

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

**SİLİS DUMANI İÇEREN GEOPOLİMER BETONLARIN % 5 SÜLFÜRİK ASİT  
ETKİSİNDE DURABİLİTE PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**UĞUR KEKLİK**

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

**DANIŞMAN**  
**Dr.Öğr. Üyesi ANIL NİŞ**

**İSTANBUL, 2020**

Uğur KEKLİK tarafından hazırlanan “Silis Dumanı İçeren Geopolimer Betonların %5 Sülfürik Asit Etkisinde Durabilite Performanslarının İncelenmesi” 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:** Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

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

.....

**Başkan :** Doç. Dr. Orhan CANPOLAT

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

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

.....

**Üye :** Dr. Öğr. Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood AL MASHHADANI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

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

.....

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

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

.....  
Dr. Öğr. Üyesi Ümit ALKAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez şartlarına uyarak hazırlamış olduğum tezde;

- Tez içersinde kullandığım, bilgiler ve belgeleri akademik ve etik kurallar kapsamında sunduğumu,
- Bütün bilgileri, değerlendirmeler ve sonuçları akademiksel etik ve ahlaki kurallara uygun olacak şekilde hazırladığımı,
- Bu çalışmamda edinmiş olduğum bilgilerin tümüne atıfta bulunup kaynak gösterdiğimi,
- Kullanmış olduğum bilgileri aynı şekilde sunduğumu,
- Çalışmamın tamamen kendime özgü olduğunu, olumsuzluklarda tarafıma doğabilecek tüm kayıpları kabul edeceğimi beyan ederim.

Uğur KEKLİK

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

# SİLİS DUMANI İÇEREN GEOPOLİMER BETONLARIN % 5 SÜLFÜRİK ASİT ETKİSİNDE DURABİLİTE PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur KEKLİK

GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OCAK 2020

## ÖZET

Son zamanlarda yapılan araştırmalara göre, Geopolimer betonların üretimi sırasında çevreye çok daha az CO<sub>2</sub> yaydıkları ve beton üretimlerinde atık malzeme kullanımından dolayı yaşadığımız çevrenin kirletilmesini engellediği ortaya çıkmıştır. Dünyada meydana gelen ekonomik sıkıntılardan dolayı ve ülkemizde yerel olarak rahatlıkla temin edebileceğimiz betonların yapılarda kullanımının önümüzdeki senelerde kullanılacağı da açıktır. Ayrıca 2018 Deprem yönetmeliklerinde yapılarda kullanılabilir beton sınıfı C80' e kadar yükseltilmesi betonların ülkemizde kullanılacağına bir işareti olarak ta düşünülebilir. Fakat günümüzde sıkça kullanılan Portland ç,mentolu betonların üretimi sırasında enerjiye ihtiyaç duymaları ve çevreye CO<sub>2</sub> yayarak yaşadığımız çevreyi kirletmesinden ötürü yeni nesil, daha yeşil ve çevreci beton tiplerine olan ihtiyaç artacaktır. Geopolimer betonlar, çimentosuz olarak üretiltikleri için ve bağlayıcı malzeme olarak atık malzeme kullanılmasından ötürü gelecekte yapılarda kullanılabilirlik açısından önem arz etmektedir. Fakat şu anda Geopolimer betonların yapılarda kullanımı için standartları yoktur. Geopolimer beton standartlarının oluşabilmesi amacıyla Geopolimer betonların dayanım ve durabilite performansların çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, Geopolimer betonları mekanik ve durabilite açısından incelemektedirler. Bu çalışma kapsamında da Geopolimer beton numunelerin Portland çimentosu içeren betonlar yerine yapı elemanlarında kullanılması incelenecektir. Bu sebeple, 3 değişik Geopolimer betonun Portland çimentolu beton yerine kullanımı araştırılacaktır. İlk Geopolimer beton tipi olarak, % 95 uçucu kül ile % 5 silis dumanlı Geopolimer beton (95U5SF), ikinci Geopolimerli beton tipi olarak %35 cürüflü + % 60 uçucu küllü + % 5 silis dumanlı Geopolimer beton (35C60U5SF), ve üçüncü Geopolimer beton tipi olarak ise % 85 cürüflü + % 10 uçucu küllü + % 5 silis dumanlı Geopolimer beton (85C10U5SF) araştırılmıştır. Geopolimer betonlar laboratuvar ortamlarında ve % 5 sülfürik asitte görsel inceleme, numune ağırlığı değişimi, ve basınç mukavemeti değişimi kriterleri ile üretilen Geopolimer beton numunelerin 28, 56 ve 120 günlük mekanik ve kimyasal durabilite performansları incelenmiştir. Elde edilen

sonuçlara göre, 85C10U5SF Geopolimer betonlar maksimum basınç mukavemeti, 95U5SF Geopolimer beton numuneleriye minimum basınç mukavemeti göstermiştir. % 5 sülfürik asite maruz kalan Geopolimer numunelerden 35C60U5SF ile 85C10U5SF betonları çok üstün durabilite performansı sergilemişlerdir. Bu yüzden bu betonların Portland çimentolu beton yerine yapısal elemanların üretiminde kullanılabilecekleri sonucuna ulaşılmıştır.



Anahtar Kelime : Sülfürik Asit, Geopolimer Beton, F-tipi Uçucu Kül, Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu, Silis Dumanı

Sayfa Aded : 73

Danışman ismi : Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

INVESTIGATION OF DURABILITY PROPERTIES OF SILICA FUME BASED  
GEOPOLYMER CONCRETES UNDER 5% SULFURIC ACID ATTACK

(M.Sc. Thesis)

Uğur KEKLİK

ISTANBUL GELISIM UNIVERITY

INSTITUTE OF SCIENCE

JANUARY 2020

ABSTRACT

According to recent researches, Geopolymer concrete emits much less CO<sub>2</sub> during production and prevents the pollution of the environment due to the use of waste material (fly ash, blast furnace slag, silica fume) in concrete production. It is also clear that the use of concretes, which can easily be supplied locally in our country, due to the economic problems occurring in the world, will be used in the upcoming years. In addition, raising the concrete class up to C80, which can be used in buildings in the Turkish earthquake standard of 2018, can be considered as a sign that concrete will be used further in our country. However, the need for new generation, greener and greener concrete types will increase due to the need for energy during the production stage of Portland cement concrete which is frequently used today and polluting the environment by emitting CO<sub>2</sub> to the environment. Since geopolymer concretes can be produced without cement and waste material is used as binder material, it is important for future usability in structural buildings. However, there are currently no standards for the utilization of Geopolymer concrete in structural buildings. In order to establish Geopolymer concrete standards, strength and durability performances of Geopolymer concrete must be well known. For this reason, researchers are examining Geopolymer concrete in terms of mechanical and durability aspects. In this study, the utilization of Geopolymer concrete samples in structural elements instead of Portland cement concrete will be examined. For this reason, the use of 3 different Geopolymer concretes instead of Portland cement concrete will be investigated. As a first Geopolymer concrete types; Geopolymer concrete containing 95 % F-type fly ash + 5 % silica fume (95U5SF), as a second Geopolymer concrete type, Geopolymer concrete containing 35 % blast furnace slag + 60 % F-type fly ash + 5 % silica fume (35C60U5SF), and a third Geopolymer concrete type, Geopolymer concrete containing 85 % blast furnace slag + 10 % F-type fly ash + 5 % silica fume (35C60U5SF), were investigated. The produced Geopolymer concretes were examined in terms of mechanical and durability aspects in the laboratory and 5 % sulfuric acid environments by visual inspection, change in weight and

change in compressive strength at 28, 56, and 90 days. According to the results obtained, 85C10U5SF Geopolymer concrete showed maximum compressive strength and 95U5SF Geopolymer concrete samples showed minimum compressive strength. Among the Geopolymer samples, 35C60U5SF and 85C10U5SF concretes showed superior durability performance against 5% sulfuric acid attack. Therefore, it is concluded that these concretes can be used in the production of structural elements instead of Portland cement.

Key Word :Sulfuric Acid Environment, Geopolymer, Fly ash, Slag  
Page Number : 73  
Supervisor name : Asst.Prof.Dr. Anıl NİŞ

## TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım ve bütn farklı süreçlerde hep yanımda olan , bana destek olan babam Selahattin Keklik , annem Havva Keklik ve abim Bekir Onur Keklik 'e teşekkürlerimi sunarım.Ayrıca bana daima inanan eşim Merve Keklik'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ve çalışmam boyunca sabır ve sevgi ile maddi ve manevi bütün desteğini arkamda hissettiğim ve saygıyı sonuna kadar hakeden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ'e teşekkürlerimi sunmaktan gurur duyarım.

Ayrıca deney aşamasında yardımcı olan çalışma arkadaşlarıma ve bize bu imkanı sundukları için Gelişim Üniversitesi ve değerli Öğretim görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Uğur KEKLİK



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xii
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2 . GEOPOLİMER BETONLAR .....	5
2.1. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu .....	5
2.1.1. Geopolimer betondaki yüksek fırın cürufu kullanım şekli .....	6
2.2. Uçucu Kül Malzemesi .....	6
2.2.1. Betonlarda uçucu kül kullanılması .....	7
2.3.1 SİLİS DUMAN KULLANIMI .....	7
2.4. Alkali Solüsyonlar .....	8
2.4.1. Geopolimer Betonun Kimyasallar ile Performansı .....	9
2.4.2. Asit etkisindeki performans .....	10
2.5. Geopolimerlerin Kimyasal ve Mekanik Özelliği .....	12
2.6. Geopolimer Beton Durabilitesi .....	13
2.6.1. Büzülme.....	13
2.6.2. Alkali - Silika tepkimesi.....	13
2.6.3. Islanması – kuruması ve çevrimi .....	14
2.7. Geopolimerlerin Dayanımlarına Etki Eden Parametreler.....	14
2.7.1. SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O oranları .....	14
2.7.2. Geopolimer betonlarda suyun içeriği .....	15
2.7.4. Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH oranı .....	15
2.7.5. NaOH alkali çözeltisi molaritesi .....	15
3. DENEY METODU .....	17
3.1. Geopolimer Beton Malzemeleri / Özellikleri .....	17
3.1.1. Yüksek fırın cürufu.....	17
3.1.2. Uçucu Kül.....	18
3.1.3. Silis Dumanı.....	19
3.1.4. Agrega.....	20

3.1.5. Alkalilerin solüsyonları .....	21
3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı.....	23
3.2. Deney Metodu.....	24
3.2.1 Beton Kalıpları .....	24
3.2.2. Alkaliler solüsyonun aşaması .....	25
3.2.3. Geopolimer karışımların hazırlığı.....	26
3.2.4. Geopolimer betonların üretilmesi .....	29
3.2.6. Numune ağırlıklarında ki değişim .....	32
3.2.7. Geopolimer numunelerde basınç mukavemeti testi .....	35
4. BULGU / TARTIŞMALAR .....	37
4.1. Görsel İnceleme .....	37
4.2. Asit etkisinde ağırlığın kaybı.....	41
4.3 Geopolimerli betonlarda asit etkisiyle basınç mukavemetinin değişmesi.....	45
5. SONUÇLAR .....	51
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	59

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Yüksek fırın cürufu kimyasal yapısı / fiziksel özelliği.....	18
Çizelge 3.2. Uçucu kül kimyasal yapısı / özelliği.....	18
Çizelge 3.3. Silis dumanı kimyasal yapısı / özellikleri.....	19
Çizelge 3.4. Agrega özellikleri .....	20
Çizelge 3.5. Sodyum silikat özellikleri.....	22
Çizelge 3.6. Kimyasal katkı özellikleri.....	23
Çizelge 3.7. 95U5SF Geopolimerinde kullanılan malzemeler .....	27
Çizelge 3.8. 35C60U5SF bulunan Geopolimer betonda kullandığımız ürünler	28
Çizelge 3.9. 15C80U5SF barındıran Geopolimer betonda ki malzemeler .....	28

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Puzolanik malzeme yapısı[25].....	6
Şekil 2.2. Uçucu kül aktivasyon şekli [44] .....	9
Şekil 3.1. Çalışmadaki yüksek fırın cürufu.....	17
Şekil 3.2. Çalışmada kullandığımız F tip uçucu kül .....	19
Şekil 3.3 Çalışmada kullandığımız yoğunlaştırılmış silis dumanı.....	20
Şekil 3.4 Çalışmada kullanılan agregalar .....	21
Şekil 3.5 14M NaOH hazırlığı.....	22
Şekil 3.6 Çalışmada kullandığımız süperakışkanlaştırıcı .....	24
Şekil 3.7 Deneydeki kalıplar ve uygulamaları.....	25
Şekil 3.8 Alkali aktivatörlerin hazırlanma aşaması ve uygulamaları .....	26
Şekil 3.9 Geopolimer betonların karışma aşamaları .....	30
Şekil 3.10 Beton karışımı ve dökümü.....	30
Şekil 3.11%5 sülfürik asit çözeltisi öncesi ve sonraki durumu .....	31
Şekil 3.12 Numunelerin yüzey fotoğrafları ve ağırlık değişimleri .....	33
Şekil 3.13 Asit etkisinde bekletilen numunelerin yüzey fotoğrafları .....	34
Şekil 3.14 Banç dayanım testleri.....	36
Şekil 4.1 Laboratuvar ortamı ile sülfürik asit şartlarındaki numunelerin yapısal değişimi	39
Şekil 4.2 Laboratuvar ortamında bekletilen numune ağırlıkların değişimi .....	42
Şekil 4.3 Asit ortamında bekletilen numune ağırlık değişmesi .....	43
Şekil 4.4 Farklı koşullarda 56.gün ağırlık değişimi.....	44
Şekil 4.5 Farklı koşullarda 120.gün ağırlık değişimi.....	45
Şekil 4.6 Değişik ortamlardaki Geopolimer betonların 56 günlük basınç mukavemetler ..	47
Şekil 4.7 Değişik ortamlardaki Geopolimer betonların 120 günlük basınç mukavemetleri .....	48
Şekil 4.8 Normal hava şartlarındaki Geopolimer betonların basınç mukavemeti .....	49
Şekil 4.9 Sülfürik asit ortamındaki Geopolimer betonların basınç mukavemetleri.....	50

## SİMGE VE KISALTMALAR

Kullanmış olduğumuz simge ve kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıdaki gibi sunulmuştur.

<b>Simge</b>	<b>Açıklama</b>
<b>NaOH</b>	Sodyum Hidroksit
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	Sodyum Silikat
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbondioksit
<b>CaO</b>	Kalsiyum oksit(Sönmemiş Kireç)

<b>Kısaltma</b>	<b>Açıklama</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; kumun, çakılın ,çimentonun ve suyun harmanlanması ile ortaya çıkan ve yapılarda kullanılan bir malzemesidir. Portland Çimentosu (OPC), her yerde bağlayıcılığı olan ürün olarak kullanılır ve hemen hemen 2013'te 4 milyar ton çimento üretilmiştir [1]. Önümüzdeki 10 yıl boyunca çimentonun 1 yıl için üretilen miktarı %25 oranında artarak devam edeceği düşünülmektedir. Agrega çimentonun ve betonun büyük kısmına sahip ana malzeme olduğundan dolayı bunun sonucunda önümüzdeki 25 ve 50 yıl içerisinde agrega rezervleri açısından sıkıntılı zamanlara yol açması mümkün olacaktır. Günümüzdeki küresel ısınmanın nedenlerinin arasında CO<sub>2</sub> salınımının etkisi çok büyük diyebiliriz nitekim CO<sub>2</sub>'nin %7'si çimentonun üretiminden kaynaklanır [2]. Açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarı artan nüfus oranı ile doğru orantılıdır. 1 ton çimentonun üretimi ortalama 820 kg CO<sub>2</sub> açığa çıkar [3]. Çimentoyu diğer malzemeler ile kıyaslamak gerekirse daha fazla enerji duyduğu bir gerçektir [4].

Serbest bırakılmış olan CO<sub>2</sub> hem üretici hem tüketici hem bütün insanlık için büyük bir problemdir. Çevresel problemleri çözmek adına çimento yerine alternatif malzeme kullanılması kaçınılmazdır. Beton mekanik performansının ve durabilitesinin yükseltmek adına deneyler başka malzemeler üzerinde yoğunlaşmıştır [5]. Geopolimerler malzemeler veya alkali aktif çimento diye söylenen çimento yerine kullanılabilecek alternatif bağlayıcı özellikte malzemeler üzerinde çalışmalar yoğunlaştı. Geopolimer malzemeler metakaolin , uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ve gibi değişik alüminosilikat malzemelerinin alkali aktivasyondan sentezlenenmiş polimerik bağlamalardan birisidir. Geopolimerlerin, mekanik özellikleri, yangına karşı performansları ayrıca asit dirençleri bakımından OPC'li beton ile kıyaslandığında daha iyidir. [4, 6].

Geopolimer betonlar çimentolu betonlara göre ortalama %80 daha az CO<sub>2</sub> açığa çıkartırlar. Buda çevre bilinci açısından salığı açısından Geopolimer malzemeleri kullanmayı cazip hale getirir[7].

Geopolimer betonlar bağlayıcılar sodyum silikat ve sodyum hidroksit alkaliler olan endüstriyel malzemeler kullanılır. Geopolimer betonların üretiminde daha fazla kullanılan malzemeler olarak uçucu külü ve yüksek fırın cürufunu söyleyebiliriz. Standart Portland

çimentonun yerini almış olan yüksek fırın cürufu beton fiziksel özelliği, kimyasal bileşim ve mukavemeti yükseltmek amacıyla kullanılmaktadır [8].

Geopolimer malzemeler, farklı sodyum silikat çözeltilerin alkali aktivasyonundaki veya yüksek fırın cürufun, uçucu külün ve metakaolinin gibi endüstriyelerin sodyum-silikat polimerin ürünleridir [9]. Geopolimerler, doğal olan zeolitik materyallerin benzeyen kimyasal bileşimlerini barındırır, fakat geopolimerler amorf olan mikro yapıya sahiptirler. Mikro yapıya sahip, Geopolimerizasyonun nihai ürünlerini etkileyen faktörler arasında kaynak malzemelerin ve alkali aktivatörlerin etkisi vardır [10]. Polimerizasyon süreci genel olarak ısı yardımıyla hızlandırılırlar. Uçucu küle üretilen Geopolimerlerin erken dönemlerinde dayanım kazanması, yüksek sıcaklıkla mümkün olabilmektedir [11].

Yapı malzemeleri bakımından aranan en önemli özellikler, iyi bir mukavemete sahip olması ve durabiledir. Portland çimentolu betonlar yüksek dayanıma sahip olmasına rağmen, bu zamana dek yapılan araştırmalarda, sülfatlar, asitler, yüksek sıcaklık ve çevresel koşullara karşı durabilitesi zayıftır. Geopolimer betonların kimyasal etkiler karşısındaki durabilitesi ile ilgili yapılan çalışmalar pek fazla değildir. Davidovits ve diğer bilim insanları kimyasal etkiye maruz kalan numunelerin ağırlık değişimlerini incelediler ve normal Portland çimentolu betonların %78 ve %95 oranında ağırlık azalması gösterdiğini, Geopolimerli örneklerde ise 28.gün ile sülfürik asite ve hidroklorik asite etkisine bırakıldığında %6.0 ve %7.0 oranında ağırlık kaybı meydana geldiği belirtilmiştir [12].

Bakharev, 5 ay süresince ve %5.0 lik bir asit çözeltisine bırakılan standart çimentolu beton ile geopolimerli betonların kıyaslaması sonucunda geopolimerli betonların performans olarak daha yüksek çıktığını ortaya koymuştur [13]. Wallah ve Rangan geopolimerli betonların örneklerin Portland çimentosu ile üretilmiş olan beton numunelerinden daha iyi dayanım gösterdiğini belirtmişlerdir [14].

Geopolimer betonların çevresel faktörelere göre daha sağlıklı olması ve çevresel avantajı bakımından günümüzde yapıların inşasında kullanılan Portland çimentosunun sürdürülebilir olmayacağı kesindir. Çimento ortalama olarak %8 CO<sub>2</sub> açığa çıkmasına neden olmaktadır. Roy ve Idorn'un yaptıkları çalışma neticesinde, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve benzeri diğer bağlayıcılar ile üretilmiş olan Geopolimer betonların, sera gazı emisyonlarını ortalama %80 civarında düşürdüğünü belirtmişlerdir [15]. Ayrıca, Duxcon ve



diğer bilim insanları bağlayıcılar olarak uçucu külün kullanılması sebebiyle, çimento üretiminden kaynaklı sera gazı emisyonunun %80 ile %90 civarında azaldığını belirtmişlerdir[16]. Bu sebeple, bilim insanları, asit direnci, dayanıklılık, iyi bir termal kararlılık, yüksek olmayan CO<sub>2</sub> emisyonu ve güçlü mekanik özellikler vb. avantajlarından dolayı Geopolimer betonları kullanmayı daha doğru bulmuşlardır. Bu bölümde, Geopolimerlerin terminoloji ve kimyasının özetini sunmaktadır. Geopolimer teknolojilerinin başka incelemeleri diğer çalışmada mevcut [17].

### Araştırmanın Önemi

Gerçekleştirilen son çalışmalar ile birlikte Geopolimer betonların standart çimentolu betonlara göre çok daha fazla çevre dostu olduğu ve dayanım olarakta bekleneni fazlasıyla vermesi sayesinde yakın zamanda çimentolu betonların üretilmesi yerine Geopolimer betonların üretiminin artacağı öngörülmektedir. Yapılacak bu çalışmada amacımız, farklı oranlarda uçucu kül ile cüruf barındıran Geopolimer betonların % 5'lik bir sülfirik asit çözeltisine maruzken kimyasal durabilitesinin incelemektir.

### Tezin Ana hattı

Bölüm 1. Özet: Yapılan çalışmadaki özet ve amaç

Bölüm 2. Literatür Taramaları / Geçmişleri: Geopolimer betonların literatür taraması ve uçucu kül, silis dumanı ayrıca cüruf içeren Geopolimer betonların bağlayıcılık etkileri ve Geopolimer betonların kimyasal etkilere karşı dayanımı ile ilgili çalışmalarda değinilmiştir.

Bölüm 3 Deneysel Çalışma: Malzemelerin özellikleri, karışımların detayları, beton dökümleri ve test edilme şekilleri anlatılmıştır.

Bölüm 4 Test Sonuçları ve Tartışmaları: Sonuçların gösterimi, değerlendirilmesi ve sonuçlarının tartışılması gösterilmiştir.

Bölüm 5 Sonuçlar: Bu bölümde de çalışmanın sonuç kısmı yer almaktadır.

### Puzolanik Malzemeler

Beton yapımlarında kullanılmakta olan mineral katkıli bağlayıcıların neredeyse tamamı, puzolan özelliği göstermektedir. Puzolan, sadece kendileri kullanıldıklarında bağlayıcı özelliği çok az veya yoktur, buna karşın ince olması durumunda iken su içeren ortamlarda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girdiğinde hidrolik bağlayıcı özelliklerine sahip olan silikat ve alüminatlı bir malzemedir. Doğal puzolan örnekleri olarak volkanik küller ve tüfler, diatom içeren toprak ve pişmiş killi topraklar verilebilir. Silis dumanı, F-tipi uçucu kül, öğütölmüş granüle yüksek fırın curufu yapay puzolan olarak adlandırılır. [18]

### Geopolimer Beton

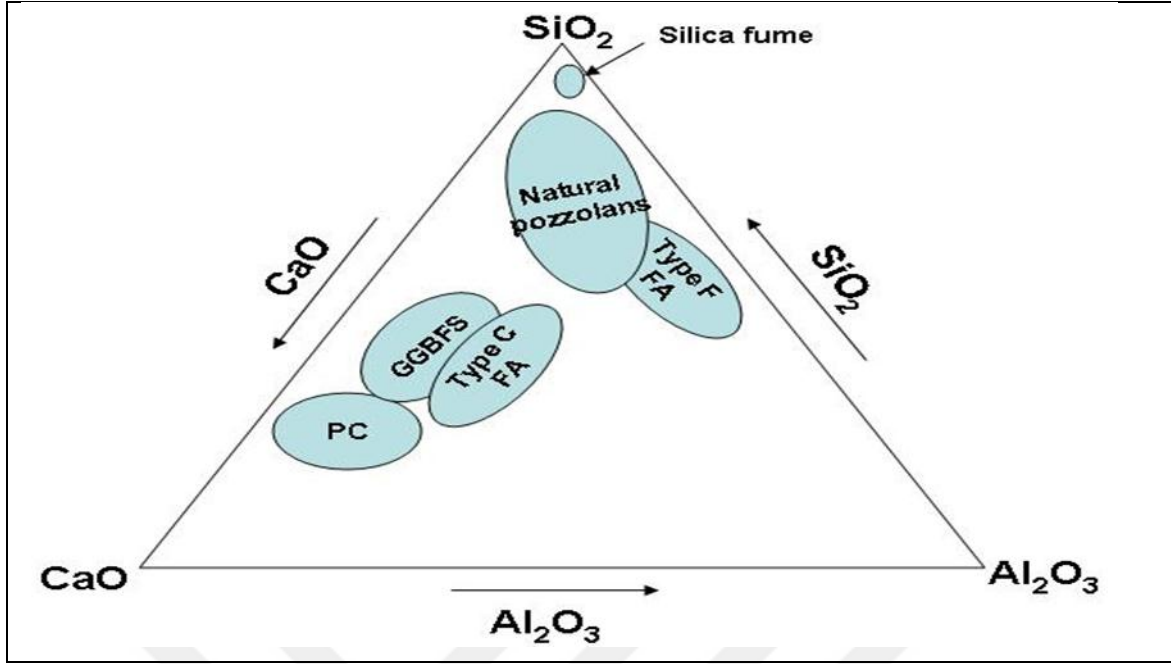
Geopolimer olarakta belirtilen inorganik polimerlerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin birçok kısmı alümino-silikatların alkali aktivasyonu ile oluşmaktadır. Geopolimer kullanımları ve fiziksel ve kimyasal özellikleri, organik kimya, mühendislik ve mineroloji açısından birden fazla bilimsel alanlar çerçevesinde araştırılmaktadır. Geopolimerlerin birçok uygulama aşaması için alanlar mevcuttur. Özellikle, yüksek yangın direnci gerekli olan malzemelerde, dekoratif taş istenen yapılarda, seramiklerde, beton üretiminde, altyapısı ve onarımı için gerekli olan kompozit karışımlar, radyoaktifli ve zehirli olan atıksal malzemelerin yeniden değerlendirilmeye alınması amacıyla ve daha çok uygulaması olan alanlarda kullanım imkanı bulunmaktadır [19].

## 2 . GEOPOLİMER BETONLAR

### 2.1. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Demir malzemesi içerisindeki demir oksit bileşimlerinin yanı sıra silis, alümin, mangan ve fosfor gibi elementlerde mevcuttur [20]. Öğütülmüş yüksek fırın cürufuna ait kimyasal içerik, demir elementinin kimyasal içeriğine benzemesine rağmen, cüruftaki silis, kireç, ve alüminyumun yüzdece oranları önemli derecede farklılıklar gösterir. Buradaki farklılıklar yalnızca demir elementinin yapısıyla alakalı olmayıp, kok kömürünün, ekonomik fayda sağlaması nedeniyle değişik demir cevheri ile üretilen karışımlar ve yüksek sıcaklıktan kaynaklanmaktadır [21]. Eğer yüksek fırın cürufu kendi kendine soğumaya bırakıldığı takdirde cüruf granülometri eğrisi düzensiz olacaktır. Bunun yanısıra eleme ve kırım işlemlerine maruz bırakılırsa arzu edilen granülometri elde edilebilir. Hava ortamında soğumaya bırakılan yüksek fırın cürufu kırım işleminden sonra elemeye beraber fiziki yapısı genelde diğer agregalara nispeten daha iyi özellik göstermektedir. Yapısında kilin ve siltin bulunmayışı, daha iyi sürtünme ve aderansın olması gibi çok daha iyi özelliklere sahiptir [22].

Öğütülmüş granule yüksek fırın cürufun içeriğinde % 28-38 SiO<sub>2</sub>, % 8-24 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 30-50 CaO ve % 1-18 MgO bulunur. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun CaO oranının daha fazla olmasından ötürü genelde beton basınç dayanımının daha fazla olmasını sağlar. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile uçucu küller belirli oranlarda birbirleriyle karıştırıldıklarında orta aşamada yer alır. Şekil 2.1 bağlayıcıların birbiriyle karışımını belirtmektedir. Bunun yanısıra, öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanımı Geopolimer betonların basınç dayanımlarının daha yüksek olmasını sağlar [23, 24].



Şekil 2. 1 Pozzolanik malzeme yapısı [25]

### 2.1.1. Geopolimer betondaki yüksek fırın cürufu kullanım şekli

Yüksek fırın cürufunun yüksek kalsiyum içeriğine sahip olmasının yanında dane inceliği ve camsı yapısı cürufun aktivitesinde rol oynamaktadır [26]. Yüksek fırın cürufunun fırından sonra soğuması ve %70 oranlarında camsı faza sahip olmalıdır. Ayrıca içerisindeki CaO, MgO ve SiO<sub>2</sub> miktarı minimum %70 oranlarında ve (CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub> oranını ise 1'den daha büyük olmalıdır [27]. Yüksek fırın cürufunun normal çimento ve beton sektörlerinde farklı kullanım alanları bulunmaktadır. Cüruf kullanımı, betondaki işlenebilirliğe arttırmak için, priz süresini uzatmak için, terleme ve geçirimsizliği azaltmak ve hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla beton sektöründe kullanılmaktadır. Aynı zamanda, cürufun çimento ile beraber bağlayıcı olarak kullanımı, betonun mekanik özelliklerini iyileştirmede asit ve sülfat ataklarına karşı durabilite sağlamaktadır [28-29].

### 2.2. Uçucu Kül Malzemesi

Uçucu külün üretimi genel olarak üretildiği santralin tipine ve işletme şekline bağlı olarak, kullanılan kömürün kalitesi ve yanmasına bağlıdır. Termik santrallerde elektrik enerjisi üretiminde genellikle kullanılmakta olan taşkömürü miktarının %10-15'i, linyit kömürü miktarının ise %20-50'i kül olarak meydana gelmektedir. Yanma sonrası meydana gelen kül miktarının %75.0-85.0'i baca gazı ile kazandan çıkarılır,çıkan atık malzemelere uçucu kül denilmektedir. Baca gazından uçucu külün tutulması maksadıyla santralde genellikle

elektroflitreler kullanılırlar [30]. Kimyasal ve mineraller bakımından uçucu küller, içi boşluklu ve boşluksuz, camsı küresel mineral parçacıklardan ve yanmamış danelerden oluşmaktadırlar. Kimyasal bakımından ana elementler olarak Al, Ca, Si ve S mevcuttur. Uçucu küller yapısı itibariyle alümino-silikatlardan ve Mg, Ti, K, Fe, Na, ve Ca elementleri oluşturmaktadır [31].

### **2.2.1. Betonlarda uçucu kül kullanılması**

Uçucu kül, baraj duvarlarında, köprü ayaklarında, dolgu enjeksiyonlarında, agrega olarak daha bir çok yapıda kullanımı mevcuttur. Dünyada kullanımına örnek vermek gerekirse, Almanyada Castor-Pollux gökdelenlerinde, İspanya'da 171m yüksekliğinde Picasso gökdeleninin farklı kısımlarında, Portekizde Caixa Gerai Deposite banka yapısında, Danimarka Great Bell East köprü yapılmasında, Finlandiya Permantokoski hidroelektrik santral yapılmasında, Fransa Puylaurent baraj yapısında, Hollanda Eindhoven Havaalanı uçak pisti yapımında, Avusturya yeraltı tren yollarında, İtalya yer üstü elektrik direği yapılmasında, İskoçya Tornes Nükleer Enerji yapısı yapılmasında, İngiltere ham petrol depolanması tesisinde, Belçika depolama kulelerinde ve Fransa-İngiltere arasında hızlı tren hattı tünel yapılmasında uçucu külden yararlanılmıştır [32].

## **2.3. SİLİS DUMANI**

Silisyum metali ve/veya alaşımının üretilmesi kaydıyla yüksek saflığa sahip kuvars mineralinin elektrik fırınında ortalama 2000 °C yüksek sıcaklık etkisinde kömür ile indirgenmesi amacıyla kullanılırlar. Bu aşamada esnasında SiO oluşmaktadır. SiO yüksek sıcaklığa sahip elektrik ark fırınında daha soğuk kısımlarında mevcut olan oksijen ile hızlı soğutulması esnasında, cam yapıya sahip SiO<sub>2</sub> daneleri oluşur. Bu daneler fiber filtreler arasından geçirilmesi sonrası yoğun (densified) silis dumanı parçacığı oluşmaktadır [33]. Yoğunlaşmış silis dumanı bayağı sağlam bağlayıcı özelliklere sahip bağlayıcı malzeme türüdür. Yüksek dayanıma sahip ve çelik liflerle üretilen reaktif pudra beton üretim aşamasında sıkça kullanım alanı bulan bir malzeme tipidir [34].

### **2.3.1 SİLİS DUMAN KULLANIMI**

Silis dumanı katkısına sahip betonların yüksek sıcaklığa direnci kullanılan silis dumanı miktarına ve dayanım derecesine bağlı kalacak şekilde değişmektedir. Silis dumanı kullanımı eğer % 20'den daha fazla olması durumunda betonların basınç dayanımları

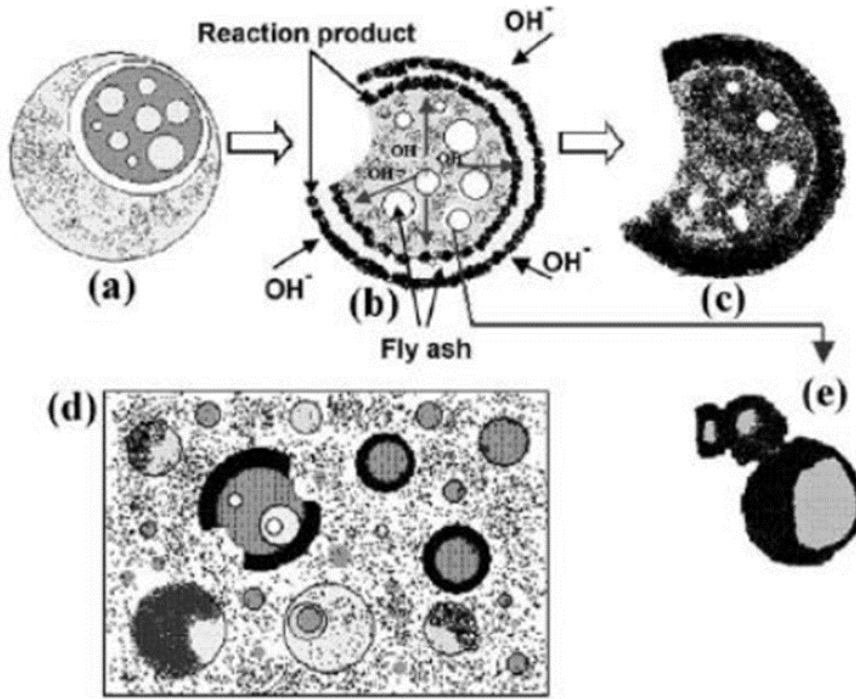
bu ve daha fazla silis dumanı kullanımından olumsuz etkilenmektedir. Yüksek sıcaklığın 300 °C'den daha fazla olması durumunda adsorb edilen su miktarı serbest hale geçmektedir. Böylece, yüksek dayanıma sahip betonlar içerisindeki kılcal boşluk boyutlarının ufak olması nedeniyle bu boşlukta oluşan buharların basınç değeri artmakta ve dolayısıyla beton içerisinde büyük gerilmelere sebep olmaktadır. Oluşan bu basınç kuvveti, beton numunesinin patlamasına ve dağılmasına sebep olmaktadır [35-37]. Yapılan bir çalışmada % 10 oranında silis dumanı içeren betonlarda, silis dumanı kullanımının yüksek sıcaklığa karşı korumada betonlara pek faydasının olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, silis dumanı içeren betonların yüksek sıcaklığa karşı durabilitesi kullanılan silis dumanına ve dayanım değerine bağlı olarak değişmektedir. Bunun dışında %10 oranından daha fazla katkılı puzolan malzemeler (silis dumanı kullanımı hariç), mineral katkı olmayan betonlardan yüksek sıcaklık etkisine karşı daha iyi performans sağlamıştır [36, 38]. Davidovits'in 2008 yıllarında araştırdığı bir incelemede M.Ö. 200 senesinde Hun saldırısını engellemek amacıyla Çinli insanlarca yapılan ve halen günümüzde var olan Çin Seddi'nde incelemeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırma sonuçlarına göre, Çin Seddi yapımında kullanılan harcın içeriğinde %80 oranında SiO<sub>2</sub> pirinç çeltiği külü ve Ca(OH)<sub>2</sub> bulunmaktadır [39,40].

#### **2.4. Alkali Solüsyonlar**

Genellikle, geopolimer betonların üretilmesi maksadıyla kullanılmakta olan alkali solüsyonlar olan sodyum silikat, sodyum hidroksit (NaOH) veya sodyum hidroksit barındıran potasyum hidroksitli (KOH) karışımıdır [1], [41] - [42].

Van Deventer ve Xu (2000) yaptıkları araştırmada alkali solüsyonlarla bağlayıcı malzeme arasında gerçekleşen tepkimelerin sodyum hidroksit sıvısı eklendiği zaman daha da arttığı belirtilmiştir [42].

Palomo ve arkadaşlarının bir çalışmasında uçucu küllerin aktive edilmelerinde kullanılmakta olan alkali aktivatörlerin reaksiyon gelişimlerini çok büyük derecede etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca, alkali solüsyon çözeltisinin sadece bir solüsyon kullanımı alkali aktivatörlerin beraber kullanılmasıyla kıyaslandığında, alkali aktivatörlerin beraber kullanılmasının oluşan tepkimeleri zamanla daha da arttırdığını bildirmişlerdir [43]. Uçucu külden alüminyum ve silikatların parçalanması Şekil 2.2.'de görülmektedir .



Şekil 2. 2 Uçucu kül aktivasyon şekli [44]

Yapılan diğer çalışmada uçucu kül bulunan Geopolimer yapılarda polimerizasyondan ile uçucu küldeki alumino-silikat iyonları çözebilmek amacıyla alkali aktivitesi yüksek solüsyonların lazım olduğunu bildirilmiştir. Ayrıca alkali aktivatörler, Geopolimerli betonlarının ana yapıtaşdır. Öğütülmüş granule yüksek fırın cürufllu Geopolimerlerin alkali aktivasyonunu birincil olarak 1940 yıllarında ‘‘Purdon Kimya Endüstrisi Derneği’’ adlı bir dergide öğütülmüş granule yüksek fırın cürufuna alkalilerin etkileri konusunda yayınlanan makale sayesinde adından söz ettirmiştir [45].

Günümüzde Geopolimer bağlayıcı üretilmesi amacıyla alkali aktivatörler kullanımı hakkında birçok çalışma yapılmaktadır. Alkali aktivatörler olarak kullanılan sodyum silikat ile sodyum hidroksit solüsyonu, araştırmacılar tarafından kullanılan en yaygın aktivatörler arasında yer almaktadır. Daha önce yapılan bir araştırmada sodyum silikat ile sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak uçucu küllü Geopolimer betonları active etmişleridir [9].

#### 2.4.1. Geopolimer Betonun Kimyasallar ile Performansı

Standart betonlar hakkında gerçekleştirilen kimyasal durabilite deneyleri ile Geopolimer betonda kullanılan malzemeleri sülfat etkilerine maruz bırakıldıklarında karışık bir

mekanizması olduğunu bulmuşlardır. Diğer sebepler arasında sülfatlı bileşiklerle Portland çimentosunun hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan ürünlerle girdiği reaksiyonlardır ve bu tepkimelerin sonuçları değişik şekillerle ortaya çıkmaktadır. Standart Portland çimentolu betonlarda gerçekleştirilen sülfat tepkimeleri, kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum hidroksit ve farklı çimento harcının alüminatlı etkilerini kapsayan birçok reaksiyonlar belirgin hale gelmektedir [46,47].

Sülfat saldırıları sonucunda oluşan beton çatlakları ve oluşan hacimsel genişlemenin direk veya dolaylı bir şekilde meydana gelen reaksiyon neticesinde, alçıtaşı oluşmasına ilaveten betonlarda bozulma gerçekleşmesi dolayısıyla kalsiyum silikat hidratın bozulmasına neden olup, bu da beton numunelerin yüzey kısımlarında ilk önce yumuşama olarak kendini gösterir ve ilerleyen aşamalarda beton yüzeylerinde parçalanma ve parça kopması şeklinde ilerler. Isı kürü neticesinde dayanım kazanan F-tipi uçucu küllü Geopolimer numuneler, sülfat saldırılarına iyi bir mukavemet göstermektedir. Sülfat tiplerinden soyum olanı ile yapılan araştırmalarda uçucu küllü üretilen GPC numunelerde 365 gün sodyum sülfata maruz kalmasına rağmen numune yüzeylerinde dökülme veya çatlak gözükmemiştir. Buna ek olarak, mukavemet değeri ise sülfat saldırılarında etkilenmemiştir. Ayrıca, değişik sürelerde sülfat etkisindeki Geopolimer beton numunesi uzunlukların değişimi, başlangıçtaki halinden % 0.01 mertebesinde daha az etkilenmiştir [14]. Bunun dışında, değişik sülfat solüsyonları etkisinde maksimum durabilite performansı, NaOH alkali aktivatörüyle hazırlanmış Geopolimer numunelerde ortaya çıkmıştır, bununla beraber basınç mukavemetinin yüksek sıcaklık ile doğru orantı ile artmış olduğu gözlemlenmiştir. Geopolimer betonların sülfat etkilerine maruz bırakılması sonucunda basınç mukavemetlerinde yaklaşık % 10 oranında kayıp olduğu belirtilmiştir [48].

#### **2.4.2. Asit etkisindeki performans**

Yapılan bazı çalışmalarda Geopolimer betonların standart betonlara karşı daha üstün performans sergilediği ortaya çıkmıştır.

Atis çalışmasında standard Portland çimentosunu kullanmayıp, öğütülmüş yüksek fırın cürufunu aktif edebilecek farklı bağlayıcı madde kullanımını incelemiştir. Alkali solüsyon olarak sodyum silikat, sodyum karbonat, sodyum hidroksit kullanmış, 7., 28. ve 90. günlük basınç mukavemetleri, eğilmede çekme mukavemetleri belirlenmiş ve 180 günlük bir



süreçte kuruma rötresi performansı araştırılmıştır. Buna ilaveten numunelerin hidrasyon gelişimi araştırılmıştır. Priz başlangıç ve priz bitiş zamanları standard Portland çimentoyla karşılaştırıldığında sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktif edilen çimentolara göre erken olduğu, sodyum karbonat kullanılarak aktif edilen çimentolara göre ise standard Portland çimentoyla benzer sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Silis modülü artması ile beraber sodyum silikat alkali aktivatörün basınç mukavemetini ve eğilmede çekme dayanımının artırmada etkin olduğu ortaya çıkmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktif hale getirilen öğütülmüş yüksek fırın cürufu harçların biraz gevrek davranış gösterdiği, sodyum karbonat ile üretilmiş numunelerin davranışının ise standard çimentoya benzer davranış gösterdiği bildirilmiştir [49].

Allahverdi ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada Taftan dağı civarında elde edilen pomza ile alkali aktivatör olarak NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün birleşimleri ile Geopolimer numunenler hazırladılar. Sodyum silikat çözeltisine sodyum hidroksitin eklenmesiyle, silika modülleri 0.52, 0.60 ve 0.68 olan 3 farklı alkali solüsyon hazırlanmıştır. Sodyum oksit içeriği kuru bağlayıcı ağırlığının %4, %7 ve % 10 oranında 3 farklı geopolimer numuneler oluşturulmuştur. Su/çimento oranı ise 0.36, 0.40 ve 0.44 olarak alınmıştır. Çalışma neticesinde; NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>' ün uygun oranlarla kullanılması ile Taftan puzolanın aktif edilebileceğini; uygun işlenebilirlik ve 28. günlük basınç mukavemeti olarak 63 MPa değerini sağlayan Geopolimer formasyonuna dönüştürülebileceğini bildirmişlerdir. Doğal puzolanlarla aktif edilebileceği ve alkali solüsyon olarakta sodyum silikat ile sodyum hidroksitin belirli oranda karışımlarının kullanımıyla Geopolimer numune üretilebileceği belirtilmiştir. Doğal puzolan bazlı Geopolimer numunenin kalitesini alkali solüsyonun birleşimine, su/bağlayıcı oranına ve doğal puzolan kalitesi ile doğru orantılı olduğunu belirtilmiştir [50]

Song ve arkadaşları alkalilerle aktif edilen ve uçucu kül ile üretilen Geopolimer beton numunelerle standart Portland çimentosu ile üretilen betonları 8,0 haftalık % 10.0 sülfürik asit solüsyonu etkisinde bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Portland çimento ile betonun %35'lik ağırlık azalması mevcutken, uçucu küle üretilen Geopolimer betonlarda %3 civarında ağırlık azalması ortaya çıkmıştır [51].

## 2.5. Geopolimerlerin Kimyasal ve Mekanik Özelliği

Geopolimerizasyon, öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu, F-tipi uçucu kül ve silis dumanı benzeri atık malzemelerle, volkanik tüf, doğal başkalaşım kayaçları, kaolinit kili gibi alkali silikat ve tuzların düşük sıcaklıkta tepkimeye girmesiyle başlarlar. Oluşan ürün fiziki özelliği; katı malzemelerin yapısına, ısı kürüne ve kalsinasyon ısı/süresine göre değişen ve moleküler yapısı ile bağlantılı olarak değişir [52].

Geopolimerler basınç mukavemetini kazanmaya başladığı zaman pH seviyesinin düşmeside önem arz etmektedir. Geopolimerlerin pH seviyesi yaklaşık 10 ile 12 civarındadır. Geopolimerlerin pH seviyesinde, ısı işlem sıcaklığıyla yükselmesi neticesinde azalma meydana gelmektedir. 85°C sıcaklıkta pH değeri 10.5 olmasına rağmen 700 °C sıcaklığa çıktığında Geopolimer harcın pH değeri 7.5 civarına düşmektedir.  $K_2O/SiO_2$  oranına bağlı olarak kürleme sıcaklığı yükseltildiğinde pH seviyesini dengede tutmak amacıyla arttırılmaktadır. Araştırmalarda zararsız karışımların üretilebilmesi günümüzde gerçekleştirilen çalışmalarla ve yönetmeliklerin uyguladığı kısıtlamalarla mümkün olmaktadır [53,54].

Geopolimer numunelerin prizlerinin başlaması ile 4 saatlik zaman zarfı içerisinde basınç dayanımının ortalama % 70'ine ulaşabilirler. Çok uzun sene boyunca dayanım kaybı olmadan kimyasal ortamlara ve çevresel faktörlere karşı durabilite gösterebilmektedirler. Geopolimer numunelerin olumlu yönlerinden birisi de çok yüksek sıcaklıkta iyi bir performans göstermesi ve çok düşük ısı-iletkenliğe sahip olmasıdır. 1200°C civarına kadar numuneler pek büyük bir zarara uğramadan dayanabilir. Isıl iletkenliği ise başka yapı malzemelerinden daha az ve 0.24 W/mK ile 0.3 W/mK civarındadır. Geopolimerler yapısında Si/Al oranı bakımından mukavemet ve elastik modülüs değerleri farklılıklar gösterir. Örnek olarak; 100 MPa civarlarında basınç dayanımına ulaşan ve/veya laboratuvar koşullarında ilk dört saatte 20 MPa basınç dayanıma ulaşabilen numuneler bulunmaktadır. Bunun yanısıra, diğer Geopolimer ürünün laboratuvar koşullarında prizini alabilmesi ve mukavemet kazanabilmesi de mümkündür. Fakat Geopolimer numunelerin Portland çimentosuna kıyas edilebilen dayanıma ulaşabilmesi amacıyla 40°C - 80 °C arasında 6 saat üzeri ısı kürüne tabii tutulan numunelerde çalışmalarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [55]. Geopolimer numunelerin kullanılmsındaki olumlu yönlerden biri de oluşan son bağlayıcının çevresel faktörlere açısından çok iyi performans göstermesidir. Bu yüzden geopolimerler çok az C-S-H içeriğine sahip malzemelerde boyutsal olarak stabilite göstermesi etkin rol oynar. Geopolimerler alkali silika tepkimesi nedeniyle CaO miktarının az

olması sebebiyle etkin rol oynamazlar. Benzer sebeplerden ötürü Geopolimerler numuneler sülfat etkisi ve deniz suyu etkisine karşı standard betonlara göre daha fazla durabilite gösterirler. Si/Al oranıyla benzer orana sahip numunelerde yüksek kimyasal etkilere mazruz kalması durumunda numunelerde genişerek şişme, kopma, ve dökülme gibi olaylar ortaya çıkmaktadır [56].

## **2.6. Geopolimer Beton Durabilitesi**

PH seviyesinin 4 ve daha az olması durumunda endüstriyel fabrikaların atıkları asit etkisi barındırması durumunda karışımda bulunan atık suyun Geopolimer beton numunelere zarar verebilecek metallere sahip olması Geopolimer beton mukavemetini olumsuz yönde etkileyebilecektir. Bu şekilde negative etmenler nedeniyle Geopolimer betonlar yapılarda kullanmak amacıyla çalışmalar yapılmaktadır.

### **2.6.1. Büzülme**

Geopolimer betonda meydana gelen büzülme olayı, GPC betonun haciminde zamanla meydana gelen su veya alkali aktivatör kaybı olacak şekilde isimlendirilir. Genel olarak büzülme, plastik, termal, kimyasal, ve kuruma büzülmesi olacak şekilde tanımlanır [57,58].

### **2.6.2. Alkali - Silika tepkimesi**

1920 ile 1930 yılları arasında Amerikada üretilen betonların yapımında sebebi belli olmayan çatlakların oluşmalarına bağlı olarak betonların yıkıldığı raporlanmıştır. Buradaki raporların neticesinde üretimde kullanılan malzemeler ilgili yönetmeliklere göre uygun seçilmesine karşın, döküm tarihinden birkaç sene içinde çatlakların olduğu belirtilmiştir. Genelde harita benzeri çatlaklar şeklinde oluşan çatlaklarda jel çıkması ve betonların patlaması şeklinde belirtiler meydana gelmiştir. Stanton 1940 yıllarında bu tip çatlaklara (sonradan ASR şeklinde isimlendirilecek) kimyasal tepkimelerin sonucunda meydana geldiğini belirtmiştir [59]. Tepkime sonrası meydana gelen jeller çok fazla miktarda su çekme özelliği vardır. Beton ise su emerek şişmeye ve bu sebeple de numune içinde çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur ve sonuçta beton genişir. Genleşme miktarı belirli bir oranı geçtiğinde beton için tehlike arz etmektedir. Sonuç olarak kullanılan agregalarla çimento pastasının çevresinde çatlaklara sebep olmaktadır [60, 61]. Literatürde 2 tip alkali agrega

reaksiyonu (AAR) mevcuttur, ASR (alkali silika reaksiyonu) - AKR (alkali karbonat reaksiyonu) tepkimeleridir fakat yapılarda ASR sıklıkla meydana çıkmaktadır. Beton içerisinde çimentodaki alkali oksit miktarı, alkalilere daha uygun agrega kullanımı (tridimit, opal, dasit, riyolit, fillat ve andezit, vb. mineral bulunduran), su ve ortamdaki ısı nedeniyle oluştuğu açıklanmaktadır. Buna ilaveten, akarsu yataklarından elde edilen ve akarsu havzalarından oluşturduğu kayalardan çıkan agregaların kullanımıyla üretilen betonlarda mevcuttur. ASR tepkimesinin sebep olduğu beton, tepkimeler sonucunda su çekme özellikleri sebebiyle jeller şişip genişler ve bu sebepten ötürü beton içerisinde 0.1 ile 11 MPa değerlerini bulan çekme gerilmesine neden olduğu belirtilmektedir [62-63].

### **2.6.3. İslanması – kuruması ve çevrimi**

Mangat ve arkadaşları, su ortamında, laboratuvar koşullarında ve ıslanma-kuruma çevrimleri gibi 3 değişik kür koşulunu alkalilerle aktif edilen harç (AAH) numunelerine ve Portland çimentolu harç numunelerine uygulamışlardır. Kür ortamı olarak en optimum ortamın Portland çimentolu harç numuneleri için su ortamında kür çıkarken, alkalilerle aktif edilen harç numuneler için ise ıslanma-kuruma kür yöntemlerinin optimum olduğu belirtilmiştir. Bununla beraber geciktirici katkılarla alkali aktif edilen harç numunelerin gözeneklerinin yapısını iyileştirip mukavemet özelliğini değiştirdiği bildirilmiştir. AAH'lerde kullanılan büzülme azaltan ve geciktirici katkının eklenmesiyle mukavemeti yükselir ve böylece ıslanma-kuruma çevrimleri ve kuru ortamda kütleme yöntemiyle daha iyi bir gözenek yapısını oluşturur[64]. Standart Portland çimento betondaki bir bileşeni CaO, asitlerle sülfatlarla tepkimeye girerek betondaki bozulma miktarını arttırması muhtemeldir. Sonuç olarak, Geopolimer betonların ısı ile sertleşmesi neticesinde Portland çimento betonlarına istinaden ıslanma-kuruma mukavemeti daha fazla ayrıca büzülmenin daha ufak niktarda olduğu gösterilmiştir [65].

## **2.7. Geopolimerlerin Dayanımlarına Etki Eden Parametreler**

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

Geopolimer betonların tasarım aşamasında etkili faktörlerden birisi de SiO<sub>2</sub> / Na<sub>2</sub>O oranıdır. SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O alkalilerle silikatların yer aldığı çözeltilerde çözünen alkali oranının polimerizasyon derecelerini büyük oranda etkileyip, sentezlenen jel ürünlerinin ve Geopolimer betonların temel mukavemetlerini büyük ölçüde etkilemektedir [66].

### 2.7.2. Geopolimer betonlarda suyun içeriği

Puzolanlı Geopolimer numune kaliteleri alkali solüsyonun cinsi ve miktarına, alkali/bağlayıcı oranına ve puzolanların kalitelerine bağlı olduğu araştırmalar neticesinde bulunmuştur. Genel olarak Geopolimer betonlarda su/bağlayıcı oranları 0.36 ile 0.44 arasında değişmektedir [50].

### 2.7.3. Isı kürü / sıcaklığı

Burciaga-Díaz ve arkadaşları silikat çözeltileriyle cüruf ve metakaolin bağlayıcısını karıştırıp elde edilen harçlara farklı kür sıcaklığı uygulandığı takdirde Geopolimer kompozit numunelerde uzun süreli performans olan etkileri araştırılmıştır. 20°C, 60°C, ve 70 °C ısı kürlerinin uygulandığı durumda elde edilen harç numunelerinin mukavemet ve mikro yapı analizleri karşılaştırılmıştır. Taze haldeki numunelerin yüksek ısı kürlerine maruz bırakılması sonrası ilk dönemlerde dayanım gelişimlerini hızlandırdığı, fakat uzun dönemde laboratuvar ortamında kürün daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. % 100 öğütülmüş granule yüksek fırın cüruf numunelerinde ısı kürü sıcaklığının laboratuvar koşullardan 60 °C civarına artırılması, cüruf parçacıklarının çok daha hızlı çözünmesini ve yaklaşık 100 MPa değerine varan basınç dayanımına ulaştığı tespit edilmiştir [67].

### 2.7.4. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı

Anuar ve arkadaşları tarafınca yapılmış olan birdiğer çalışmada ise alkali solüsyon tipi, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) karışımından meydana gelen alkali aktivatör kullanıldı [22]. Başka bir çalışmada ise, Geopolimer betonları 2 değişik Molarite (8M ve 14M NaOH) kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında 3., 7., 14., 21., ve 28. günlük basınç mukavemetleri bulunmuştur. 14M sodyum hidroksit kullanıldığı zaman basınç mukavemetinin çok yüksek bulunduğu ortaya çıkmıştır [68].

### 2.7.5. NaOH alkali çözeltisi molaritesi

Alkali aktivatör çözeltisinin konsantrasyonu, sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonu ile bulunur. Çok fazla NaOH kullanımı, CH oluşmasını ve kimyasal çözünmesini hızlandırır [62]. Alkali solüsyon olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanımı gözenekteki sıvının pH seviyesini ve hidrasyon aktivitesini düzenler, böylece Geopolimerlerde C-S-H üretim

temel şeklini direk olarak etkileyebilir. Sodyum hidroksit molaritesi ile ısı üretilmesi arasında doğrusal olmayan ilişki mevcuttur [64].

Yapılan bu çalışmada farklı oranda uçucu külle-silis dumanı, farklı oranlarda uçucu küllü-silis dumanlı-öğütülmüş yüksek fırın cürufllu Geopolimer beton numunelerin % 5 sülfürik asit etkisi altında kimyasal durabilitesinin incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışmadaki asıl amaçlardan diğeri de, Geopolimer beton durabilitesinin incelenerek, yapılarda Geopolimer beton kullanımını standard hale getirilmesini sağlamaktır. Sülfürik asit etkisi betonlarda en tehlikeli kimyasal atakların başında yer almaktadır. Eğer bu çalışmada üretilen Geopolimer betonların kimyasal durabilite performansları bilinirse bu betonların üretimleri standartlara girerek yapılarda kullanımının önü açılmış olacaktır.

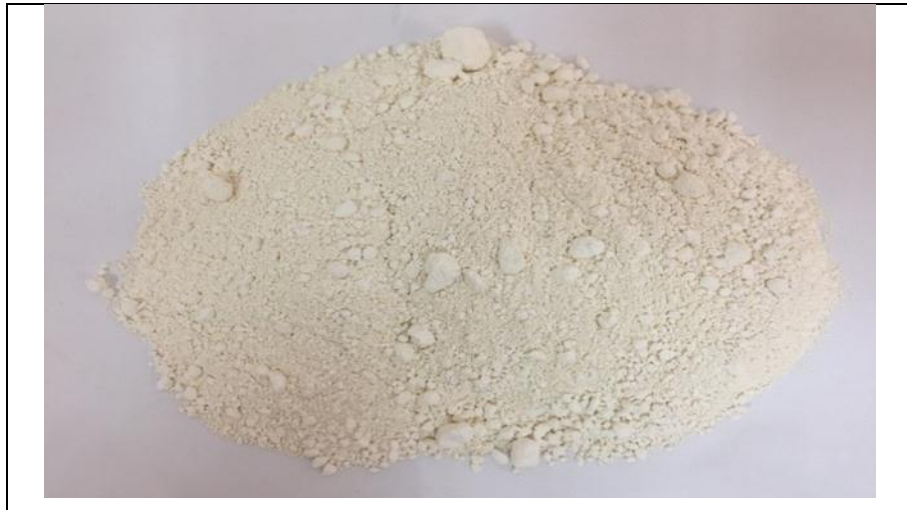
### 3. DENEY METODU

Çalışmanın bu kısmında üretmiş olduğumuz Geopolimer betonun malzemelerinin fiziksel / kimyasal özelliklerini, alkali aktivatörleri, bağlayıcılar, kür yöntemleri, mekaniksel ve durabilitele deneyler ile ilgili geniş kapsamlı bilgiler verilecektir.

#### 3.1. Geopolimer Beton Malzemeleri / Özellikleri

##### 3.1.1. Yüksek fırın cürufu

(YFC) demir çelik fabrikalarında demirlerin üretim süreci sonucunda meydana gelen atık malzemedir. YFC içerisinde kalsiyum-silikat ile alumina-silikattan oluşmaktadır. Elde edilen istenmeyen (atık) bir malzemenin betonların yapılmasında kullanımı, atık malzemelerden kurtulmak için ekonomik alanda, ve de çevrenin kirlenmesini önlemesi açısından hayati önem arz etmektedir. Tez kapsamında kullanılmakta olan YFC'nun kimyasal yapısı ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir, ayrıca deneylerde kullanılan YFC ise Şekil 3.1'de belirtilmiştir. Öğütülmüş granule YFC 'Bolu çimento' vasıtasıyla Zonguldak-Ereğli demir çelik tesislerinden temin edilmiştir.



Şekil 3. 1 Çalışmadaki yüksek fırın cürufu

Çizelge 3. 1 Yüksek fırın cürufu kimyasal yapısı / fiziksel özelliği

Kimyasal yapı	Analizin sonucu
Kalsiyum oksit	% 36.9
Silisyum dioksit	% 36.9
Alüminyum oksit	% 12.2
Demir oksit	% 1.1
Magnezyum oksit	% 5.6
Kükürt trioksit	% 0.2
Potasyum oksit	% 0.5
Sodyum oksit	% 0.8
Klor	% 0.015
Kükürt	% 0.7
Titanyum dioksit	% 0.6
Mangan trioksit	% 0.5
Kızdırma kaybı	% 0.010
Özgül ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	2.950
Özgül Yüzeyi (cm <sup>2</sup> /gr)	5131,0

### 3.1.2. Uçucu Kül

Deneyde kullanılan uçucu kül renk bakımından gri, dane olarak ince, şekil bakımından küre şeklinde ve cam görünümlü bir yapısı olan atık bir malzemedir. Yapılan çalışma kapsamında kullandığımız uçucu külü kimyasal yapısı ile fiziksel özellikleri Çizelgede 3.2’de verilmiştir ve ayrıca çalışmada kullanıldığımız uçucu küller Şekil 3.2’de sunulmuştur. İçeriğindeki CaO’nun miktarı yaklaşık % 2 dolaylarında bulunduğundan deneyde F tip uçucu kül kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 Uçucu kül kimyasal yapısı / fiziksel özelliği

Kimyasal yapı	Analiz sonucu
Kalsiyum oksit	% 1.79
Silisyum dioksit	% 56.15
Alüminyum oksit	% 26.37



Demir oksit	% 6.44
Magnezyum oksit	% 2.35
Kükürt trioksit	% 0.056
Potasyum oksit	% 3.804
Sodyum oksit	% 1.096
Klor	% 0.0900
Kızdırma kaybı	% 2.200
Özgül ağırlığı	2.050 g/cm <sup>3</sup>



Şekil 3.2 Çalışmada kullandığımız F-tip uçucu kül

### 3.1.3. Silis Dumanı

Silis dumanı çok ince taneye sahip, pürüzsüz yüzeyli, küre şeklinde ve camsı görümlü, yapısında çok fazla miktarda SiO<sub>2</sub> barındıran bir malzemedir. Yapılan çalışma kapsamında kullandığımız silis dumanının kimyasal yapısı ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir ayrıca çalışmada kullandığımız silis dumanı Şekil 3.3'de sunulmuştur.

Çizelge 3.3 Silis dumanı kimyasal yapısı / fiziksel özellikleri

Kimyasal yapı	Analizin sonucu
Silisyum dioksit	% 91.210
Magnezyum oksit	-
Alüminyum oksit	-

Demir oksit	-
Kalsiyum oksit	-
Sodyum oksit	% 0.35
Potasyum oksit	% 0.85
Sodyum oksit	% 0.450
Kızdırma kaybı	% 2.870
Klor	% 0.0246
Serbest Kalsiyum oksit	% 0.030
Özgül Ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )	2.32



Şekil 3.3 Çalışmada kullandığımız yoğunlaştırılmış silis dumanı

### 3.1.4. Agregalar

Çalışmada kullandığımız agregalar ebatları bakımından çakıl veya kırmataş, kırma kum, kum gibi isimlerle adlandırılmaktadır. İnce agregalar boyut olarak 4 mm ve daha düşük boyutlu olmakta iken iri agregalar ise boyut olarak 4 - 22 mm boyutlarındadır. İri agregalar No I (4 ile 11 mm arası) ve No II (12 ile 22 mm arası) olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında kullandığımız agregaların özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir ve çalışmada kullandığımız agregalar Şekil 3.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Agregalar özellikleri

Özellik	4-12 mm (No I)	12-22 mm (No II)
Dane yoğunluğu	$2.71 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^3$	$2.72 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^3$

Su emme	% 0.7	% 0.6
Yassılık endeksi	% 14.0	% 9.0
Parçalanma direnc	% 20.0	% 20.0



Şekil 3.4 Çalışmada kullanılan agregalar

### 3.1.5. Alkalilerin solüsyonları

Deneylede kullandığımız bağlayıcı malzemelerin mukavemet kazanabilmesi amacıyla alkali solüsyon tipi olarak sodyum hidroksitten (NaOH) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) birleşiminden elde edilen bir karışım kullanıldı. Sodyum silikat özelliği Çizelge 3.5’de gösterilmiştir. Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) sıvı olarak alınmıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) % 98 saf bir katı malzeme olarak alınmıştır. Daha önce gerçekleştirilen araştırmada 14 M (Molarite) NaOH alkali aktivatörün kimyasal faktörlere direnç bakımından en kötü direnci gösteren NaOH molarite oranı olarak bulunmuştur [68]. Bu nedenle bu tez çalışmasında Geopolimer beton numunelerin kimyasal etkilere karşı performansını araştıracağımızdan en

zayıf NaOH molaritesi  $14 \text{ M}^{\wedge}$  NaOH kullanıldı. NaOH katı malzeme  $14 \text{ M}^{\wedge}$  (Molarite) elde edilinceye kadar su içerisinde çözünerek  $14$  ayarlanmıştır. Literatürdeki bir diğer çalışmada ise kullanılan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranını ekonomik olması sebebiyle  $1.5-2.5$  değerlerinde kullanılması gerekmektedir [69]. Dolayısıyla, bu tez çalışması kapsamında ekonomik etkenler düşünülerek  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı  $2.50$  kullanılmıştır. Sodyum silikatlar ve  $14\text{M}$  NaOH alkali solüsyonları bir kova içerisinde karıştırılıp karışım esnasında kullanılmak üzere alkali solüsyonlar hazırlanmıştır. Şekil 3.5’de  $14\text{M}^{\wedge}$  NaOH hazırlanmasını göstermektedir. Daha önceden belirlenen miktar kadar kaba konulan suya belli bir hızda sodyum hidroksit katısı ilave edilerek yüksek hız ile döndürülerek katı halde bulunan sodyum hidroksitin su içerisinde çözünmesi gerçekleştirilmiştir..

Çizelge 3.5 Sodyum silikat özellikleri

Bileşim	Değeri
Silisyum dioksit	% 22 - %25
Sodyum oksit	% 10 - %12
Yoğunluğu	$1.39 \text{ g/cm}^3$



Şekil 3.5  $14\text{M}$  NaOH hazırlığı

### 3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı

Hazırlanan Geopolimer karışımlarının yapılarda rahatça kullanılabilmesi ve beton mikserinden kolayca dökülmesi amacıyla betonların akıcı kıvamına sahip olması gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenle akıcı bir kıvam olan S4 kıvamına ulaşabilmek amacıyla karışımlarda süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan süperakışkanlaştırıcı naftalin-sülfonat esaslı bir süperakışkanlaştırıcı olup bu katkı beton karışımlarına 2 dökülüp uygulandı. Birinci aşamada süperakışkanlaştırıcının yarısı alkali solüsyonların içine döküldükten sonra karışım işlemine devam edildi. İkinci aşamada süperakışkanlaştırıcının kalan yarısı mikser içerisine ilave edilmiştir. Naftalin-sülfonat bazlı süperakışkanlaştırıcının cinsi ve özelliği Çizelge de 3.6'da verilmiştir ayrıca süperakışkanlaştırıcı Şekil 3.6'da belirtilmiştir.

Çizelge 3.6 Kimyasal katkı özellikleri

Özellik	Süperakışkanlaştırıcı
Malzeme ismi	Yaprheo Super 145
Rengi	Opak
Durum	Sıvı
Özgül ağırlığı	1.0690 g/cm <sup>3</sup>

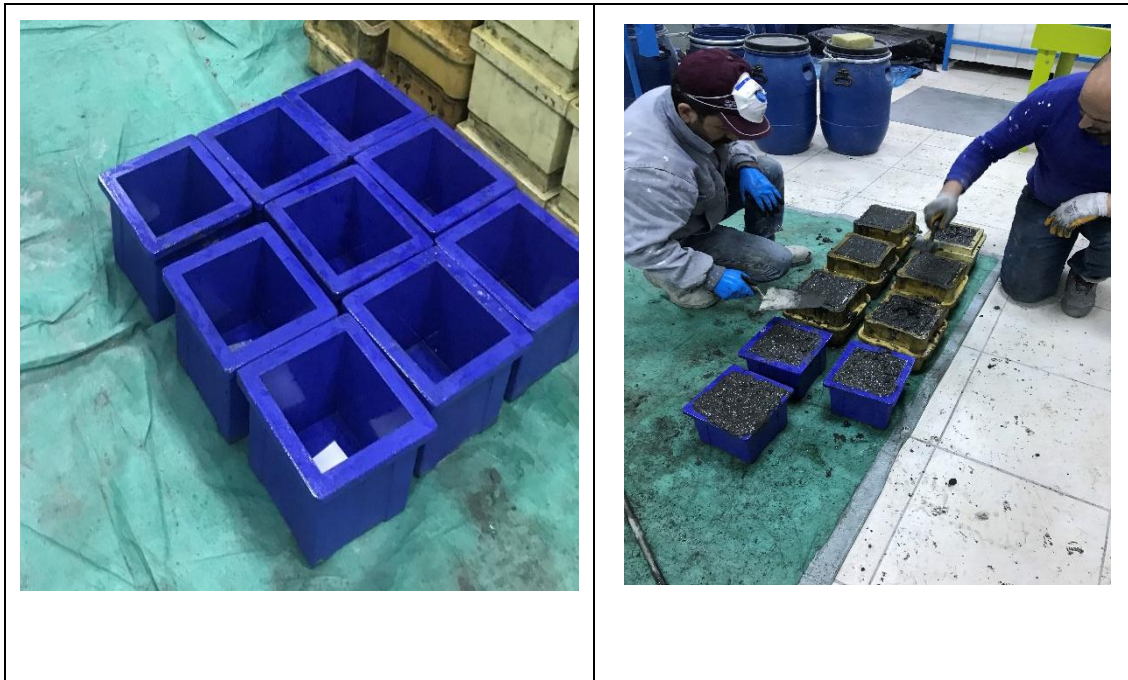


Şekil 3.6 Çalışmada kullandığımız süperakışkanlaştırıcı

## 3.2. Deneysel Metodu

### 3.2.1 Beton Kalıpları

Çalışmamızda 150x150x150 mm ebatlarında Şekil 3.7’ deki gibi kübik kalıplar kullandık. Taze beton dökülmeden önce kalıplar temizlenip hazırlandı ve yağlama işlemi yapıldı. Kapların alt kısmına kağıt parçası koyarak numunelerin kalıp söküm aşamasında daha kolay çıkması sağlandı. Şekil 3.7’de de görüldüğü gibi kalıpların temizlenip yağlanması, beton hazırlanması, hazırlanan betonların 150x150x150 mm küp kalıplara doldurulması, ve beton dökümünden sonra mala ile dökülen Geopolimer beton yüzeylerinin düzeltilmesi gibi işlemler gösterilmiştir.





Şekil 3.7 Deneydeki kalıpla ve uygulamaları

### 3.2.2. Alkaliler solüsyonun aşaması

Alkali solüsyonların uygulanma prosedüründe Şekil 3.8’de gösterilmiş olan sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) çözeltilerinin beraber kullanılması ile elde edilmiştir. Yapmış olduğumuz karışımda 1482.0 gr 14 M  $\text{NaOH}$  çözeltisine ulaşmak amacıyla , 525.0 gr  $\text{NaOH}$  ile 957.0 gr su kullanılmıştır. Bu çözelti hazırlanırken suyun içerisine yavaş yavaş katı sodyum hidroksit eklenerek karıştırma yapılmıştır. Bu karıştırma esnasında sodyum hidroksit sui le tepkimeye girdikçe çevreye ısı yayılmıştır. Elde etmiş olduğumuz 14 M  $\text{NaOH}$  çözeltisinin ısı açığa çıkarması sebebiyle, bu şekilde sıcak çözeltinin kullanımı betonun erken priz almasını sağlayacağı için bu elde edilen 14 Molarite sodyum hidroksit çözeltisi beton döküm işlemlerinden önce 30 dakika soğuması için bırakılmıştır.



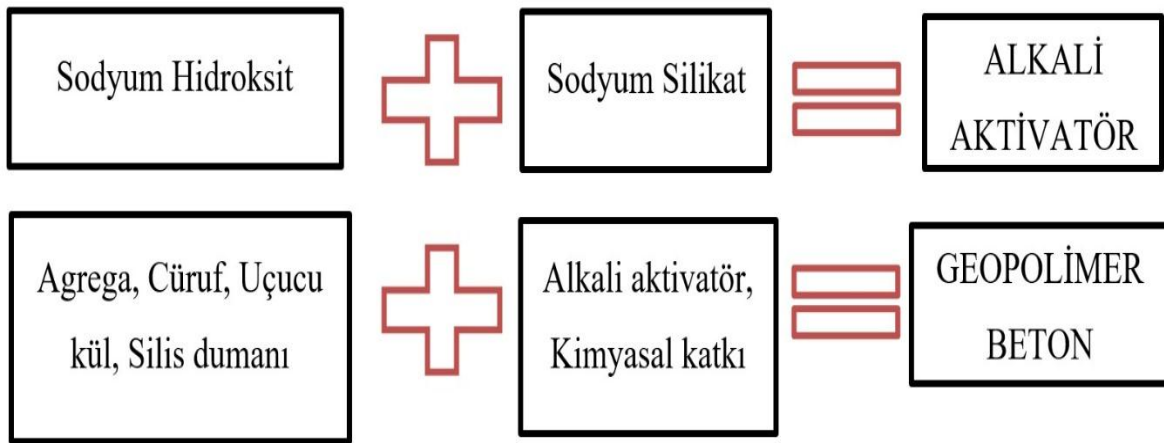
Şekil 3.8 Alkali aktivatörlerin hazırlanma aşaması ve uygulamaları

### 3.2.3. Geopolimer karışımların hazırlığı

Üretilecek Geopolimer betonların; agregalar, çimentolara alternatif olarak kullanmak istediğimiz ve bağlayıcılık özelliğini sağlayabilmek için kullanmış olduğumuz atık malzemeler ve alkali aktivatörler olan kullanılarak elde etmiş olduğumuz çevreye faydalı yeni beton şeklidir. Şekil 3.9’da bu süreç detaylı olarak gösterilmiştir. Silis dumanı çok ince bir yapıya sahip olduğundan Geopolimer betonların geçirimsizlik özelliklerini iyileştireceğini düşündüğümüzden dolayı % 5 oranlarında silis dumanı bütün Geopolimer karışımlara eklenmiştir. Dolayısıyla, % 5 silis dumanlı üç farklı Geopolimer betonlar dökülecektir. Betonlardan ilk olarak, % 95 F-tip uçucu kül ile % 5 silis dumanlı Geopolimer numune üretilmiştir. Çalışmada bu ilk Geopolimer beton isimlendirilmesi için 95U5SF kullanılacaktır. Üretilen Geopolimer betonların ikincisi olarak ise % 35 yüksek fırın cürufu



+ % 60 F-tip uçucu kül + % 5 silis dumanlı Geopolimer numuneler üretilmiştir. Çalışmada ikinci Geopolimer betonların isimlendirilmesi için 35C60U5SF kullanılacak. Üretilen Geopolimer betonların üçüncüsü olarak ise % 85 yüksek fırın cürufu + % 10 F-tip uçucu kül + % 5 silis dumanlı Geopolimer numune üretilmiştir. Çalışmada üçüncü Geopolimer betonların isimlendirilmesi içinde 85C10U5SF kullanılacaktır. Üretmiş olduğumuz farklı %5 silis dumanlı Geopolimer numunelerin % 5 sülfürik asite maruz bırakılması durumunda numunelerde görsel, ağırlık ve basınç mukavemeti olarak numunelerin nasıl etkilendiği araştırılacaktır. Çizelge 3.7’de 95U5SF Geopolimer numunelerinin 1 m<sup>3</sup> betonda kullanılan malzeme miktarları, Çizelge 3.8’de 35C60U5SF Geopolimer numunelerinin 1 m<sup>3</sup> betonda kullanılan malzeme miktarları, Çizelge 3.9’da ise 85C10U5SF Geopolimer numunelerinin 1 m<sup>3</sup> betonda kullanılan malzeme miktarları verilmiştir.



Şekil 3.9 Geopolimer betonların karışma aşamaları

Çizelge 3.7 95U5SF Geopolimerinde kullanılan malzemeler

Kullanılan malzemeler		Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
İri agrega	No 1	560.0
	No 2	560.0
İnce Agrega	Kum	372.0
	Kırma Kum	372
Yüksek fırın cürufu		-
Uçucu Kül		342
Silis Dumanı		17.9

Kimyasal katkı	6.25
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	114.70
NaOH	45.30
İlave Su	24

Çizelge 3.8 35C60U5SF bulunan Geopolimer betonda kullandığımız ürünler

Kullanılan malzemeler		Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
İri agrega	No I	560.0
	No II	560.0
İnce Agrega	Kum	372.0
	Kırma Kum	372.0
Yüksek fırın cürufu		126
Uçucu Kül		216
Silis Dumanı		17.9
Kimyasal katkı		9.06
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		114.70
NaOH		45.30
İlave Su		24

Çizelge 3.9 85C10U5SF barındıran Geopolimer betonda ki malzemeler

Kullanılan malzemeler		Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
	No I	560.0

İri agrega	No II	560.0
İnce Agrega	Kum	372.0
	Kırma Kum	372.0
Yüksek fırın cürufu		306
Uçucu Kül		36
Silis Dumanı		17.9
Kimyasal katkı		10.94
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		114.70
NaOH		45.30
İlave Su		24

#### 3.2.4. Geopolimer betonların üretilmesi

Geopolimer betonların üretilmesi de normal betonların üretilmesine benzer şekilde mikser yardımı ile karıştırmak sureti ile elde edilmiştir. Homojen bir karışım elde etmek için mikserin en altına iri agregalar en üstüne ise ince agregalar koyulur. Daha sonra ise atık malzemeler diye tabir ettiğimiz beton mikserine sırası ile belirlenen miktarlarca koyulur. Mikserdeki kuru malzemeler yaklaşık 2 dakika boyunca kendi içerisinde karıştırılır. Daha sonra, başka kapta hazırlanmış olduğumuz alkali aktivatörlerin kimyasal katkıların yarısı önce karıştırılır, sonra mikserde dökülür, ve karıştırma işlemi 2 dakika süre boyunca devam ettirilir. Sürecin devamında ise elimizde kalan süperakışkanlaştırıcı kimyasal ile su ilave edilerek karıştırma işlemine devam edilir. Beton döküm işi 6 dakika içerisinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan Geopolimer beton numunelerimiz, 150x150x150 mm kübik kalıplara önce ilk yarısı, ardından sıkıştırma işlemi, sonra diğer yarısı dolacak şekilde koyulup ardından 2. tabakanın sıkıştırma işlemi yapılır. Buradaki amacımız beton içerisindeki havayı dışarıya çıkarıp numunelerin içerisindeki hava boşluklarını engellemektir. Numuneler küp kalıplara koyulduktan sonra mastarlanma işlemi yapıp naylon ile yüzeyleri kaplanarak oda sıcaklığına kürlenmesi için bırakılır. Üretilen 3 tip Geopolimer betonlar 28, 56, ve 120 gün boyunca laboratuvar ortamında kürlenmesi için bırakılmıştır. Üretmiş olduğumuz numunelerden birkaçı 28. gün sonunda %5 sülfürik asit etkisine

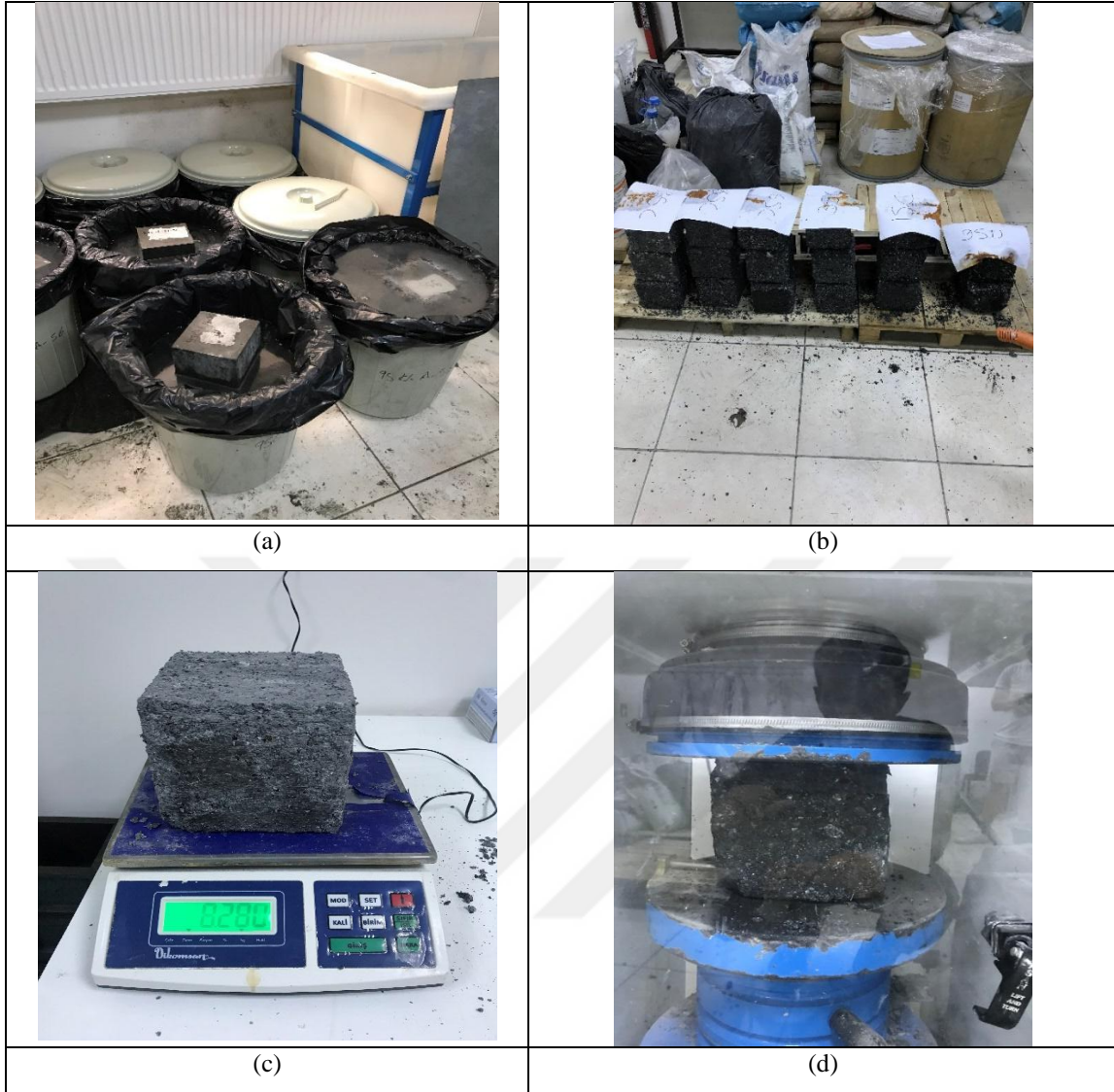
bırakılmıştır. Numunelerimiz 56. gününde (28 günlük kür + 28 günlük sülfürik asit) ve 120 gününde (28 günlük kür + 92 günlük sülfürik asit) olacak şekilde bu süreç sonunda basınç dayanım testleri yapılmıştır. Asite maruz bırakılan Geopolimer beton numunelerde dış katmanda aşınmalar ve ağırlık kaybı gözlenmiştir. Ürettiğimiz beton karışım aşaması Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Beton karışımı ve dökümü Şekil 3.10'da numunelerin önce kovalara ardından asitle doldurulması görülmektedir (a). Daha sonra numuneler testler öncesinde laboratuvar ortamında kurutulmaya bırakılmıştır (b). Sonrasında ise numunelerin belirli günlerindeki ağırlıkları kaydedilmiştir (c). En son ise numuneler üzerinde basınç dayanımı gerçekleştirilmiştir (d).

### **3.2.5. Sülfirik asitin (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) çözeltisi aşaması**

Üretmiş olduğumuz Geopolimer numunelerin %5 sülfirik asite (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) maruz kalması durumunda durabilite ve dayanımını gözlemlemek amacı ile 56 ve 92 gün boyunca sülfirik asite maruz bırakılmıştır. Hazırlanmış olduğumuz 15 cm'lik kübik numuneler önce büyük kovalara konulmuştur ve sülfirik asit beton numunelerden 5 cm yukarıda kalıcak şekilde %5'lik asitle doldurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kovaların kapları kapatılarak test günü gelinceye kadar asit ortamında numuneler bekletilmiştir. Kovalara konulan numunelerin bir kısmını 28 gün sonunda bir kısmını 90 gün sonunda çıkartıp yapılacak testler ve fotoğraflama öncesinde oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.11 %5 sülfürik asit çözeltisi öncesi ve sonrası işlemleri

### 3.2.6. Numune ağırlıklarında ki değişim

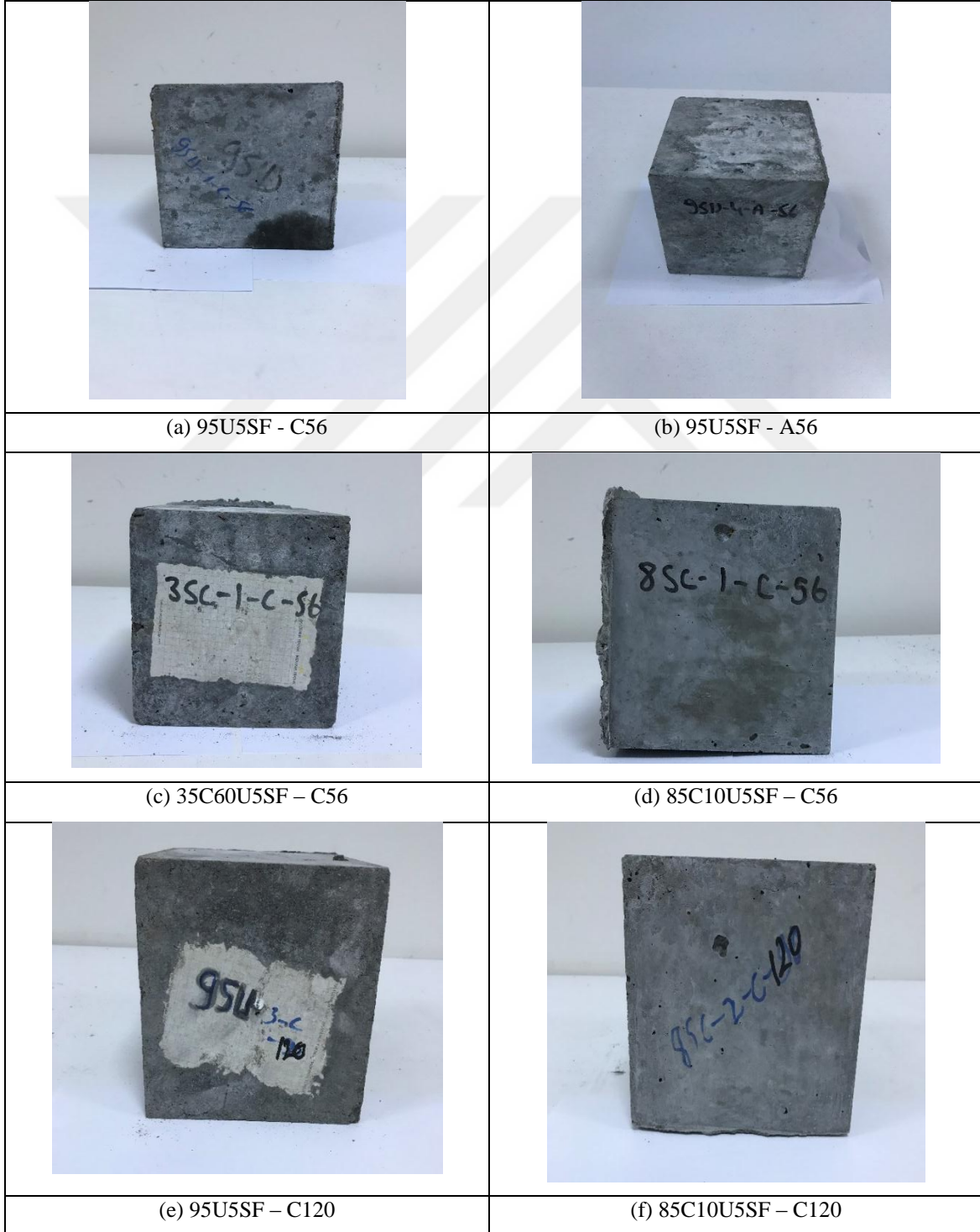
Üretmiş olduğumuz bütün numunelerin 28. gündeki ağırlıkları asite maruz bırakılmadan ölçülüp kaydedildi. Bu uygulamanın akabinde 56. ve 120. günlerdeki normal oda şartlarındaki numuneler ile asite maruz bırakılmış numunelerin ağırlıkları da kaydedilmiştir. Asit ortamından çıkarılan numuneler yaklaşık 1 gün oda sıcaklığında beklemeye bırakıldıktan sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Numunelerin asite maruz kalması ve laboratuvar ortamında bekletilmesi sonrası ağırlıklarındaki değişimler aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

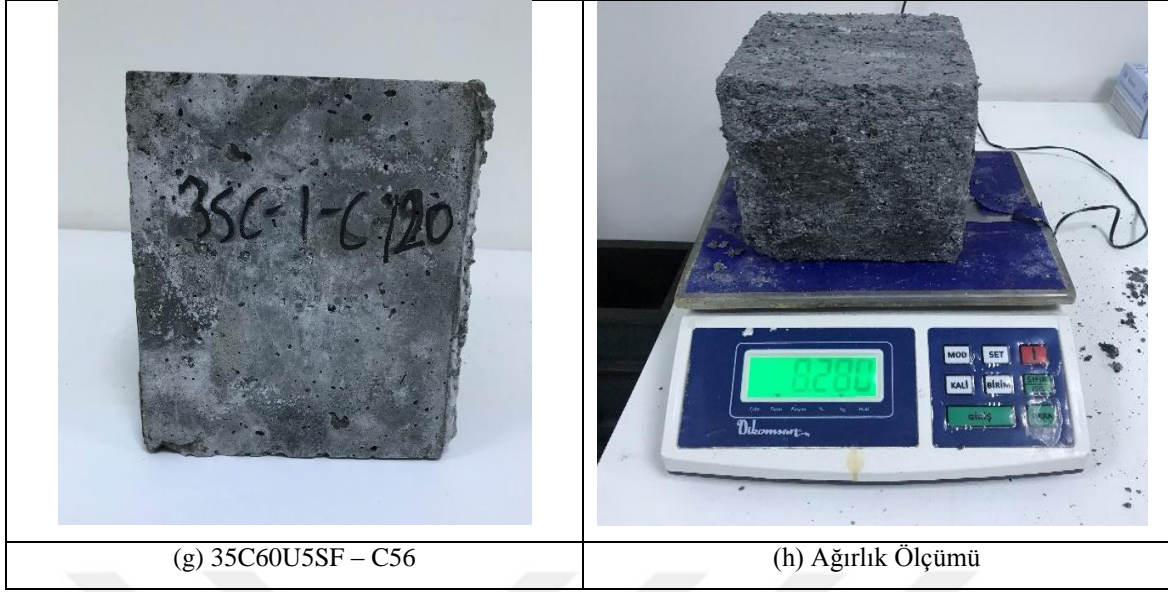
$$\text{Ağırlık yüzdece değişim} = [(B-A)/A] \times 100 \quad (3.1.)$$

A. = İlk Ağırlık

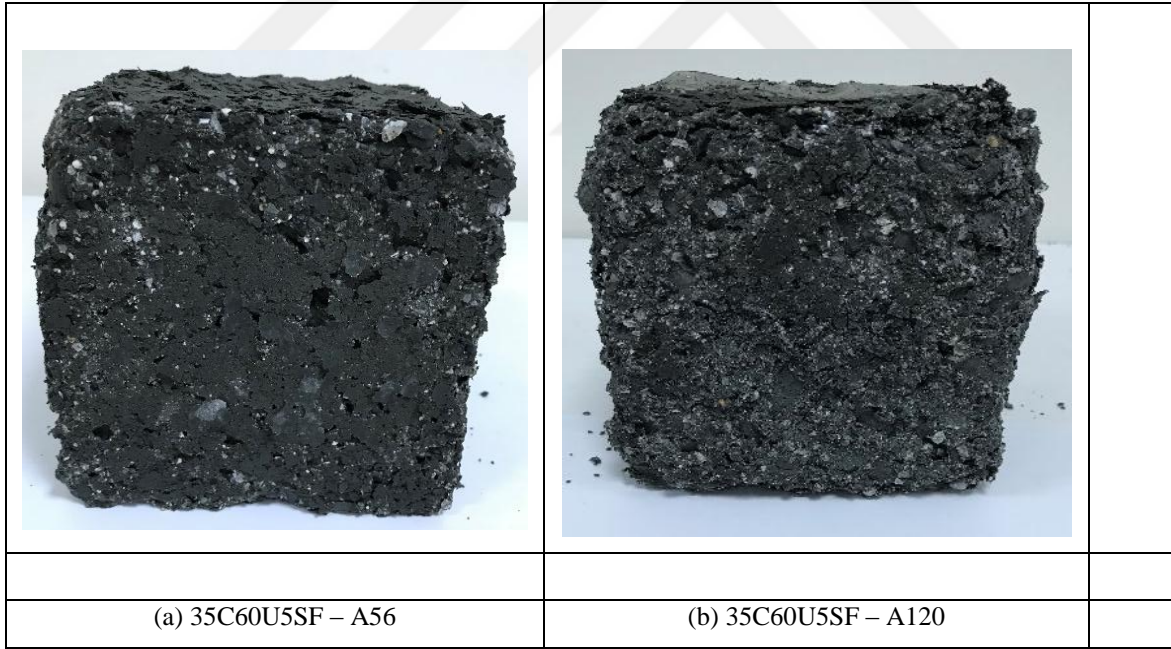
B. = Asit sonrası ağırlık

Laboratuvar ortamında bekleyen numunelerin 56. ve 120. günlerindeki yüzey fotoğrafları Şekil 3.11’de, sülfurik asit ortamında bekleyen numunelerin 56. ve 120. günlerindeki yüzey fotoğrafları Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

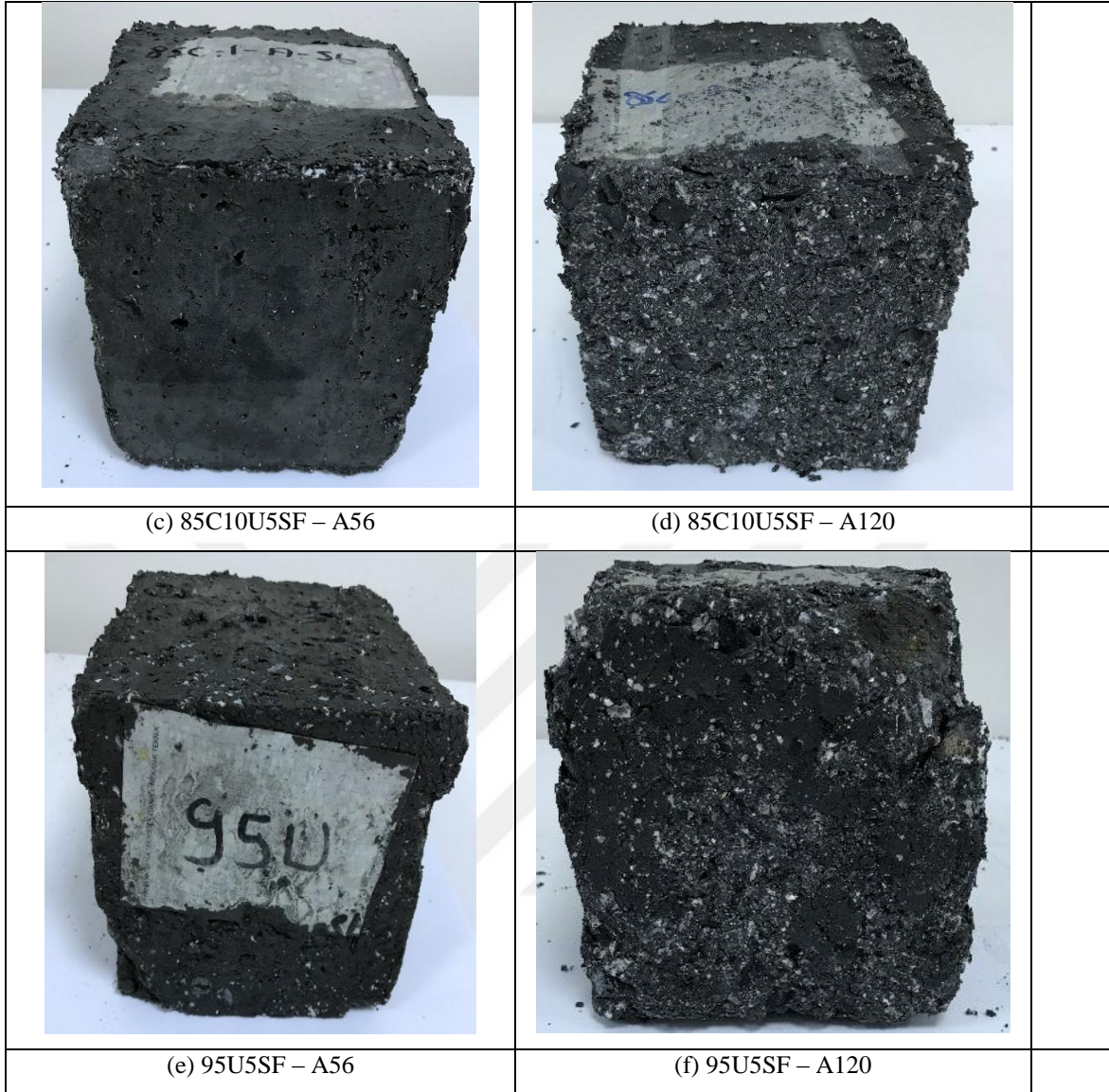




Şekil 3.12 Numunelerin yüzey fotoğrafları ve ağırlık değişimi







Şekil 3.13 Asit etkisinde bekletilen numunelerin yüzey fotoğrafları

### 3.2.7. Geopolimer numunelerde basınç mukavemeti testi

Numunelerin basınç dayanımı testleri üretilen veya kimyasal ortama maruz bırakılan numunelerin taşıyabileceği dayanım değerini bulmak ölçmek amacıyla gerçekleştirilir. Basınç dayanımı testi sırasında tek (z) ekseninde basınç gerilmesine maruz kalan numunelerin dayanabileceği maksimum yük bulunur. Sonuçta betonların dayanabileceği maksimum basınç kuvvetinin numune alanlarına bölerek betonların basınç dayanımları bulunur. Genelde basınç dayanım birim MPa ( $N/mm^2$ ) olarak alınmaktadır. Geopolimer betonlarda yapılan basınç dayanımı testi AS1012.9-1999'a uygun olarak gerçekleştirilmiştir, Şekil 3.13. Yapılan çalışma kapsamında 28, 56, ve 120 günlük basınç dayanımı testi hem laboratuvarında hem de asitte bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14 Basınç dayanımı testleri

## 4. BULGU / TARTIŞMALAR

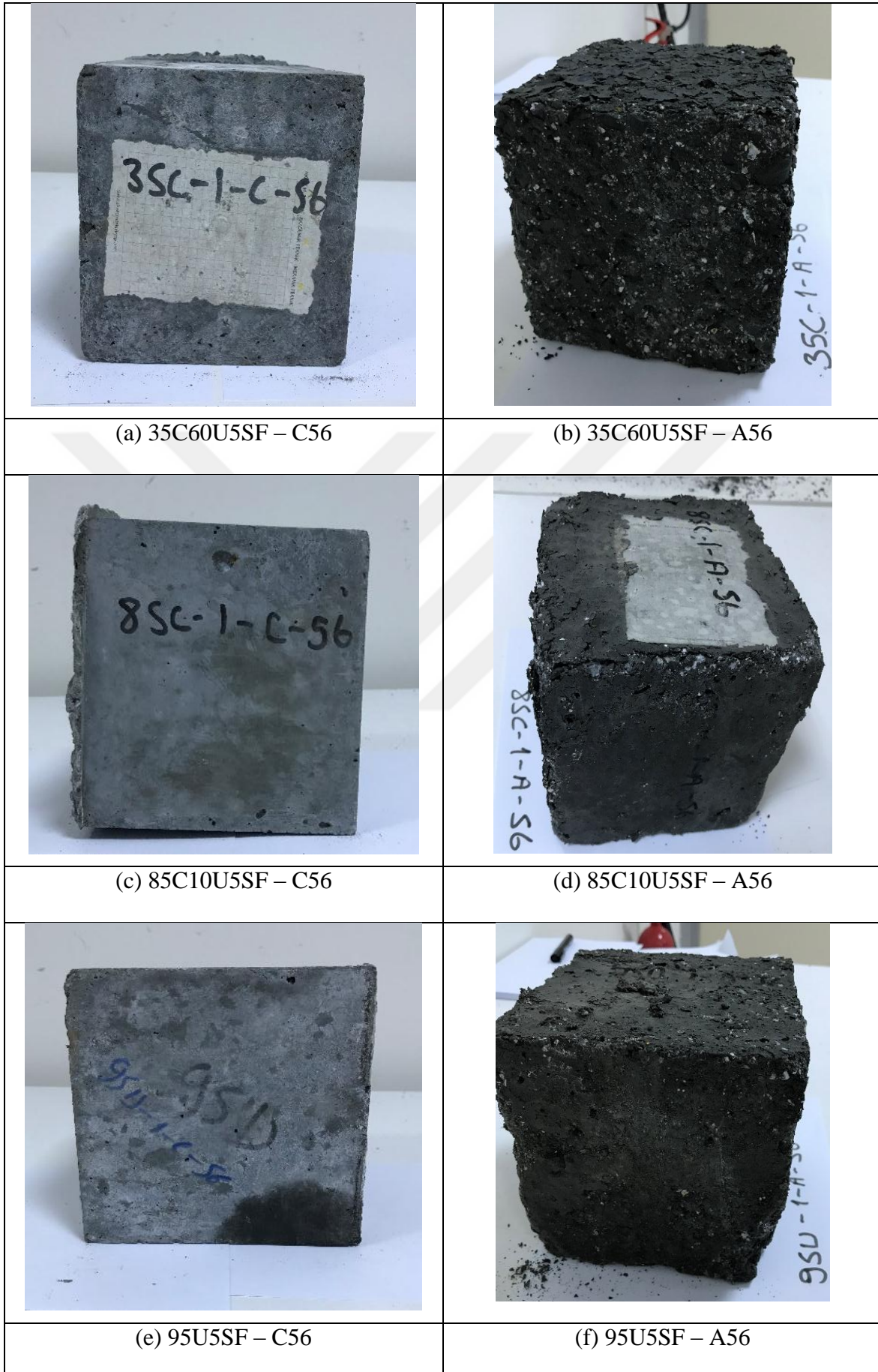
Yapılan tezde üç farklı Geopolimer betonlar; % 95 F-tip uçucu küllü + % 5 silis dumanlı (95U5SF), % 35 yüksek fırın cürufu + % 60 F-tip uçucu küllü + % 5 silis dumanlı (35C60U5SF), ve % 85 yüksek fırın cürufu + % 10 F-tip uçucu kül + % 5 silis dumanı içeren (85C10U5SF) betonlar üretilmiştir. Üretilen Geopolimer betonlardan bazıları laboratuvar ortamında kürlenmiş ve bu numunelerin 28., 56., ve 120. günlerde laboratuvar ortamında basınç dayanımları elde edilmiştir. Üretilen diğer Geopolimer betonlar 28 günlük laboratuvar ortamında kürün akabinde % 5 sülfürik asit çözeltisi etkisinde bırakılmıştır. Daha sonra betonlar testlerden önce asit çözeltisinden çıkarılmış ve kuruması için laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler üzerinde görsel inceleme, ağırlık ölçümleri ve basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar verilmiştir.

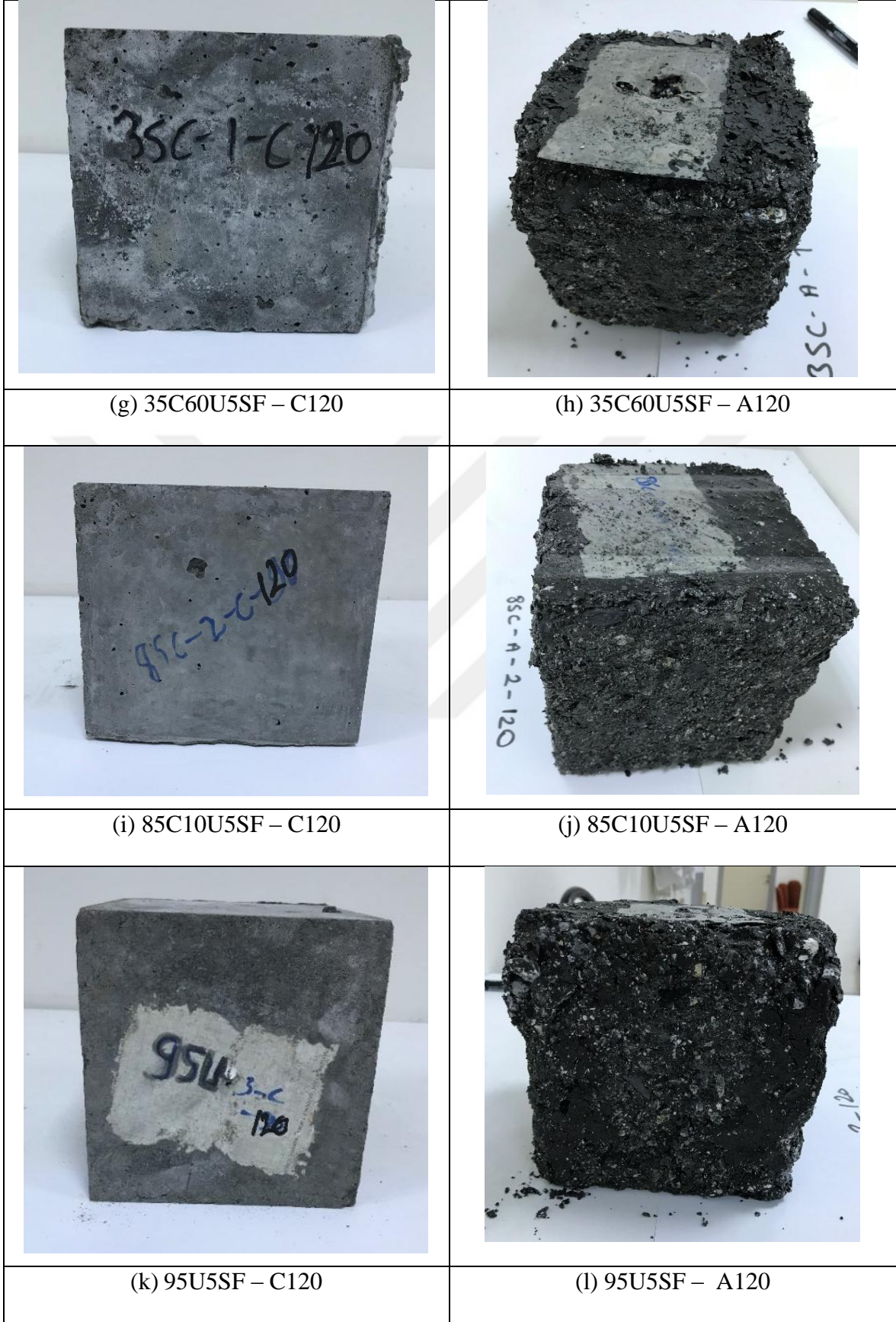
### 4.1. Görsel İnceleme

Şekil 4.1’de laboratuvar ortamı ile sülfürik asit ortamında bekletilen numunelerin 56. ve 120. günlerde yüzey değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.1’de numunelerin sonundaki C56 ve C120 numunelerin laboratuvar ortamında 56 ve 120 gün bekletildiklerini, A56 ve A120 ise numunelerin %5 sülfürik asit ortamında 56 ve 120 gün bekletildiklerini göstermektedir. Şekil 4.1’de soldaki yüzey fotoğrafları laboratuvar ortamını, sağdaki yüzey fotoğrafları ise aynı numunenin % 5 sülfürik asitteki yüzey fotoğraflarını göstermektedir. Yüzey incelemelerden elde edilen sonuçlara göre, sülfürik asite maruz kalan betonların dış yüzeylerinde kabarmalar, beyaz noktalaşmalar, bölgesel bozulmalar ve dış tabakanın kopması görülmektedir. Sülfürik asite maruz betonların yüzeylerinin yapısı görsel yöntemle incelendiğinde, Geopolimer numunelerin yüzeylerinde etrenjit ile alçıtaşı oluşmasından kaynaklanan bozulmalar ile beyaz renkli noktalar oluştuğu gözükmektedir. 5% sulfurik asite maruz kalan numunelerdeki yüzey erozyonu,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (kalsiyum-hidroksit) ile kalsiyum mono sülfoalüminat ile tepkimesi sonucunda beyaz renge sahip alçı kristalden oluşan tabaka nedeniyle meydana gelmektedir. Oluşan alçıtaşı ve etrenjit ürünlerinden dolayı betonların dıştaki yüzeyi bozulmakta ve bu bozulma numune dış çevresinden başlayıp agrega ve bağlayıcı harcın parçalanarak betonda erozyon oluşuma yol açmaktadır. Bu oluşan erozyon miktarının artmasına paralel olarak beton boyutlarında parça dökülmesinden kaynaklı azalma meydana gelmektedir. Eğer betonlar yüzeylerinden başlayarak iç kısımlara doğru

giderek artan parça dökülmeleri ve alçıtaşı oluşumundan kaynaklı beyaz noktaların sayıca çok oluşu (yüzey tabakasını zayıflatmakta) betonlarda mukavemet kayıplarına sebebiyet vermektedir. Yani sülfurik asit dolayısıyla oluşan bozulmalar arttığı takdirde, betonların basınç dayanımlarında azalma meydana gelmektedir. Şekil 4.1’de laboratuvarında ve asitte 56. ve 120. günlerde numunelerin yüzeyinde oluşan değişiklikler karşılaştırılma yapılarak gösterilmiştir. Geopolimer betonların dış yüzeylerine detaylıca bakıldığında, betonlarda oluşan bozulmaların zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. Yani Geopolimer beton numunelerde %5 sülfurik asit sebebiyle 120 gün sonunda beyaz noktalar ve ufalanmalar sebebiyle oluşan hasar miktarı aynı numunelerin %5 sülfurik asit sebebiyle 56 gün sonunda oluşan hasar miktarından daha fazla olduğu görülmektedir.

Üretilen birbirinden bağımsız Geopolimer betonlar % 5.0 sülfurik asit etkisi sonucu yüzeylerinin durumlarının incelenmesi sonucunda, F-tipi uçucu kül miktarının maksimum olduğu 95U5SF numunelerinde, yüksek fırın cürufu numunelere kıyasla daha çok kabarıklık ve parça dökülmesi, ve numune yüzeylerinde miktar olarak daha çok beyaz noktalar oluşmuştur. Cürufun miktarının maksimum olduğu 85C10U5SF numunelerinde çok daha az kabarıklık ve parça dökülmesi, ve numune yüzeylerinde miktar olarak az sayıda beyaz noktalar oluşmuştur. Geopolimer betonların gözle incelenmesi sonucunda, 85C10U5SF Geopolimer numuneleri % 5 sülfurik asitte maksimum durabilite performansı göstermişken, 95U5SF Geopolimer numuneleri % 5 sülfurik asitte minimum durabilite performansı sergilemiştir. İçeriğinde fazla miktarda cüruf olan Geopolimer numunelerin sülfurik asit nedeniyle bozulma göstermesinin sebebi öğütülmüş yüksek fırın cürufunun içerisindeki fazla miktarda mevcut olan kalsiyum oksitten kaynaklanmaktadır. İçeriğinde fazla miktarda F-tipi uçucu kül olan Geopolimer numunelerin sülfurik asit nedeniyle bozulma göstermesinin sebebi henüz geopolimerizasyona dönüşmeyen uçucu küller nedeniyle geçirgenliğin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun yanısıra, uçucu kül içeren Geopolimer numunelerin basınç dayanımlarının zamana bağlı olarak yavaş artmasından kaynaklı olabilir çünkü daha geopolimerizasyona uğramayıp nihai basınç mukavemetine ulaşamayan betonların asite maruz kalması numunelerin basınç mukavemetlerinin gelişimini kötü etkileyebilir. Yüksek fırın cüruf miktarının artmasında bağlı olarak beton içerisinde kalsiyum oksit artmaktadır ve böylece arayüzeyler daha güçlü olmaktadır ve bu da beton geçirgenliğini azaltarak sülfurik asite karşı çok daha iyi performans göstermesini sağlamaktadır.





Şekil 4.1 Laboratuvar ortamı ile sülfürik asit şartlarındaki numunelerin yapısal değişimi

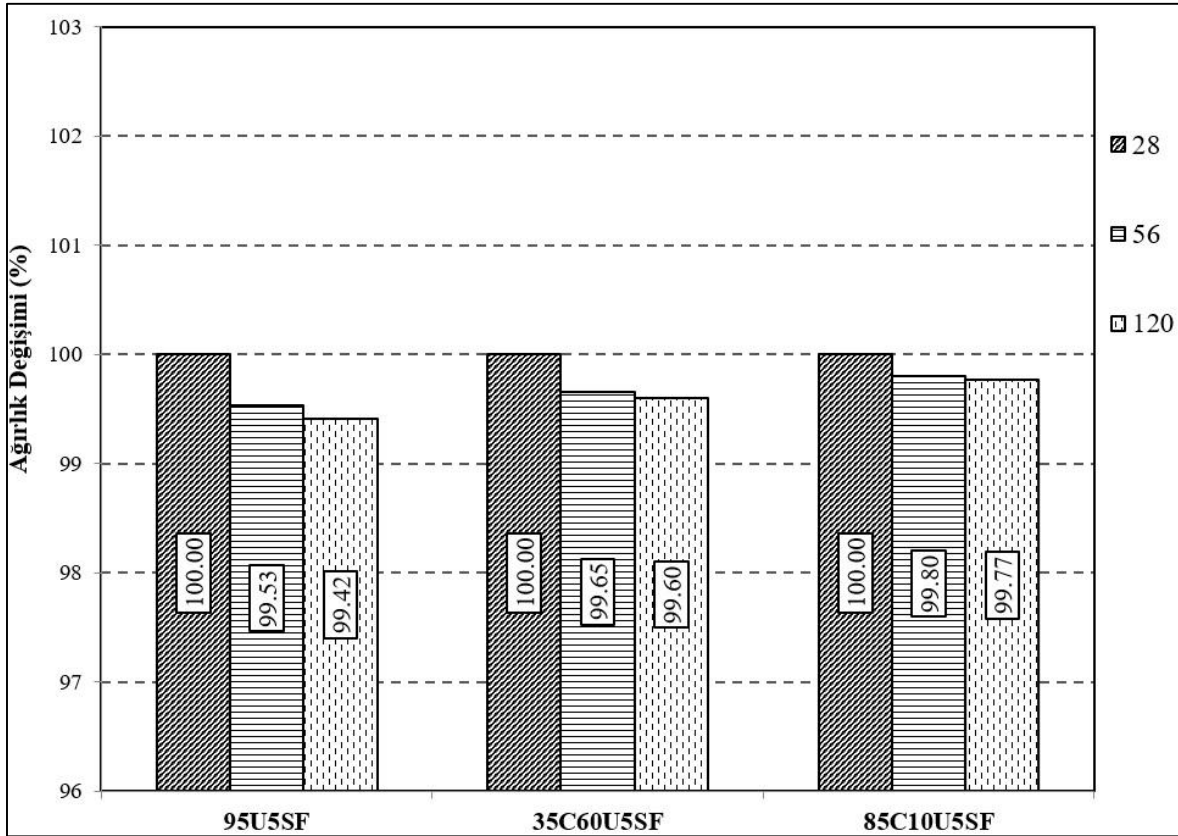
#### 4.2. Asit etkisinde ağırlığın kaybı

Yapılan tez çalışmasında 95U5SF, 35C60U5SF ile 85C10U5SF Geopolimer betonların laboratuvarında ve %5 sülfurik asitte 28, 56, ve 120 gün sonunda numune ağırlıklarında oluşan değişimler not edilmiş ve Şekil 4.2 - 4.5'lerde verilmiştir. Geopolimer beton numunelerinin ağırlığı ölçülerek kaydedilmiş olup, Şekil 4.2 - 4.5'lerde gösterilen Geopolimer beton ağırlıkları üçer numunenin ortalama ağırlıklarını göstermektedir. Şekil 4.2'de laboratuvar ortamında bekletilen numune ağırlıklarının değişmesi % cinsinden verilmiştir. Ağırlık değişimi grafiğinde 28 gün ağırlığı % 100 alınmıştır, ve 56 ve 120 gün sonunda numune ağırlığında oluşan değişimler 28 gün sonundaki değişimlere göre kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuç değerlerine göre, zamanla gerçekleşen geopolimerik reaksiyonlar nedeniyle numune ağırlıkları azalmıştır.

95U5SF numune ağırlıklarındaki değişim sonuçlarına göre, 56 ve 120 günler sonundaki numune ağırlıklarındaki değişim, 28 gün sonundaki numune ağırlıklarına kıyasla sırayla % 0.47 ve % 0.58 azalmıştır, Şekil 4.2. Numunelerin 28 günlük ağırlık azalması % 0.47 iken, diğer 56 günlük azalma ise % 0.11 olmuştur. Sonuçlara göre, 95U5SF numunelerdeki Geopolimerik reaksiyonların zamana bağlı olarak azalmasını gösterir.

35C60U5SF ağırlıklarındaki değişim sonuçlarına göre, 56 ve 120 günler sonundaki numune ağırlıklarındaki değişim, 28 gün sonundaki numune ağırlıklarına kıyasla sırayla % 0.35 ve % 0.40 azalmıştır, Şekil 4.2. Numunelerin 28 günlük ağırlık azalması % 0.35 iken, diğer 56 günlük azalma ise % 0.05 olmuştur. Sonuçlara göre, 35C60U5SF numunelerdeki Geopolimerik reaksiyonların zamana bağlı olarak azalmasını gösterir. Fakat 35C60U5SF numunelerindeki azalma miktarı 95U5SF numunelerinden daha azdır.

85C10U5SF ağırlıklarındaki değişim sonuçlarına göre, 56 ve 120 günler sonundaki numune ağırlıklarındaki değişim, 28 gün sonundaki numune ağırlıklarına kıyasla sırayla % 0.20 ve % 0.03 azalmıştır, Şekil 4.2. Numunelerin 28 günlük ağırlık azalması % 0.2 iken, diğer 56 günlük azalma ise % 0.03 olmuştur. Sonuçlara göre, 85C10U5SF numunelerdeki Geopolimerik reaksiyonların zamana bağlı olarak azalmasını gösterir. 85C10U5SF numunelerindeki azalma miktarı hem 35C60U5SF hem de 95U5SF numunelerinden daha azdır. Buradan çıkarılabilecek sonuç, Geopolimer betonda yüksek fırın cürufu oranı arttıkça Geopolimerizasyon reaksiyonları çok daha hızlı tamamlanmaktadır. Bu da yüksek fırın cürufu içeren numunelerin erken dayanım kazanmasını sağlamaktadır. Uçucu kül içeren Geopolimer betonların ise Geopolimerizasyon reaksiyonları uzun süre devam etmektedir. Bu yüzden uçucu küllü Geopolimer betonların erken dayanımları düşüktür.



Şekil 4.2 Laboratuvar ortamında bekletilen numune ağırlıklarının değişmesi

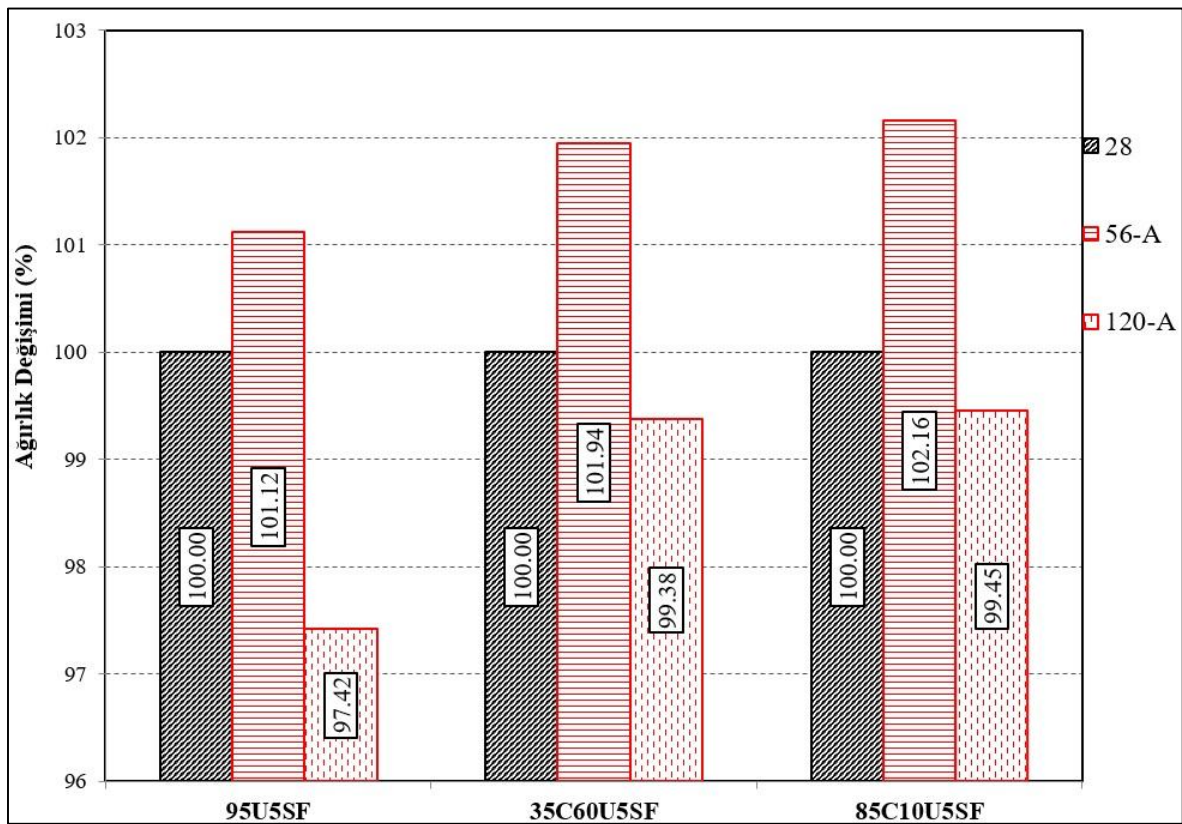
Şekil 4.3 sonuçlarına göre, farklı beton tiplerinin 28 günlük ağırlığı %100 alınmıştır, 56 ve 120 günlük numunelerde asite maruz kalmalar sebebiyle ağırlıklarda oluşan değişimler 28 günlük ağırlıklara (asite girmeyen 28 günlük) göre kıyaslanmıştır. 95U5SF numunelerinin ağırlık değişmesi incelendiğinde, 56 günlük ağırlık değişimi, 28 günlükle kıyaslandığında % 1.12 artarken, 120 günlük ağırlıkların değişmesi 28 günlüğe kıyasla % 2.58 azalmıştır. Sonuçlar, sülfurik asit emilmesi nedeniyle numunelerin 56 günlük ağırlıklarında artma meydana gelirken, 120 günlükte ağırlık değişmesi numunelerin parçaları döküldüğünden dolayı numune ağırlıklarında azalış meydana gelmiştir.

35C60U5SF numunelerinin ağırlık değişmesi incelendiğinde, 56 günlük ağırlık değişimi, 28 günlükle kıyaslandığında % 1.94 artarken, 120 günlük ağırlıkların değişmesi 28 günlüğe kıyasla % 0.62 azalmıştır.

85C10U5SF numunelerinin ağırlık değişmesi incelendiğinde, 56 günlük ağırlık değişimi, 28 günlükle kıyaslandığında % 2.16 artarken, 120 günlük ağırlıkların değişmesi 28 günlüğe kıyasla % 0.55 azalmıştır. Elde edilen sonuçlar, 120 günlük (asite 92 günlük) numunelerin



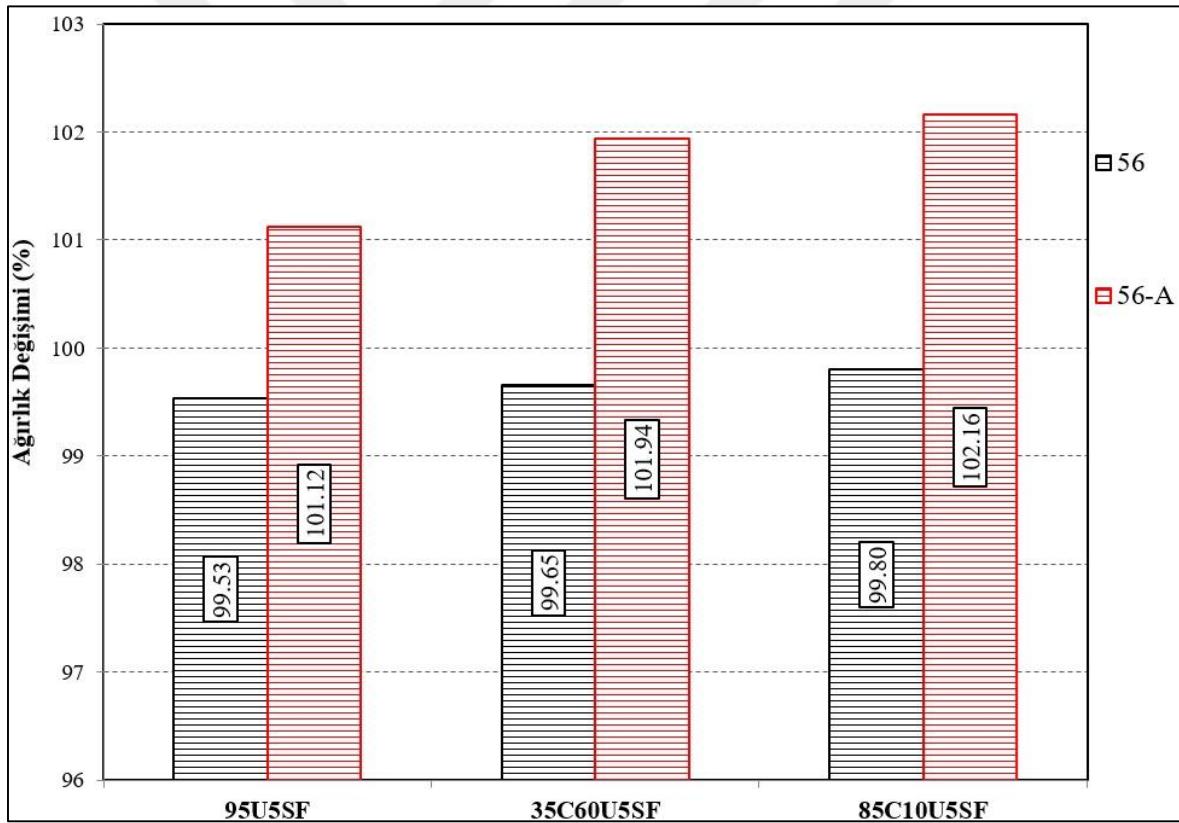
minimum ağırlık azalması/minimum bozulması 85C10U5SF Geopolimer betonlarda olurken, maksimum ağırlık azalması/maksimum bozulma ise 90U5SF Geopolimer betonlarında oluşmuştur. Maksimum hasar, en fazla F-tipi uçucu küllü Geopolimer betonda oluşurken, minimum hasarda en fazla yüksek fırın cürufllu Geopolimer betonlarda meydana gelmiştir. Cüruf içeren betonların içeriğinde yüksek kalsiyum oksit olmasına rağmen minimum hasarın bu betonlarda olmasının nedeni, uçucu kül içeren betonlarda geopolimerik reaksiyonların tamamlanmamasından dolayı, çok fazla miktarda boşluk oluşumu, dolayısıyla geçirimsizliğin artışı olmasından dolayı olabilir.



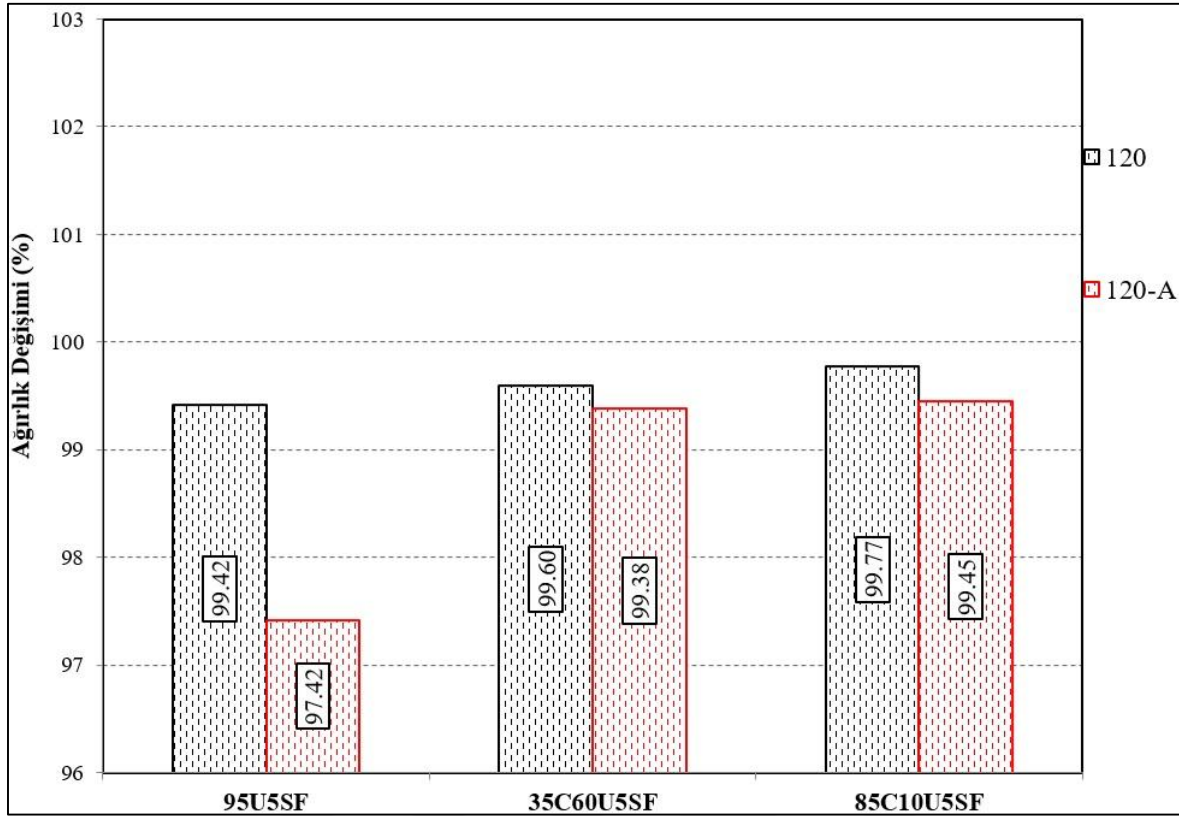
Şekil 4.3 Asit ortamında bekletilen numune ağırlıklarının değişmesi

Şekil 4.4'de 56 gün laboratuvarında ve 5 % sülfürik asitte bekleyen betonların ağırlıklarının değişimleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm Geopolimer betonların 5% sülfürik asit çözeltisi içerisinde sülfürik asit emilmesi gerçekleştiğinden, Geopolimer beton numune ağırlıklarının artışı gözlemlenmiştir. Şekil 4.5'te 120 gün laboratuvarında ve 5 % sülfürik asitte bekleyen beton numune ağırlıklarının değişimleri verilmiştir. Elde edilen 120 günlük sonuçlar, hem 85C10U5SF hem de 35C60U5SF Geopolimer beton numunelerde 5 % sülfürik asitten ötürü numunelerin ağırlıklarının çok az azaldığı ortaya çıkmıştır.

95U5SF Geopolimer beton numunelerinde parçaların dökülmesi dolayısıyla kaynaklanan ağırlıklarda azalmanın fazla olduğu görülmektedir. Ağırlık azalması sonuçları görsel inceleme sonuçları ile beraber değerlendirildiğinde, benzer sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir. Görsel inceleme sonuçlarında da 95U5SF numunelerinde ufanma ve dökülme sebebiyle oluşan hasar fazla iken, ağırlık değişimlerinin sonuçları da numunelerde parça kopmasının gerçekleştiği ağırlık azalmasıyla görülmektedir. 30C60U5SF numunelerinde görsel olarak hasar orta seviyede bulunmuştu, ağırlık değişiminde de benzer sonuçlara ulaşılmaktadır. En az bozulma/hasar ve ağırlıktaki en az azalma ise 85C10U5SF Geopolimer beton numunelerinde meydana gelmiştir. Bu çalışma, ağırlık değişimi ile görsel denetimlerin, Geopolimer betonların durabilite performanslarının değerlendirilmesinde kriter olabileceklerini ortaya koymuştur.



Şekil 4.4 Farklı koşullarda 56.gün ağırlık değişimi



Şekil 4.5 Farklı koşullarda 120.gün ağırlık değişimi

### 4.3 Geopolimerli betonlarda asit etkisiyle basınç mukavemetinin değişmesi

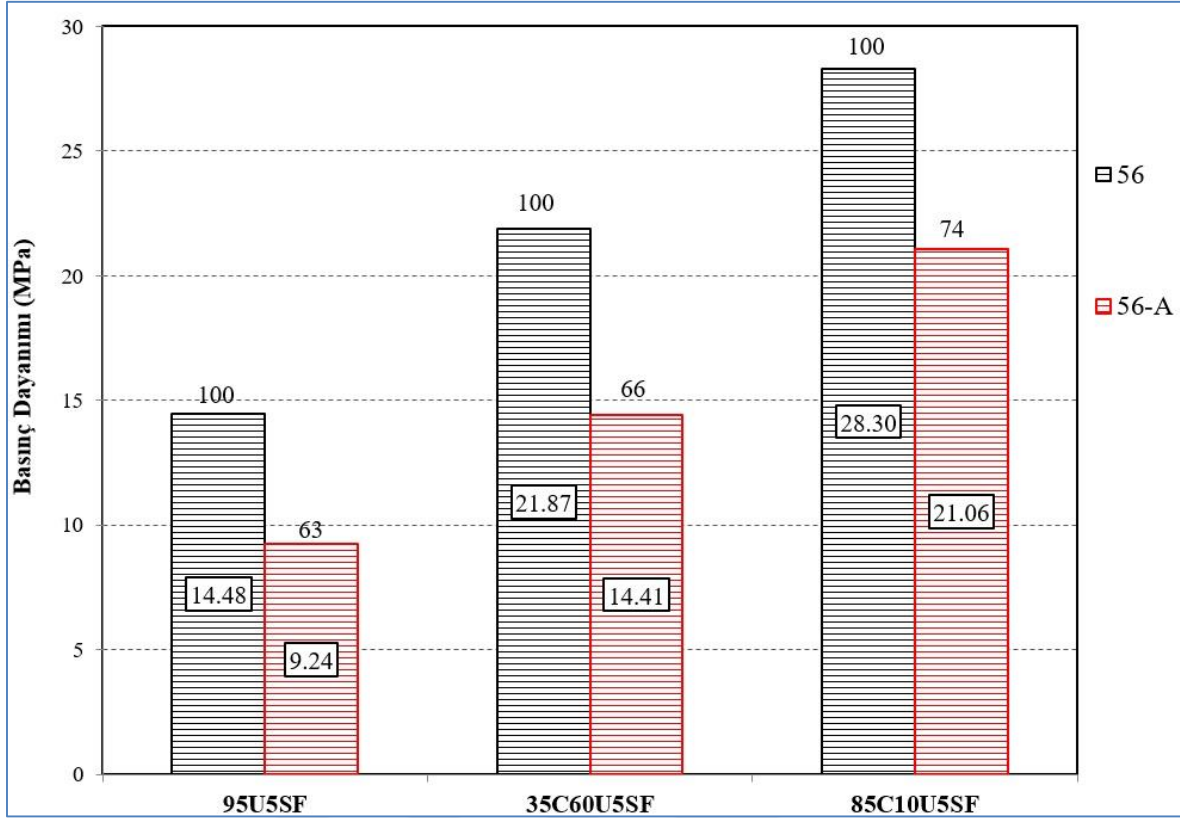
Yapılan tez kapsamında üç farklı Geopolimer betonlar; % 95.0 F-tip uçucu küllü + % 5.0 silis dumanlı (95U5SF), % 35.0 yüksek fırın cürufu + % 60.0 F-tip uçucu küllü + % 5.0 silis dumanlı (35C60U5SF), ve % 85.0 yüksek fırın cürufu + % 10 F-tip uçucu kül + % 5.0 silis duman içeren (85C10U5SF) üretilmiştir. Bilindiği gibi beton numunelerin basınç dayanımı ile diğer eğilme, çekme vb. dayanımları arasında doğrusal bir ilişki vardır. Betonların basınç dayanımları arttığında betonun diğer mekanik özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenirken, basınç dayanımının azalması sonucunda da betonların diğer mekanik özelliklerinde de kötüleşme meydana gelecektir.

Bu çalışmadaki amaçlarımızdan birisi de üretilen 3 farklı Geopolimer betonların laboratuvar ortamında basınç dayanımının belirlenmesi dolayısıyla elde edilen basınç dayanımlarının yapılarda kullanılabilirliği araştırılmış olacaktır. Betonda durabilite basınç dayanımından sonra betonun performansını belirleyen en önemli parametreler arasındadır. Bu çalışmada üretilen 3 farklı Geopolimer beton numunelerinin % 5 sülfürik asit etkisiyle beton basınç dayanımlarında hangi oranlarda bir azalma meydana geleceği merak konusudur. Bilindiği gibi % 5 sülfürik asit, betonlar için en tehlikeli asit ortamlarından birisidir. Eğer bu zararlı

asit etkileri altında üretilen Geopolimer betonlarda oluşan basınç dayanımdaki kayıp standart Portland çimentolu betona eşit ya da yakın olduğu takdirde bu Geopolimer betonların yapıda kullanılabilirliği için önemli bir adım olacaktır.

Yapılmış olan bu tez çalışması kapsamında ise, 95U5SF, 35C60U5SF, ve 85C10U5SF Geopolimer betonu numunelerinden laboratuvar ve %5 sülfürik asitte 28, 56, ile 120 günlük Geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemetindeki değişimler belirlenip, Şekil 4.6 – 4.9’da gösterilmiştir. Şekil 4.6’da 95U5SF, 35C60U5SF ve 85C10U5SF Geopolimer betonların 56 günlük basınç mukavemetleri laboratuvar ortamında (asitte bekletilmemiş numuneler) ve % 5 sülfürik asit ortamında (56-A) gösterilmiştir. 95U5SF, 35C60U5SF ile 85C10U5SF Geopolimer betonların laboratuvar ortamında 56 günlük ortalama basınç mukavemetleri sıra ile 14.48 MPa, 21.87 MPa, ve 28.30 MPa olarak elde edilmiştir. 95U5SF, 35C60U5SF ile 85C10U5SF Geopolimer betonların % 5 sülfürik asit ortamındaki (28 gün laboratuvar ortamında + 28 gün asit ortamında) ortalama basınç mukavemetleri sıra ile 9.24 MPa, 14.41 MPa, ve 21.06 MPa olarak belirlenmiştir.

95U5SF, 35C60U5SF ve 85C10U5SF Geopolimer beton numunelerin 28 gün laboratuvar ortamından sonra 28 gün % 5 sülfürik asit çözeltisinde bekletilmesi sebebiyle ortalama basınç mukavemetlerindeki azalış sırası ile % 37, % 34, ve %26 olarak elde edilmiştir. Geopolimer betonların 28 günlük 5 % sülfürik asitte bekletilmesi nedeniyle en çok basınç mukavemetindeki azalma % 95 uçucu küllü + % 5 silis dumanlı Geopolimer betonlarında oluşurken, % 5 sülfürik asit etkisinden minimum etkilenen Geopolimer betonu numuneleri % 85.0 granule yüksek fırın cürufu + % 10.0 uçucu kül + % 5.0 silis dumanla üretilmiş olan Geopolimer betonu numuneleri olmuştur. % 35 yüksek fırın cürufu + % 60 F-tip uçucu kül + % 5.0 silis dumanı ile üretilmiş olan Geopolimer betonu numuneleri ise 28 günlük periyot sonucunda oluşan mukavemet kaybı % 34 olmuştur.

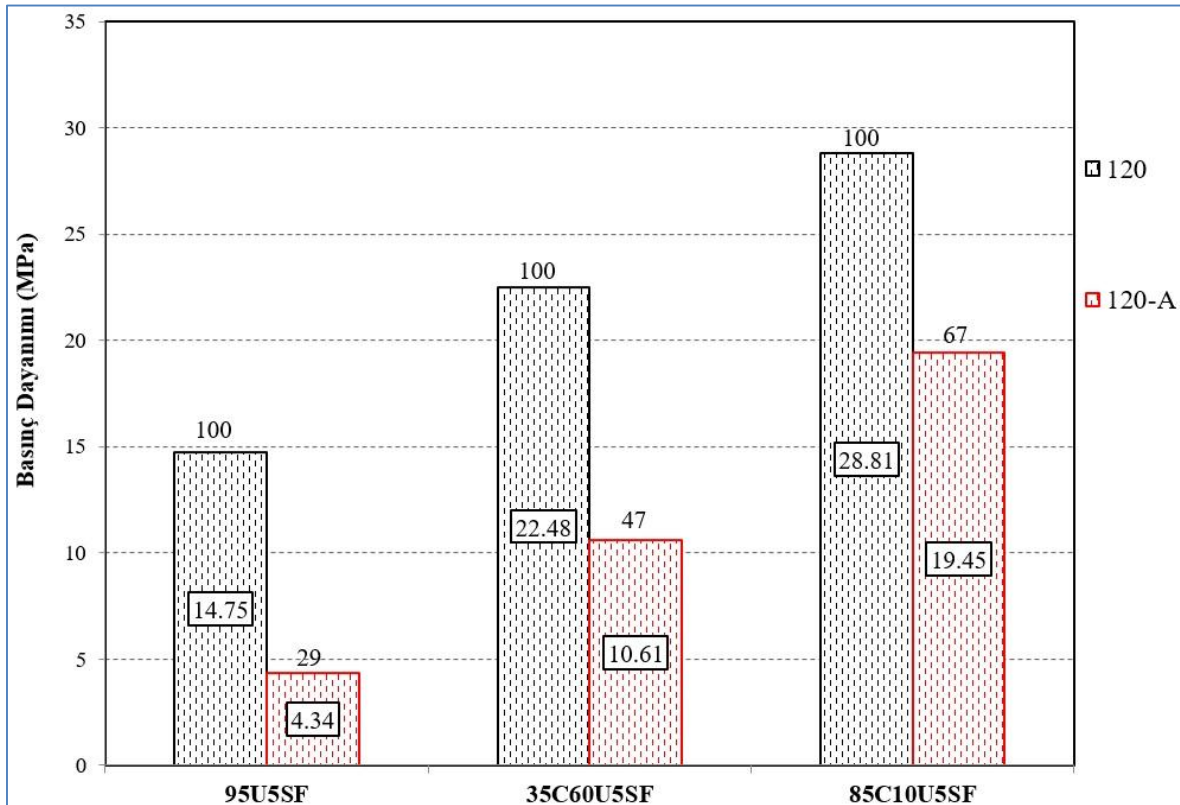


Şekil 4.6 Değişik ortamlardaki Geopolimer betonların 56 günlük basınç mukavemetleri

Şekil 4.7’de 95U5SF, 35C60U5SF ve 85C10U5SF Geopolimer betonların 120 günlük basınç mukavemetleri laboratuvar ortamında (asitte bekletilmemiş numuneler) ve % 5 sülfürik asit ortamında (120-A) gösterilmiştir. 95U5SF, 35C60U5SF ile 85C10U5SF Geopolimer betonların laboratuvar ortamında 120 günlük ortalama basınç mukavemetleri sıra ile 14.75 MPa, 22.48 MPa, ve 28.81 MPa olarak elde edilmiştir. 95U5SF, 35C60U5SF ile 85C10U5SF Geopolimer betonların % 5 sülfürik asit ortamındaki (28 gün laboratuvar ortamında + 92 gün asit ortamında) ortalama basınç mukavemetleri sıra ile 4.34 MPa, 10.61 MPa, ve 19.48 MPa olarak belirlenmiştir.

95U5SF, 35C60U5SF ve 85C10U5SF Geopolimer beton numunelerin 28 gün laboratuvar ortamından sonra 92 gün % 5 sülfürik asit çözeltisinde bekletilmesi sebebiyle ortalama basınç mukavemetlerindeki azalış sırası ile % 71, % 53, ve %33 olarak elde edilmiştir. Geopolimer betonların 92 günlük 5 % sülfürik asitte bekletilmesi nedeniyle en çok basınç mukavemetindeki azalma % 95 uçucu küllü + % 5 silis dumanlı Geopolimer betonlarında oluşurken, % 5 sülfürik asit etkisinden minimum etkilenen Geopolimer betonu numuneleri % 85.0 granule yüksek fırın cürufu + % 10.0 uçucu kül + % 5.0 silis duman ile üretilmiş

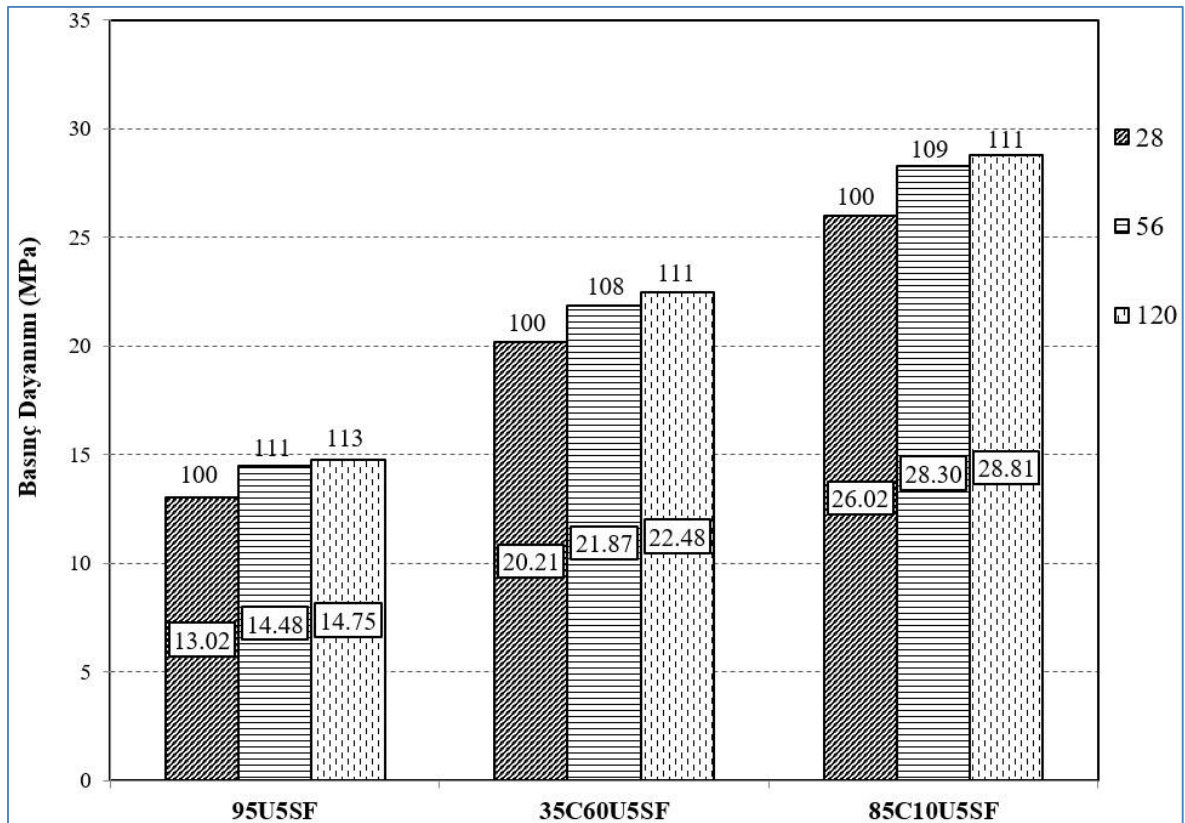
olan Geopolimer betonu numuneleri olmuştur. % 35.0 yüksek fırın cürufu + % 60.0 uçucu kül + % 5.0 silis duman ile üretilmiş olan Geopolimer betonu numuneleri ise 92 günlük periyot sonucunda oluşan mukavemet kaybı % 53 olmuştur. 95U5SF numuneleri 92 günlük sülfürik asitten çok fazla (% 71 dayanım kaybı) etkilenirken, 85C10U5SF numuneleri çok daha az (% 33 dayanım kaybı) etkilenmiştir. 35C60U5SF numunelerinde ise 92 gün sülfürik asitten sonra % 53 kayıp olmasından ötürü, bu betonlarında orta dereceli kimyasal durabilite direnci gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.7 Değişik ortamlardaki Geopolimer betonların 120 günlük basınç mukavemetleri

Şekil 4.8’de ise 95U5SF, 35C60U5SF ile 85C10U5SF Geopolimer betonların laboratuvarında (kontrol ortamı) 28, 56, ve 120 günlük basınç mukavemetlerinin zamana bağlı olarak değişimi belirtilmiştir. Elde edilen değerlere göre, 95U5SF Geopolimer betonların 28, 56, ve 120 günlük basınç mukavemetleri sırası ile 13.02 MPa, 14.48 MPa, ve 14.75 MPa olmuştur. 95U5SF Geopolimer betonların 56 ve 120 günlük basınç mukavemetlerindeki artma 28 günlük basınç mukavemetleri ile karşılaştırıldığında sırası ile % 11 ve % 13 olmuştur. 35C60U5SF Geopolimer betonların 28, 56, ve 120 günlük basınç mukavemetleri sırası ile 20.21 MPa, 21.87 MPa, ve 22.48 MPa olmuştur. 35C60U5SF Geopolimer betonların 56 ve 120 günlük basınç mukavemetlerindeki artma 28 günlük basınç

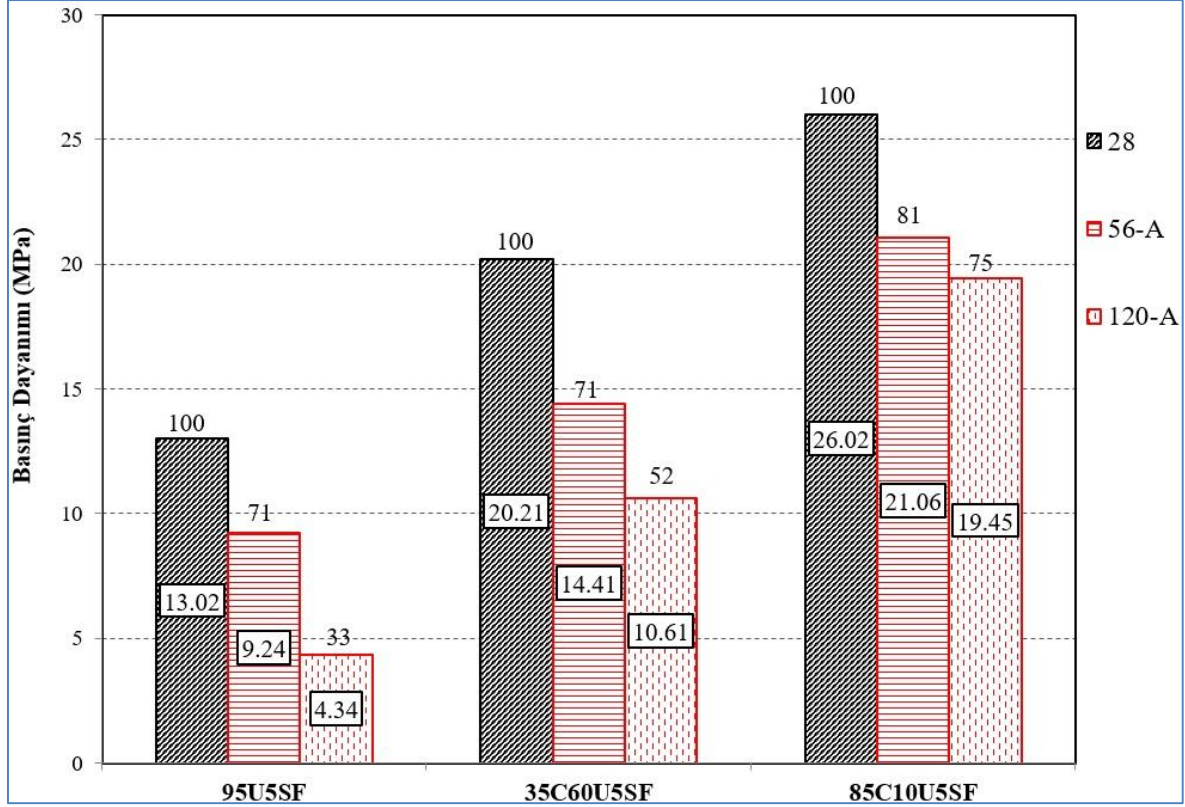
mukavemetleri ile karşılaştırıldığında sırası ile % 8 ve % 11 olmuştur. 85C10U5SF Geopolimer betonların 28, 56, ve 120 günlük basınç mukavemetleri sırası ile 26.02 MPa, 28.30 MPa, ve 28.81 MPa olmuştur. 85C10U5SF Geopolimer betonların 56 ve 120 günlük basınç mukavemetlerindeki artma 28 günlük basınç mukavemetleri ile karşılaştırıldığında sırası ile % 9 ve % 11 olmuştur. En yüksek basınç mukavemeti 85C10U5SF Geopolimer betonlarda 120 günlük numunelerde 28.81 MPa olarak elde edilirken, en düşük basınç mukavemeti ise 95U5SF Geopolimer betonlarda 28 günlük numunelerde 13.02 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.8 Normal hava şartlarındaki Geopolimer betonların basınç mukavemetleri

Şekil 4.9’de 56 ve 120 günlük Geopolimer betonların % 5 sülfürik asit ortamındaki Geopolimer betonların 28 günlük laboratuvar koşullarında bekletilmiş Geopolimer betonları ile beraber basınç mukavemet sonuçları gösterilmiştir. Elde edilen değerlere göre, 56 ve 120 günlük 95U5SF Geopolimer betonların basınç mukavemetleri 28 günlük laboratuvar ortamındaki basınç mukavemetine göre sırası ile % 29 ve % 67 azalmıştır. 56 ve 120 günlük 35C60U5SF Geopolimer betonların basınç mukavemetleri 28 günlük laboratuvar ortamındaki basınç mukavemetine göre sırası ile % 29 ve % 48 azalmıştır. 56 ve 120 günlük 85C10U5SF Geopolimer betonların basınç mukavemetleri 28 günlük laboratuvar

ortamındaki basınç mukavemetine göre sırası ile % 19 ve % 25 azalmıştır. 5% sülfürik asite maruz kalma sebebiyle maksimum azalış %95 uçucu kül içeren Geopolimer betonlarda, minimum azalış ise %85 cüruflu Geopolimer betonlarda gerçekleşmiştir. F-tipi uçucu küllerdeki geopolimerik reaksiyonu tamamlamış kül parçacıklarının geçirimsizliğe neden olduğundan dolayı, basınç mukavemetinde en fazla azalış olmuştur.



Şekil 4.9 Sülfürik asit ortamındaki Geopolimer betonların basınç mukavemetleri



## 5. SONUÇLAR

Yapılan bu tez kapsamındaki amacımız; üretimi esnasında büyük oranda enerjiye ihtiyaç duyan ve yüksek miktarda CO<sub>2</sub> salınımından ötürü yaşadığımız çevreyi kirleten Portland çimentosu yerine, çevreye çok daha duyarlı ve atık malzemelerden üretilebilen Geopolimer betonların yapılarda kullanılabilirliğinin araştırmaktır. Bu sebeple, atık malzemeler kullanılarak üç farklı Geopolimer betonlar; % 95 F-tip uçucu küllü + % 5 silis dumanlı (95U5SF), % 35 yüksek fırın cürufu + % 60 F-tipi uçucu küllü + % 5 silis dumanlı (35C60U5SF), ve % 85 yüksek fırın cürufu + % 10 F-tip uçucu kül + % 5 silis dumanı içeren (85C10U5SF) üretilmiştir. Üretilen 3 farklı Geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemeti ile kimyasal ( 5 % sülfirik asit) durabilite performansı 28, 56, ve 120 günlük numunelerde belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, üretilmiş olan 3 farklı Geopolimer beton numunelerin % 5 sülfirik asite maruz bırakılması sonucunda numunelerde görsel inceleme, ağırlık değişimi ve basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Geopolimer beton numunelerinin yüzey kısımları görsel bakımdan incelenirse, yüzeylerde oluşan maksimum bozulmanın 95U5SF (% 95 uçucu küllü + % 5 silis dumanlı) Geopolimer betonlarında, yüzeylerde meydana gelen minimum bozulmanın ise 85C10U5SF (% 85 cürufu + % 10 F-tipi uçucu küllü + % 5 silis dumanlı) Geopolimer betonlarda meydana gelmiştir. En fazla yüzeylerde meydana gelen bozulmanın uçucu kül içeren Geopolimer beton numunelerinde oluşmasının nedeni olarak geopolimerizasyona uğramamış uçucu küllü parçacıkların neden olmasından meydana gelmektedir. Bunun yanısıra, Geopolimer beton numunelerinde % 5 sülfirik asite maruz kalınması nedeniyle Geopolimer numunelerinde oluşan yüzey bozulmasının zamana bağlı olarak arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Tüm Geopolimer beton yüzeylerinde 120 gün sonunda oluşan yüzey bozulması, 56 gün sonunda oluşan yüzey bozulmasından daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.
- Geopolimer beton numunelerinde % 5 sülfirik asite maruz kalması sonucu meydana gelen numune ağırlıklarının azalma sonuçlarıyla Geopolimer beton numune yüzeylerinde meydana gelen bozulma sonuçları bir birlerine benzemektedir.

Geopolimer betonların 120 günlük ( 28 gün laboratuvar ortamı + 92 gün 5 % sülfurik sit ortamı) ağırlık değişimi sonuçlarına göre, 85C10U5SF Geopolimer betonlarında % 0.55 ağırlık azalması gözlemlenirken, 35C60U5SF Geopolimer betonlarında % 0.62 ve 9U5SF Geopolimer betonlarında % 2.58 ağırlık azalması gözlemlenmiştir. Geopolimer betonların 56 günlük ağırlık değişimi sonuçlarına bakıldığında ise, bütün Geopolimer beton numune ağırlıklarında artma meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak ise Geopolimer beton numunelerinde % 5 sülfurik asit çözeltisi emiliminden dolayı kaynaklanmaktadır.

- Geopolimer beton numunelerinin % 5 sülfurik asite maruz kalması nedeni ile basınç mukavemetlerindeki değişimler incelendiğinde, 5 % sülfurik asit etkisiyle Geopolimer beton numunelerinde oluşan basınç azalması maruz kalma süresine bağlı olarak artmaktadır. Yani 120 günlük Geopolimer beton numunelerde oluşan ağırlık azalması 56 güne göre daha fazladır.
- % 5 sülfurik asit etkisi dolayısıyla basınç mukavemetinde meydana gelen en çok azalmanın 120 günlük 95U5SF Geopolimer beton numunelerinde (% 71 azalış), sonrada 35C60U5SF Geopolimer beton numunelerinde (% 53 azalış), ve minimum basınç mukavemeti kaybı 85C10U5SF Geopolimer beton numunelerinde (% 33 azalış) meydana gelmiştir. Geopolimer betonların kimyasal etkilere karşı olan durabilitesi incelendiğinde, en iyi kimyasal durabilite performansına sahip olan betonun 85C10U5SF Geopolimer betonları olduğu, 35C60U5SF Geopolimer betonların kimyasal etkilere karşı orta derecede direnç gösterdiği, fakat 95U5SF Geopolimer beton numunelerinin % 5 sülfurik asite direnç gösteremediği sonuçlarına ulaşılmıştır. Yapılarda Portland çimentolu beton yerine kullanılabilirlik açısından, 35C60U5SF Geopolimer betonları ile 85C10U5SF Geopolimer betonların Portland çimentolu beton yerine kullanılabilceği ortaya çıkmaktadır.
- Geopolimer beton numunelerin laboratuvar ortamlarında (betonarme yapıların maruz kaldığı ortam) basınç mukavemetlerinin zamana bağlı değişimi olarak incelendiğinde, 95U5SF numunelerinin 28 ve 120 günlük zaman diliminde sıra ile yaklaşık 13 MPa ve 15 MPa basınç mukavemetine, 35C60U5SF numunelerinin 28 ve 120 günlük zaman diliminde sıra ile yaklaşık 20 MPa ve 22 MPa basınç mukavemetine, 85C10U5SF numunelerinin 28 ve 120 günlük zaman diliminde sıra ile yaklaşık 26

MPa ve 29 MPa basınç mukavemeti değerlerine ulaştığı ortaya çıkmıştır. Değişik çevre koşulları ortamlarında kullanılması bakımından değerlendirilmesi ele alındığında, standartlarca Portland çimento miktarı olarak kullanılması gereken en az bağlayıcı madde değerinin  $360 \text{ kg/m}^3$  olacak şekilde değerlendirilmeye alındığında, 35C60U5SF ile 85C10U5SF Geopolimer betonlarının, Portland çimentosu ile üretilen betonların yerlerine yapılarda kullanılması hem durabilite açısından hem de çevreye duyarlılık açısından daha uygun olacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] Statista. (2014). “United states and world cement production in 2010 and 2013.” Online. Available: <http://www.statista.com/statistics/219343/cementproduction-worldwide/> Swanepoel. (Erişim Tarihi: 30.11.2019)
- [2] V.M. Malhotra, Making concrete “greener” with fly ash, *Concr. Int.* 21 (1999) 61–66.
- [3] Motorwala, A., Shah, V., Kammula, R., Nannapaneni, P. & Raijiwala, D. (2008). “ALKALI Activated FLY-ASH Based Geopolymer Concrete,”
- [4] Sakulich, A. (2011). “Reinforced Geopolymer Composites for Enhanced Material Greenness and Durability,” *Sustainable Cities and Society*. 1(4)
- [5] G.L. Golewski, T. Sadowski, The fracture toughness the 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>. (Erişim Tarihi: 22.11.2019)
- [6] Alzeer, M. & MacKenzie, K.(2013). “Synthesis and Mechanical Properties of Novel Composites of Inorganic Polymers (Geopolymers) with Unidirectional Natural Flax Fibres (Phormium Tenax),” *Applied Clay Science*,76, 75–76.
- [7] Davidovits, J. (1994). “Properties of geopolymer cements on alkaline cements and concretes., ” *International conference*, 131–149.
- [8] Swamy, R. N. (1986). “Cement Replacement Materials, ” *Glasgow: Surrey University Press*, 3.
- [9] Davidovits, J.(2008). “Scientific tools, X-rays, FTIR, NMR. In J. Davidovits(ed) *Geopolymer. Chemistry and applications*, ” *Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France.*, 61–76.
- [10] Diaz E.I., Allouche E.N and Eklund S.(2010). “Factors affecting the suitability of fly ash as source materials for geopolymers., ” *Fuel*, 89, 992–996.
- [11] Vijai, K., Kumutha, R. and Vishnuram, B. G. (2010). “Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete, ”*International Journal of the Physical Sciences*, 5, 1419–1423.
- [12] J. Davidovits, D.C. Comrie, J. Paterson, D.J. Ritcey, *Geopolymeric concretes for environmental protection*, *ACI Concr. Int.* (1990) 30–40.
- [13] Wallah, S.E. and Rangan, B.V. (2006). “LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE: LONG-TERM By Faculty of Engineering Curtin University of Technology, ” *Research Report GC 2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.*
- [14] Rajesh, A. M, Joe, M. A. and Mammen, R. (2014). “Study of the Strength Geopolymer Concrete with Alkaline Solution of Varying Molarity, ”*engineeringcivil.com*,4,19–24.

- [15] Deb, P. S., Nath, P. and Sarker, P. K. (2014). “The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature” *Materials and Design*, **62**,32–39.
- [16] Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V.(2005). “Performance of Geopolymer Concrete Under Sulfate Exposure, ” Paper for Ed Nawy Symposium, American Concrete Institute.
- [17] Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). “Pozzolanic and Cementitious Materials, Gordon and breach publishers, advances in concrete” technology, ISSN1024-5038, **1.1**.
- [18] Sinan T. ERDOĞAN Teksas Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Austin, Teksas Prof.Dr. Turhan Y. ERDOĞAN Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ankara “Puzolanik minarel katkıları ve tarihi geçmişleri. ” 2. <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/3998.pdf> (Erişim Tarihi: 30.12.2019)
- [19] Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and applications* .2008 , Saint Quantin, France
- [20] Erdoğan, T.Y., “Atık Malzemelerin İnşaat Sektöründe Kullanımı-Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cüruf ve Kullanımı”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara,1995
- [21] Erdemir Ereğli Demir Çelik Fabrikası, Ar-Ge Müdürlüğü, 2008.
- [22] Atanur, A., *Yol Yapımında Yüksek Fırın Cürufu* , Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara 1983.
- [23] Douglas, E and Zebino, R. (1986). “Characterisation of Granulated and Pelletized Blast- furnace Slag” *Cement and Concrete Research*, retrieved from <http://www.sciencedirect.com>, **16**, 662–670.
- [24] Frearson, JPH. and Uren, JM. (1986). “Investigations of Ground Granulated Blast-furnace Slag Containing Merwinitic Crystallisation” *Second International Conference on Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Madrid, Spain., **2**.
- [25] Reeves, C.(1985). “The Use of Ground Granulated Blast-furnace Slag to Produce Durable Concrete.” *How to Make Today's Concrete Durable for Tomorrow*, Thomas Telford, London, May.
- [26] Erdoğan, Ş., Kurbetçi Ş., “Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426: 115-120 (2003).
- [27] Yeğınobalı, A., “Çimentoda yeni standartlar ve mineral katkıları”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426: 56-61 (2003).
- [28] Erdoğan, T.Y., “Beton”, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ.*, Ankara, (2003).

- [29] Eren Ö., Yılmaz, Z., “Değişik sıcaklıklarda kür edilen salt Portland çimentolu, yüksek fırın cürufu veya uçucu kül katkılı betonlarda dayanım gelişimi”, İMO Teknik Dergi, 23 (1): 3311-3322 (2004).
- [30] Morrison. R.E. (1970). "A Review of Ash Specifications." Symposium on Fly Ash Utilization, pp. 24-31. Pittsburgh.
- [31] Çana. B., Güleç. N., & Erler. A. (1997). "Kömür Yakıtlı Termik Santral lard akı Uçuu Kullerin Çevreye Etkisi". Genel değerlendirme. Selçuk Unv. Mûh-Mim. Fak. 20. Yıl Jeoloji Semp., IS1 -187. Konya.
- [32] Ecoba. (2001). Information Bulletin. Italy.
- [33] Yeğınobalı, A., 2003, Silis Dumanı Ve Çimento İle Betonda Kullanımı, TÇMB Yayını, No. Y01/01, 64 s
- [34] Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, N. ve Yerlikaya, M., 2004, Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton 2004 Hazır Beton Kongresi, 24-57
- [35] Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2010.
- [36] Yeğınobalı, A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB/ARGE/Y01.01, Ankara, 2002.
- [37] Yüzer, N., Aköz, F., Kızılkant, A. B., "Yüksek Dayanımlı Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisi" Türkiye İnşaat Mühendisliği 17. Teknik Kongre, 495-497, İstanbul, 2004.
- [38] Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M. ve Wong, Y.L., “Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal-and High-Strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures”, Cement and Concrete Research, No: 31, pp.1291-1300, 2001.
- [39] Davidovits, J., Geopolymer Chemistry and applications .2008 , Saint Quantin, France.
- [40] Kantarcı, F., 2013. Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [41] Temuujin, J. Van Riessen, A. Williams, R. (2009). “Influence of Calcium Compounds on the Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes” Journal of Hazardous Materials Journal of Hazardous Materials. **167**.
- [42] 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.

- [43] 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**.
- [44] Shi, C. and Qian, J. (1999). “High Performance Cementing Materials from Industrial Slags” *Resources, Conservation and Recycling*, 195–207.
- [45] Taylor, H. F. W. (2003). “Cement Chemistry, Second Edition” Published by Thomas Telford publishing, Thomas Telford services ltd, 1 Heron Quay, London E144JD.
- [46] Jiang W, Silsbee MR, Breval E, Roy MD.(1997). “Alkali-activated cementitious materials in chemically aggressive environments” In: Young JF, editor. *Mechanisms of chemically degradation of cement-based systems*. E and FN SPON (1997) London, **2**, 89–96.
- [47] Davidovits J, Comrie DC, Paterson JH, Ritcey DJ.(1990). “Geopolymeric concretes for environmental protection” *Concrete International: Design and Construction*, **12**,30–40.
- [48] 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.
- [49] E. Luga, and C. D. Atis, “Strength Properties of Slag/Fly Ash Blends Activated with Sodium Metasilicate and Sodium Hydroxide+ Silica Fume,” *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, vol. 60, no. 2, pp. 223, 2016.
- [50] A. Allahverdi, K. Mehrpour, and E. N. Kani, “Taftan pozzolan-based geopolymer cement,” *IUST International Journal of Engineering Science*, vol. 19, no. 3, pp. 1-5, 2008.
- [51] Hakkinen, T. (1987). “Durability of alkali-activated slag concrete” *Construction and Building Materials journal*, **6**, 81–94.
- [52] Bingöl, Ş., “Alkali İle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması”, *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, (2018)*.
- [53] Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications*, 3rd edition, St. Quinten, Institut Geopolymere, (2008).
- [54] Zeybek, O., "Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2009).
- [55] Gümüş, A., "Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, (2016).
- [56] Luga, E., "Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri", *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, (2015)*.
- [57] Xie, Z. and Xi, Y. (2001). “Hardening Mechanisms of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash” *Cement and Concrete Researc*, **31**, 1245–1249.

- [58] Divya, K., Chaudhary, R. (2007). “Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review” *Journal Materials Science*, **42**, 729–746.
- [59] Stanton, T.,E., “Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate”, *Proceedings, American Society of Civil Engineers*, Vol. 66, pp. 1781-1811, 1940.
- [60] Neville, A. M., “Properties of Concrete”, Longman Scientific & Technical, England, 155- 166, 1981.
- [61] Farny, J. A., Kosmatka, S. H., ”Betonda Alkali Agregre Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü”, Çeviren: Kalmış, M., Güngör, N., Eribol, S., American Concrete Pavement Association (ACPA), 1-26, 1998.
- [62] Ramachandran, V.S., *Concrete Admixture Handbook, Science and Technology*, Second Edition, USA, 1995.
- [63] Arslan, M., *Beton, Atlas Yayın Dağıtım Ltd. Şti.*, 1. Baskı, İstanbul, 2001.
- [64] Mangat, P. S. and Ojedokun, O. O. "Influence of curing on pore properties and strength of alkali activated mortars", *Construction and Building Materials*, 188, 337–348, (2018).
- [65] Barros, J. A. O and Cruz, J. S. (2001). “Fracture Energy of Steel FiberReinforced Concrete” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, **8**, 29–45.
- [66] 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.
- [67] Burciaga-Díaz, O., Gómez-Zamorano, L. Y. and Escalante-García, J. I. "Influence of the long term curing temperature on the hydration of alkaline binders of blast furnace slag-metakaolin”, *Construction and Building Materials*, 113, 917–926, (2016).
- [68] K. Anuar, A. Ridzuan, and S. Ismail, “Strength characteristics of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregate,” *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2011.
- [69] ] Kozul R, D. D. (1997). “Effects of aggregate type, size and content on concrete strength and fracture energy” *Technical report SM 43*. Lawrence, KS: The University of Kansas Research Inc.
- [70] Carpinteri A, B. R.(2010). “Fracture behavior of plain and fibre-reinforced concrete with different water content under mixed mode loading., ”*Mater Des*, 32–42.



## ÖZGEÇMİŞ



### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Uğur KEKLİK  
Uyruğu : T.C  
Doğum Tarihi ve Yeri : 1991 Malatya  
Medeni Hali : Evli  
Telefon : 0 531 955 99 50  
Faks : -  
E-Mail : ugurkeklik@ hotmail.com

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İ.G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnş. Müh.A.B.D.	
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Bahçeşehir Atatürk Anadolu Lisesi	2009

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görevi
2015-2016	Bardo İnşaat	Şantiye Şefi
2016-	Hüseyin Koçer İnşaat	Proje Müdürü

### Yabancı Dil

İngilizce