

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**DENİZ SUYUNUN FARKLI BAĞLAYICI**  
**MİKTARLARINA SAHİP UÇUCU KÜLLÜ VE YÜKSEK**  
**FIRIN CÜRUFU GEOPOLİMER BETONLARA ETKİSİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Yunus Emre OLCAY**

Danışman

Doç. Dr. Anıl NİŞ

**İstanbul - 2022**



## TEZ TANITIM FORMU

**Yazar Adı Soyadı** : Yunus Emre Olcay

**Tezin Dili** : Türkçe

**Tezin Adı** : Deniz Suyunun Farklı Bağlayıcı Miktarlarına Sahip Uçucu Küllü ve Yüksek Fırın Cürüflü Geopolimer Betonlara Etkisi

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

**Anabilim Dalı** : İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Tezin Türü** : Yüksek Lisans

**Tezin Tarihi** : 16.06.2022

**Sayfa Sayısı** : 86

**Tez** : Doç. Dr. Anıl NİŞ

**Danışmanları**

**Dizin Terimleri** : Geopolimer beton, Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, Uçucu kül

**Türkçe Özet** : Çimento üretimi esnasında atmosfere salınan karbondioksit miktarını azaltmak amacıyla geopolimer beton kullanımı arttırılmalıdır. Geopolimer betonlar hem ekonomik olmaları hem de çevreci olmaları sebebiyle birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu tez kapsamında farklı geopolimer beton üretimleri gerçekleştirilmiş olup üretilen betonlar üzerinde dayanım ve durabilite araştırmaları yapılmıştır.

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

*İmzası*

*Yunus Emre OLCAY*

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**DENİZ SUYUNUN FARKLI BAĞLAYICI**  
**MİKTARLARINA SAHİP UÇUCU KÜLLÜ VE YÜKSEK**  
**FIRIN CÜRUFU GEOPOLİMER BETONLARA ETKİSİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Yunus Emre OLCAY**

Danışman

Doç. Dr. Anıl NİŞ

**İstanbul - 2022**

## **BEYAN**

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

Yunus Emre OLCA Y

.../.../2022



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

Yunus Emre OLCAY'ın "Deniz Suyunun Farklı Bağlayıcı Miktarlarına Sahip Uçucu Küllü Ve Yüksek Fırın Cürüflü Geopolimer Betonlara Etkisi" adlı tez çalışması, jüri tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

*Prof. Dr. Orhan CANPOLAT*

Üye

*Doç. Dr. Anıl NİŞ*  
(Danışman)

Üye

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

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 20..

*İmzası*

*Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ*

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Beton tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de en çok kullanılan yapı malzemelerinin başında yer alır. Beton genel anlamıyla su, çimento, agrega ve gerektiği zaman gerektiği kadar katkı maddesi kullanılarak üretilir. Çimento üretimi esnasında atmosfere fazlasıyla karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı gerçekleşir. Atmosfere salınan bu karbondioksit (CO<sub>2</sub>) çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Çimentonun atmosfere verdiği zararı engellemek için çimento kullanımını azaltmak ve minimuma indirmek gerekir. Bu sebepten ötürü geopolimer beton üretimi ve yapıların inşasında kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Geopolimer betonlarda bağlayıcı olarak mineral katkı maddeleri ve bunları aktifleştirmek için de kimyasal katkı maddeleri kullanılır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, volkanik tüf vb. puzolanlar atık malzemelerdir. Bu atık malzemeler bağlayıcı olarak kullanıldığında depolama alanı problemi de ortadan kalkmış olur. Sürdürülebilir malzemeler kullanılarak üretilen geopolimer betonlar hem çevreci hem de ekonomik oldukları için tercih edilebilecek bir beton çeşididir. Bu sebeple araştırmacılar geopolimer betonlar üzerinde dayanım ve durabilite çalışmaları yapmaya devam etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında çimento yerine bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için farklı oranlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların deniz suyu etkisindeki dayanım ve dayanıklılığı incelenmiştir. Deneysel olarak üretilen (FA100-400, FA100-500, FA100-600) betonlar ile %25 yüksek fırın cürufu ve %75 uçucu kül kullanılarak üretilen (S25FA75-400, S25FA75-500 ve S25FA75-600) betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlarda iki farklı alkali aktivatör /bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Bu oranlar 0,45 ve 0,55'dir. Ayrıca sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2,5 olarak kullanılmıştır. Üretimi tamamlanan numuneler 88 gün boyunca ortam kütüne tabii tutulmuş ve son iki gün ise 48 saat 70°C fırın kütüne tabii tutulmuştur. Daha sonra numunelerin bir kısmı tuzlu suya maruz bırakılmadan basınç deneylerine tabii tutulurken, diğer bir kısmı ise %3,5 NaCl içeren çözeltide 365 gün (1 yıl) bekletilmiştir. 365 gün sonunda tuzlu sudan çıkarılan numuneler fotoğflanmış, ağırlıkları ölçülmüş ve dayanım testlerine tabii tutulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer Beton, Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Alkali Aktivatör, Deniz Suyu

## SUMMARY

Concrete is one of the most used building materials in our country as well as all over the world. Concrete is generally produced by using water, cement, aggregate and additives when necessary. During cement production, excessive carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is released into the atmosphere. This carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) released into the atmosphere causes environmental pollution. In order to prevent the damage of cement to the atmosphere, it is necessary to reduce cement utilization. For this reason, the production and use of geopolymer concrete should be expanded for structural applications. Mineral additives are used as binders in geopolymer concretes and chemical additives are used to activate them. Fly ash, blast furnace slag, volcanic tuff etc. type of pozzolanas are waste materials. When these waste materials are used as binders, the storage area problem is also eliminated. Geopolymer concretes produced using sustainable materials are a frequently preferred concrete type because they are both environmentally friendly and economical. For this reason, researchers continue to work on geopolymer concretes. Within the scope of this thesis, the strength and durability of geopolymer concretes produced by using fly ash and blast furnace slag in order to show binding properties instead of cement under the influence of sea water were investigated. In the experiments, concretes produced using 100% fly ash (FA100-400, FA100-500, FA100-600) and concretes produced using 25% blast furnace slag and 75% fly ash (S25FA75-400, S25FA75-500 and S25FA75-600) were produced. Two different alkali activator/binder ratios were used in the produced concretes. These ratios are 0,45 and 0,55. In addition, the sodium silicate/sodium hydroxide ratio was used as 2.5. The produced samples were left in an ambient environment for 88 days, and then heat curing applied on specimen with 70°C at 48h. Then, compressive strength tests were executed on some of the samples, while remaining specimens were put in 3.5% NaCl environment for 365 days (one year). At the end of 365 days, the samples removed from the seawater were photographed, their weights were measured and they were subjected to mechanical strength tests.

**Key Words:** Geopolymer Concrete, Ground granulated blast Furnace Slag, Fly Ash, Alkaline Activators, Seawater



# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
SUMMARY .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
GİRİŞ .....	1

## BİRİNCİ BÖLÜM

1.1. Araştırmanın Önemi.....	3
1.2. Araştırmanın Amacı.....	4
1.3. Tezin Ana Hattı .....	4

## İKİNCİ BÖLÜM

### GEPOLİMER BETONUN BİLEŞENLERİ

2.1. Agrega .....	5
2.2. Uçucu Kül.....	6
2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı.....	7
2.3. Yüksek Fırın Cürufu.....	9
2.3.1. Betonda yüksek fırın cürufu kullanımı.....	9
2.4. Alkali Aktivatörler.....	11
2.5. Geopolimer Beton Özellikleri .....	12
2.6. Geopolimer Betonun Kimyasal Etkileri .....	14
2.7. Geopolimer Betonun Durabilitesini Etkileyen Faktörler.....	15
2.7.1. Betonda büzülme .....	15
2.7.2. Aşınma.....	15
2.7.3. Isıya karşı dayanıklılığı .....	16
2.7.4. Alkali - Silika reaksiyonları.....	16
2.7.5. Asit etkisi.....	17
2.8. Geopolimer Betonda Dayanımı Etkileyen Faktörler .....	18
2.8.1. Geopolimer betonlarda su miktarı .....	18
2.8.2. Kür süresi ve sıcaklık .....	18
2.8.3. SiO <sub>2</sub> / Na <sub>2</sub> O oranı .....	19
2.8.4. Donma - Çözülmenin olayları .....	19
2.8.5. Alkali aktivatör kullanımı.....	19

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Geopolimer Beton Malzemeleri .....	21
3.1.1. Agrega .....	21
3.1.2. Yüksek fırın cürufu.....	22
3.1.3. F-tipi uçucu kül.....	23
3.1.4. Alkali aktivatörler.....	24

3.1.5. Kimyasal katkı maddesi .....	26
3.2. Deneysel Metot.....	27
3.2.1. Numune kalıpları .....	27
3.2.2. Alkali solüsyon hazırlığı.....	28
3.2.3. Karışım hazırlığı.....	29
3.2.4. Geopolimer betonun üretimi.....	36
3.2.5. Kür işlemi .....	37
3.2.6. Tuzlu su çözeltisi .....	38
3.2.7. Ağırlıktaki değişim.....	39
3.2.8. Basınç mukavemetinin belirlenmesi.....	40

## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM BULGULAR VE TARTIŞMA**

4.1. Görsel İncelemeler.....	43
4.2. Ağırlıklardaki Değişimler.....	47
4.3. Basınç Dayanımı Değişimleri.....	52
<b>SONUÇ.....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>66</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
°C	Santigrad
MPa	Megapaskal
M	Molar
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Sodyum Silikat
C	Karbon
CaO	Kalsiyum oksit
H	Hidrojen
SiO <sub>2</sub>	Silisyum Dioksit
Na <sub>2</sub> O	Sodyum Oksit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir (II) Oksit
Ca	Kalsiyum
Si	Silisyum
NaCl	Tuz

**Kısaltmalar****Açıklamalar****OPC**

Normal Portland Çimento

**AS**

Alkali Solüsyon

**BM**

Bağlayıcı Miktarı

**AAEB**

Alkali Aktive Edilmiş Beton

**FA100**

%100 Uçucu kül

**S25FA75**

%25 Yüksek fırın cürufu, %75 uçucu kül



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge3. 1. Deneyde kullanılmış agregaların özellikleri.....	22
Çizelge3. 2. Deneylerde kullanılmış öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu özellikleri.....	23
Çizelge3. 3. Deneylerde kullanılmış F-tipi kül özellikleri.....	24
Çizelge3. 4. Deneylerde kullanılmış sodyum silikat ( $Na_2SiO_3$ ) özellikleri.....	26
Çizelge3. 5. Deneylerde kullanılmış süper akışkanlaştırıcı özellikleri.....	27
Çizelge3. 6. FA100-400-0.45 numunelerinin reçetesi.....	30
Çizelge3. 7. FA100-400-0.55 numunelerinin reçetesi.....	30
Çizelge3. 8. FA100-500-0.45 numunelerinin reçetesi.....	31
Çizelge3. 9. FA100-500-0.55 numunelerinin reçetesi.....	31
Çizelge3. 10. FA100-600-0.45 numunelerinin reçetesi.....	32
Çizelge3. 11. FA100-600-0.55 numunelerinin reçetesi.....	32
Çizelge3. 12. S25FA75-400-0.45 numunelerinin reçetesi.....	33
Çizelge3. 13. S25FA75-400-0.55 numunelerinin reçetesi.....	33
Çizelge3. 14. S25FA75-500-0.45 numunelerinin reçetesi.....	34
Çizelge3. 15. S25FA75-500-0.55 numunelerinin reçetesi.....	34
Çizelge3. 16. S25FA75-600-0.45 numunelerinin reçetesi.....	35
Çizelge3. 17. S25FA75-600-0.55 numunelerinin reçetesi.....	35

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil2. 1. Uçucu külün alkali aktivasyonu .....	12
Şekil3. 1. Deneylede kullanılmış iri agrega.....	21
Şekil3. 2. Deneylede kullanılmış öğütölmüş granöle yüksek fırın cürufu.....	22
Şekil3. 3. Deneylede kullanılmış F-tipi kül.....	24
Şekil3. 4. Deneylede kullanılmış sodyum hidroksit (NaOH).....	25
Şekil3. 5. Deneylede kullanılmış süper akışkanlaştırıcı .....	26
Şekil3. 6. Deneylede kullanılmış küp beton kalıpları.....	28
Şekil3. 7. Deneylede kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) ve H <sub>2</sub> O.....	29
Şekil3. 8. Geopolimer betonun üretim aşaması.....	37
Şekil3. 9. Beton küp örneklelerinin %3,5 NaCl çözeltilerinde bekletilmesi ve çıkarılması .....	39
Şekil3. 10. Geopolimer küp örneklelerinin ağırlığının ölçümü .....	40
Şekil3. 11. Geopolimer küp beton örneklelerinin basınç mukavemetlelerinin ölçümü .....	41
Şekil4. 1. 365 gün(1 yıl) %3,5 NaCl çözeltilisine maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin görsel değişimlelerinin incelenmesi.....	46
Şekil4. 2. FA100-400-0,45, FA100-500-0,45 ve FA100-600-0,45 numunelerin ağırlık değişimi sonuçları.....	47
Şekil4. 3. FA100-400-0,55, FA100-500-0,55 ve FA100-600-0,55 numunelerin ağırlık değişimi sonuçları.....	48
Şekil4. 4. S25FA75-400-0,45, S25FA75-500-0,45 ve S25FA75-600-0,45 numunelerin ağırlık değişimi sonuçları.....	49
Şekil4. 5. S25FA75-400-0,55, S25FA75-500-0,55 ve S25FA75-600-0,55 numunelerin ağırlık değişimi sonuçları.....	50
Şekil4. 6. %100 uçucu kül içeren FA100 numunelerin ağırlık değişimi sonuçları .....	51
Şekil4. 7. %75 uçucu kül %25 yüksek fırın cüruf içeren S25FA75 numunelerin ağırlık değişimi sonuçları.....	52
Şekil4. 8. FA100 numunelerin ağırlık değişimi sonuçları.....	54
Şekil4. 9. S25FA75 numunelerin ağırlık değişimi sonuçları .....	56
Şekil4. 10. FA100 numunelerin basınç dayanımı sonuçları .....	58
Şekil4. 11. S25FA75 numunelerin basınç dayanımı sonuçları.....	58

## ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım ve tezimin deney süresince bana maddi manevi her türlü imkânı sağlayan İstanbul Gelişim Üniversitesi ve hocalarına teşekkürlerimi sunarım. Özellikle çalışmalarım boyunca ve tezimin her aşamasında bana her türlü desteği sunan danışman hocam Doç. Dr. Anıl NİŞ' e ve Serdar AKYILDIRIM' a ve kuzenim Said Nur OLCAY 'a çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana sonsuz destek veren ve yol göstericim olan babam Mehmet Şirin OLCAY ve her koşulda yanımda olan ve sevgisini esirgemeyen annem Filiz OLCAY' a teşekkürlerimi sunarım. Bana her türlü desteği veren ve her zaman yanımda olan çok değerli meslektaşım ve eşim Nursena ÖZBEY OLCAY' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## GİRİŞ

Beton; temel olarak çimento, su ve agreganın belirli oranlarda karıştırılması sonucu elde edilen yapı malzemesine verilen isimdir. Beton üretiminde genellikle dünyada bağlayıcı olarak Normal Portland Çimentosu(OPC) kullanılır. Çimentonun ülkemizde yerel kaynaklarla üretilebilmesi ve üretiminin yaygınlaşmasından ötürü çimento kullanımı ülkemizde yaygındır. Çimento üretimine baktığımızda 2013 yılında yaklaşık 4 milyar ton çimento üretimi olduğunu görmekteyiz. (KEKLİK, 2020)

Önümüzdeki 10 yıl içerisinde ise çimentoların yıllık üretim miktarlarında %26 oranında artış olması öngörülmektedir. Artan nüfus oranı ve yaşlı popülasyonun daha fazla olmasından ötürü konut ihtiyacına olan talebin artacağı açıktır. Günümüzde ve sonraki yıllarda küresel ısınmanın etkilerinin daha şiddetli olacağı ve dünya çapında bir sorun haline gelen CO<sub>2</sub> salınımının %8' inin çimento üretimi esnasında ortaya çıktığı görülmektedir. (Malhotra V. , 1999)

Atmosfere bırakılan CO<sub>2</sub> gazı sera etkisine ve çevre kirliliğine neden olur. Çimento üretiminden dolayı salınan CO<sub>2</sub> miktarı da çevre kirliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Beton üretiminden kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımını azaltmak için OPC yerine çimentoya alternatif bağlayıcı özellik gösteren yapı malzemesi arayışı olmuştur. Betonun durabilitesi ile mekanik performansını arttırmak amacıyla yapılan çalışmaların bu yeni yapı malzemeleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir (G.L. Golewski, 2017)

Çimentosuz beton olarak bilinen geopolimer betonlar üretilirken atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı Normal Portland Çimentosu (OPC) kullanılarak üretilen betona kıyasla yaklaşık %80 oranında azalmıştır. Bu sebeple geopolimer betonlar geleneksel betonlara göre daha çevreci betonlardır. (Davidovits, Properties of geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes, 1994)

Geopolimer betonda bağlayıcılığı öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi puzolanlar sağlar. Bu puzolanları aktifleştirmek için ise sodyum silikat (  $Na_2SiO_3$  ) ve sodyum hidroksit (  $NaOH$  ) alkali kullanılmıştır. (FrankCollins, 2001). Bunların yansıra potasyum silikat ve potasyum hidroksit alkali aktivatörleri de mevcuttur. Fakat sodyum bazlı alkali aktivatörler potasyum bazlılardan daha ucuz olduğu için birçok çalışmada sodyum bazlı alkali aktivatörler kullanılmaktadır.



Mineral katkı maddeleri yani puzolanlar betonda tek başına kullanıldığında düşük bağlayıcılık özelliği gösterirken çimento ile birlikte kullanıldığında yüksek oranda bağlayıcılık özelliği gösterir. Çimento suyla tepkimeye girdiğinde kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelleri ve  $\text{Ca(OH)}_2$  oluşur. Betona bağlayıcılığı C-S-H jelleri kazandırır. Puzolanların içinde bulunan silikatlar ( $\text{SiO}_2$ ) çimentonun suyla tepkimesi sonucu açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile tepkimeye girer ve C-S-H jelleri oluşur. (ÖZBEY, 2021)

Davidovits' un yönetmiş olduğu ve 1978 yılında yapılmış olan çalışmalar ile geopolimer bağlayıcıların mühendislik alanlarında kullanımına başlanmıştır. Geleneksel beton gibi yapı malzemelerine kıyasla çok daha çevreci olan geopolimer betonların aside karşı dirençleri ve dayanıklılıkları geleneksel betonlarla hemen hemen eşit seviyeye gelmiştir. Yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül gibi atık malzemeler geopolimer betonlara bağlayıcılık özelliği kazandırır. Bu bağlayıcılık özelliği su yerine sodyum bazlı alkali aktivatörlerle olmaktadır. Günümüz şartlarına baktığımızda uçucu kütle üretilen geopolimer betonun maliyeti geleneksel betonlara göre daha düşüktür (thokchom s, 2009). Uçucu küllerin atık olarak elde edilmesinden dolayı bu atıkların bir yere atılması veya gömülmesi hem çevre açısından hem de hem de hayvan ve insan sağlığı açısından büyük risk oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu küllerin beton içerisinde kullanımı çok faydalı olacaktır.

## BİRİNCİ BÖLÜM

Geopolimerlerin mineraloji, kimya, jeoloji ile diğer mühendislik dalları gibi birçok araştırma alanı olduğunu görmekteyiz. Geopolimer betonların kullanım alanları oldukça fazladır. Mimaride kullanılan taşlı yapılarda, atık su tünellerinde ve düşük enerjili seramikler gibi çeşitli alanlarda geopolimer beton kullanımı görülmektedir. Atık malzemeler değerlendirilerek üretilen bir malzeme olması çevreci bir yapı malzemesi olduğunu gösterir. Ayrıca yangına karşı oldukça dayanıklı bir malzeme olması da geopolimerlerin tercih sebeplerinden birisidir. (davidovits, 2013)

Yapı malzemelerinde aranan en önemli özelliklerden biri de dayanıklılık ve iyi mukavemete sahip olmasıdır. Portland çimentosunun göstermiş olduğu dayanımın yüksek olmasına rağmen şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalarda sülfat ve asit saldırıları gibi zorlu çevresel koşullara karşı göstermiş olduğu performans zayıftır ve yüksek sıcaklığa karşı dayanımı da çok iyi değildir. Geopolimer betonda özellikle uzun süreli dayanıklılık konusunda az sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Davidovits ile diğer araştırmacılar kimyasal saldırılar karşısında numunelerdeki kütle kaybı konularını incelediler. Ürettikleri beton numunelerinde %95 ile %79 oranlarında kütle kaybı olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca 28 gün süre ile hidroklorik asit ile sülfirik aside maruz kalma aşamasında %7 ile %6 kütle kaybı olduğu görülmektedir. (Joseph Davidovits, 1990)

Bilim insanları yüksek termal kararlılık, iyi derecede asit direnci, iyi derecede mekanik özellikler ile düşük CO<sub>2</sub> emisyonu gibi avantajlar nedeni ile geopolimer beton kullanımını gerekli bulmuş ve önermişlerdir. (Malhotra V. M., 1996)

### 1.1. Araştırmanın Önemi

Atmosfere salınmış olan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) miktarlarını azaltmak amacıyla Normal Portland Çimentosu (OPC) kullanılarak üretilmekte olan geleneksel betonların yerlerine bu çalışmada yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi atık malzemeler ile üretilen geopolimer betonlar kullanılmıştır. Ekonomik olması ve çevre dostu olması sebebiyle geopolimer beton kullanımının yapılarda kullanımının artması istenmektedir. Yapılan çalışmalarda üretilen geopolimer betonlarda farklı miktarlarda bağlayıcı ve alkali solüsyonlar kullanılmıştır. Farklı reçeteler kullanılarak üretilen geopolimer beton numuneleri farklı kür koşullarına maruz bırakıldıktan sonra %3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakılıp dayanım ve durabilite performansı incelenmiştir.

## 1.2. Araştırmanın Amacı

Günümüzde geleneksel betonlarda kullanılan çimentonun çevreye verdiği zararı azaltmak için beton üretiminde kullanılacak alternatif bağlayıcı malzeme ihtiyacı söz konusu olmuştur. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi puzolanik malzemeler betonda bağlayıcı olarak kullanılabilir. Bu malzemeleri betonda kullanmak hem ekonomik sebepten hem de sürdürülebilir malzeme olması sebebiyle tercih edilir. Çimentosuz beton olarak da bilinen geopolimer betonlarda bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi puzolan malzemeleri aktifleştirmek için alkali aktivatörler kullanılır. Geopolimer betondan beklenen geleneksel betonlarda olduğu gibi yüksek mukavemet ve dayanımdır. Ayrıca hizmet ömrünün yani dayanıklılığının fazla olmasıdır. Bu çalışmadaki amaç geopolimer betonların yapıların inşasında kullanımını yaygınlaştırmak ve bunun için gerekli olan standardizasyon çalışmalarına katkı sağlamaktır. Bu amaçla geopolimer betonların hem mekanik hem de deniz suyu etkisinde durabilite performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır.

## 1.3. Tezin Ana Hattı

1. Bölüm, Özet: Tezin amacı ve özetinin anlatıldığı bölümdür.
2. Bölüm, Literatür Taraması ile Geçmiş: Geopolimer beton hakkında önceden yapılan araştırmalardan yararlanılıp literatür taramaları yapılmıştır. Ayrıca ürettiğimiz geopolimer betonlarda kullandığımız yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi bağlayıcı malzemeler ile bu malzemelerin aktive edildiği alkali aktivatörler (sodyum silikat (  $Na_2SiO_3$  ) ve sodyum hidroksit (  $NaOH$  )) hakkında bilgiler verilmektedir.
3. Bölüm, Deneysel Çalışma: Üretimi yapılan geopolimer betonların karışımları, kullanılan malzemeleri, beton numunelerine uygulanan kür metodu, geopolimer betonun dökümü ile uygulanan test yöntemleri anlatılmaktadır.
4. Bölüm, Test Sonuçları ile Tartışmalar: Yapılmış olan deney sonuçlarına göre numunelerin ağırlıkları, görselleri ile basınç dayanımlarının değerlerinde meydana gelen değişimlerin karşılaştırılması yapılmıştır.
5. Bölüm, Sonuçlar: Tezin sonuç kısımlarına yer verilen bölümdür.

# İKİNCİ BÖLÜM

## GEOPOLİMER BETONUN BİLEŞENLERİ

### 2.1. Agregalar

Beton üretiminde kullanılan mineral kökenli malzemelere agregalar denir. Genellikle betonda kum, çakıl ve kırma taş olarak kullanılırlar. Agregalar betonda hacimsel olarak %58 ile %76 oranlarında bulunurlar. (Alp, 2014)

Normal agregalar iri agregalar ve ince agregalar olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılırlar. Ağır beton üretiminde ağır agregalar kullanılırken hafif beton üretiminde hafif agregalar kullanılır. Bu iki beton türü dışında kalan geleneksel beton üretiminde ise normal agregalar kullanılır. Normal agregaların fırın kurusunda tane yoğunlukları  $2000 \text{ kg/m}^3$ -  $3000 \text{ kg/m}^3$  aralığındadır. 4 mm açıklığı olan ve kare eleklerden geçmeyen agregalar iri agregalar olarak adlandırılırken 4 mm açıklıklı kare eleklerden geçen agregalar ince agregalar olarak adlandırılır. (Doğangün, 2018)

Agregalar maliyet açısından çimentoya göre oldukça ekonomik olan yapı malzemeleridir. Bu sebeple betonda dolgu malzemesi olarak kullanılırlar. Doğada kolaylıkla bulunup temin edilebildiği için de tercih sebebidir. Agregaların tercih sebebi sadece ekonomik olduğu için değildir. Betonun çevreye karşı direncini, dayanıklılığını arttırıp hacim sabitliğini koruduğu için beton üretiminde sık kullanılan bir yapı malzemesidir. (Neville A. , 1975)

Agregaların dağılımı (granülometrileri) genel olarak beton harcından en ekonomik ve en verimli biçimde yararlanılacak şekilde olmalıdır. Ayrıca agregalar beton içerisindeki suyun da etkisiyle yumuşamamalı, dağılmamalı ve ezilmemelidir. Agregalar çimento ile bir araya geldiklerinde çimentonun bağlayıcılığına zarar vermemeli ve çimento ile birlikte zararlı reaksiyonlar (alkali-silika reaksiyonu vb.) oluşturmamalıdır. Betonarmelerde kullanıldıklarında donatıyı korozyona uğratmamalıdır ve agregaların içerisinde zararlı kimyasallar ve kil bulunmamalıdır. (Köken, Köroğlu, & Yonar, 2008)

Agregalar beton karışımında kullanılırken su emme oranları göz önüne alınır. Su emme oranı beton için oldukça önemlidir. Betonun dayanımını etkilediği gibi mekanik ve fiziksel özelliklerini de doğrudan etkiler. Agregaların su emme ihtiyacı arttıkça

karişıma ilave edilecek su miktarı da artar bu da betonun basınç mukavemetini azaltır. Ayrıca su emme kapasitesi fazla olan agregalar kullanıldığında betonun işlenebilirliği de olumsuz etkilenir. Bu sebepten ötürü geopolimer betonların üretiminde agregaların su emme oranlarının belirlenmesi çok önemlidir. Yüksek su emme kapasiteli agregalar kullanıldığında işlenebilirlik azalırken düşük su emme kapasiteli agregalar kullanıldığında ise betonda işlenebilirlik artar. (Kawakami, 1992). Agregaların yerel olarak temininin zor olduğu durumlarda ise yapay agrega veya geri dönüştürülmüş agrega kullanımı da mümkün olabilir. Fakat özellikle yapay agregaların üretilmesi için zaman ve iş gücü gerekmektedir. Geri dönüştürülmüş agregalarda ise problem genellikle agrega parçacıkları arasındaki çimento hamuru olmaktadır. Bunların agregalardan temizlenmesi biraz zor ve zahmetli bir iştir.

## 2.2. Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerin bacalarında biriken atık bir malzemedir. Termik santrallerde kullanılan linyit kömürün %20-%50' si kül olurken taş kömürün %10-%15' i kül olarak ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu küllerin %75-%85' i termik santralin bacasından gazlarla birlikte çıkar. Bu küller uçucu küllerdir ve bu külleri tutabilmek için genellikle elektrofiltreler kullanılır. Bu filtreler sayesinde tutulan uçucu küller silolara yerleştirilip depolanır. (Krivenko, 1994) Ülkemizde 1 yılda 45 milyon ton civarlarında kömür yakılmakta ve bunların sonuçlarında 15 milyon ton civarlarında uçucu kül açığa çıktığı görülmektedir. (Güler, Güler, İpekoğlu, & Mordoğan, 2005)

Üretilen uçucu küllerin %25' i inşaat, tarım ve kimya sektöründe kullanılırken geri kalan %75' i ise atık malzeme olarak imha edilir. Uçucu kül kullanımı yaygın olan sektör inşaat sektörüdür. İnşaat sektöründe uçucu kül gaz beton üretiminde, tuğla üretiminde, katkılı beton ve çimento üretiminde dolgularda ve zemin stabilizasyonlarında kullanılır. (Tangüler, P, & Ç, 2015) Bu kullanılmayıp atılan %75'lik kısmın belirli kısmını beton içerisinde kullanımını sağlayabilirsek ülkemiz için çok faydalı bir çalışma olacaktır. Atık malzemelerin yeniden kullanılmasıyla beraber hem yaşadığımız çevre açısından hem de ekonomik olarak bir fayda sağlayacaktır. Günümüzde artan petrol ve enerji fiyatlarından ötürü bu malzemelerin başka bir yerlere taşınıp gömülmesi günümüzde daha da zor hale gelmektedir.

Uçucu külde, yanan kömür ile bu kömürün yanma şekillerine bağlı olarak grinin tonları oluşmaktadır. İyi yanan kömürde uçucu kül çok daha açık bir gri tonu alır ve yanmanın sonuçlandığı yerlerde kül siyah rengi almış olur. Daha koyu olan uçucu kül ise iyi yanmamış kömürden çıkan küldür ve bu küllerle üretilen betonlarda dayanım fazla gelişmemektedir. Mineral ile kimyasal bakımdan küller, boşluksuz ile iç kısmı boşluklu, yanmamış daneler ve camsı küresel şeklinde mineral parçacıklardan oluşmaktadır. Kimyasal bakımdan incelendiğinde uçucu küldeki ana elementler bakımından Si, Ca, Al ile S mevcuttur. Uçucu kül yapısı itibari ile alümino-silikatlar ile Ti, K, Fe, Mg, K, ve Ca elementlerini oluşturur. (A., 1997)

Uçucu küller olarak TS EN 197-1 ile ASTM C618 standartlarına göre sınıflandırılır. TS EN 197-1'e göre uçucu kül iki şekilde sınıflandırılır. Bu sınıflandırmada W tipi uçucu kül kalkersi, V tipi uçucu kül ise silisidir. ASTM C618 standartında ise iki tip uçucu kül vardır. Bunlar F tipi uçucu kül ve C tipi uçucu küldür. Bitümlü kömürden elde edilen F tipi uçucu küllerde toplam  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve  $Fe_2O_3$  miktarları %70' den fazladır. Ayrıca CaO yüzdesi %10' un altındadır. Yarı bitümlü kömürden veya linyitli kömürden elde edilen C tipi uçucu küllerde toplam  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve  $Fe_2O_3$  miktarları %50' den fazladır. Ayrıca CaO yüzdesi F tipi uçucu küllerden fazla olduğu için de bağlayıcılık özelliği fazladır. (Türker, B, F, & A, 2009). C tipi uçucu kül ile üretilen betonların basınç dayanımları genellikle F-tipine göre daha fazladır. Literatürde C tipine yüksek kalsiyum içerikli kül denirken, F tipine de düşük kalsiyum içerikli kül de denmektedir.

Davidovits 2008 yıllarında bir çalışmada alkali aktivatör çözeltisiyle uçucu kül ile üretilen CAFA isminde ürettiği üründe incelemelerde bulunmuştur. Sonucunda 90°C ye maruz bırakılıp 18 saat suresince kür elde edilen beton örneklerinde 85 MPa basınç dayanımları gösterip iyi bir sonuç aldığını görmekteyiz. (Davidovits, Geopolymer chemistry and applications, 2008)

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

Betonlarda uçucu külün kullanımı, diğer malzemelerin aksine eskiye dayanmamaktadır. Gelişmekte olan teknolojiyle birlikte enerji kullanımları gitgide artmaktadır ve enerji temini her geçen gün çok daha pahalı hal almıştır. Bu sebeple endüstriyel atık olan uçucu küllerin kullanımları her gün artmaktadır. Yapılmış olan araştırmalar sonucunda ağırlık bakımından %20 civarlarında uçucu kül kullanımları

betonda basınç dayanımını artan şekilde etkilemektedir (Topçu & Canbaz, 2001). Bu oranın daha fazla olması için çalışmalar yapılmaktadır.

Uçucu külün betonda kullanımında pek çok yarar vardır. Bu yararlar;

Uçucu küller termik santrallerde atık madde olarak üretildikleri için betonda kullanımını ekonomik açıdan yarar sağlar.

Uçucu küllerin inceliği az olduğundan taze betondaki suyu çeker bu sayede betondaki terlemeyi azaltır.

Uçucu küller çimentoğa göre yapısal olarak daha ince taneli oldukları ve tanecikleri küresel yapıda olduğu için sürtünmeleri daha azdır. Bu özellikleri sebebiyle betonda akıcılığı artırır ve dolayısıyla da su/çimento(bağlayıcı) oranı düşer.

Uçucu kül kullanımı betonda kullanılacak çimento miktarını azaltır. Dozajı azalan betonda hidrasyon ısı düşer bu da rötre çatlaklarını azaltır.

Uçucu kül kullanılarak üretilen betonların ilk zamanlardaki dayanımı düşük olsa da içerisinde serbest olarak gezen  $Ca(OH)_2$ 'ler uçucu küller ile tepkimeye girer ve bağlayıcılık özellik kazandıran C-S-H jellerini oluşturur. Bu sayede betonun bağlayıcılığı artar ve dolayısıyla dayanım da artar.

Uçucu kül kullanılmayan betonlarda serbest kalan  $Ca(OH)_2$ ' in su ile teması sonucu betonda boşluklar oluşur. Bu boşluklar betonun geçirimliliğini artırır.

Uçucu küle üretilen betonların priz süreleri uzar. Bu sayede sıcak havalarda beton üretimi daha kolay olur. (Tuygun, 2002)

Uçucu külün dolgu enjeksiyonlarında, köprü ayaklarında, baraj duvarlarında daha birden çok yapıda kullanımını mevcuttur. Dünyada uçucu kül kullanıma bakılacak olursa, İspanya'da 171 m olan Picasso gökdeleninin bazı kısımlarında, Almanya'da Castor-Pollux gökdelenlerinde, Avusturya da yeraltındaki tren yollarında, Belçika da bulunan depolama kulelerinde ve daha birçok ülkede önemli yapıtlarda uçucu külden yararlanıldığı görülmektedir. (Ecoba, 2001) Uçucu küllerin bir diğer olumsuz tarafı ise geç dayanım kazanmasıdır. Düşük kalsiyum içermesinden dolayı uçucu küller zamanla yavaş yavaş dayanım kazanırlar. Bu da özellikle betonlarda kalıp alma süresini olumsuz etkilemektedir. Normal betonda fazla kullanılmamasının sebebi uzun süren kalıp alma süreleri ve ilk günlerdeki düşük dayanımdır. Bu dezavantajından ötürü uçucu kül katılarak üretilen beton numunelerinde uçucu kül miktarı genelde

düşük kalmaktadır. Dayanımın geç oluşması özellikle inşaat yapım sürecini olumsuz etkilemektedir. Buna ek olarak maliyet de artmaktadır. Bunun için kullanımı sınırlı olmaktadır. Fakat yeni nesil geopolimer veya alkali aktive edilmiş betonlarda uçucu kül kullanımı %100 mertebelerine kadar ulaşmaktadır. Özellikle uçucu kül katkı geopolimer betonların hızlıca dayanım kazanabilmesi için ısı kürü uygulaması yapılmaktadır.

### **2.3. Yüksek Fırın Cürufu**

Yüksek fırın cürufları demir - çelik sanayide eritme işlemlerinden meydana gelen atık bir yapı malzemesidir. İçeriğinde genellikle metal oksit ile silika gibi karışımları bulunmaktadır. Yüksek fırın cürufu sıvı metali en düşüğe indirgeme ve eritmeyle sıcaklık kontrollerine yardımcı olmak gibi birden fazla nedenle kullanılabilir. (Provis, 2009)

Çelik üretimlerinde çeliklerin yaklaşık olarak %26'sı değerlerinde çeliklerin atık malzemeleri olarak yüksek fırın cürufu oluşmaktadır. Yaklaşık bir ton çelik üretiminden 250 kilo civarlarında yüksek fırın cürufu açığa çıkmaktadır. Atık olarak meydana gelen bu malzemeleri değerlendirmek amacıyla inşaat sektöründe yüksek fırın cürufunun beton ile çimentoya katkı maddesi olarak eklendiğini görmekteyiz. (Bilgen, Kavak, Yıldırım, & Çapar, 2010)

Öğütülmüş olan granüle yüksek fırın cüruflarının içeriklerinde % 8 ile %24 arasında  $Al_2O_3$ , % 26 ile %39 arasında  $SiO_2$ , % 30 ile %50 arasında  $CaO$ , ve de %1 ile %18 arasında  $MgO$  bulunmaktadır. Öğütülmüş granule yüksek fırın cüruflarının içeriğinde bulunan  $CaO$  oranlarının daha yüksek olması sebebiyle diğer puzolanlara göre beton basınç dayanımlarının daha fazla oldukları bilinmektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları uçucu küller ile birlikte belirli oranlarda karıştırıldıklarında beton basınç dayanımlarının yüksek olduğu görülmüştür (Frearson, 1986). Hem öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun hem de uçucu külün betonda atık malzeme olarak kullanılması yaşadığımız çevre açısından çok iyi olmaktadır.

#### **2.3.1. Betonda yüksek fırın cürufu kullanımı**

Yüksek fırın cüruflarının yüksek derecede kalsiyum içeriklerine sahip olmalarının yanı sıra dane incelikleri ile camsı yapıları cürufun aktivitelerinde büyük



rol oynadığı görülmektedir. Böylece cüruf katkılı numuneler erken dayanım kazanma özelliğine sahiptirler (Erdoğan, 2003)

Yüksek fırın cürufunun fırından sonraki soğuması ile %68 oranlarında camsı faza sahip olması gerekmektedir. Ayrıca içeriklerindeki MgO, CaO ile SiO<sub>2</sub> miktarlarının minimum olarak %70 oranı civarlarında ve (CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub> oranının da 1'den büyük olması gerekmektedir (Yeğinobalı, 2003)

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton üzerindeki olumlu etkileri;

Yüksek fırın cürufunun tanecik boyutları oldukça ince olduğu için taze betondaki işlenebilirliği fazladır.

Yüksek fırın cürufu kullanımı betonun priz süresini kısaltır. Bu da soğuk havalarda beton dökümünü kolaylaştırır.

Yüksek fırın cürufunun inceliği çimentoya göre daha az olduğu için taze betondaki suyu emer bu sayede taze betondaki terleme azalır.

Yüksek fırın cürufu kullanımı sayesinde beton karışımına daha az çimento eklenir. Çimento kullanımının azalmasıyla hidrasyon ısı düşer ve buna bağlı olarak rötre çatlakları azalmış olur.

Yüksek fırın cürufu çimentonun suyla reaksiyonu sonucu meydana gelen ve serbest olarak gezen Ca(OH)<sub>2</sub> ile tepkimeye girer ve bunun sonucunda betona bağlayıcılık kazandıran C-S-H jelleri oluşur.

Yüksek fırın cürufu kullanılmayan betonlarda serbest olan Ca(OH)<sub>2</sub> su ile temas etmesi sonucu betonda istenmeyen boşluklar oluşur. Oluşan boşluklar betonun geçirimsizliğini artırır.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton üzerindeki olumsuz etkileri;

Yüksek fırın cürufunun betonda kullanımında priz süresi artar. Bu da soğuk havalarda beton dökümünü güçleştirir.

Yüksek fırın cürufu kullanılmasıyla taze betonda daha fazla kimyasal katkı maddesi(hava sürükleyici) kullanılır. Bu da sertleşmiş betondaki dayanım artışının yavaşlamasına neden olur. (30)

Yüksek fırın cürufularının öğütülmesi gerçekleştirilerek tanecik boyutlarının daha da küçültüldüğü ve puzolanik özellikler gösterdiği görülür. Bundan dolayı yüksek fırın

cürufları kullanılan taze ile sertleşmiş betonlarda beton özelliklerinin iyileşmesi ve çevre koşullarına çok daha dayanıklı betonlar üretildiği görülmektedir (Bilim & Atış, 2011) Yapılan araştırmalarda öğütülen yüksek fırın cürufuyla elde edilen betonlarda öğütülmemiş cüruflara göre çok daha yüksek basınç dayanımı ile eğilme dayanımı elde edilmiştir. Dolayısıyla cürufun dane boyutunun düşürülerek aktivitesinin artırılması hem erken dayanım gerekli yerlerde hem de yüksek mukavemet gerekli yerlerde kullanılmasını sağlar. Ayrıca yapılan çalışmalarda da öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş betonların durabilite performanslarının da iyi olduğu belirtilmiştir.

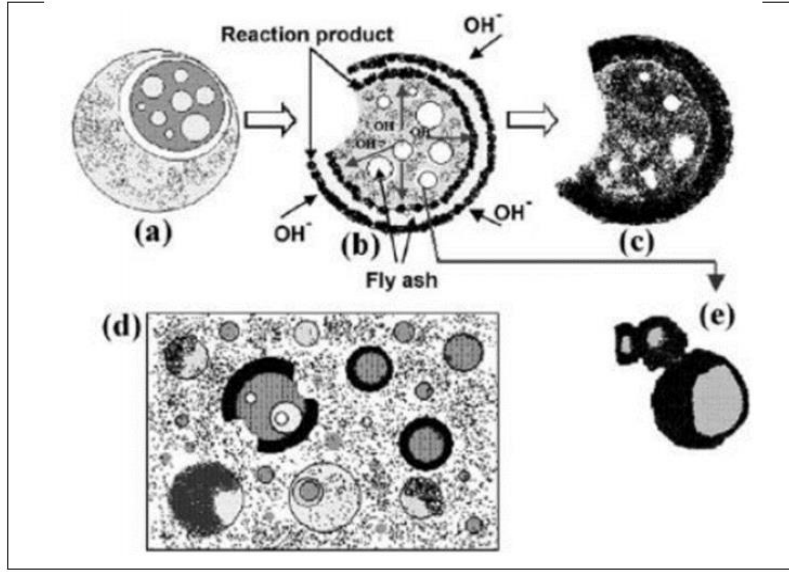
#### 2.4. Alkali Aktivatörler

Karbondiyoksitten kaynaklanmış olan çevre kirliliklerin önüne geçmek amacıyla hiç çimento kullanmadan veya en az düzeyde çimento kullanarak beton üretimi gerekmektedir. Çimentosuz beton olarak bilinen geopolimer betonun üretiminde çimento yerine bağlayıcılığı sağlamak için kullanılan puzolanları (uçucu kül, silis dumanı, seramik atık tozu, öğütülmüş yüksek fırın cürufu vb.) aktif hale getirebilmek için kullanılan alkali aktivatör olarak genellikle cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat (  $Na_2SiO_3$  ) ve sodyum hidroksit (  $NaOH$  ) kullanılır (RiessenR.Williams, 2009) Sodyum bazlı alkali aktivatörler dışında potasyum bazlı alkali aktivatörlerde vardır fakat potasyum bazlılar sodyum bazlılara göre daha pahalı olduğundan dolayı pek kullanılmazlar.

Palomo ile arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada uçucu küllerin aktive edilmelerinde kullanılan alkali aktivatörlerin uçucu küllerin aktivite gelişimlerini önemli derecede etkilediklerini belirtti. Ayrıca, alkali aktivatör çözeltilerinin tek başına alkali kullanımlarına kıyas ile potasyum silikat veya sodyum silikat içerdikleri zaman tepkimelerinin zamanla daha fazla arttıklarını belirtmişlerdir (SaidJalali, 2008)

Alkali aktivatörler kullanılıp bağlayıcılık kazandırılan puzolanlar yardımıyla üretilen betonlar incelendiğimizde çimento ile üretilmiş betonlara kıyas ile nihai ve erken dayanımları daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca bu betonlar hidrasyon ısısı bakımından daha düşük seviyede oldukları ve kimyasallara karşı daha dayanıklı oldukları görülmektedir. Fakat bu betonlarda ani priz ile birlikte mikro düzeyde çatlak

oluşumu, yüksek büzülme ile çiçeklenme meydana geldiği görülmektedir. (Görür, 2015)



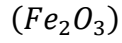
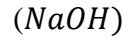
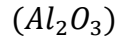
**Şekil2. 1.** Uçucu külün alkali aktivasyonu  
**Kaynak:** (Shi & Qian, 1999)

## 2.5. Geopolimer Beton Özellikleri

Geopolimer betonlar, çevre dostu bir beton çeşidi olarak bilinmekle beraber çimento kullanılmadan üretilen bir betondur. Geopolimer beton üretilirken çimento yerine bağlayıcı olarak depolama alanı açısından sıkıntı oluşturan ve endüstriyel atık malzeme olan puzolan malzemeler kullanılmıştır. Bu puzolanik malzemelerin beton üretiminde kullanılmasıyla birlikte çimento tüketimi azalmış olup hem ekonomik hem de çevreci betonlar üretilmiştir. Ayrıca puzolan kullanımı betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini de olumlu yönden etkilemiştir. Ancak mineral katkı maddeleri olan puzolanlar betonda tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık özellik göstermezler. Geopolimer betonlar çimento içermedikleri için puzolanları aktifleştirmek için alkali aktivatörlere ihtiyaç duyarız. Puzolanlarda bulunan SiO<sub>2</sub> ve alümin içeren malzemeler cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) gibi alkali solüsyonlar ile aktif hale gelir ve bağlayıcılık sağlanmış olur. (Şinik, 2019)

Geopolimer betonlarda puzolanlar ve alkali aktivatörlerin en basit şekilde tepkimesi şu şekilde gözlemlenir;





Geopolimerlerin birden fazla avantaj sağladığı noktalar vardır. Bu avantajların en önemlilerinden biri hazırlama tekniklerinin çok kolay olması durumudur. Geopolimerler, kolay şekilde reaktif olan alümino-silikatlarla kuvvetli alkali çözeltilerinin karıştırıldıktan sonra oda koşullarında kür edilme işlemi ile üretilirler. Üretime bakıldığında çimentoyla üretilmiş olan normal geleneksel betonların üretimlerine benzer oldukları görülmektedir. Kürlenme aşaması bittikten kısa bir zamandan sonra ideal düzeyde basınç dayanımlarına sahip olurlar. (Li, Ding, & Zhang, 2004)

Geopolimer betonlarda üretim sayesinde çimento üretimleri esnasında açığa çıkmış olan CO<sub>2</sub> miktarları %80'lere kadar azaldığı görülmektedir. Ayrıca geopolimer betonlarda büzülme oranı düşük seviyede olduğu, aside karşın dirençlerinin yüksek seviyede olduğu ve yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu şeklinde mekanik özelliklerinin bulunduğundan dolayı tercih edilen iyi düzeyde bir yapı malzemesi olduğu görülmektedir. (Al Muhit, Foong, Alengaram, & Mohd, 2013)

Geopolimer betonların geleneksel betonlara göre avantajları şunlardır;

Ham madde kaynaklarının oldukça fazla olması: Atık malzeme olarak ortaya çıkan puzolanlar ve alkali aktivatörler kullanılarak üretilebilmesi

Çevre dostu ve ekonomik olması: Atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı geleneksel betonlara göre daha azdır. Ayrıca enerji sarfiyatı geleneksel betonlara göre 3/5 daha azdır.

Hazırlama tekniklerinin kolay olması: silikat ve alüminat içeren reaktifler ile alkaliler kullanılarak hazırlanır. Geleneksel beton gibi hızla dayanım kazanır.

Hacim kararlılıklarının stabil olması: Geleneksel betonlara göre 4/5 oranında daha düşük büzülmeye sahiptir.

Gerekli olan dayanımı kısa zamanda alabilmesi: Isı kürü sayesinde dayanımı kısa zamanda %70 daha fazla olur.

Durabilitesinin iyi olması: Geleneksel betonlara göre çevre şartlarına daha uzun süre dayanabilmektedirler. (Li, Ding, & Zhang, 2004)

## 2.6. Geopolimer Betonun Kimyasal Etkileri

Geleneksel betonlar hakkında gerçekleştirilmiş olan kimyasal durabilite deneyleriyle Geopolimer betonlarda kullanılmış olan malzemeler sülfat etkisi altında maruz bırakıldığında karmaşık bir mekanizmasının olduğu görülmüştür. Diğer bir sebeple aralarında sülfatlı bileşikler ile Portland çimentolarının hidrasyon reaksiyonları sonucunda oluşan ürünler ile girdiği reaksiyonlardır diyebiliriz ve bu tepkimelerin sonuçlarının farklı şekillerle ortaya çıktığı görülmektedir. Standart Portland çimento kullanılan geleneksel betonlarda gerçekleştirilmiş olan sülfat tepkimeleri, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hidrat ile farklı çimento harçlarının alüminatlı etkileri de dâhil birden fazla reaksiyonlar belirgin hale geldiği görülmektedir. (Jiang W, 1997)

Sülfat atakları sonucunda betonlarda çatlak oluşması ve bunun neticesinde hacimsel genişlemelerin doğrudan veya dolaylı şekilde ortaya çıkan reaksiyonlar sonucunda alçıtaşı oluşumlarına ek olarak betonların bozulmalarının yanı sıra C – S – H jellerinin (kalsiyum silikat hidrat) belli oranlarda tahrip edilmesi ile de parçalanma oluşmaktadır. Benzer şekilde numunelerin yüzeylerinde kimyasal etki sonucu yumuşama durumu meydana geldiği ve bu yumuşamadan sonra numunelerin parçalarında pul pul dökülmeler/parçalanmalar görülmektedir. Isı küründen kaynaklanan sıcaklık etkisiyle de dayanımı artan geopolimer betonlar, sülfat ataklarına karşın daha güçlü bir şekilde direnç göstermektedir. Uçucu kül ile üretilen geopolimer beton numuneleri 1 yıl (365 gün) boyunca sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmış ve bu 1 yılın sonunda numune yüzeylerinde dökülmeler ve çatlaklar görülmüştür. Bu görülen değişimlerin yanında basınç dayanım değerlerinin ise neredeyse aynı kaldığı görülmüştür. Bunların yanında, değişik sürelerde sodyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılan geopolimer numunelerindeki uzunlukların değişimi, ilk geopolimer beton numunelerden % 0,01 oranında daha az oluşu görülmüştür. (Rajesh, 2014)

Ayrıca, değişik sülfat çözeltilerinde, en yüksek durabilite performansların, sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri ile hazırlanmış olan geopolimer malzemelerinde gösterilmiş ve basınç dayanımlarının yükselen sıcaklıklarla doğru orantılı şekilde

arttığı görülmüştür. Numunelerin sülfat çözeltilerinde bekletilmesiyle yaklaşık olarak % 10 civarlarında dayanım kayıpları meydana geldiği görülmüştür. (A.Palomo, 1999)

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

Betonun dayanımı mekanik ve kimyasal nedenlerden etkilendiği gibi beton dayanıklılığı da etkilenmektedir. Beton olumsuz çevre şartlarına maruz kaldığında, numune yüzeyinde çatlaklar meydana gelir. Bu çatlaklar zamanla büyür ve betonun geçirgenliğini artırır. Geçirgenliği artan betonların hem dayanımı hem de dayanıklılığı azalmış olur. Bu fiziksel ve mekanik etkiler betonun durabilitesini olumsuz etkilediği için üretilen yeni nesil betonların bu şartlara daha dayanıklı olarak üretilmesi gerekmektedir. Bu sayede betonun hizmet ömrü uzar ve ülke ekonomisi bu durumdan olumlu etkilenir.

### **2.7.1. Betonda büzülme**

Betonlarda gözlemlenen büzülme, betonun hacimlerinde zamana bağlı azalmalar olarak adlandırılır. Kimyasal, plastik, termal ve kuruma büzülmesi olarak dört farklı şekilde sınıflandırılırlar. Rötire olarak da bildiğimiz büzülme olayları hem taze betonlarda hem ise sertleşmiş betonlarda gözlemlendiğini görmekteyiz. Büzülme neticesinde betonda su, alkali aktivatör veya kimyasal katkı kaybı gözlemlenir (Divya, 2007) Büzülmeyi engellemek için özellikle rüzgâra karşı ve güneşe karşı özel önlem alınmalıdır. Büzülme olmaması açısından beton büyük yüzeye sahipse bu yüzeyin rüzgâra maruz kalmaması adına kalıplara kapatılması su kaybını azaltacak yöntemlerden bir tanesidir. Diğer yöntem ise beton dökümü yapıldıktan birkaç saat sonrasında beton yüzeyini su tutacak herhangi bir malzeme ile kaplayıp o yüzeyi sulamak olacaktır. Böylece yüzeyi kapalı olan betondan su kaybı daha zor hale gelecektir. Ayrıca son zamanlarda büzülmeyi önlemek amacıyla betona sentetik lifler katılmaktadır. Böylece büzülme çatlaklarını sınırlandırmak amaçlanmaktadır.

### **2.7.2. Aşınma**

Devamlı olarak darbelere maruz kalan beton yüzeylerinde aldıkları yükler ve bu yüklerin tekrarlanması neticesinde bozulmalar, yıpranmalar ve dökülmeler görülmektedir. Bu yıpranmalar betonda aşınma olarak da nitelendirilir ve beton yüzeyinde kayıplar oluşur. Betonda oluşan aşınmalar betonun durabilitesini olumsuz etkiler ve beton kısa zamanda kullanılmaz hale gelir. Aşınma problemiyle baş etmek

için beton üretimine dikkat etmek ve betonun basınç dayanımlarını arttırmak gerekir. Bunun için de betonun iskeleti olarak nitelendirilen agregaların aşınmaya karşı dirençli olmaları gerekmektedir. Kullanılan agregalar boşluksuz ve temiz olmalıdır. Betonda kullanılan agregalar betonun kalitesini arttırdığı gibi kullanılan diğer ürünlerin (çimento, su, kimyasal katkı, mineral katkı vb.) de kaliteli ve aşınmaya karşı dirençli olmaları gerekmektedir. Özellikle kullanılan mineral katkı maddelerini seçerken ince taneli ve betondaki geçirimsizliği azaltacak türden olmalarına dikkat etmek gerekir. Mesela silis dumanı gibi çok ince taneli mineral katkıları ara-yüz bölgesini güçlendirerek aşınma direncini artırır. Son zamanlarda betonlarda nano malzeme kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Bunlara örnek olarak nanosilika, nanografit gibi malzemeler örnek olarak verilebilir. Bu nanomalzemelerin kullanılması ile geçirimsiz, daha dayanıklı ve aşınma direnci yüksek beton üretimi mümkün olmaktadır.

### **2.7.3. Isıya karşı dayanıklılığı**

Burciaga-Díaz ile arkadaşlarının silikat çözeltiler ile cüruf ve metakaolin bağlayıcılarını karıştırılmasından elde edilmiş olan geopolimer harçlara farklı kür sıcaklıkları uygulandıkları durumlarda Geopolimer kompozit numunelerinde uzun süreli performanslara olan etkilerini araştırmışlardır. 70 °C, 60°C ile 20°C ısı kürlerinin uygulandıkları durumlarda elde edilmiş harç numunelerinin mukavemet ile mikro yapılarının analizlerini karşılaştırmışlardır. Taze hal durumundaki numunelerin yüksek derecede ısı kürlerine maruz bırakılmalarından sonraki ilk dönemlerde dayanımlarının gelişimlerini hızlandırdıklarını fakat uzun süren dönemlerde laboratuvar ortamlarında kürlenmiş numunelerin çok daha iyi performanslar gösterdiklerini belirtilmiştir. %100 öğütülmüş granüle diye adlandırdığımız yüksek fırın cürufu numunelerde ısı kürleri sıcaklıklarının laboratuvar şartlarında 60 °C civarlarında artırılmalarının, cüruf parçacıklarının daha hızlı şekilde çözünmelerini ve yaklaşık olarak 100 MPa değerlerine kadar varan basınç dayanımlarına ulaştıklarını görmekteyiz. (Burciaga-Díaz)

### **2.7.4. Alkali - Silika reaksiyonları**

1920 - 1930 yıllarında Amerika'da üretilmiş olan betonların yapımlarında sebepleri belli olmayan çatlaklıkların oluşma durumlarına bağlı olarak betonların yıkıldıkları raporlarda gösterilmiştir. Hazırlanan raporlar neticesinde betonda kullanılan malzemelerle ilgili yönetmelikler incelendiğinde yönetmeliklere aykırı bir

durum olmadığı ve betonda oluşan çatlakların beton döküm tarihinden birkaç sene sonra olduğu gözlemlenmiştir. Çatlakların harita şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çatlaklar ilk olarak jel çıkması ve betonlarda patlama şeklinde görülmeye başlanmıştır. Stanton 1940 senelerinde bu tarzdaki çatlaklıklara (sonraki durumlarda ASR şeklinde isimlendirilecek) kimyasal tepkimelerin sonuçlarından dolayı meydana geldiğini belirtmektedir. Tepkimeler sonrasında meydana gelen jellerin çok fazla miktarlarda su çekme özellikleri vardır. Betonlar ise su emme durumundan şişmeye ve bu nedenle de numunelerin içlerinde çekme gerilmelerinin oluşmalarına neden olmakta ve sonuçta betonlarda genleşme durumu görünmektedir. Genleşme miktarlarının belirli seviyede bir oranı geçtiklerinde betonlarda tehlike arz ettiklerini görmekteyiz. Sonuca bakarsak kullanmış olunan agregalar ile çimento pastasının çevrelerinde çatlaklıklara sebep olduğunu görmekteyiz (Stanton, 1940) (Neville A. M., 1981) (Farny, 1998). Geopolimer betonlarda alkali-silika etkisi pek bilinmemektedir. Geopolimer betonlarda çimento kullanılmamasından dolayı serbest alkaliler mineral katkılardan gelecektir ve farklı mineral katkıların kullanılması ASR riskini düşürebilir. Özellikle uçucu kül ile üretilen geopolimer betonlarda ASR riskinin yüksek fırın cürufuyla üretilmiş geopolimer betonlara göre daha düşük olacağı tahmin edilmektedir.

#### **2.7.5. Asit etkisi**

Yüksek geçirimsizliğe sahip sertleşmiş betonlar aside maruz kaldıklarında beton içerisinde genleşmeye sebebiyet veren kimyasal reaksiyonlar olduğu gözlemlenmektedir. Bu reaksiyonlar genleşmeye sebep oldukları için betona zarar verir. Asitlerin betona vermiş olduğu bu zararı azaltmak için düşük geçirimsizliğe sahip beton üretmek gerekir. Betonları aside karşı korumak için yüzeyleri reçineli veya bitümlü maddelerle kaplanmalıdır. (Erdoğan, 2015)

Yapılmış olan bazı çalışmalara bakarsak geopolimer betonların geleneksel betonlara karşın daha üstün performanslar sergiledikleri ortaya çıkmaktadır.

Atis çalışmalarında standart Portland çimentolarının yerine öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufalarını aktif hale getirebilecek farklı bağlayıcı maddelerinin kullanımlarını incelemişlerdir. Alkali solüsyonlar olarak da sodyum karbonat, sodyum silikat, sodyum hidroksit kullanılmış olup, 7, 28 ile 90 günlük basınç mukavemetleri, eğilmelerde çekme mukavemetleri belirlenmiş, 180 günlük süreç durumunda kuruma



rötresi performansları araştırmışlardır. Bunlara ek olarak numunelerin hidrasyon reaksiyonlarının gelişimlerini araştırılmıştır. Priz başlangıçları ile priz bitiş süreleri standart Portland çimento ile karşılaştırıldıklarında sodyum silikat (  $Na_2SiO_3$  ) ve sodyum hidroksit ( NaOH ) aktif edilmiş olan çimentolara nazaran erken oldukları, sodyum karbonat kullanarak aktif duruma gelen standart Portland çimento ile benzer şekilde sonuçların verildikleri bildirmişlerdir. Silis modülünün artmasıyla birlikte sodyum silikatın alkali aktivatörlerin basınç mukavemetlerini ve eğilmede çekme dayanımlarının artırmalarda etkin oldukları ortaya çıkmaktadır. Sodyum silikat ile sodyum hidroksitle birlikte aktif hale getirilmiş olan öğütülmüş yüksek fırın cürufu harçlarının biraz daha gevrek davranışlar gösterdikleri, sodyum karbonatla üretilmiş olan numunelerin davranışlarının ise standart çimentolara benzer şekilde davranışlar gösterdiklerini bildirmişlerdir. (E. Luga C. D., 2016)

## **2.8. Geopolimer Betonda Dayanımı Etkileyen Faktörler**

### **2.8.1. Geopolimer betonlarda su miktarı**

Geopolimerler ile üretilen betonların dayanımını etkileyen en önemli etmenlerden bir tanesi beton karışımının içerisinde bulunan su miktarıdır. Geopolimer betonlara eklenen fazla su betonun işlenebilirliğini artırır. İşlenebilirliği artan geopolimer betonun basınç dayanımı azalır. Portland çimentosu kullanılarak üretilen geleneksel betonda su/çimento oranı arttıkça betonun basınç dayanımı azalmaktadır. Geleneksel çimentolu betonlara benzer şekilde geopolimer betonlarda alkali solüsyon / bağlayıcı oranı da betonun basınç dayanımını değiştirmektedir. (Hillerborg, 1985,)

### **2.8.2. Kür süresi ve sıcaklık**

Geopolimer betonlarda basınç dayanımlarının fazla olmasının içeriğindeki CaO miktarının fazla olması etkilemektedir. Bunların yanında beton dökülme işlemlerinden sonraki bakımları ile beton kürleri de basınç dayanımlarını büyük ölçülerde etkilediklerini görmekteyiz. Uçucu küllerin yüksek sıcaklıklar altında daha aktif olduklarından dolayı uçucu kül kullanılarak üretilmiş olan betonları ısıyla kür etmenin basınç dayanımlarında pozitif etkiler oluşturduğunu bilmekteyiz. Ayrıca yüksek sıcaklıklar altında betonların alkali aktivasyon reaksiyonların daha hızlı şekilde olacağından betonların ısıyla kür etme durumunun daha avantajlı olduğunu görmekteyiz. Özellikle uçucu küllerin aktifleştirilmesinden sonra geopolimerizasyon

reaksiyonlarının hızlandırmaları için yüksek ısı kürü uygulamalarına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. (ÖZBEY, 2021)

### 2.8.3. SiO<sub>2</sub> / Na<sub>2</sub>O oranı

SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O molar değerleri ile kürlenme şekillerindeki Geopolimer harçlarının basınçlarının mukavemetlerinin üzerindeki etkilerinin incelenmiş olduğunu görmekteyiz. 60°C deki fırın kürleriyle buhar kürlerinin uygulanmaları sonucunda numunelerin test işlemine tabii tutulmuşlardır. Testlerin sonuçlarına baktığımızda SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı 1'e yaklaştığında numunelerde daha çok basınç mukavemeti gözlemlenmiştir. (akyıldırım, 2021)

### 2.8.4. Donma - Çözülmenin olayları

OPC ile üretilmiş olan geleneksel betonlardaki gibi geopolimer betonlarda da sıcaklık seviyesi düşük olduğu durumlarda betonların içlerinde bulunan kapiler boşlukların içlerinde bulunan sular donmaktadır. Sıcaklık değerleri yükseldiğinde ise kapiler boşluklarda donmuş olan bu suların tekrar erimektedir. Kapiler boşluklarda yer almış olan sular donunca suyun hacmi ile beraber boşluk hacimlerinde de artışlar gözlemlenmektedir. Bu donma-çözünme olayları sık tekrar ettikleri takdirde kapiler boşlukların hacimleri sürekli artma meydana gelir. Bu da betonlardaki boşluk miktarlarını artırır ve betonların su geçirgenliklerinin artırır. Bu olaylar betonların dayanımlarında ve dayanıklılıklarında azalmaya sebep olur. (ÖZBEY, 2021)

### 2.8.5. Alkali aktivatör kullanımı

Sodyum hidroksit (NaOH) ile sodyum silikat ( *Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>* ) aynı anda kullanıldıklarında geopolimer betonların mekanik performanslarında artışlar gözlemlenmektedir. Geopolimer betonların üretiminde kullanılan alkali solüsyonlar geopolimer betonların basınç dayanımlarını etkiledikleri gibi fiziksel ile kimyasal etkileriyle ve davranışlarıyla betonların durabilitelerini yani hizmet ömürlerini de etkilemektedir. Bu nedenle geopolimer betonda kullanılmış olan alkali aktivatörlerin oranları (sodyum silikat ( *Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>* ) /sodyum hidroksit (NaOH)) iyi bir şekilde belirlenmelidir. Daha önceden yapılmış bir deneyde sodyum silikat ( *Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>* ) /sodyum hidroksit (NaOH) değerlerinin geopolimer betonların erken basınç dayanımları ile mekanik özelliklerinin büyük ölçülerde değiştirdiklerini raporlamışlardır. Sodyum silikat ( *Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>* ) /sodyum hidroksit (NaOH) oranının

artmasıyla beraber geopolimer betonların basınç dayanımları da doğru orantılı olarak artmaktadır. (Hardjito, Wallah, Sumajouw, & Rangan, 2004)

Farklı minerallerin geleneksel betonda kullanımı ve deniz suyuna maruz kalması sonucu, mineral katkıların betonların dayanım ve durabilite performanslarına olan olumlu etkisi belirtilmiştir (NİŞ, 2019) (Niş A. &, 2022). Bu çalışmalarda mineral katkılar ile geopolimer beton üretmenin de mümkün olduğu gösterilmiştir. Özellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile üretilen geopolimer betonların hem dayanım hem de durabilite performansları incelenmiş olup, yüksek fırın cürufu betonların dayanımlarının uçucu küllü betonlara göre içeriğindeki kalsiyum oksit nedeniyle daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, çalışmalarda geopolimer betonların belirli dayanım kazanmasına rağmen hala geopolimerizasyon reaksiyonlarının devam ettiği bildirilmiştir. Bunun için bu çalışmada özellikle uçucu küllü betonların dayanım kazanması için 88 gün beklenmiş ve ayrıca gecikmiş ısı kürü de uygulanarak numunelerin dayanım kazanmasının artık tamamlanması beklenmiştir. Gecikmiş ısı kürü uygulaması özellikle prekast betonlarda uygulanabilecek yöntemlerden bir tanesidir.

Yapılan bu çalışma kapsamında farklı bağlayıcı miktarı ve alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranına sahip geopolimer betonların %3.5 NaCl çözeltisi altında dayanım ve durabilite performansları araştırılmıştır. Bu sebeple %100 uçucu küllü ve %75 uçucu küllü ve %25 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu geopolimer betonlar üretilmiştir. Geopolimer betonların yapıların inşasında kullanılabilmesi adına geleneksel betonda standartlarda belirtilen parametreler, farklı geopolimer betonların üzerinde deneyerek, geopolimer betonların deniz suyu etkisi altında davranışının öğrenilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda deniz suyu etkisi altında 365 gün tutulan geopolimer beton numunelerinin görsel denetim, ağırlık değişimi ve basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler kapsamlı olarak ele alınıp incelenmiştir. Bunlara ek olarak gecikmiş ısı kürü uygulanan geopolimer numuneler %3.5 NaCl çözeltisine maruz kaldıktan sonra dayanım ve durabilite performanslarına olan etkisi de kapsamlı olarak incelenmiştir.

# ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmalar kapsamında üretilen geopolimer betonlarda kullanılan malzemelerin özelliklerinden, betonun üretim aşamalarından, malzemelerin kullanım şekillerinden ve yapılan deneylerin yöntemlerine değinilmiştir. Daha sonra geopolimer betonların dökülmesi, kür edilmesi ve deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonraki durabilite çalışmalarından bahsedilmiştir.

### 3.1. Geopolimer Beton Malzemeleri

#### 3.1.1. Agregalar

Gerçekleştirilen deneylerde iri ve ince agregalar kullanılmıştır. İri agregaların büyüklüğü 4 mm – 16 mm arasındadır. İnce agregalar büyüklüğü ise 0 mm – 4 mm arasındadır. Deneylerde kum ve kırma kum olmak üzere iki farklı çeşit ince agregalar kullanılmıştır. Kumun boyutu kırma kumdan daha ince tanelidir. Deneyde iki çeşit de iri agregalar kullanılmış olup bunlar NoI ve NoII' dir. NoI olan iri agregaların tane boyutu 4 mm – 8 mm, NoII olan iri agregaların tane boyutu ise 8 mm – 16 mm arasındadır. Deneyde kullanılan iri agregalar, Şekil 3.1.' de deneylerde kullandığımız agregalar gösterilmiştir ve Çizelge 3.1.'de ise kullanılan agregalar özellikleri gösterilmiştir.



**Şekil3. 1.** Deneylerde kullanılmış iri agregalar

**Çizelge3. 1.** Denejde kullanılmış agregaların özellikleri

Agregaların Özellikleri	NoI Agregası	NoII Agregası
Dane yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	2.71	2.72
Su emme oranı (%)	0.7	0.6
Yassılık Endeksi (%)	14.0	9.0
İri agregaların parçalanmalara karşı direnci (%)	20	20

### 3.1.2. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu puzolanik özellik gösteren atık bir malzemedir. Demir üretimi esnasında yan ürün olarak oluşan bu malzeme beton üretiminde kullanıldığında betonun dayanıklılığını artırır ve betona yüksek mukavemet sağlar. Aynı zamanda taze betonun işlenebilirliğini ve priz süresini artırır terlemesini azaltır. Sertleşmiş betonda ise geçirimsizliği azalttığı gibi sülfata karşı dayanıklılığını da artırır. Demir üretiminde yan ürün olan yüksek fırın cürufu ekonomik bir malzemedir ve aynı zamanda atık bir malzeme değerlendirilip kullanıldığı için de çevre dostudur. Şekil 3.2.'de yapılan deneylerde kullanılmış olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gösterilmiştir. Çizelge 3.2.' de ise deneylerde kullanılmış öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu özellikleri belirtilmiştir.



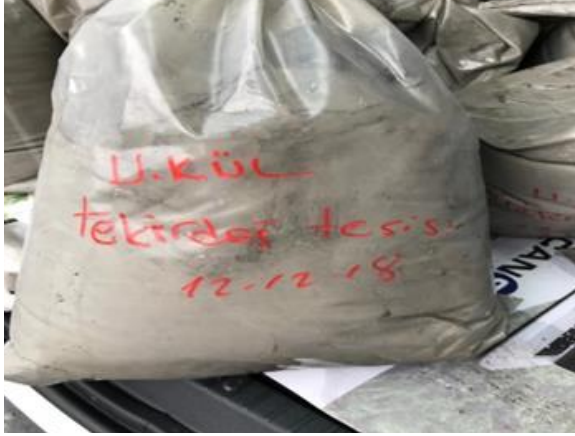
**Şekil3. 2.** Deneylerde kullanılmış öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

**Çizelge3. 2.** Deneyleerde kullanılanmış öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu özellikleri

Kimyasal Analizler	Sonuç
CaO (%)	37.92
SiO <sub>2</sub> (%)	37.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	13.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1.16
MgO (%)	5.64
SO <sub>3</sub> (%)	0.23
K <sub>2</sub> O (%)	0.56
Na <sub>2</sub> O (%)	0.84
Cl (%)	0.02
S (%)	0.78
TiO <sub>2</sub> (%)	0.66
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.55
Kızdırma Kaybı (%)	0.01
Özgöl Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.95
Özgöl Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	5131

### 3.1.3. F-tipi uçucu kül

F-tipi uçucu küller bağlayıcılık özelliğine sahip atık bir malzemedir. Termik santrallerdeki kömürün yakılmasıyla bacadaki filtrelerde tutulan ve biriken bu malzeme çok iyi bir puzolandır. Uçucu küllerin içeriğinde bulunan bileşenler termik santrallerde yakılmış olan kömürlerin kalitesine ve cinsine bağlı olarak farklılık gösterir. Uçucu küllerin kimyasal analizde ağırlıkça Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> ve CaO bulunur. Bu bileşenlerin bulunma miktarı uçucu külün çeşidini belirler. Tip C ve Tip F olmak üzere iki tip uçucu kül bulunur. Bu deney kapsamında bitümlü kömürden elde edilmiş F- tipi uçucu kül kullanılmıştır. F-tipi uçucu külün kalsiyum miktarı C-tipi uçucu külden daha azdır. F-tipi uçucu külün içeriğinde bulunana CaO miktarı %10'dan daha azdır ve içeriğinde bulunan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub> bileşenlerinin toplam miktarı ise %70'den daha fazladır. Şekil 3.3.' de yapılan deneylerde kullanılanmış F-tipi kül gösterilmektedir. Çizelge 3.3.' de ise deneyde kullanılanmış F-tipi külün özellikleri belirtilmiştir.



**Şekil3. 3.** Deneilerde kullanılmış F-tipi kül

**Çizelge3. 3.** Deneilerde kullanılmış F-tipi kül özellikleri

Uçucu Külde Bulunan Bileşenler	Sonuç
CaO (%)	1.79
SiO <sub>2</sub> (%)	56.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	26.37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.44
MgO (%)	2.35
SO <sub>3</sub> (%)	0.06
K <sub>2</sub> O (%)	3.80
Na <sub>2</sub> O (%)	1.09
Cl (%)	0.09
Kızdırma Kaybı (%)	2.20
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.05

#### 3.1.4. Alkali aktivatörler

Çimentosuz üretilen geopolimer betonlarda kullanılan yüksek fırın cürufuyla ve uçucu külle bağlayıcılık özellikleri kazandırmak için alkali aktivatör kullanılır. Yapılan deney kapsamında puzolanları aktifleştirmek için cam suyu olarak da bilinen sodyum silikatla (  $Na_2SiO_3$  ) ve sodyum hidroksitin (NaOH) birleşimi kullanılmıştır. Sodyum silikat (  $Na_2SiO_3$  ) sıvı formda kullanılmış olup sodyum hidroksit (NaOH) ise %98 saflıkta katı formda kullanılmıştır. Sodyum bazlı alkali solüsyonlar potasyum

bazlı alkali solüsyonlardan daha uygun fiyatlı olduğu için deneyde sodyum bazlı alkali solüsyon kullanılmıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisini hazırlamak için sodyum hidroksit (NaOH) kütlesi 6 saat önceden suyla karıştırılır ve aktif hale getirilir. Suyla tepkimeye giren sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinden ısı çıkışı görülür. Şekil 3.4.' de yapılan deneyde kullanılmış olan sodyum hidroksit (NaOH) gösterilmiştir. Çizelge 3.4.' deyse deneyde kullanılmış olan sodyum silikat ( $Na_2SiO_3$ ) özelliği belirtilmiştir.



**Şekil3. 4.** Deneylerde kullanılmış sodyum hidroksit (NaOH)



**Çizelge3. 4.** Deneyleerde kullanılmış sodyum silikat ( $Na_2SiO_3$ ) özellikleri

Bileşenler	Değerler
$SiO_2$	% 22 - % 25
$NaO_2$	% 10 - % 12
Yoğunluğu	1. 39 g/cm <sup>3</sup>
Görünümü	Renksiz

### 3.1.5. Kimyasal katkı maddesi

Gerçekleştirilen deney çalışmalarında üretilen geopolimer betonların S4 kıvamda olabilmesi için kimyasal katkı kullanılması gerekir. Bu deneyde kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı bir katkı malzemesi kullanıldı. Şekil 3.5.' de yapılan deneyde kullanılmış olan kimyasal katkı gösterilmektedir. Çizelge 3.5.' de deneyde kullanılmış olan kimyasal katkının (süper akışkanlaştırıcı) özellikleri belirtilmiştir.



**Şekil3. 5.** Deneyleerde kullanılmış süper akışkanlaştırıcı

**Çizelge3. 5.** Deneyleerde kullanılmış süper akışkanlaştırıcı özellikleri

Ürünün Özellikleri	Kimyasal Katkı
Rengi	Opak
Durum	Sıvı-Likit form
Özgöl Ağırlığı	1.07 g / cm <sup>3</sup>
Katı Maddenin Ağırlığı (%)	31. 93
Suda Çözünebilen Klor (%)	0. 04
pH	6. 03

### **3.2. Deneysel Metot**

#### **3.2.1. Numune kalıpları**

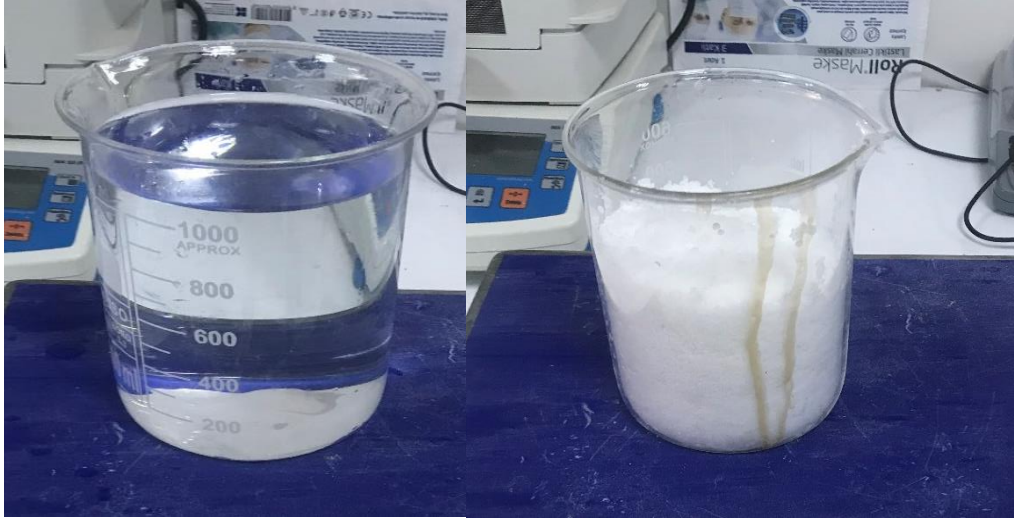
Yapılan deney kapsamında geopolimer beton numuneler için küp kalıplar kullanılmıştır. Küp numune kalıplarının boyutları 15 cm x 15 cm x 15 cm' dir. Beton priz alıp sertleştikten sonra kalıplardan daha kolay ve hasar görmeden çıksın diye geopolimer beton hazırlandıktan sonra önceden temizlenmiş ve yağlanmış kalıplara yerleştirilir. Kalıplar yağlandıktan sonra numunelerin numarası ve betonun çeşidini belirtecek etiketler yerleştirilir ve beton 3 parçaya bölünecek şekilde parça parça eklenir. Priz alan beton numunelerin kalıplardan ayrılması için kompresör yardımıyla hava verilir ve bu sayede beton numuneler kalıplardan daha kolay ayrılmış olur. şekil 3.6. 'da kullanılan küp beton kalıpları gösterilmektedir.



**Şekil3. 6.** Deneyleerde kullanılan küp beton kalıpları

### **3.2.2. Alkali solüsyon hazırlığı**

Yapılmış olan deney kapsamında puzolanları aktif etmek için iki çeşit alkali aktivatör kullanılmıştır. Bunlar sodyum silikat (  $Na_2SiO_3$  ) ve sodyum hidroksit (  $NaOH$  ) dir. Yapılan deneyde sodyum silikat (  $Na_2SiO_3$  ) / sodyum hidroksit (  $NaOH$  ) oranı olarak 2.5 kullanıldı. Sodyum hidroksit (  $NaOH$  ) katısını saf olarak betona koyduğumuz takdirde aktif hale gelmez. Bu yüzden suyla karıştırılır. Sodyum hidroksit (  $NaOH$  ) suyla tepkimeye girdiğinde ısı açığa çıkar. Isınan çözeltiyi betonda kullanabilmek için geopolimer beton üretiminden yaklaşık bir gün öncesinden sodyum hidroksit (  $NaOH$  ) çözeltisinin hazırlanmış olması gerekir. Böylece soğuk  $NaOH$  çözeltisi kullanılarak erken priz gibi sorunların ortaya çıkması engellenmiş olur. Şekil 3.7.' de deneyleerde kullanılan sodyum hidroksitle (  $NaOH$  ) su gösterildi.



**Şekil3. 7.** Deneyde kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) ve H<sub>2</sub>O

### 3.2.3. Karışım hazırlığı

Gerçekleştirilen deney yöntemlerinde geopolimer beton üretimi için birçok malzeme farklı oranlarda beton karışımına eklenir. Bu deneyde üretilen betonlarda çimento kullanılmadığı için çimentonun bağlayıcılık özelliğini betonun içerisine konulan puzolanlar ve onları aktif hale getiren alkali aktivatörler ile sağlarız. Yapılan deneyde puzolan olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Bu bağlayıcı puzolanlar üç farklı oranda kullanılmış ve denenmiştir. Bu bağlayıcı miktarları kg/m<sup>3</sup> olarak sırasıyla 400, 500 ve 600 kg/m<sup>3</sup> olarak kullanılmıştır. Puzolanları aktif hale getiren alkali solusyon ise sodyum silikatla (  $Na_2SiO_3$  ) sodyum hidroksitin beraber ( NaOH ) kullanıldığı karışımdır. Sodyum silikat(  $Na_2SiO_3$  ) / Sodyum hidroksit( NaOH ) oranı 2.5 olarak kullanılmıştır. Ayrıca toplam alkali aktivatör/ bağlayıcı malzeme miktarı olaraksa 0. 45 ile 0. 55 olacak şekilde tasarlanmıştır. Çizelge 3.6 - 3.17' de 1m<sup>3</sup> farklı geopolimer betonların üretilmesinde kullanılacak olan malzemelerin kg cinsinden miktarı verilmiştir. Bir başka deyişle bu deney programlarında üretilecek geopolimer betonlarının reçeteleri verilmiştir. Yapılan deneyde farklı bağlayıcıların ve bu bağlayıcıların oranlarının beton dayanımına ve dayanıklılığına olan etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda FA100-400-0.45, FA100-400-0.55, FA100-500-0.45, FA100-500-0.55, FA100-600-0.45, FA100-600-0.55, S25FA75-400-0.45, S25FA75-400-0.55, S25FA75-500-0.45, S25FA75-500-0.55, S25FA75-600-0.45, S25FA75-600-0.55 numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu numuneler %3.5 tuzlu su çözeltisine uzun süreli olarak tabii tutulmuştur.

**Çizelge3. 6.** FA100-400-0.45 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarı ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	464
	NoII	464
İnce Agrega	Kum	298
	Kırma Kum	298
F-tipi kül		400
Süper akışkanlaştırıcı		4.50
SS (sodyum silikat)		128. 57
SH (sodyum hidroksit)		51. 43
İlave Su		30

**Çizelge3. 7.** FA100-400-0.55 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	432
	NoII	432
İnce Agrega	Kum	277
	Kırma Kum	277
F-tipi kül		400
Süper akışkanlaştırıcı		4. 50
SS (sodyum silikat)		157. 14
SH (sodyum hidroksit)		62. 86
İlave Su		30

**Çizelge3. 8.** FA100-500-0.45 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	382
	NoII	382
İnce Agrega	Kum	246
	Kırma Kum	246
F-tipi kül		500
Süper akışkanlaştırıcı		3
SS (sodyum silikat)		160. 71
SH (sodyum hidroksit)		64. 29
İlave Su		37. 50

**Çizelge3. 9.** FA100-500-0.55 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	342
	NoII	342
İnce Agrega	Kum	219
	Kırma Kum	219
F-tipi kül		500
Süper akışkanlaştırıcı		3
SS (sodyum silikat)		196. 43
SH (sodyum hidroksit)		78. 57
İlave Su		37. 50

**Çizelge3. 10.** FA100-600-0.45 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	300
	NoII	300
İnce Agrega	Kum	193
	Kırma Kum	193
F-tipi kül		600
Süper akışkanlaştırıcı		1. 2
SS (sodyum silikat)		192. 86
SH (sodyum hidroksit)		77. 14
İlave Su		45

**Çizelge3. 11.** FA100-600-0.55 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	252
	NoII	252
İnce Agrega	Kum	161
	Kırma Kum	161
F-tipi kül		600
Süper akışkanlaştırıcı		1.2
SS (sodyum silikat)		235. 71
SH (sodyum hidroksit)		94. 29
İlave Su		45

**Çizelge3. 12.** S25FA75-400-0.45 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	476
	NoII	476
İnce Agrega	Kum	306
	Kırma Kum	306
Yüksek fırın cürufu		100
F-tipi kül		300
Süper akışkanlaştırıcı		6. 10
SS (sodyum silikat)		128. 57
SH (sodyum hidroksit)		51. 43
İlave Su		30

**Çizelge3. 13.** S25FA75-400-0.55 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	443
	NoII	443
İnce Agrega	Kum	285
	Kırma Kum	285
Yüksek fırın cürufu		100
F-tipi kül		300
Süper akışkanlaştırıcı		6.10
SS (sodyum silikat)		157. 14
SH (sodyum hidroksit)		62. 86
İlave Su		30



**Çizelge3. 14.** S25FA75-500-0.45 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	397
	NoII	397
İnce Agrega	Kum	255
	Kırma Kum	255
Yüksek fırın cürufu		125
F-tipi kül		375
Süper akışkanlaştırıcı		2.27
SS (sodyum silikat)		160. 71
SH (sodyum hidroksit)		64. 29
İlave Su		37. 50

**Çizelge3. 15.** S25FA75-500-0.55 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	357
	NoII	357
İnce Agrega	Kum	229
	Kırma Kum	229
Yüksek fırın cürufu		125
F-tipi kül		375
Süper akışkanlaştırıcı		2.27
SS (sodyum silikat)		196. 43
SH (sodyum hidroksit)		78. 57
İlave Su		37. 50

**Çizelge3. 16.** S25FA75-600-0.45 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	318
	NoII	318
İnce Agrega	Kum	204
	Kırma Kum	204
Yüksek fırın cürufu		150
F-tipi kül		450
Süper akışkanlaştırıcı		1. 50
SS (sodyum silikat)		192. 86
SH (sodyum hidroksit)		77. 14
İlave Su		45

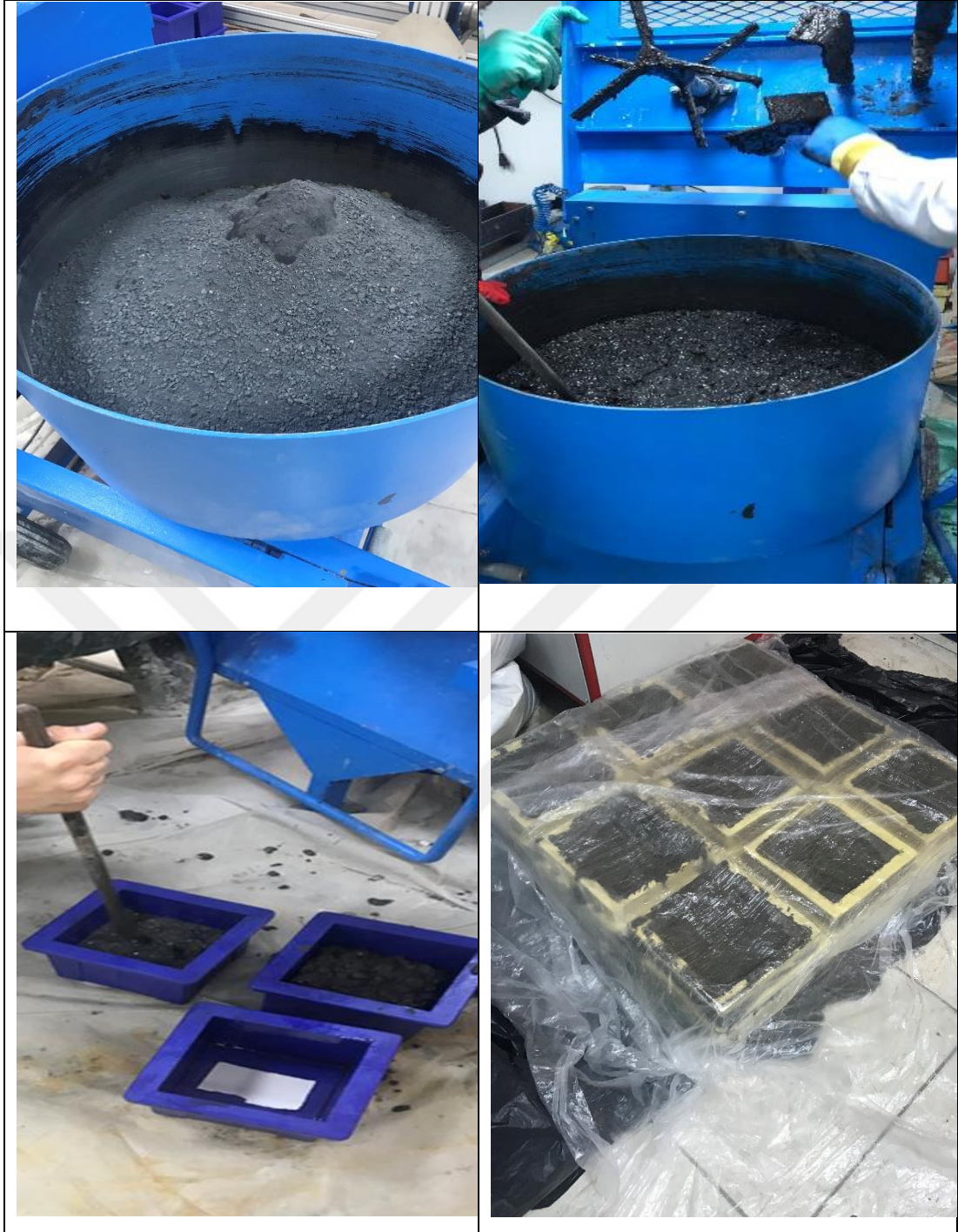
**Çizelge3. 17.** S25FA75-600-0.55 numunelerinin reçetesi

Malzemeler		Miktarlar ( kg /m <sup>3</sup> )
İri Agrega	NoI	270
	NoII	270
İnce Agrega	Kum	173
	Kırma Kum	173
Yüksek fırın cürufu		150
F-tipi kül		450
Süper akışkanlaştırıcı		1. 50
SS (sodyum silikat)		235. 71
SH (sodyum hidroksit)		94. 29
İlave Su		45

### 3.2.4. Geopolimer betonun üretimi

Bu deney kapsamında üretilen betonlar standart karıştırma yöntemiyle üretilmiştir. Beton üretimine başlarken ilk olarak karıştırmak için kullanılan mikserin tabanı güzelce temizlenir. Temizlenen mikser alt kısmına ilk önce iri agrega ve sonra ince agrega eklenir ve kuru karışım 2 dk homojen oluncaya kadar karıştırılır. Birbirine karışmış ince ve iri agreganın üzerine puzolan olan katı maddeleri de eklenir ve kuru malzemeler 2 dk daha karıştırılır. Mikserdeki kuru malzemelerin üzerine sıvı formda bulunan alkali aktivatörler, kimyasal katkı ve ilave su iki parçaya ayrılarak eklenir ve ikişer dakika daha karıştırılır. Homojen kıvama gelene kadar karıştırılan beton karışımı önceden yağlanmış ve etiketlenmiş küp beton kalıplarına üç parçaya ayrılarak kademeli bir şekilde yerleştirilir. Beton yerleştirilen kalıplar şişlenir ve tokmaklanır. Beton numuneler düz bir zemine yerleştirilir ve üzerleri mala yardımıyla düzeltilir ve üzerlerine temiz ve kuru bir muşamba örtülür. Bu sayede beton numuneleri pürüzsüz ve düzgün bir şekilde priz alırlar ve içerisindeki kimyasal katkı ve alkali aktivatörlerin buharlaşarak azalması engellenmiş olur. Şekil 3.8. 'de geopolimer betonun üretim aşamaları da gösterilmiştir.





**Şekil3. 8.** Geopolimer betonun üretim aşaması

### 3.2.5. Kür işlemi

Üretimi tamamlanan betonlar priz aldıktan sonra kompresör yardımıyla konuldukları kalıplardan çıkarılırlar. Kalıplardan çıkarılan beton numunelerine herhangi bir su kürü uygulanmamıştır. Beton numuneler ortam kürüne ve 70°C de 48 saat fırın kürüne tabii tutulmuştur. Kür işlemleri arasında betonlar düz bir zemin üzerinde laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Kürlenen beton numunelerin 365 gün

boyunca tuzlu su (%3,5 NaCl) çözeltisi etkisiyle basınç dayanımları incelenmiştir. Ayrıca numune yüzeylerinde meydana gelen değişimler de incelenmiştir.

### 3.2.6. Tuzlu su çözeltisi

Isı kürüne ve ortam kürüne tabii tutulan beton numunelerin ağırlıkları tuzlu su çözeltisi öncesinde tek tek ölçülüp, numaraları ve etiketleri yenilenerek havuza konuldu. Havuza %3,5 NaCl yoğunluklu tuzlu su çözeltisi eklendi ve beton numuneler 365 gün tuzlu su çözeltisinde bekletildi. Numunelerin solüsyonun içinde kalmasına dikkat edildi. Böylece küp numunelerin her bir yüzeyinden tuzlu su penetrasyonuna olanak sağlandı. 365 günün sonunda tuzlu su çözeltisinden çıkarılan numuneler düz bir zemine bırakılan demir mazgalalar üzerine çıkarıldı (alt yüzeylerinin de kuruması için) ve 24 saat boyunca kuruması için bekletildi. 24 saatin sonunda kuruyan beton numuneleri tek tek tartılıp ağırlıkları not edildi. Ağırlıkları ölçülen numuneler fotoğraflandı ve basınç dayanım testi için beton test cihazına yerleştirildi. Şekil 3.9.'da beton numunelerinin %3,5 NaCl yoğunluklu tuzlu su çözeltilerinde bekletilmesi ve çıkarılması gösterilmiştir.



**Şekil3. 9.** Beton küp örneklerinin %3,5 NaCl çözeltilerinde bekletilmesi ve çıkarılması

### 3.2.7. Ağırlıktaki değişim

Deney için üretilen geopolimer beton numuneleri tuzlu su çözeltisine konulmadan önce numuneler tek tek tartıldı ve ağırlıkları not edildi. Ağırlıkları ölçülen numuneler %3,5 NaCl yoğunluklu tuzlu su çözeltisinde 365 gün boyunca bekletildi. 365 gün sonra çıkarılan beton numuneleri kuruması için 24 saat bekletildikten sonra ağırlıkları yeniden ölçüldü. Şekil 3.10.'da tartılan numuneler gösterilmiştir. Geopolimer numuneler tuzlu su içerisine daldırıldıktan sonra ağırlıklarındaki değişimler aşağıda verilen formül kullanarak hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlıktaki yüzde(\%) değişim} = [(B-A) / A] \times 100$$

A=Başlangıç ağırlığı – numunelerin tuzlu suya maruz kalmadan öncesindeki ağırlık

B= %3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki ağırlık



**Şekil3. 10.** Geopolimer küp örneklerinin ağırlığının ölçümü

### **3.2.8. Basınç mukavemetinin belirlenmesi**

Tartılıp ağırlığı alınan beton numuneleri basınç dayanımları ölçülmek üzere önceden kalibre edilen beton pres cihazına yerleştirilir. Betonlar daha çok basınca çalıştığı için sınıflandırılırken beton basınç dayanımlarına göre sınıflandırılırlar. Beton pres cihazına yerleştirilen geopolimer beton numunelerine kuvvet uygulanır ve  $Kuvvet (N) / Alan (mm^2)$  formülü ile basınç kuvvetleri MPa cinsinden ölçülür. Yapılan deney kapsamında kullanılan beton pres cihazında 2000 kN kapasitesi ile kuvvet uygulanmıştır. Basınç deneylerini AS1012.9-1999 standardına uygun olacak şekilde yaptık. Şekil 3.11.'de Geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarının ölçülmesi gösterilmektedir.



Şekil3. 11. Geopolimer küp beton örneklerinin basınç mukavemetlerinin ölçümü



## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

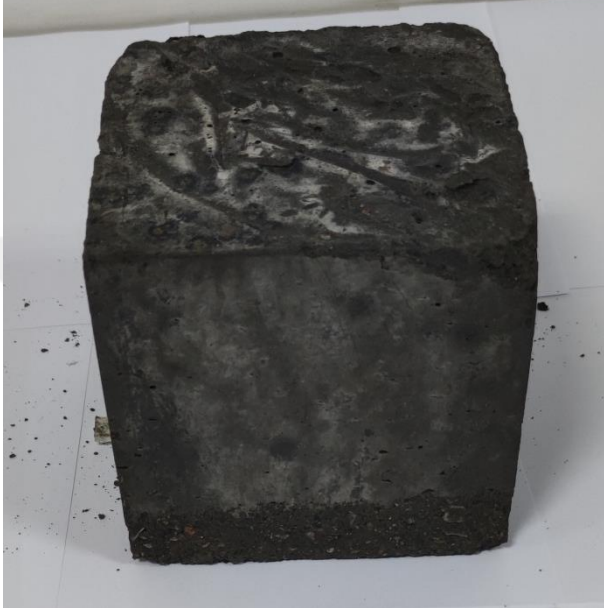



### BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışma kapsamında geopolimer betonlar iki çeşit bağlayıcı kullanılarak üretilmiştir. Bu bağlayıcılar uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur. Bunlarda birinci tamamen uçucu kül ile üretilen numunelerden oluşurken, diğer serilerde ise uçucu kül oranı %75 mertebesinde ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu %25 mertebesinde tutulmuştur. Buradaki amaç %25 cüruf eklemenin geopolimer beton performansını nasıl etkileyeceğini irdelemektir. Ayrıca bu çalışma kapsamında farklı bağlayıcı miktarı kullanarak değişik geopolimer betonlar üretilmiştir. Bunlardan ilki olan FA100-400, FA100-500, FA100-600 serisinde bağlayıcı olarak %100 uçucu kül kullanılmış olup, betonlar gecikmiş ısı kürü (70°C) ve ortam kürüne tabii tutulmuştur ve kür işlemi biten geopolimer beton numuneleri 365 gün boyunca tuzlu su (%3,5 NaCl) çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra görsel değişimleri, ağırlık değişimleri ve basınç dayanımları incelenmiştir. İkinci olarak S25FA75-400, S25FA75-500, S25FA75-600 serisinde %25 yüksek fırın cürufu ve %75 uçucu kül kullanılmıştır. Betonlar ilk seride olduğu gibi gecikmiş ısı kürü (70°C) ile ortam kürüne tabii tutulmuştur. Kür işlemi biten geopolimer beton numuneleri 365 gün boyunca tuzlu su (%3,5 NaCl) çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra görsel değişimleri, ağırlık değişimleri ve basınç dayanımları incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan mineral katkı maddelerini aktif hale getirmek için alkali aktivatörler (sodyum silikat( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit( $\text{NaOH}$ )) kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında üretilen bütün betonlarda Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )/Sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) oranı 2.5 olarak kullanılmıştır. Alkali solüsyon/bağlayıcı oranı ise 0,45 ve 0,55 olarak seçildi. Bunun amacı ise geleneksel Portland çimentosu ile yapılan çalışmalarda deniz suyuna maruz kalan bölgelerde bu iki su/çimento oranının kullanılmasına izin verilmiştir. Çalışmada  $400 \text{ kg/m}^3$ ,  $500 \text{ kg/m}^3$ ,  $600 \text{ kg/m}^3$  olacak şekilde 3 değişik miktar seçilmiştir. Bu çalışmada üretilmiş geopolimer örnekler 90 gün boyunca kür işlemleri (ısı kürü ve ortam kürü ) tamamlandıktan sonra tartılıp bir kısım numuneler tuzlu suya maruz bırakmaksızın (kontrol) basınç deneylerine tabii tutulurken, diğer kısmı ise %3,5 NaCl içeren çözeltide 365 gün (1 yıl) bekletilmiştir. 365 gün sonunda numuneler tuzlu sudan çıkartılıp görsel denetlemeler maksadıyla fotoğrafları çekilmiş, sonrasında ağırlıkları ölçülüp, basınç dayanım testlerine tabii tutulmuştur.

#### 4.1. Görsel İncelemeler

Deney kapsamında alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı (AS/BM) oranı 0,45 ve 0,55 olarak üretilen farklı betonlar ve bu betonların tuzlu su etkisindeki davranışları Şekil 4.1’ de görülmektedir. AS/BM oranları %100 uçucu kül içeren (FA100-400, FA100-500, FA100-600) ve %25 yüksek fırın cürufu ve %75 uçucu kül içeren (S25FA75-400, S25FA75-500, S25FA75-600) betonlar arasında karşılaştırılmıştır ve bağlayıcı miktarlarının, oranlarının ve çeşitlerinin geopolimer beton numunelerinin üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Her iki tür beton da gecikmiş ısı kürüne (70°C) ve ortam kürüne tabii tutulmuş ve kür işlemleri biten geopolimer beton numuneleri 365 gün tuzlu su (%3,5 NaCl) çözeltisinde kalmıştır. Şekil 4.1’ e bakıldığında beton numunelerinin yüzeylerinde bozulmalar meydana gelmiştir. Tuzlu su beton yüzeylerinin korozyonuna neden olur bu da betonda çatlamalara, ufalanmalara ve renk kayıplarına sebebiyet vermektedir. Tuzda bulunan klor (Cl) iyonları hem geleneksel betonun hem de geopolimer betonların dayanımını ve durabilitesini azaltır. Hizmet ömrü azalan beton yüzeylerinde zamanla parçalanmalar meydana gelir. Şekil 4.1’de sol tarafta olan numunelerin AS/BM oranı 0.45 iken, sağ tarafta olan numunelerin AS/BM oranı 0.55’tir. 365 gün tuzlu su çözeltisine maruz bırakılan numune fotoğrafları incelendiğinde numunelerin yüzeylerinde çatlaklar, parça dökülmeleri ve yüzey aşınmaları görülmektedir. İlk olarak AS/BM etkisi incelendiğinde AS/BM oranının tuzlu su etkisi altında belirgin bir fark yaratmadığı anlaşılmaktadır. Yani AS/BM oranı 0.45 ile AS/BM oranı 0.55 olan geopolimer betonların yüzeylerinde meydana gelen bozulma miktarı birbirine benzer olduğu, aralarında belirgin bir farkın olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak OPC betonlarında su/çimento oranı 0.55 olduğunda karışımdaki su miktarının artmasıyla dayanımın azaldığı ve geçirgenliğin arttığı bilinmektedir. Fakat AS/BM oranında BM oranı sabit iken AS miktarının artması karışımdaki su miktarının artmasına paralel olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi miktarı da artmaktadır. Bu da karışımdaki alkali miktarının artmasından ötürü dayanımın düşmemesini açıklamaktadır. Diğer bir etkisi ise %100 uçucu küllü ve %75 uçucu küllü %25 yüksek fırın cürufu geopolimer betonların karşılaştırılmasıdır. Burada ise %100 uçucu küllü geopolimer betonların yüzeylerinde meydana gelen aşınmanın daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da karışımdaki düşük kalsiyum içeriği nedeniyle dayanımın düşük olması ve geçirgenliğin fazla olması ile açıklanabilir. %25 yüksek fırın cürufu katkılı geopolimer beton numunelerin yüzey

fotoğrafları detaylıca incelendiğinde tuzlu su etkisi altında bozulma miktarının çok daha az olduğu açıkça görülmektedir. Bu da dayanımın artmasıyla beraber geçirgenliğin azalması ve dolayısıyla bozulmanın azalması olarak ifade edilebilir.

AS / BM oranı 0,45 olan beton numuneleri	AS / BM oranı 0,55 olan beton numuneleri
 A dark, rectangular concrete specimen with a rough, weathered surface, showing signs of degradation and some surface cracking.	 A dark, rectangular concrete specimen with a smoother surface compared to the 0,45 ratio specimen, showing less weathering and cracking.
FA100-400-0,45	FA100-400-0,55
 A dark, rectangular concrete specimen with a very rough and heavily cracked surface, indicating significant weathering and degradation.	 A dark, rectangular concrete specimen with a smoother surface and fewer cracks compared to the 0,45 ratio specimen, showing better resistance to weathering.
FA100-500-0,45	FA100-500-0,55



**FA100-600-0,45**



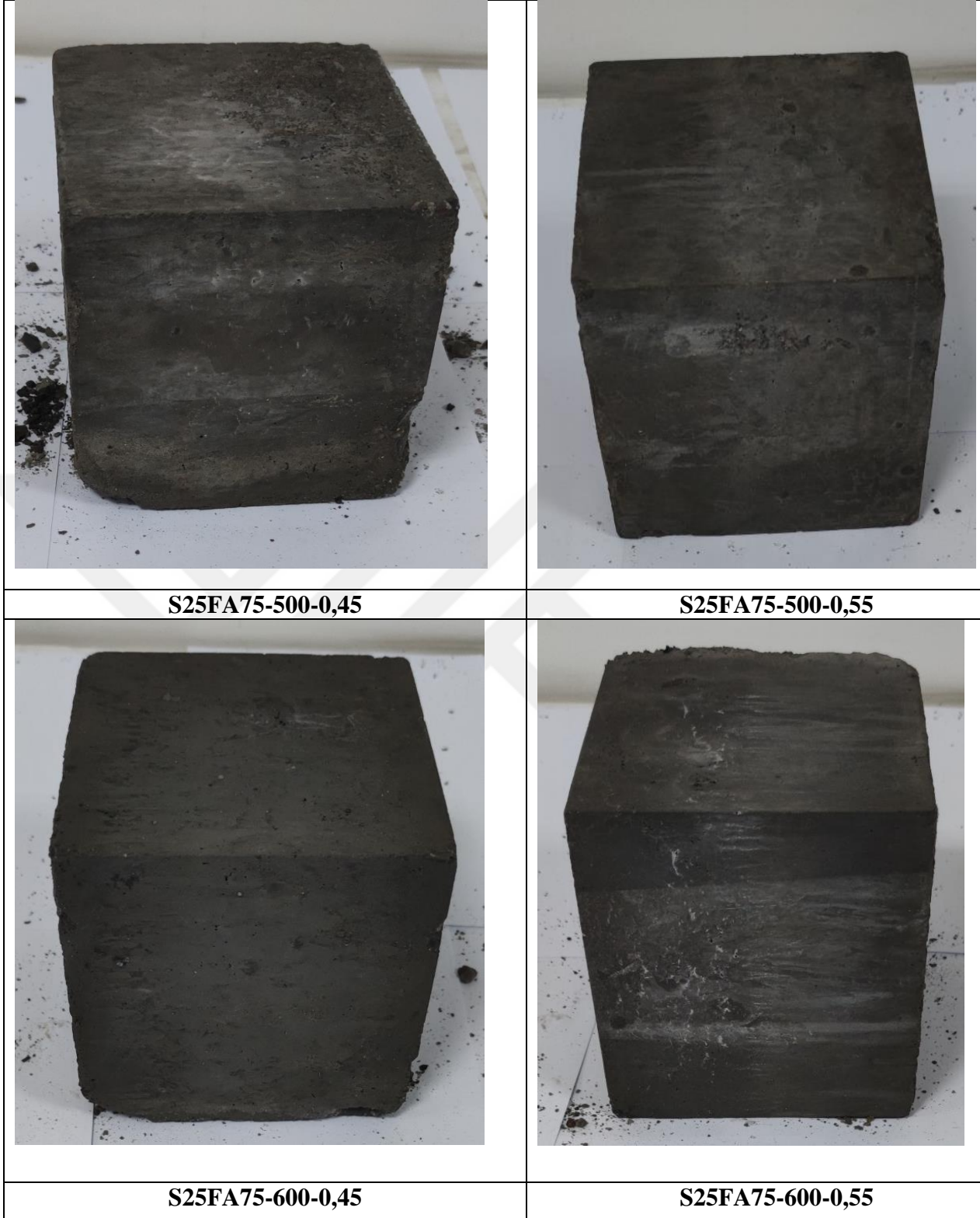
**FA100-600-0,55**



**S25FA75-400-0,45**



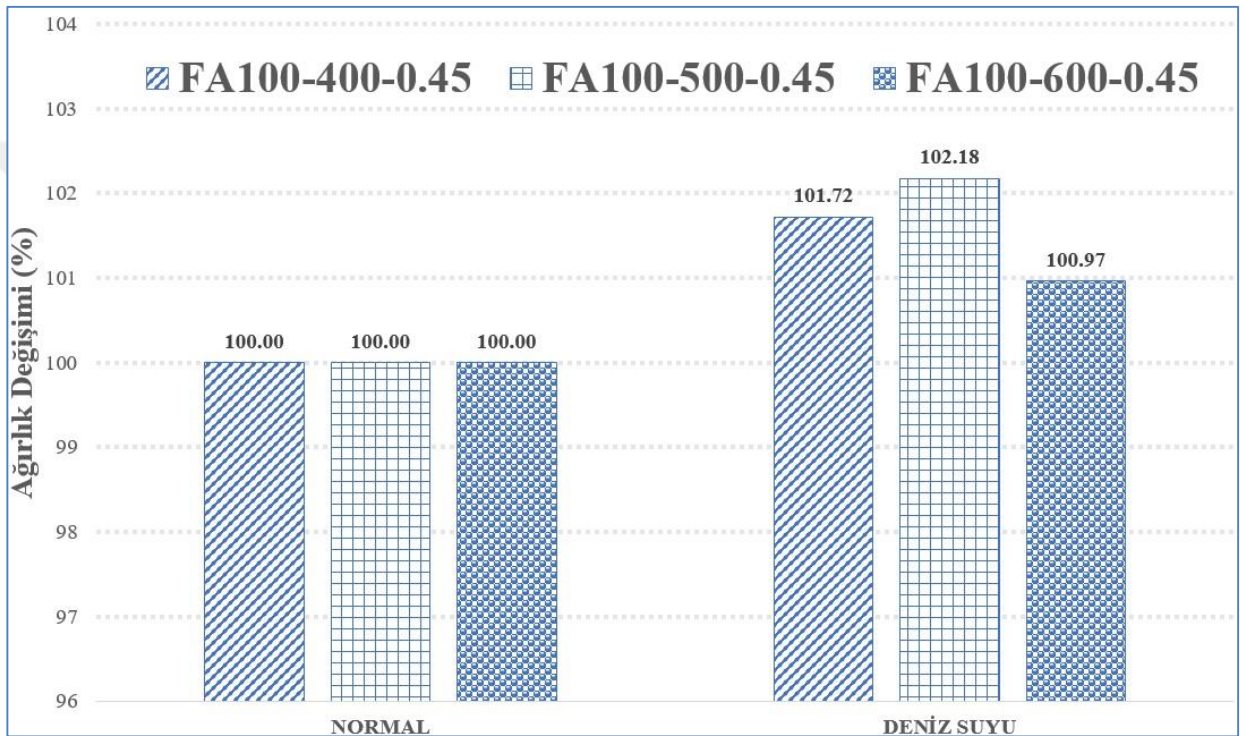
**S25FA75-400-0,55**



**Şekil4. 1.** 365 gün(1 yıl) %3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin görsel değişimlerinin incelenmesi

## 4.2. Ağırlıklardaki Değişimler

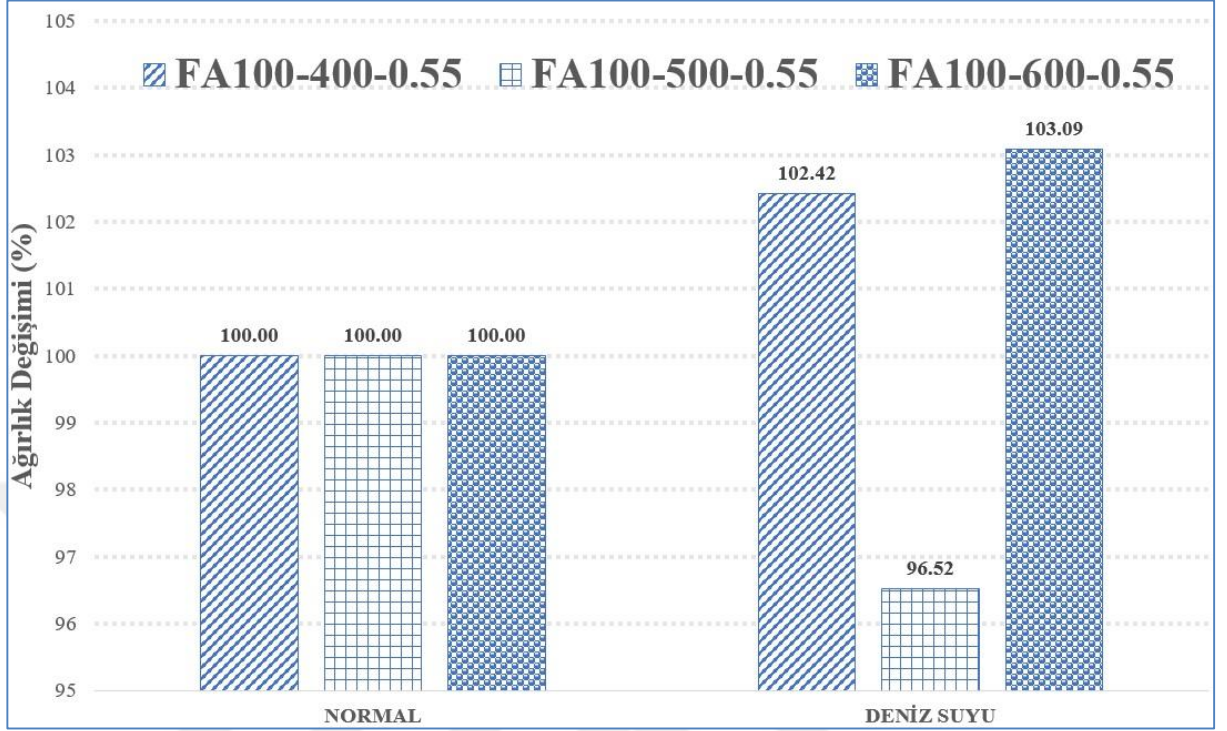
Yapılan deney kapsamında üretilen geopolimer beton numunelerinin deniz suyu etkisine maruz bırakılmadan önceki ağırlıkları ile deniz suyu etkisine maruz bırakıldıktan sonraki ağırlıkları ölçülmüş olup ağırlıklardaki değişimler gözlemlenmiştir. Geopolimer beton numunelerindeki bu değişimler betonda bozulmalar olduğu anlamına gelir. Geopolimer beton numunelerin 365 gün boyunca %3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki ağırlık kaybı veya ağırlık artışı aşağıdaki tablolarda verilmiştir.



**Şekil4. 2.** FA100-400-0,45, FA100-500-0,45 ve FA100-600-0,45 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.2.' de FA100-400-0,45, FA100-500-0,45 ve FA100-600-0,45 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları gösterilmektedir. Numunelerde alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı (AS/BM) oranı 0.45'tir. Bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan numunelerimiz 365 gün deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra ağırlığında % 1.72 artış görülmektedir. 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı miktarına sahip numunelerimiz 365 gün deniz suyuna maruz bırakıldığında % 2.18 oranında artış eğilimi olduğunu görmekteyiz. 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı oranlarına sahip numunelerimizde ise ağırlık oranlarında % 0.97 oranında diğerlerine nazaran daha küçük bir artış olduğunu görmekteyiz. Bu artışların nedeni olarak ise numunelerin tuzlu su çözeltisini bünyesine çekerek şişmesidir. Yani

numuneler %3.5 NaCl solüsyonunu dış yüzeylerden iç yüzeylere doğru çektiği için ağırlıklarında artma meydana gelmiştir. Bu artış %1 ile %2 mertebelerinde kalmıştır.



**Şekil4. 3.** FA100-400-0,55, FA100-500-0,55 ve FA100-600-0,55 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.3.'de FA100-400-0,55, FA100-500-0,55 ve FA100-600-0,55 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçlarını görmekteyiz. Bu numunelerin AS/BM oranı 0.55'tir. Bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan numunelerimiz 365 gün deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra ağırlığında % 2.42 artış görülmektedir. 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı miktarına sahip numunelerimiz 365 gün deniz suyuna maruz bırakıldığında % 3.48 oranında azalma eğilimi gösteren ağırlık değişimi olduğunu görmekteyiz. 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı oranlarına sahip numunelerimizde ise ağırlık oranlarında % 3.09 oranında artış olduğunu görmekteyiz. 400 ve 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı miktarlarındaki artışların nedeni %3.5 NaCl solüsyonu emilimi olurken, 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı miktarındaki düşüşün nedeni ise önce ağırlıkta artma meydana gelmiştir ve daha sonra numunedeki bozulmalardan ötürü (parça dökülmesi, yüzey erozyonu) numune ağırlığında azalma meydana gelmiştir.



**Şekil4. 4.** S25FA75-400-0,45, S25FA75-500-0,45 ve S25FA75-600-0,45 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

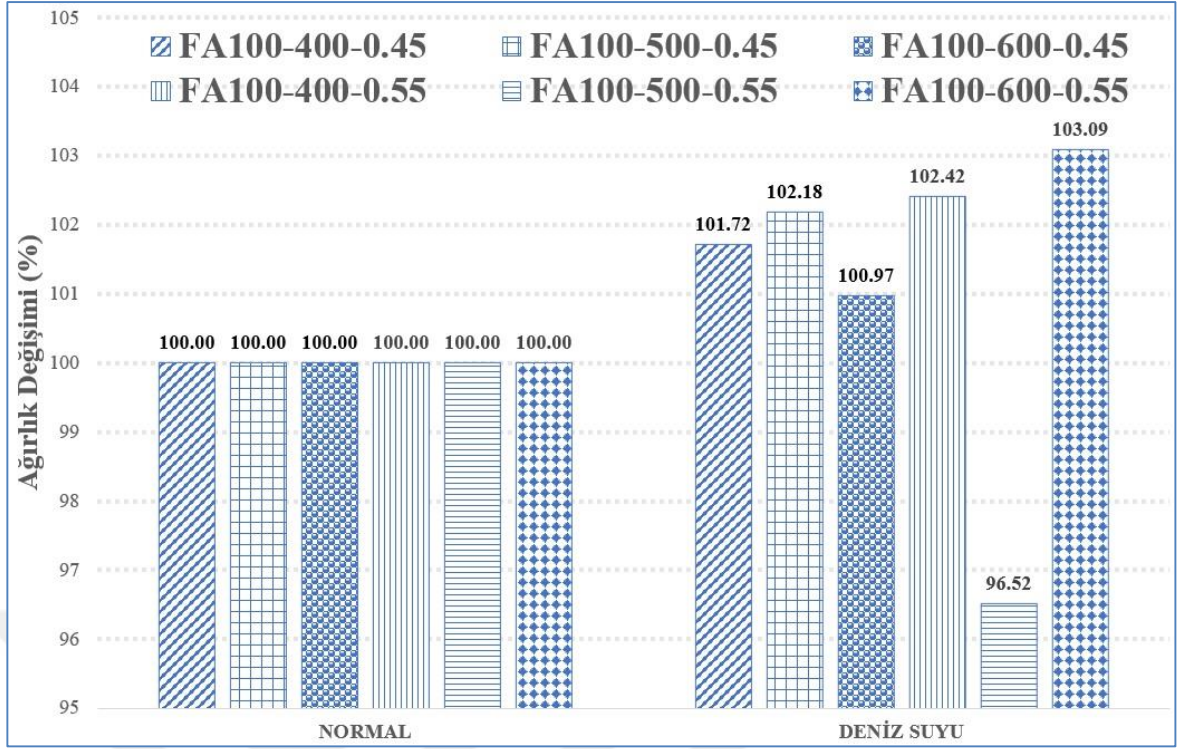
Şekil 4.4.'de ise %25 öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren S25FA75-400-0,45, S25FA75-500-0,45 ve S25FA75-600-0,45 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları verilmiştir. Bu numunelerimizde AS/BM oranı 0.45'tir. Bağlayıcı miktarı  $400 \text{ kg/m}^3$  olan numunelerimiz 365 gün deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra ağırlığında % 1.25 artış görülmektedir.  $500 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı miktarına sahip numunelerimiz 365 gün deniz suyuna maruz bırakıldığında % 2.23 oranında artış eğilimi olduğunu görmekteyiz.  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı oranlarına sahip numunelerimizde ise ağırlık oranlarında % 2.41 oranı ile en fazla artış olduğunu görmekteyiz.  $400$ ,  $500$  ve  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı miktarına sahip numunelerimizde tuzlu su çözeltisi emilimi nedeniyle numune ağırlıklarında artış oluşmuştur. Bu artış en az  $400 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip numunelerde, en fazla ise  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip yüksek fırın cürufu geopolymer betonlarda görülmüştür.





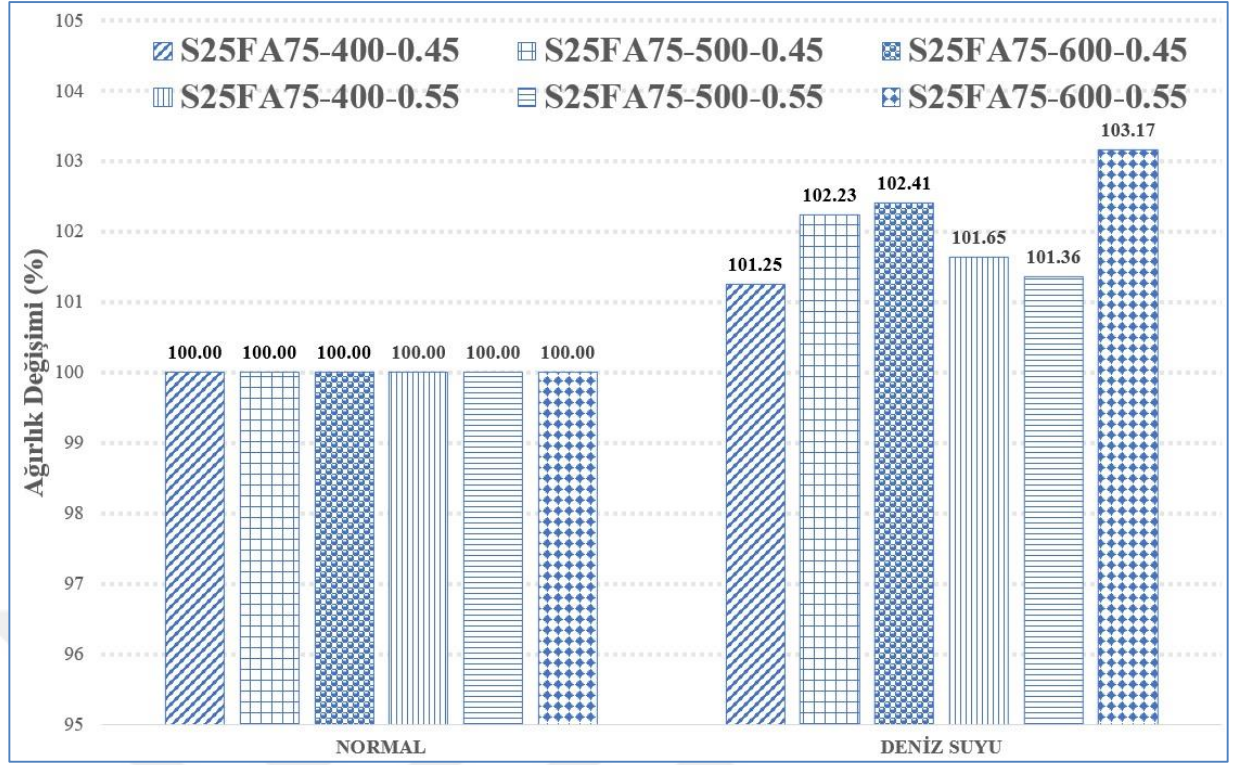
**Şekil4. 5.** S25FA75-400-0,55, S25FA75-500-0,55 ve S25FA75-600-0,55 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.5.'deyse S25FA75-400-0,55, S25FA75-500-0,55 ve S25FA75-600-0,55 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları görmekteyiz. Burada AS/BM oranı 0.55'tir. Bağlayıcı miktarı  $400 \text{ kg/m}^3$  olan numunelerimiz 365 gün deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra ağırlığında % 1.65 artış görülmektedir.  $500 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı miktarına sahip numunelerimiz 365 gün deniz suyuna maruz bırakıldığında % 1.36 oranında artış eğilimi olduğunu görmekteyiz.  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı oranlarına sahip numunelerimizde ise ağırlık oranlarında % 3.17 oranı ile en fazla artış olduğunu görmekteyiz.  $400, 500 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı miktarına sahip numunelerimizde ki en az ağırlık artışı  $500 \text{ kg/m}^3$  numunelerinde oluşurken, en fazla ağırlık artışı ise  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip numunelerde olmuştur.



**Şekil4. 6.** %100 uçucu kül içeren FA100 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.6. ise AS/BM oranı 0.45 ve 0.55 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların ağırlık değişimi sonuçları birlikte gösterilmiştir. En fazla ağırlık azalması 0.55 AS/BM oranına ve  $500 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip geopolimer betonlarda, en az ağırlık artışı ise 0.45 AS/BM oranına  $600 \text{ kg/m}^3$  sahip geopolimer betonlarda olmuştur. Tuzlu su solüsyonu nedeniyle en fazla ağırlık artışı ise 0.55 AS/BM oranına ve  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip geopolimer betonlarda oluşmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, ağırlık artışının veya ağırlık kaybının çok olması betonlardaki bozulma miktarının çok olduğunu göstermektedir. Numune bozulması en çok AS/BM oranı 0.55 olan ve 500 ile  $600 \text{ kg/m}^3$  betonlarda gözlemlenirken, en az bozulma ise AS/BM oranı 0.45 ve bağlayıcı miktarı  $600 \text{ kg/m}^3$  olan betonlarda gerçekleşmiştir.



**Şekil4. 7.** %75 uçucu kül %25 yüksek fırın cüruf içeren S25FA75 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.7.'de ise AS/BM oranı 0.45 ve 0.55 olan ve %75 uçucu kül %25 yüksek fırın cüruf içeren S25FA75 numunelerimizde deniz suyu etkisi sonrası ağırlık değişimleri gösterilmektedir. Deniz suyu etkisi sonrası en az ağırlık artışı S25FA75-400-0.45 numunelerinde yani  $400 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya ve 0.45 AS/BM oranına sahip betonlarda gözlemlenirken, en fazla ağırlık artışı ise S25FA75-600-0.55 numunelerinde yani  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya ve 0.55 AS/BM oranına sahip numunelerde gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında AS/BM oranı 0.45 ve 0.55 olan numunelerde en fazla ağırlık değişimi  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip geopolimer numunelerde gözlemlenmiştir. En az ağırlık değişimi ise AS/BM oranı 0.55 olan numunelerde  $400 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip numunelerde, AS/BM oranı 0.45 olan numunelerde ise  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip numunelerde gerçekleşmiştir.

### 4.3. Basınç Dayanımı Değişimleri

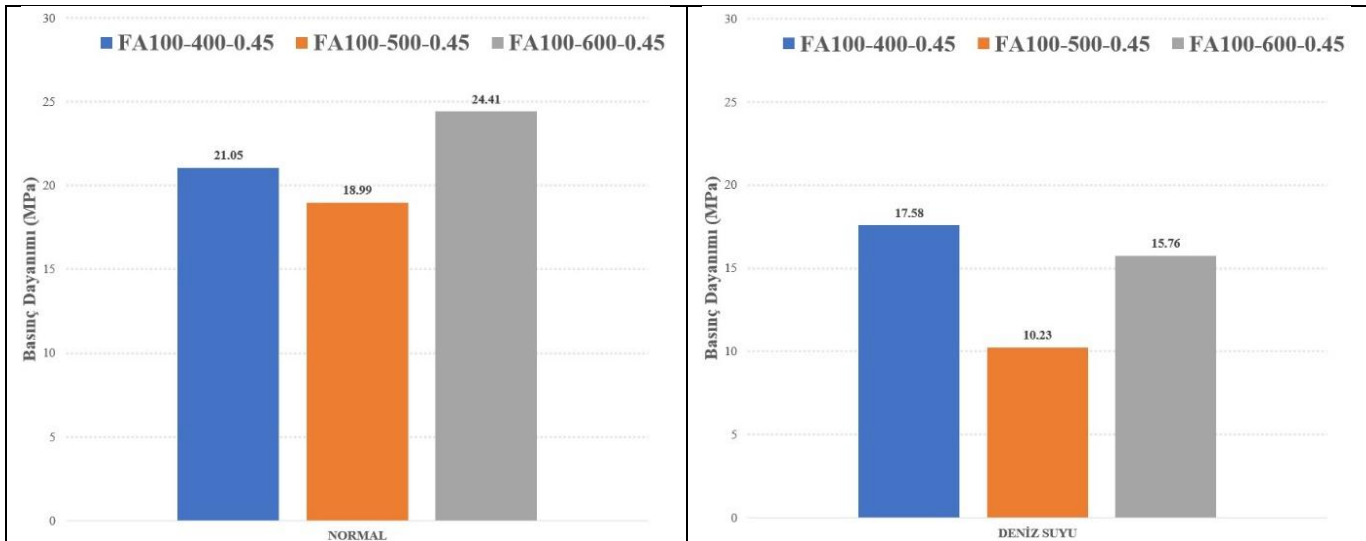
Bu çalışma kapsamında  $150 \times 150 \times 150$  mm küp numuneler üzerinde deniz suyuna tabii tutulmamış ve tutulmuş numuneler üzerinde basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8.'de normal ortam (deniz suyuna maruz bırakılmamış, Şekil 4.8.a) ve deniz suyu sonrası (Şekil 4.8.b) %100 uçucu küllü geopolimer

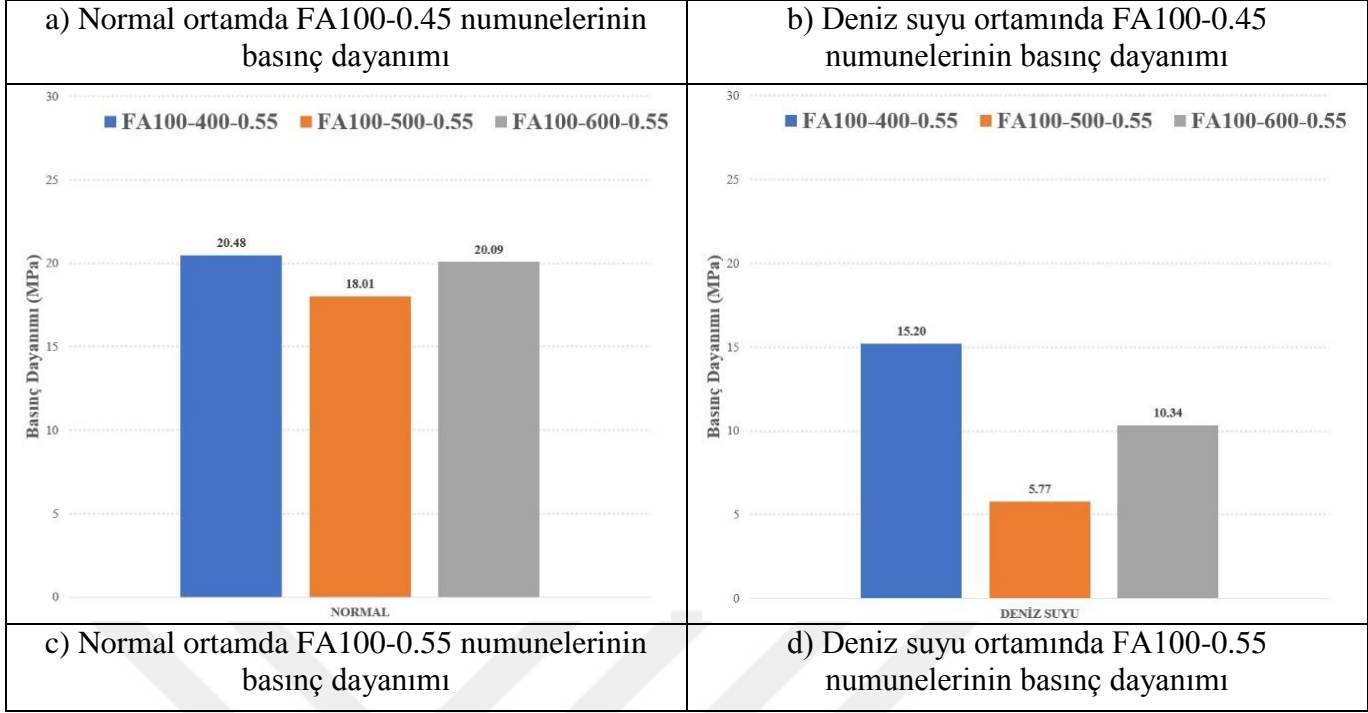
numunelerin basınç dayanım sonuçları verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre, normal ortamda FA100-400-0.45 yani alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı (AS/BM) oranı 0.45 ve bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan numunelerin basınç dayanımı 21.05 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra basınç değerimiz 17.58 MPa olup % 16.48 azalmıştır.

AS/BM oranı 0.45 ve bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan %100 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 18.99 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 10.23 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 46.13 olmuştur.

AS/BM oranı 0.45 ve bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan %100 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 24.41 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 15.76 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 35.44 olmuştur.

AS/BM oranı 0.45 olan %100 uçucu küllü geopolimer numuneler karşılaştırıldığında normal ortamda en yüksek basınç dayanımı FA100-600-0.45 (24.41 MPa) olurken, normal ortamda en düşük dayanım ise FA100-500-0.45 (18.99 MPa) numunelerinde bulunmuştur. Deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra ise en yüksek basınç dayanımı FA100-400-0.45 numunelerinde (17.58 MPa) çıkarken, en düşük basınç dayanımı ise FA100-500-0.45 numunelerinde (10.23 MPa) çıkmıştır.





**Şekil4. 8.** FA100 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.8.c ve 4.8.d ise AS/BM oranı 0.55 olan %100 uçucu küllü geopolimer numunelerin sırasıyla deniz suyuna maruz bırakılmamış (normal) ve deniz suyuna maruz bırakılmış ortamında basınç dayanımı değerlerini göstermektedir. AS/BM oranı 0.55 ve bağlayıcı miktarı  $400 \text{ kg/m}^3$  olan %100 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 20.48 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 15.20 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 25.78 olmuştur.

AS/BM oranı 0.55 ve bağlayıcı miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  olan %100 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 18.01 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 5.77 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 67.96 olmuştur.

AS/BM oranı 0.55 ve bağlayıcı miktarı  $600 \text{ kg/m}^3$  olan %100 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 20.09 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 10.34 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 48.53 olmuştur.

AS/BM oranı 0.55 olan %100 uçucu küllü geopolimer numuneler karşılaştırıldığında normal ortamda en yüksek basınç dayanımı FA100-400-0.55 (20.48 MPa) olurken, normal ortamda en düşük dayanım ise FA100-500-0.55 (18.01 MPa) numunelerinde bulunmuştur. Deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra ise en

yüksek basınç dayanımı FA100-400-0.55 numunelerinde (15.20 MPa) çıkarken, en düşük basınç dayanımı ise FA100-500-0.45 numunelerinde (5.77 MPa) çıkmıştır.

Şekil 4.9 ise %25 cüruf ile %75 uçucu kül katkılı geopolimer betonların deniz suyu ortamına maruz bırakılmamış ve bırakılmış ortamlardaki basınç dayanımının sonuçlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, normal ortamda S25FA75-400-0.45 yani alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı (AS/BM) oranı 0.45 ve bağlayıcı miktarı  $400 \text{ kg/m}^3$  olan numunelerinin basınç dayanımı 22.30 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra basınç değerimiz 17.92 MPa olup % 19.64 azalmıştır.

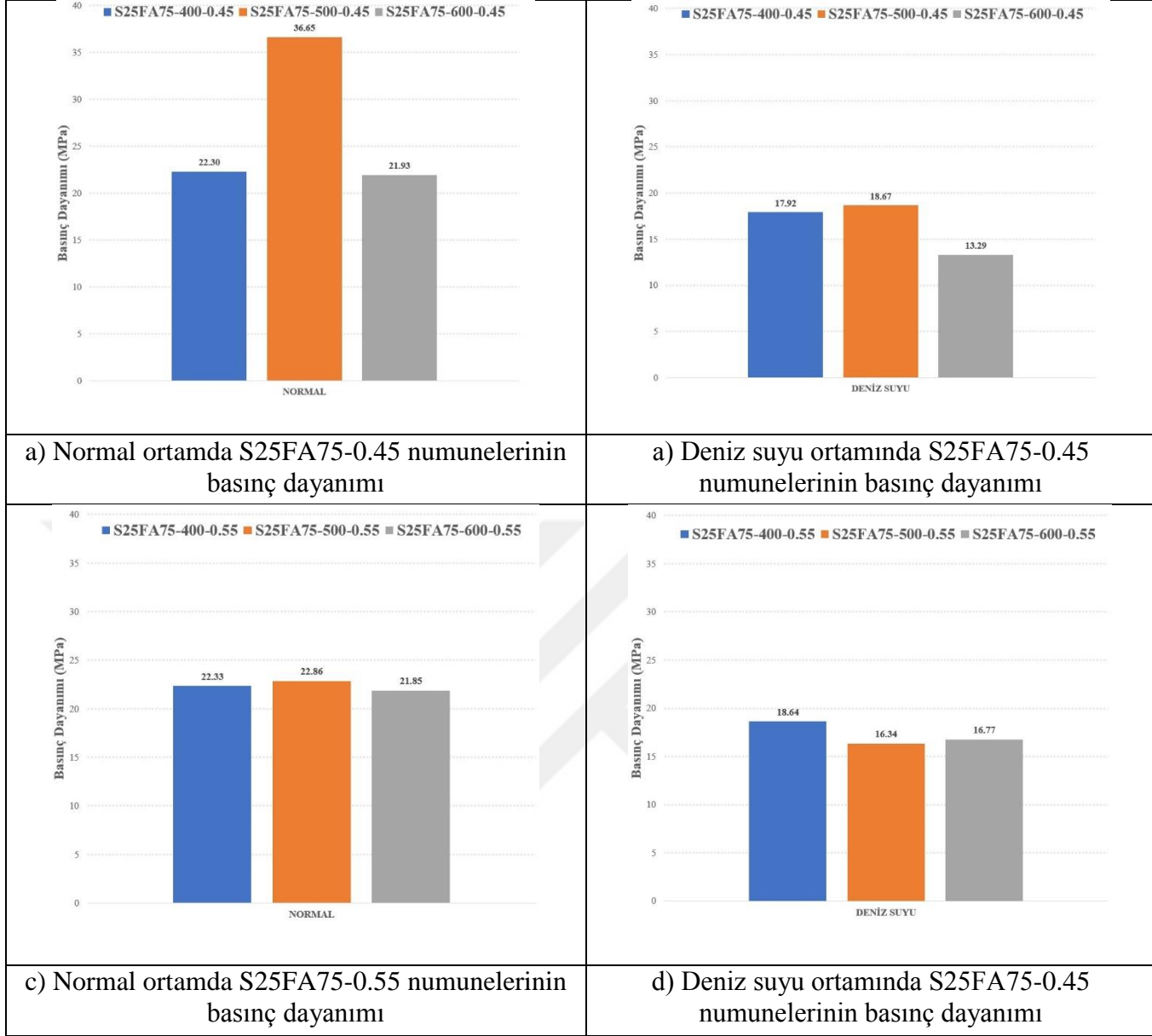
AS/BM oranı 0.45 ve bağlayıcı miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  olan %25 cürufllu ve %75 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 36.65 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 18.67 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 49.06 olmuştur.

AS/BM oranı 0.45 ve bağlayıcı miktarı  $600 \text{ kg/m}^3$  olan %25 cürufllu ve %75 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 21.93 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 13.29 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 39.39 olmuştur.

Şekil 4.9.c ve 4.9.d ise AS/BM oranı 0.55 olan %25 cürufllu ve %75 uçucu küllü geopolimer numunelerin sırasıyla deniz suyuna maruz bırakılmamış (normal) ve deniz suyuna maruz bırakılmış ortamında basınç dayanımı değerlerini göstermektedir. AS/BM oranı 0.55 ve bağlayıcı miktarı  $400 \text{ kg/m}^3$  olan %25 cürufllu ve %75 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 22.33 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 18.64 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 16.52 olmuştur.

AS/BM oranı 0.55 ve bağlayıcı miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  olan %25 cürufllu ve %75 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 22.86 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 16.34 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 28.52 olmuştur.

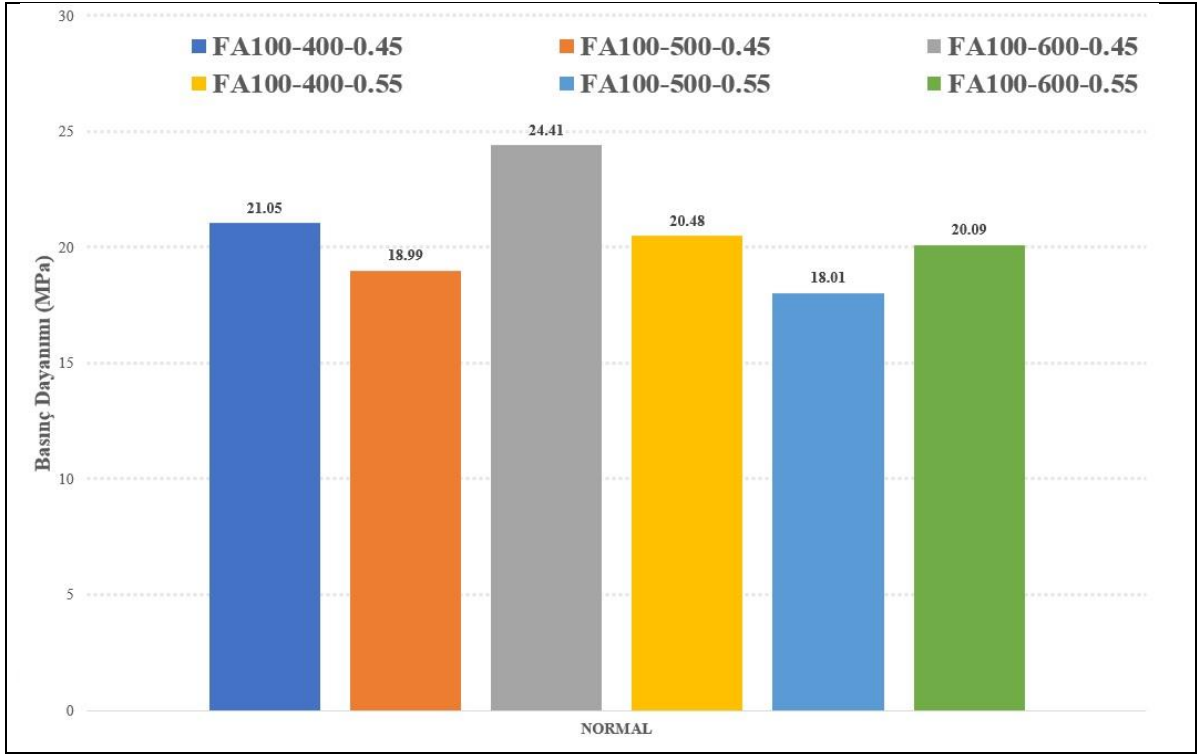
AS/BM oranı 0.55 ve bağlayıcı miktarı  $600 \text{ kg/m}^3$  olan %25 cürufllu ve %75 uçucu küllü geopolimer numunelerin normal ortamda basınç dayanımı 21.85 MPa iken, deniz suyuna maruz bırakıldıktan sonra 16.77 MPa değerine düşmüştür ve azalma miktarı % 22.79 olmuştur.



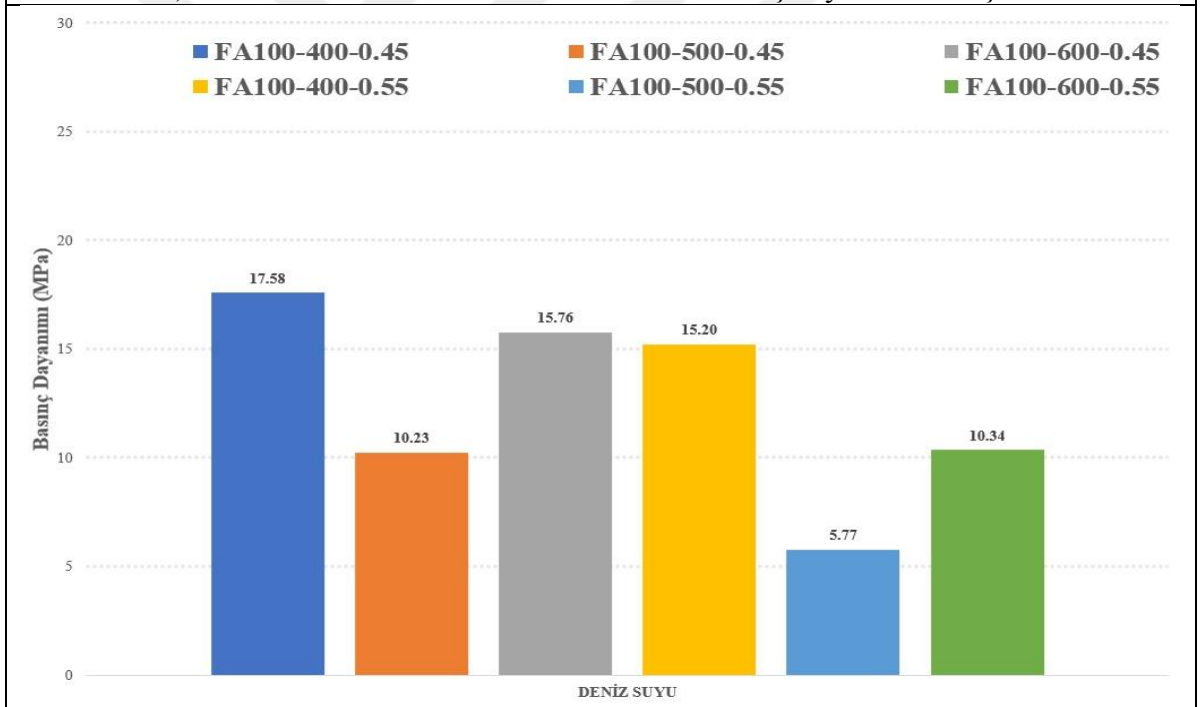
**Şekil4. 9.** S25FA75 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.10.a'da tüm %100 uçucu küllü numunelerin deniz suyuna maruz bırakılmamış ortamda basınç dayanım sonuçları gösterilmiştir. En yüksek basınç dayanımı FA100-600-0.45 geopolimer betonunda (24.41 MPa) elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise FA100-500-0.55 geopolimer betonlarında (18.01 MPa) elde edilmiştir.

Şekil 4.10.b'de ise tüm %100 uçucu küllü numunelerin deniz suyuna maruz bırakılmış ortamda basınç dayanım sonuçları gösterilmiştir. En yüksek basınç dayanımı FA100-400-0.45 geopolimer betonunda (17.58 MPa) elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise FA100-500-0.55 geopolimer betonlarında (5.57 MPa) elde edilmiştir.



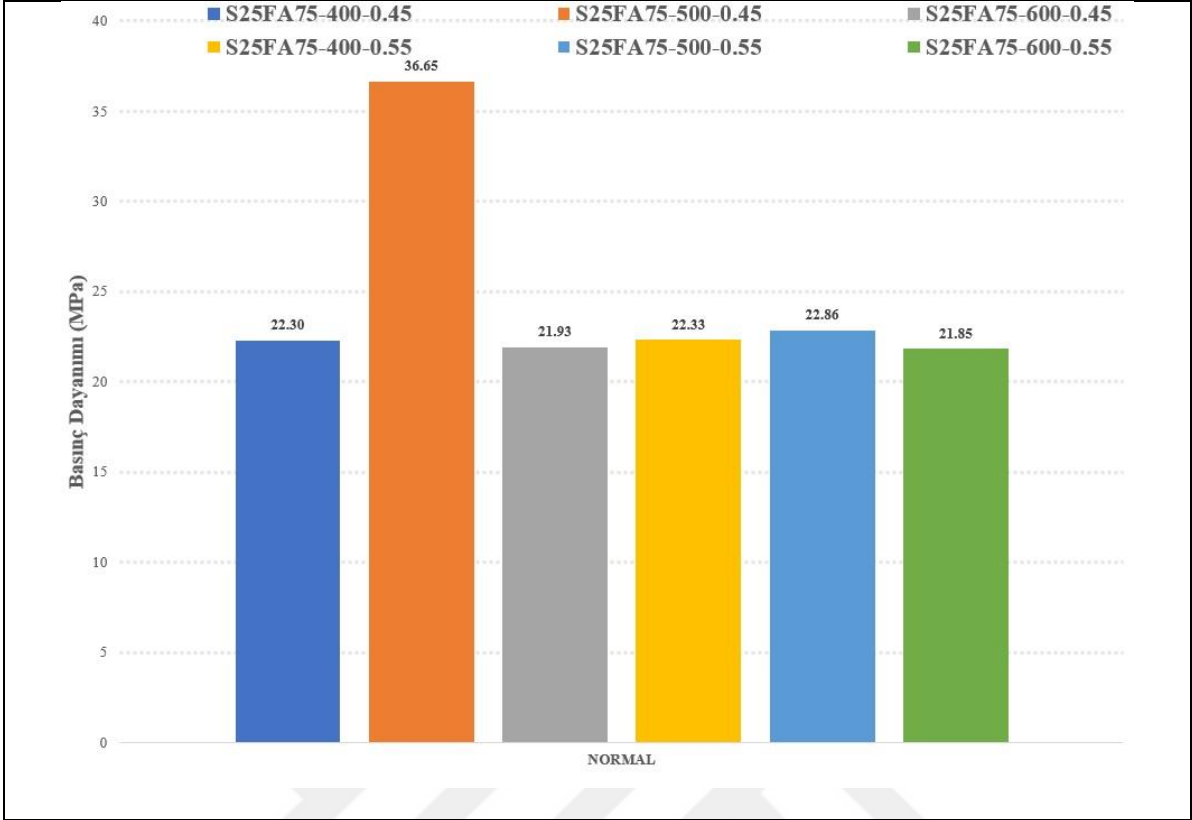
a) Normal ortamda FA100 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları



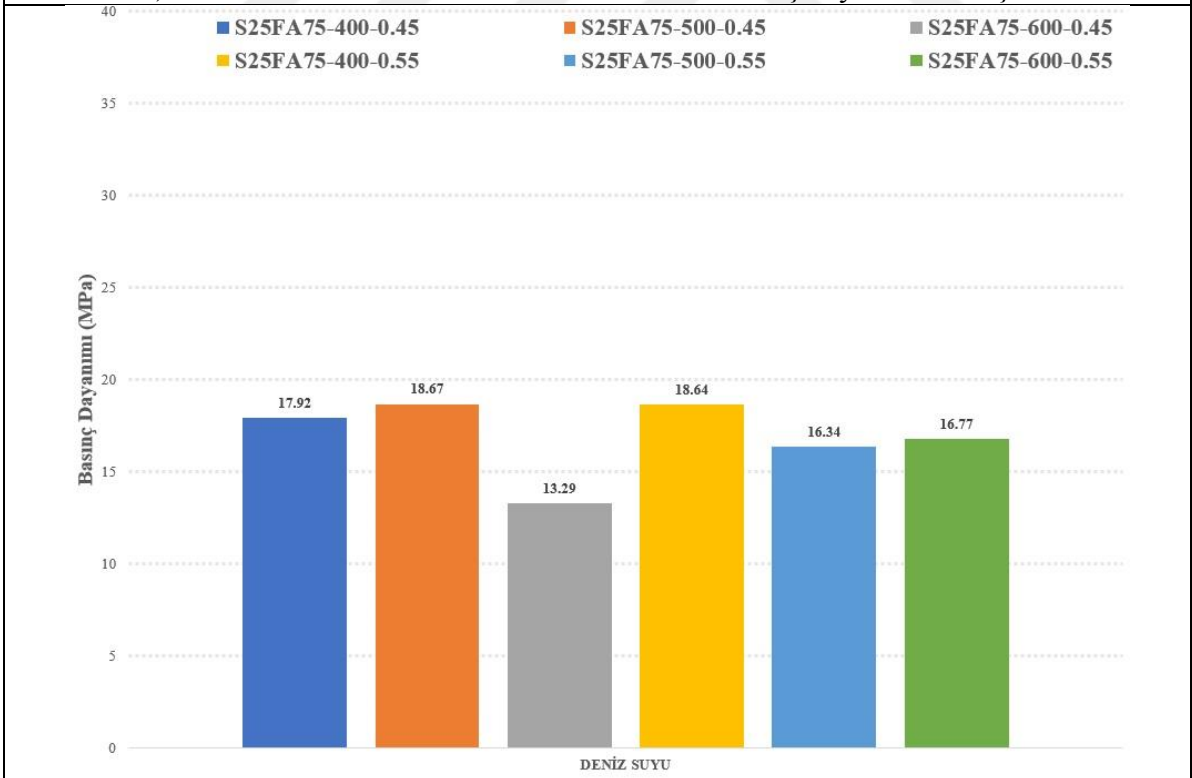
b) Deniz suyu ortamında FA100 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları



**Şekil4. 10.** FA100 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları



a) Normal ortamda S25FA75 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları



b) Deniz suyu ortamında S25FA75 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

**Şekil4. 11.** S25FA75 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.11.a'da tüm %25 yüksek fırın cürüflü ve %75 uçucu küllü numunelerin deniz suyuna maruz bırakılmamış (normal) ortamda basınç dayanım sonuçları

gösterilmiştir. En yüksek basınç dayanımı S25FA75-500-0.45 geopolimer betonunda (36.65 MPa) elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise S25FA75-600-0.55 geopolimer betonlarında (21.85 MPa) elde edilmiştir.

Şekil 4.11.b'de ise tüm %25 yüksek fırın cürufllu ve %75 uçucu küllü geopolimer numunelerin deniz suyuna maruz bırakılmış ortamda basınç dayanım sonuçları gösterilmiştir. En yüksek basınç dayanımı S25FA75-500-0.45 geopolimer betonunda (18.67 MPa) elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise S25FA75-600-0.45 geopolimer betonlarında (13.29 MPa) elde edilmiştir.

Tüm numuneler değerlendirildiğinde ise normal ortamda S25FA75 numuneleri FA100 numunelerinden hem 0.45 hem de 0.55 AS/BM oranlarında daha yüksek basınç dayanımı sonuçları vermiştir. Bunun nedeni yüksek fırın cürufundan gelen CaO miktarından kaynaklanmaktadır. Uçucu küllü numunelerin geopolimerizasyonunda N-S-A-H tipi jel oluşumu etkin olurken, yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde ise N-(C)-S-A-H tipi jeller basınç dayanımının gelişiminde etkin rol oynamaktadır. Normal ortamda en yüksek basınç dayanımı S25F75-500-0.45 numunelerinde (36.65 MPa) elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise FA100-500-0.55 numunelerinde (18.01) oluşmuştur. Deniz suyu ortamında ise en yüksek basınç dayanımı S25F75-500-0.45 numunelerinde (18.67 MPa) elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise FA100-500-0.55 numunelerinde (5.77 MPa) oluşmuştur.

Bağlayıcı miktarları düşünülmediğinde, yani 400-500-600 kg/m<sup>3</sup> değerleri bir bütün olarak hesaba katıldığında FA100-0.45 numunelerinin normal ortamda ortalama basınç dayanımı 21.48 MPa olurken, deniz suyu ortamında ise 14.52 MPa olmuştur ve azalma miktarı %32.40'dır. FA100-0.55 numunelerinin normal ortamda ortalama basınç dayanımı 19.53 MPa olurken, deniz suyu ortamında ise 10.44 MPa olmuştur ve azalma miktarı %46.55'dir.

Bağlayıcı miktarları S25FA75 numunelerinde de düşünülmediğinde, yani 400-500-600 kg/m<sup>3</sup> değerleri bir bütün olarak hesaba katıldığında S25FA75-0.45 numunelerinin normal ortamda ortalama basınç dayanımı 26.96 MPa olurken, deniz suyu ortamında ise 16.63 MPa olmuştur ve azalma miktarı %38.33'tür. S25FA75-0.55 numunelerinin normal ortamda ortalama basınç dayanımı 22.35 MPa olurken, deniz suyu ortamında ise 17.28 MPa olmuştur ve azalma miktarı %22.66 olmuştur.

FA100 geopolimer numunelerinin ortalama sonuçları değerlendirildiğinde, deniz suyuna tabii tutulmamış normal ortamda AS/BM oranı 0.45 olan numuneler AS/BM oranı 0.55 olan numunelere göre %10 daha fazla dayanım göstermiştir. Aynı FA100 numunelerinin deniz suyu etkisi sonrasında AS/BM oranı 0.45 olan numuneler AS/BM oranı 0.55 olan numunelere göre %39 daha fazla dayanım göstermiştir. Bu da özellikle %100 uçucu küllü geopolimer betonlarda özellikle durabilite gereksinimi olan yerlerde AS/BM oranının 0.45 olması önem kazanmaktadır.

S25FA75 geopolimer numunelerinin ortalama sonuçları değerlendirildiğinde, deniz suyuna tabii tutulmamış normal ortamda AS/BM oranı 0.45 olan numuneler AS/BM oranı 0.55 olan numunelere göre %21 daha fazla dayanım göstermiştir. Aynı S25FA75 numunelerinin deniz suyu etkisi sonrasında AS/BM oranı 0.45 olan numuneler AS/BM oranı 0.55 olan numunelerle birbirine benzer dayanım değerleri göstermiştir. Buradan çıkarılacak sonuç ise %25 cüruf ikamesinin betonun özellikle durabilite özelliklerini olumlu etkilediği sonucu ortaya çıkmıştır. Bu da cüruftaki CaO oranının yüksek olmasından dolayı N-C-A-S-H tipi jel ürünlerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır.

AS/BM oranı 0.45 olan %100 uçucu kül içeren numunelerde deniz suyu etkisiyle dayanım kaybı %32.68 olurken, AS/BM oranı 0.55 olan numunelerde ise bu dayanım kaybı %47.42'ye yükselmiştir. AS/BM oranı 0.45 olan %25 cüruf ve %75 uçucu kül içeren numunelerde deniz suyu etkisiyle dayanım kaybı %36.03 olurken, AS/BM oranı 0.55 olan numunelerde ise bu dayanım kaybı %22.61 olmuştur. Deniz suyundan dolayı AS/BM oranı 0.45 olan %100 uçucu küllü numuneler ile %25 cüruf ve %75 uçucu küllü numuneler benzer dayanım kaybı gösterirken, AS/BM oranı 0.55 olan %25 cüruf ve %75 kül katkılı geopolimer betonlar %100 küllü numunelere göre daha fazla durabilite direnci göstermiştir.

Çalışmamızın diğer bir amacı da AS/BM oranının etkisi yanında farklı bağlayıcı miktarlarının (400, 500, 600 kg/m<sup>3</sup>) deniz suyu etkisi sonrası dayanım ve durabilite performanslarını belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilirken AS/BM oranı 0.45 ile 0.55 numunelerinin ortalaması alınarak sadece bağlayıcı türü ve miktarına göre değerlendirme yapılmıştır. Normal ortamda ortalama olarak FA100-400 numuneleri 20.77 MPa, FA100-500 numuneleri 18.5 MPa, FA100-600 numuneleri ise 22.25 MPa basınç dayanımlarına sahiptir. 1 yıl deniz suyu etkisi sonrası FA100-400 numuneleri 16.39 MPa, FA100-500 numuneleri 8 MPa, FA100-600

numuneleri ise 13.05 MPa dayanım değerlerine düşmüştür. Deniz suyu etkisi basınç dayanımlarında azalma miktarları FA100-400 numuneleri için % 21.07, FA100-500 numuneleri için % 56.76, FA100-600 numuneleri için ise % 41.35 olmuştur. %100 kül katkıli geopolimer betonlar karşılaştırıldığında normal ortamda en yüksek basınç dayanımı 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıli betonlarda, en düşük basınç dayanımı ise 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıli betonlarda olmuştur. Fakat deniz suyu etkisi sonrasında en yüksek kalan dayanım 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda, en düşük kalan dayanım ise yine 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda gözlemlenmiştir. FA100 numuneleri normal ortamda dayanım olarak karşılaştırıldığında FA100-600 kg/m<sup>3</sup> > FA100-400 kg/m<sup>3</sup> > FA100-500 kg/m<sup>3</sup>, fakat durabilite performansları olarak karşılaştırıldığında ise FA100-400 kg/m<sup>3</sup> > FA100-600 kg/m<sup>3</sup> > FA100-500 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Sonuçlar detaylıca incelendiğinde, %100 küllü betonlarda normal ortamda en yüksek dayanım 600 kg/m<sup>3</sup> ve en düşük dayanım 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda elde edilirken, durabilite performansı en iyi betonlar 400 kg/m<sup>3</sup>, en kötü betonlar 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirilirken AS/BM oranı 0.45 ile 0.55 numunelerinin ortalaması alınarak sadece bağlayıcı türü ve miktarına göre S25FA75 geopolimer betonlarda da değerlendirme yapılmıştır. Normal ortamda ortalama olarak S25FA75100-400 numuneleri 22.32 MPa, S25FA75-500 numuneleri 29.76 MPa, S25FA75-600 numuneleri ise 21.89 MPa basınç dayanımlarına sahiptir. 1 yıl deniz suyu etkisi sonrası S25FA75-400 numuneleri 18.28 MPa, S25FA75-500 numuneleri 17.51 MPa, S25FA75-600 numuneleri ise 15.08 MPa dayanım değerlerine düşmüştür. Deniz suyu etkisi basınç dayanımlarında azalma miktarları S25FA75-400 numuneleri için % 18.08, S25FA75-500 numuneleri için % 41.17, S25FA75-600 numuneleri için ise % 31.11 olmuştur. %25 çürüf ve %75 kül katkıli geopolimer betonlar karşılaştırıldığında normal ortamda en yüksek basınç dayanımı 500 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıli betonlarda, en düşük basınç dayanımı ise 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıli betonlarda olmuştur. Fakat deniz suyu etkisi sonrasında en yüksek kalan dayanım 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda, en düşük kalan dayanım ise 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda (15.08 MPa) gözlemlenmiştir. S25FA75 numuneleri normal ortamda dayanım olarak karşılaştırıldığında S25FA75-500 kg/m<sup>3</sup> > S25FA75-400 kg/m<sup>3</sup> > S25FA75-600 kg/m<sup>3</sup>, fakat durabilite performansları olarak karşılaştırıldığında ise S25FA75-400 kg/m<sup>3</sup> > S25FA75-500 kg/m<sup>3</sup> > S25FA75-600 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Sonuç

olarak, %25 cürüflu ve %75 küllü betonlarda normal ortamda en yüksek dayanım 500 kg/m<sup>3</sup> ve en düşük dayanım 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda elde edilirken, durabilite performansı en iyi betonlar 400 kg/m<sup>3</sup> ve en kötü betonlar 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda elde edilmiştir.

Numunelerdeki bu basınç dayanımındaki azalmanın sebebi ise kalsiyum çözünmesi, sülfat ve klorür iyonlarının betona penetrasyonu olarak gösterilebilir. %100 uçucu küllü betonlarda klor bağlama oranı (düşük kalsiyum olduğundan dolayı) düşüktür, ayrıca uçucu küllü geopolimer numunelerin sülfat ve klor penetrasyonuna direnci düşük olduğundan dolayı durabilite performansı düşüktür. Cürüflu numunelerde ise yüksek CaO oranından dolayı klor bağlama oranı yüksektir böylece zararlı Friedel tuzu oluşumu önlenir. Ayrıca C-S-H oluşumu sebebiyle daha yoğun bir mikroyapı oluşur ve bu da klor ve sülfat geçirgenliğini azaltarak daha az bozulmayı sağlar.

## SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında %25 yüksek fırın cürufu ve %75 uçucu kül kullanılarak üretilen (S25FA75-400, S25FA75-500 ve S25FA75-600) betonlar ile %100 uçucu kül kullanılarak üretilen (FA100-400, FA100-500 ve FA100-600) betonlar kullanılmıştır. Bu geopolimer betonlarda bağlayıcı olarak kullanılan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu sodyum hidroksit(NaOH) ve sodyum silikat( $Na_2SiO_3$ ) kullanılarak aktifleştirilmiştir. Üretilen beton numuneleri 88 gün ortam kürüne ve ardından 70°C de 48 saat ısı(fırın) kürüne tabii tutulmuştur. Kür işlemi biten geopolimer beton numunelerinden bazıları 365 gün boyunca deniz suyu (%3,5 NaCl) etkisindeki görsel değişimleri, ağırlık değişimleri ve basınç dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Çalışmalarda bağlayıcı miktarı olarak 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>, 600 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere üç farklı miktar kullanılmıştır. Çalışma boyunca kullanılan alkali aktivatör oranı sodyum silikat( $Na_2SiO_3$ ) /sodyum hidroksit(NaOH) oranı 2,5 olarak kullanılmıştır. Ayrıca üretilen geopolimer beton numunelerinde 0,45 ve 0,55 olmak üzere iki farklı alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı (AS/BM) oranı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

Numuneler görsel olarak incelenmiş olup tuzlu suyun beton yüzeyler üzerinde yüzey korozyonuna sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca numunelerin yüzeylerinde çatlamalara, ufalanmalara ve renk kayıplarına rastlanmıştır. %3.5 NaCl çözeltisinde içerisinde bulunan klor (Cl) iyonları geleneksel betonda olduğu gibi geopolimer betonda da dayanımı ve durabiliteyi azalttığı gözlemlenmiştir. AS/BM etkisini incelendiğimizde, AS/BM oranının deniz suyu etkisindeki numunelerde görsel bozulma olarak belirgin bir fark oluşturmadığı görülmüştür. Yani AS/BM oranı 0.45 olan ve AS/BM oranı 0.55 olan betonların yüzeylerinde çok belirgin farklar gözlemlenmemiştir. %100 uçucu küllü ile %75 uçucu küllü ve %25 yüksek fırın cürufu geopolimer betonlar karşılaştırıldığında, %100 uçucu küllü geopolimer betonların yüzeylerinde oluşan aşınmanın, %75 uçucu küllü ve %25 yüksek fırın cürufu geopolimer betonların yüzeylerindeki aşınmalardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuç, basınç dayanımı sonuçlarında kalan dayanım bulgularıyla uyumaktadır. Yani görsel denetiminde betonların durabilitesinin incelenmesinde bir parametre olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Deniz suyu etkisi sonucu ağırlık değişimi sonuçlarına göre, FA100 numunelerinde AS/BM oranı 0.55 olan betonlar AS/BM oranı 0.45'e göre daha fazla ağırlık değiştirmiştir. FA100 numunelerinde en az ağırlık artışı AS/BM oranı 0.45 olup  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip numunelerde gerçekleşmiştir. En fazla ağırlık kaybı ise AS/BM oranı 0.55 olup  $500 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı içeren numunelerde gerçekleşirken (agrega ve harç kaybı), en fazla ağırlık artışı AS/BM oranı 0.55 olup  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı içeren numunelerde gerçekleşmiştir.

S25FA75 numunelerinin deniz suyu etkisi sonrası ağırlık değişimine göre ise, AS/BM oranı 0.55 olan betonlar AS/BM oranı 0.45'e göre biraz daha fazla ağırlık değiştirmiştir. S25FA75 numunelerinde en az ağırlık artışı AS/BM oranı 0.45 olup  $400 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip numunelerde gerçekleşmiştir. En fazla ağırlık artışı ise AS/BM oranı 0.55 olup  $600 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı içeren numunelerde gerçekleşmiştir.

Basınç dayanımı sonuçlarına göre, normal ortamda AS/BM oranı 0.45 olan FA100 numuneleri, AS/BM oranı 0.55 olan numunelere göre %10 daha fazla dayanım göstermiştir. Aynı FA100 numunelerinin deniz suyu etkisi sonrasında AS/BM oranı 0.45 olan numuneler AS/BM oranı 0.55 olan numunelere göre %39 daha fazla dayanım göstermiştir. Bu da özellikle %100 uçucu küllü geopolimer betonlarda özellikle durabilite gereksinimi olan yerlerde AS/BM oranının 0.45 olması önem kazanmaktadır.

Normal ortamda AS/BM oranı 0.45 olan S25FA75 numuneleri, AS/BM oranı 0.55 olan numunelere göre %21 daha fazla dayanım göstermiştir. Deniz suyu etkisi sonrasında AS/BM oranı 0.45 olan S25FA75 numuneleri, AS/BM oranı 0.55 olan numunelerle birbirine benzer dayanım değerleri göstermiştir. Buradan %25 cüruf ikamesinin betonun durabilite özelliklerini olumlu etkilediği sonucu ortaya çıkmıştır. Bu da cüruftaki CaO oranının yüksek olmasından dolayı N-C-A-S-H tipi jel ürünlerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır.

Bağlayıcı oranlarına göre ise, FA100 betonlarında normal ortamda en yüksek dayanım  $600 \text{ kg/m}^3$  ve en düşük dayanım  $500 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip betonlarda elde edilirken, durabilite performansı en iyi betonlar  $400 \text{ kg/m}^3$ , en kötü betonlar  $500 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcıya sahip betonlarda elde edilmiştir. %25 cüruf ve %75 küllü betonlarda normal ortamda en yüksek dayanım  $500 \text{ kg/m}^3$  ve en düşük dayanım  $600 \text{ kg/m}^3$

bağlayıcıya sahip betonlarda elde edilirken, durabilite performansı en iyi betonlar 400 kg/m<sup>3</sup> ve en kötü betonlar 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcıya sahip betonlarda elde edilmiştir.

Hem FA100 hem de S25FA75 betonlarında durabilite açısından en iyi performans 400 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı ve AS/BM oranı 0.45 olan betonlarda elde edilmiştir.

Çalışmada yüksek işlenebilirlik elde etmek için karışımlara bağlayıcı miktarının %7.5' u kadar ilave su katılmıştır. Yapılan bu çalışma sonuçlarına göre, geopolimer betonlarda ilave suyun dayanımı çok düşürdüğü görülmektedir. İlave su miktarının bağlayıcı miktarının %7.5' uğundan az olması tavsiye edilmektedir.

Bağlayıcı olarak endüstriyel atık malzemelerin kullanılması beton karışımında kullanılan agrega miktarını da azaltmıştır. Bu sayede özellikle büyük şehirlerde problem olan agrega temini problemi de azaltılmış olur. Ayrıca, çimento kullanılmadan da yeterli dayanıma sahip geopolimer betonların üretimi mümkündür.



## KAYNAKÇA

- Akyıldırım, S. (2021). Uçucu kül bazlı geopolimer betonlarda gecikmiş ısı kürü etkisinin ve yüksek fırın cürufu ikamesinin dayanım ve durabilite özelliklerine etkileri. (Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü). İstanbul, Türkiye.
- Al Muhit, B., Foong, K., Alengaram, U., & Mohd, Z. (2013). Geopolymer concrete : A building material for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(1).
- Alp, S. (2014). İstanbul Ticaret Odası, Kum, Kil Ve Taş Ocakları Sektör Raporu.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S., & Çapar, Ö. (2010). Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi. 2. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi, 1, 506- 513. Mersin.
- Bilim, C., & Atış, C. (2011). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 101-107.
- Burciaga-Díaz, O. G.-Z.-G. (tarih yok). "Influence of the long term curing temperature on the hydration of alkaline binders of blast furnace slag-metakaolin",. *Construction and Building Materials*.
- Chaudhary, D. K. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*.
- Çana, B. (1997). Kömür Yakıtlı Termik Santral lard akı Uçucu Küllerin Çevreye Etkisi. Selçuk Üniv. Müh-Mim. Fak. 20. Yıl Jeoloji Semp. Konya.
- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes. Vol. 1, s. pp. 131-149. Kiev: Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials.
- Davidovits, J. (2008). Geopolymer chemistry and applications. Saint quantin.
- Davidovits, J. (2013). geopolymer cement. a revlew. geopolymer institute, technical papers.
- Divya, K. C. (2007). "Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review" . *Journal Materials Science*,.
- Doğangün, A. (2018). Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- E. Luga, A. C. (2016). , "Strength Properties of Slag/Fly Ash Blends Activated with Sodium Metasilicate and Sodium Hydroxide+ Silica Fume," . *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, .
- E. Luga, C. D. (2016). Strength Properties of Slag/Fly Ash Blends Activated with Sodium Metasilicate and Sodium Hydroxide+ Silica Fume,.

- Ecoba. (2001). Information Bulletin. İtaly.
- Escalante-García, I. (2016). Influence of the long term curing temperature on the hydration of alkaline binders of blast furnace slag-metakaolin. *Construction and Building Materials*.
- Erdoğan, T. (2015). *Beton*. Ankara: ODTÜ Yayınları.
- Erdoğan, Ş. K. (2003). Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*.
- Farny, J. A. (1998). "Betonda Alkali Agregası Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü", Çeviren: Kalmış, M., Güngör, N., Eribol, S., American Concrete Pavement Association (ACPA), 1-26, 1998.
- Frank Collins, J. (2001). Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- Frearson, J. A. (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.
- Golewski, G.L. (2017). The fracture toughness of concretes with F fly ash (FA) additive. *Construction and Building Materials*.
- Görür, E. (2015). Alkali İle Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H. (2005). Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, 19, 419-423. Türkiye.
- Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D., & Rangan, B. (2004). "on the development of fly ash-based geopolymer concrete.", *ACI Materials Journal*, 101, 6.
- Hillerborg, A. (1985.). The theoretical basis of a method to determine the fracture energy  $G_F$  of concrete. *Materials and Structures*.
- Jiang W, S. M. (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 London, 2.
- Joseph Davidovits, D. C. (1990). *Geopolymeric concretes For Environmental Protection*. Concrete International.
- Jalali, S (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*.
- Kawakami, H. (1992). Effect of aggregate type on the mechanical behavior of concrete. *Japonya*.

- Keklik, U. (2020). Silis dumanı içeren geopolimer betonların% 5 sülfürik asit etkisinde durabilite performanslarının incelenmesi. Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Köken, A., Köroğlu, M., & Yonar, F. (2008). Atık Betonların Beton Agregasi Olarak Kullanılabilirliği. Selçuk-Teknik Dergisi, 7(1), 86-97.
- Krivenko, P. D. (1994). Materiales de construcción . kiev: Editorial CSIC.
- Li, Z., Ding, Z., & Zhang, Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials. International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology Conference Proceedings, (s. 56).
- Malhotra, V. (1999). Making Concrete "Greener" with Fly Ash. Concrete International.
- Malhotra, V. M. (1996). "Pozzolanic and Cementitious Materials, Gordon and Breach publishers, advances in concrete" technology, ISSN1024-5038, 1.1.
- Neville, A. (1975). Properties of Concrete, Pitman Publishing, London.
- Neville, A. M. (1981). Properties of Concrete", . Longman Scientific & Technical, England, .
- Niş, A. &. (2022). . Seawater resistance of alkali-activated concrete. In Handbook of Advances in Alkali-Activated Concrete . (pp. 451-469). Woodhead Publishing.
- Niş, A. (2019). Compressive strength variation of alkali activated fly ash/slag concrete with different NaOH concentrations and sodium silicate to sodium hydroxide ratios. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies.
- NİŞ, A. (2019). Mineral katkılı betonların kimyasal durabilitesinin toplam bağlayıcı miktarı ve eşdeğer su/çimento parametreleriyle beraber incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
- Niş, A. (2019). Mineral katkılı betonların kimyasal durabilitesinin toplam bağlayıcı miktarı ve eşdeğer su/çimento parametreleriyle beraber incelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
- Niş ,A. ç. a. (2022). Seawater resistance of alkali-activated concrete. In Handbook of Advances in Alkali-Activated Concrete. Woodhead Publishing.
- Niş, A. (2019). Mechanical strength degradation of slag and fly ash based geopolimer specimens exposed to sulfuric acid attack. . Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 37(3), 917-926.

- Özbey, N. (2021). Farklı bağlayıcı miktarlarına sahip yüksek fırın cürufu ikameli uçucu küllü geopolimer betonların durabilitesi . (Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Properties of geopolimer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes. (tarih yok).
- Provis, J. A. (2009). ‘Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications’’. UK: Woodhead Cambridge.
- Palomo, A. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. Cement and Concrete Research.
- Rajesh, A. M. (2014). . “Study of the Strength Geopolymer Concrete with Alkaline Solution of Varying Molarity,.
- RiessenR.Williams, J. (2009). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. Journal of Hazardous Materials.
- Shi, C., & Qian, J. (1999). High Performance Cementing Materials from Industrial Slags. Resources, Conservation and Recycling.
- Srivener, K., & Young, J. (1997). mechanisms of chemical degradation of cement-based systems. London : Taylor, Francis.
- Stanton, T. (1940). “Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate”, . Proceedings, American Society of Civil Engineers, .
- Şinik, O. (2019). Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması.
- Tangüler, M., P, G., & Ç, M. (2015). Türkiyede uçucu küllü betonlar için yaşam döngüsü analizi. 9. Ulusal Beton Kongresi.
- Thokchom S, G. P. (2009). effect of na<sub>2</sub>O content on durability of geopolymer mortars in sulphuric acid. international journal of natural sciences and engineering, 77-82.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2009). Effect of Na<sub>2</sub>O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid. International Journal of Natural Sciences and Engineering, 77-82.
- Thomas E. Stanton, M. (1942). Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate. Transactions of the American Society of Civil Engineers.
- Topçu, İ., & Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(2), 11-23.
- Tuygun, C. (2002). Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi. istanbul: İstanbul teknik üniversitesi fen bilimleri enstitüsü.

Türker, P. & A, Y. (2009). Türkiyedeki uçucu küllerin sınıfkandırılması ve özellikleri. Ankara: TÇMB.

Yeğınobalı, A. (2003). “Çimentoda yeni standartlar ve mineral katkıları. Türkiye Mühendislik Haberleri.



