

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE UÇUCU KÜLLÜ
GEOPOLİMER BETONLARIN % 5 SÜLFÜRİK ASİT
ORTAMINDA DURABİLİTESİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Celal KARABAŞ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

İstanbul – 2021

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Celal KARABAŞ

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Küllü Geopolimer Betonların
%5 Sülfürik Asit Ortamında Durabilitesinin İncelenmesi

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tezin Türü : Yüksek Lisans

Tezin Tarihi : 09.02.2021

Sayfa Sayısı : 77

Tez : Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

Danışmanları

Dizin Terimleri : Geopolimer beton, F-tipi uçucu kül, Öğütülmüş granüle
yüksek fırın cürufu

Türkçe Özet : Çimentosuz betonların yapılarda kullanımını sağlamak için
standartlara ihtiyaç vardır.bu tez kapsamında çimentosuz
betonların standartlaşması için bir adım atılmış olacaktır.

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

İmzası

Celal KARABAŞ

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE UÇUCU KÜLLÜ
GEOPOLİMER BETONLARIN % 5 SÜLFÜRİK ASİT
ORTAMINDA DURABİLİTESİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Celal KARABAŞ

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Anıl NIŞ**

İstanbul – 2021

BEYAN

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

Celal KARABAŞ

.../.../2021



İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Celal KARABAŞ'ın “Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Küllü Geopolimer Betonların %5 Sülfürik Asit Ortamında Durabilitesinin İncelenmesi” adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mücteba UYSAL

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Anıl NIŞ

(Danışman)

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood

Üye

AL-MASHHADANI

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 2021

İmzası

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yapılan tez çalışmasında alkali aktive edilmiş yani geopolimer betonların durabilite ve dayanımları incelenmiştir. Çalışma kapsamında F tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bunun yanında 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 ve 600 kg/m^3 3 farklı miktarda bağlayıcı kullanılarak incelenmiştir. F tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ise %50 ve %50 oranlarında kullanılmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ise alkali aktivatör olarak kullanılmıştır ve sodyum hidroksitin molaritesi 14 M olarak seçilmiştir. Deney kapsamında 6 adet farklı alkali aktive edilmiş numuneler üretilmiştir. Bu numuneler 28., 120., ve 150. gün boyunca hem %5 sülfürik asit ortamında hemde de laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Sonrasında ilk olarak yüzeyde meydana gelen değişim için görsel inceleme yapılmıştır. Görsel inceleme ardından ağırlık değişimleri ve basınç dayanımları incelenmiştir. Bu araştırma ve yapılan test sonuçlarına göre alkali aktive edilmiş betonların kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Geopolimer beton, F-tipi uçucu kül, Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

SUMMARY

In the thesis study, the durability and strength of the alkali-activated geopolymer concretes were examined. Within the scope of the study, F-type fly ash and ground granulated blast furnace slag were used. Besides, 400 kg / m³, 500 kg / m³ and 600 kg / m³ were examined using 3 different amounts of binders. F-type fly ash and ground granulated blast furnace slag were used at rates of 50% and 50%. Sodium silicate and sodium hydroxide were used as alkali activators, and the molarity of sodium hydroxide was chosen as 14 M. 6 different alkali activated samples were produced within the scope of the experiment. Afterwards, the visual examination was made for the change on the surface first. After the visual examination, the weight changes and compressive strength were examined. According to the tooling and test results, it was concluded that the use of alkali activated concretes was appropriate

Key Words : Geopolymer concrete, F-type fly ash, Ground granulated blast Furnace Slag

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
SUMMARY	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	xi
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

1.1. Tez Çalışmasındaki Hedef.....	5
------------------------------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

GEOPOLİMER BETON

2.1. Agrega	6
2.2. Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	8
2.3. Alkali Solüsyonlar	10
2.4. Geopolimer Betonların Özellikleri.....	11
2.5. Geopolimer Betonların Kimyasal Etkisi	13
2.6. Geopolimer Betonun Dayanımını Etkileyen Parametreler.....	15
2.6.1. Yükleme Hızının Basınç Dayanımına Etkisi	15
2.6.2. Sıcaklık Ve Kütle Süresinin Etkisi	15
2.6.3. Aşınma Ve Erozyon Etkileri.....	16
2.6.4. Donma-Çözünme	17
2.6.5. Kimyasal Durabilite Etkisi.....	17

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri	20
3.1.1. Yüksek fırın cürufu.....	20
3.1.2. Uçucu kül.....	20
3.1.3. Agregalar	22
3.1.4. Alkali aktivatör	22
3.1.5. Kimyasal Katkı	23

3.2. Deneysel Metod	24
3.2.1. Küp Kalıp.....	24
3.2.2. Alkali Aktivatörler Hazırlıkları	24
3.2.3. Karışım Hazırlanması	25
3.2.4. Geopolimer Betonların Üretimi	30
3.2.5. Kütleme	31
3.2.6. Sülfürik asit çözeltisi	31
3.2.7. Numune Ağırlıklarının Değişimi	32
3.2.8. Basınç Dayanımı Testleri.....	33

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Görsel İnceleme.....	38
4.2. Ağırlıkta Meydana Gelen Değişme	38
4.3. Geopolimer Betonda Mekanik Ve Dayanıklılık Testi.....	43
4.3.1. Basınç Dayanımı.....	42
SONUÇLAR	53
KAYNAKÇA	55
ÖZGEÇMİŞ.....	60

KISALTMALAR

°C	:	Santigrad
MPa	:	Megapaskal
Mm	:	Milimetre
Gr	:	Gram
M	:	Molar
NaOH	:	Sodyum Hidroksit
KOH	:	Potasyum Hidroksit
Na₂SiO₃	:	Sodyum Silikat
C	:	Karbon
CaO	:	Kalsiyum oksit(Sönmemiş Kireç)
SO₃	:	Kükürt trioksit
K₂O	:	Potasyumoksit
N	:	Azot
S	:	Kükürt
H	:	Hidrojen
SiO₂	:	Silisyum Dioksit
Na₂O	:	Sodyum Oksit
Al₂O₃	:	Alüminyum Oksit
MgO	:	Magnezyum Oksit
Fe₂O₃	:	Demir (II) Oksit
Ca	:	Kalsiyum

Si	:	Silisyum
H2SO4	:	Sülfürik asit
g/cm3	:	gram/santimetreküp
kg/m3	:	kilogram/metreküp
kg	:	kilogram
OPC	:	Normal Portland Çimento
AAEB	:	Alkali Aktive Edilmiş Beton
S50FA50	:	%50 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ,%50 F-tibi uçucu kül



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1. Farklı ülkelerde 2010-2017 senelerindeki çimento üretimi	3
Tablo 2. Agregaların betonda kullanılması için gerekli özellikler	7



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanıldığımız yüksek fırın cürufunun özellikleri.....	20
Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan uçucu kül özellikleri	21
Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan agregaların özellikleri	22
Çizelge 3.4. Sodyum silikat özelliği	23
Çizelge 3.5. Kullanılan kimyasal katkının özellikleri.....	23
Çizelge 3.6. S50FA50-400-0.45 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler	26
Çizelge 3.7. S50FA50-400-0.55 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler	26
Çizelge 3.8. S50FA50-500-0.45 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler	27
Çizelge 3.9. S50FA50-500-0.55 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler	28
Çizelge 3.10. S50FA50-600-0.45 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler	28
Çizelge 3.11. S50FA50-600-0.55 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler	30

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Yüksek fırın cürufu.....	20
Şekil 3.2. Deneylede kullandığımız F-tipi uçucu kül.....	21
Şekil 3.3. Kullanılan iri agrega	22
Şekil 3.4. Kullanılan kalıplar	24
Şekil 3.5. Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması.....	25
Şekil 3.6. Geopolimer betonların üretimi	31
Şekil 3.7. Numunelerin %5 sülfürik asit çözeltisinde tutulması ve çıkarılması	32
Şekil 3.8. Numunelerin sülfürik asit etkisi sonrası ağırlıklarının tartılması	33
Şekil 3.9. Küp numunelerin basınç testlerinin yapılması	34
Şekil 4.1. 120. Gün ve 150. Gün Asite Maruz Kalan Numunelerde Oluşan Değişim	38
Şekil 4.2. 600 kg/m ³ Bağlayıcı S50FA50 AAE Beton Numunelerinin Ağırlık Değişimi	40
Şekil 4.3. 500 kg/m ³ Bağlayıcı S50FA50 AAE Beton Numunelerinin Ağırlık Değişimi	40
Şekil 4.4. 400 kg/m ³ Bağlayıcı S50FA50 AAE Beton Numunelerinin Ağırlık Değişimi	41
Şekil 4.5. S50FA50 AAE Beton Numunelerin Kontrol Ortamında 28 Günlük Basınç Dayanımları.....	42
Şekil 4.6. S50FA50 AAE Betonların Kontrol Ortamında 120 Günlük Basınç Dayanımları.....	43
Şekil 4.7. S50FA50 AAE Betonların Sülfürik Asit Ortamında 120 Günlük Basınç Dayanımları.....	44
Şekil 4.8. S50FA50 Betonlarının Kontrol Ortamında 150 Günlük Basınç Dayanımları	45
Şekil 4.9. S50FA50 Betonlarının Asit Ortamında 150 Günlük Basınç Dayanımları	46
Şekil 4.10. 600 kg/m ³ Bağlayıcı İçeren S50FA50 AAE Numunelerinin Basınç Dayanımı	47
Şekil 4.11. 500 kg/m ³ Bağlayıcı İçeren S50FA50 AAE Numunelerinin Basınç Dayanımı	50
Şekil 4.12. 400 kg/m ³ Bağlayıcı İçeren S50FA50 AAE Numunelerinin Basınç Dayanımı	51

Şekil 4. 13. 0.45 Alkali /Bağlayıcı Oranına Sahip AAE Beton Numunelerin Basınç Dayanımı.....	50
Şekil 4. 14. 0.55 Alkali /Bağlayıcı Oranına Sahip AAE Beton Numunelerin Basınç Dayanımı.....	51
Şekil 4. 15. Tüm S50FA50 AAE Beton Numunelerinin Farklı Ortamlarda Basınç Dayanımı.....	52



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her sayfasında değerli yardım ve ilgisini esirgemeyen, bilimsel araştırma projesi kapsamında yürütülmesini sağlayan, yönlendirici ve bilgilendirici desteklerinden dolayı danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi **Anıl NİŞ**'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımını hiç esirgemeyen değerli arkadaşlarım ve Selami ARSLAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme de sonsuz teşekkürler ederim.



GİRİŞ

Beton; yüksek dayanımı, bakım maliyeti düşük olması ve bileşenlerine erişimi kolay olması sebepleriyle inşaat sektöründe kullanımı en yaygın olan malzemelerdendir. Doğal kaynaklı hammaddelerin azalması ve Portland çimentosunun üretimindeki sera etkisiyle ilgili duyulan kaygılarla birlikte dünya genelinde çok büyük miktarlarda beton üretilmesi yeni beton arayışlarını beraberinde getirmiştir.

Son yıllarda çimentoların üretimi aşamasında da belirli oranlarda öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katılarak üretilen farklı tip çimentolar üretilmektedir. Özellikle yüksek basınç dayanımının yanı sıra iyi bir kimyasal durabilite gerekli yerlerde bu farklı tip çimentoların kullanımı yaygınlaşmıştır. Sülfata dayanıklı çimentolar, düşük hidratasyon ısısına sahip çimentoların günümüzde kullanımı yaygınlaşmıştır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, F-tipi uçucu kül gibi mineral katkılara sahip çimentolarla üretilen betonların işlenebilirlik özellikleri de genelde geleneksel betonlardan daha iyidir. Günümüzde bu tip mineral katkıları genelde çimentonun belirli oranlarında ikame edilip kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda ise sadece mineral katkıları üretilen geopolimer, alkali aktive edilmiş çimentosuz betonlar ile ilgili çalışmalar yapılmakta olup, çimentonun hem insan sağlığına hem de çevreye verdiği zararı minimuma indirmek amaçlanmaktadır.

Çimentosuz betonlarda bağlayıcı özelliği alkali solüsyonlar yardımıyla kazanılmaktadır. sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum silikat ve potasyum hidroksit benzeri Çimento hidratasyon reaksiyonlarında su ile tepkimeye girerek bağlayıcı özelliği kazanmaktadır. Çimentosuz betonlarda ise su yerine alkali solüsyonlar kullanılarak üretilirler. Son zamanlarda çimentosuz geopolimer veya alkali aktive edilmiş beton kullanılarak hem dayanım hem de durabilite deneyleri gerçekleştirilmektedir.

BİRİNCİ BÖLÜM

Beton; çimento, su, agrega ve gerektiği yerde kullanılan katkı maddelerinden oluşan; malzemelerin kullanım oranları belirli esaslarla ve belirli durabilite koşullarına göre belirlenmiş karışımı, istenen kalıplar içerisine boşluksuz yerleştirerek uygun koşullarda bakımı yapılarak priz almasıyla elde edilen malzemedir. (Kocataşkın,1991)

Betonlar üretim amaçları ne olursa olsun şu 3 niteliği mutlaka sağlamalıdır:

1. Yüksek basınç dayanıma sahip olmalıdır.
2. Durabilitesi yüksek (dış etkilere dayanıklı) olmalıdır.
3. İşlenebilir olmalıdır. (Akman,1987)

Beton; yüksek dayanımı, bakım maliyeti düşük olması ve bileşenlerine erişimi kolay olması sebepleriyle inşaat sektöründe kullanımı en yaygın olan malzemelerdendir. Doğal kaynaklı hammaddelerin azalması ve Portland çimentosunun üretimindeki sera etkisiyle ilgili duyulan kaygılarla birlikte dünya genelinde çok büyük miktarlarda beton üretilmesi yeni beton arayışlarını beraberinde getirmiştir. Çeşitli tarımsal ve endüstriyel atıklar betona eklenerek üretilen ve iyi yöneterek sürdürülebilir betonlar yapılan pek çok çalışmaya konu olmuştur. Araştırmacıların yaptıkları bu çalışmaların çoğu çevreye duyarlı beton üretebilmek adına uçucu kül, çimento tozu, çelik cüruf ve yüksek fırın cürufunun yanında, agrega veya çimento yerine hurma yağı külünün veya pirinç kabuğu külünün kullanılmasına yöneliktir. Bu şekilde tarımsal ürünler kullanılmış olacaktır. (Villaquirán-Caicedo ve de Gutiérrez, 2018)(Zaree vd., 2019)

2015 senesinde tüm dünyada yaklaşık olarak 4 milyar ton, Türkiye’de ise yaklaşık 75 milyon ton kadar çimento üretilmiştir. 1 ton normal Portland çimento üretilirken 0,8 ton CO₂ emisyonu oluşmaktadır. Yani Türkiye’deki 5 milyon ton çimento üretiminde yaklaşık 60 milyon ton CO₂ açığa çıkmaktadır. Bu yüksek oranda CO₂ salınımını azaltmak, doğaya verilen zararı önlemek veya en aza indirmek amacıyla geopolimer alternatif olarak düşünülmektedir. Tablo 1’de ülkelerin çimento üretiminin yıllara göre miktarı gösterilmiştir. (<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement>)

Tablo 1. Farklı ülkelerde 2010-2017 senelerindeki çimento üretimi

ÇİMENTO ÜRETİMİ (MİLYON TON)								
ÜLKE	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Çin	1880	2100	2210	2420	2480	2350	2400	2400
Hindistan	210	240	270	280	260	300	280	270
ABD	67	69	75	77	83	84	85	89
Türkiye	63	63	64	71	75	71	75	77
Suudi Arabistan	42	48	50	57	55	62	62	63
Güney Kore	47	48	48	47	63	52	57	59
Rusya	50	56	61	66	68	62	56	58
Brezilya	59	64	69	70	72	65	57	54

Bu miktarda çimento üretiminin çevreye yaydığı karbondioksitten dolayı hem insan sağlığına hem de çevreye verdiği zararı tahmin edebiliriz. Son zamanlarda yapıların üretiminde çimento kullanımı yerine çimentosuz beton kullanımı amaçlanmaktadır. Geopolimer ve/veya alkali aktive edilmiş betonlar olarak da isimlendirilen çimentosuz betonların üretiminde fabrika atık malzemeleri olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi malzemeler kullanılmaktadır. Son yıllarda çimentoların üretimi aşamasında da belirli oranlarda öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katılarak üretilen farklı tip çimentolar üretilmektedir. Özellikle yüksek basınç dayanımının yanı sıra iyi bir kimyasal durabilite gerekli yerlerde bu farklı tip çimentoların kullanımı yaygınlaşmıştır. Sülfata dayanıklı çimentolar, düşük hidratasyon ısısına sahip çimentoların günümüzde kullanımı yaygınlaşmıştır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, F-tipi uçucu kül gibi mineral katkılara sahip çimentolarla üretilen betonların işlenebilirlik özellikleri de genelde geleneksel betonlardan daha iyidir. Günümüzde bu tip mineral katkıları genelde çimentonun belirli oranlarında ikame edilip kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda ise sadece mineral katkıları ile üretilen geopolimer, alkali aktive edilmiş çimentosuz betonlar ile ilgili çalışmalar yapılmakta olup, çimentonun hem insan sağlığına hem de

çevreye verdiği zararı minimuma indirmek amaçlanmaktadır. Geopolimerler ve/veya alkali aktive edilmiş betonlarda çimentosuz betonlar olarak isimlendirilmektedir. Çimentosuz betonlar % 100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, % 100 düşük kalsiyum içeren uçucu kül ve değişik oranlarda (%50-%50 veya %75-%25 gibi) kullanılarak çimentosuz betonlar üretilebilmektedir. Çimentosuz betonlarda bağlayıcı özelliği alkali solüsyonlar yardımıyla kazanılmaktadır. Çimento hidratasyon reaksiyonlarında su ile tepkimeye girerek bağlayıcı özelliği kazanmaktadır. Çimentosuz betonlarda ise su yerine sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum silikat ve potasyum hidroksit benzeri alkali solüsyonlar kullanılarak üretilirler. Son zamanlarda çimentosuz geopolimer veya alkali aktive edilmiş beton kullanılarak hem dayanım hem de durabilite deneyleri gerçekleştirilmektedir. Literatürde geopolimer beton ile alkali aktive edilmiş beton isimlerinin kullanılışı farklılık göstermektedir. Geopolimer beton %100 düşük kalsiyum içeren F tipi uçucu küllerle üretilmiş betonlar olarak isimlendirilirken, alkali aktive edilmiş beton ise ya % 100 ya da belirli oranlarda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu katkılı beton olarak adlandırılmaktadır. Çalışmamızda anlam karışıklığı olmaması için çimentosuz üretilen betonları geopolimer beton olacak şekilde adlandıracağız.

Yapı malzemelerinin üretimindeki atık malzemelerin çevreye verdikleri zararın kabul edilebilecek en az seviyeye, indirgenmesi amaçlanır. Bu sebeple de çimento üretim aşamasında CO₂ emisyonunu azaltabilecek geopolimer betonların üretilmesi alternatif olarak görülebilir. Betonda atıklar kullanılarak çevresel etkiler en aza indirgenebilir. Genelde yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi alümina silikat esaslı maddeler alkalın aktivasyonla kullanılarak üretilebilir. (Darsanasiri vd.,2018)Geopolimerlerin üretimi genellikle düşük sıcaklık ve uçucu küllerin aktive edilerek gerçekleşir. Uçucu küllerin yapısında alüminyum oksit ve silisyum dioksit bileşikleri, kalsiyum hidroksitle tepkimeye girer ve puzolanik bir tepkime başlamasına neden olur. Portland çimentosunun yerine uçucu kül kullanılmasının en önemli sebebi budur. Geopolimerizasyon temelinde uçucu külün geopolimer üretimi sırasında rol oynaması düşünülür çünkü geopolimerizasyon temeli alümina silika zinciri temellidir.(Rattanasak ve Chindapasirt, 2009).Özellikle uçucu kül ile üretilen geopolimer betonlarda alkalilerin yanında ısı da gerekir. Yüksek fırın cürufu ile imal edilen geopolimer beton ise ısı olmadan da dayanım olarak iyi sonuçlar verir. Betondaki büzülme sorunlarının yok olması, üretimdeki maliyetin azalması, olumlu özelliklerin geliştirilmesi gibi nedenlerden ötürü uçucu kül ve cüruf kullanımının

dışında farklı mineral katkıların kullanımı gerekebilir.(Dündar vd., 2017)(Yurt ve Emiroğlu, 2018)

1.1. Tez Çalışmasındaki Hedef

Yapacağımız çalışma kapsamında çimentosuz betonların yapılarda kullanımının yolunu açmak için standartlara/yönetmeliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez kapsamında çimentosuz betonların standartlaşmasına yönelik bir adım atılmış olacaktır. Geopolimer betonların hem dayanım hem de durabilite özellikleri incelenecektir.

Yapılan çalışma kapsamında %50 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuyla % 25 F-tipi uçucu kül kullanılarak değişik geopolimer beton tipleri üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit (NaOH) ile sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Kullanılan sodyum hidroksitin molaritesi ise 14M olacak şekilde ayarlanmıştır. Her iki alkali solüsyonların tasarımında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2.5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuyla düşük kalsiyum içeren uçucu küllerle üretilmiş geopolimer betonlarda basınç mukavemetinin gelişimi hem değişik alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranlarıyla (0.45 ve 0.55) hem de değişik bağlayıcı dozajlarıyla (400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 , ve 600 kg/m^3) beraber araştırılmıştır. Basınç dayanımının farklı zamanlarda gelişimlerine ek olarak üretilen geopolimer betonların %5 sülfürik asit (en zararlı kimyasal ortamlardan birisi) etkisindeki durabilite performansları da incelenmiştir. Sülfürik asit etkimesi sonucunda geopolimer beton numunelerinin en dış yüzeylerinde meydana gelen görsel değişim, sülfürik asit etkimesi dolayısıyla geopolimer numune ağırlıklarındaki değişim, ve basınç dayanımlarındaki azalma 28., 120., ve 150., günlerde incelenmiştir. %50 uçucu küllü ve %50 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile üretilmiş betonların kür işlemi laboratuvar ortamında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, geopolimer betonların inşaatlarda kullanımı için gerçekleşmesi gereken standartlaşma konusunda literatüre fayda sağlayacağı beklenmektedir. Karbondioksitin hem insan sağlığına hem de çevreye olan etkilerinin azaltılması hem de yüksek enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla, alkali aktive edilmiş veya geopolimer beton olarak isimlendirilen çimentosuz betonların, yeşil ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi olması bakımından yapılarda kullanılması ülkemiz için çok faydalı olacaktır.

İKİNCİ BÖLÜM

GEOPOLİMER BETON

2.1. Agregata

Günümüzde yapı malzemeleri içerisinde kullanımı en yaygın olan betondur. Betonun kullanım yaygınlığına bağılı olarak agregaya da talep artmaktadır. Ancak agregata doğal kaynaklarının uygun olmaması veya sınırlı olması beton üretiminde kırma taş kullanılmasını gerekli hale getirmiştir.(Ramyar, 1995.)

Agregalar içerisinde 200 no'lu elekten geçebilen malzemeler limit değerinin üzerinde bulunuyorsa agregalar önce yıkayıp sonra kullanılır. Bunun yapılmasının nedeni 200 no'lu elekten geçebilen malzemelerin kil olduğu düşünülmesidir. Bilindiğı üzere kil malzemesi agregayla çimento hamuru arasındaki mevcut aderansı düşürür, hidrasyonunu geciktirir, betondaki sahip olunan hacimsel kararlılığa zarar verir.

TS 706' da 0,25 mm' lik elekten geçebilen ince malzeme olarak tanımlanmış taş ununun kil malzemesi gibi davranmamasına karşılık betonun karma suyunu yani dolaylı olarak da su/çimento arttıracak düşüncesi ile zararlı olarak kabul edilir. Bu sebeple de agregaların içerisinde bulunması istenmez. Kırmataş agregalar kullanılarak üretilen betonların kohezyonu ve işlenebilirlik özelliğı zayıftır. Bu şekilde üretilen betonlar, suyu tutabilecek yeterli kadar ince malzemelere sahip değildirler. Bu sebeple yerleştirildikten bir süre sonra da karışım suyunu kismaya başlarlar ve rötre çatlakları oluşur. Bu şekilde elde üretilen betonların basınç dayanımı düşük ve porozitesi yüksektir. Bunu önlemek amacıyla kullanılan çimento dozajı arttırılır veya kimyasal katkı kullanılabilir. Tabi ki bu da ek maliyet yaratacaktır.(Uğurlu, 1993)

Agregalar elde edilmiş biçimlerine göre genellikle kırma agregalar ve doğal akarsularda bulunur.(Simşek, 2004) Beton üretiminde kullanılan agregata özellikleri TS 706 EN 12620 standartlarında belirtilmiştir. Bu standartlara göre agregalar;

- Zayıf taneler içermemelidirler,
- Toz, toprak gibi betona zararlı maddeler içermemelidirler.
- Boşluksuz, dayanıklı ve sert olmalıdırlar.
- Aşınmaya ve basınca mukavemetli olmalıdırlar.
- Uzun ve yassı daneler içermemelidirler.
- Donatıların korozyona karşı koymasını tehlikeye düşürmemelidirler.
- Çimento ile zararlı reaksiyonlara girmemelidirler. (TS 706 EN 12620,2009)

Beton agregasının çeşitli standartlarda sahip olması gereken mekanik ve kimyasal özellikler Tablo 2’de verilmiştir.(Arioğlu vd., 2008)(Arioğlu ve Yüksel, 2002).

Tablo 2. Agregaların betonda kullanılması için gerekli özellikler

Özellik	Agrega	TS 706	ASTM C 33	BS 882:1983
Tane şekli, uygunsuz maks. [%] Yıkanabilir Maddeler, Maks [%]	İri Agregata	50	-	C20-35 için 50* , 35** >C35 için 35* , 35**
	İri Agregata	0,5	1.0	Çakıl:1 , Kırmataş:3
	İnce Agregata	4,0	Aşınan beton:3.0 Diğer:5.0	kum:3 , Taş:15
Su emme, Maks [%]	İri ve ince	-		BS5337:1976'e göre :3.0
Taş Basınç Dayanımı	İri ve ince	1000 kg/cm ²		%10 incelik değeri:50 Kn
Aşınma dayanımı Maks [%]	İri Agregata	Los Angeles 100 devir 10 500 devir 50 Darbeli aşınma 45	Los Angeles 500 devir 50	Darbeli aşınma 45
Dona dayanıklılık, Maks [%] Na ₂ SO ₄ 'e dayanıklılık Mg ₂ SO ₄ 'e dayanıklılık	İri Agregata	18	12	-
	İnce Agregata	15	10	-
	İri Agregata	27	18	-
	İnce Agregata	22	15	-
Organik maddeler , Maks [%]	İri ve ince	0.5	0.5	-
Sülfat miktarı, Maks [%]	İri ve ince	SO ₃ olarak :1.0	-	BS5328:1981: 4/ çimento

Suda çözünen klorürler,Maks [%]	İri ve ince	0.2	-	***Öngermeli:2 B/A :4
Alkali - agregat reaktifliği Uzama,Maks [%]	İri ve ince	6 ayda:0,5 1 yılda:1	3 ayda:0.05 6 yılda:0.10	-

*Doğal çakıl

** Kırmataş veya kırma çakıl

***Bu değerler,BS882:1983'ün ekinde öngörülen değerlerdir.

Agregalar suyu emme oranları göz önünde bulundurularak karışım hesabında kullanılır. Agregaların su emme oranları, dayanımı bunun yanında da mekanik ve fiziksel özelliklerini de etkiler. Agregaların su emme değerleri ne kadar yüksek ise karışım suyuna ihtiyaç o kadar fazla olacağı için basınç mukavemetini düşürürler. Ayrıca su emme kapasitesi yüksek olduğunda betonun işlenebilirliğini de olumsuz olarak etkiler. Yüksek su emme kapasitesine sahip olanlar işlenebilirliği azaltırken, düşük olanlar ise işlenebilirliği artırır. (Kawakami,1992)

Aderans, betonun elastisite modülü ve basınç mukavemeti ile ters orantılıdır. 13 birbirinden farklı kökene sahip agregalar kullanılarak yapılan araştırmada 3 farklı karışım üretilmiş ve birbiriyle aynı karışım oranı kullanıldığı halde basınç dayanımı %30, eğilme dayanımı ise %40 miktarda değişiklik göstermiştir. Agregaların şekli, elastisite modülü ve yüzey yapıları betonun mekanik davranışlarını etkilediği, dolayısıyla da mekanik özelliklerin artmasıyla da dayanım artacağından bu mekanik özelliklerin önemini arttırmıştır.(Kaplan, 1959)

2.2. Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Çelikleri üretimleri esnasında meydana gelen atık malzemelerden birisi de yüksek fırın cürufudur. Aslında cürufun tanımı “Çelik üretilirken oluşan ve ekonomik değere sahip yan üründür” şeklinde olmaktadır.1 ton çelik üretimi yapıldığında 250 kilo, yani çeliğin %25'i kadar cüruf atık malzeme olarak oluşmaktadır. Ereğli Demir Çelik fabrikası içerisinde yapılan üretim ile bir yılda yaklaşık olarak 600.000 ton kadar yüksek fırın cürufu meydana gelmektedir. Meydana gelen bu cüruf farklı sektörlerle satılmaktadır ve bu sektörlerin en başında da inşaat sektörü gelmektedir. Cüruf beton agregasında, tuğla ve briket yapımında, asfalt agregasında, yalıtım malzemesi üretimlerinde, çimento sanayinde, cam üretiminde, tarım ve çevre uygulamalarında,

blokların yapımında ve prefabrik elemanların gibi birçok alanda kullanılır. Cüruflar elenmiş olarak veya doğrudan da kullanılmaktadır. Genel olarak cüruf kullanım alanları şu şekildedir: (Bilgen vd., 2010)(Erdoğan, 1993)

1-Cürufun Doğrudan Kullanım Alanları:

- Yalıtım
- Beton agregası
- Hafif dolgu malzemesi
- Hafif beton

2- Cürufun Öğütülmüş Olarak Kullanım Alanları:

- Çimento yapımı
- Beton agregası
- Harç enjeksiyonu
- Cam sanayi
- Zemin stabilizasyonu

Çimentoda uygun miktarda cüruf kullanıldığında kütle betonda, sıcaklık kontrolünde etkili olduğu gözlenmiştir. İçerisinde cüruf bulunan çimentonun ilave edilmesiyle ilk anlarda sebep olduğu ısı üretimini azalmış olur. Betondaki yüksek sıcaklığın betonda çatlaklar oluşmasına ve hacimsel kararlılıkları üzerinde çok önemli etkileri vardır.

Betonda öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanıldığı zaman, çimento hamurunda agrega- çimento karışımının ara yüzeyindeki boşlukların azaldığı, süreksiz ve ince bir boşluk oluştuğu ve betonun durabilitesinin (kalıcılık) arttığı gözlemlenmiştir. (Tokyay, 2013)

(Manso vd., 2006), cüruf agrega kullanılan betonun dayanıklılık ve mekanik dayanımlarının oranlarını incelemiş ve geliştirmiştir. Betondaki dayanıklılığın incelenmesi amacıyla testler yapmıştır. Ayrıca hava sürükleyici katkıları da kullanmıştır. Cüruf agregalarıyla kullanılan diğer beton bileşenleriyle arasındaki reaksiyonu gözlenmek amacıyla testler yapmıştır. Çelik cürufunun içerisinde tehlikeli birkaç ağır metal bulunduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak basınç dayanımının artış gösterdiğini, donma-çözülme olaylarının ve dayanıklılığın yeterli seviyede olduğunu

ve kullanılan çelik çürüfta olduğu gibi başka endüstriyel yan ürünlerinde potansiyelini olduğunu belirtmiştir.

Yüksek sıcaklığa sahip çelik üretim tesisinde bir yan ürün olarak meydana gelen yüksek fırın çürufu, parça parça öğütülür ve agrega olarak kaba agrega ve ince agrega olarak kullanılmaktadır. Mevcut standartlara ilave olarak, çürufların ve bütün agregaların farklı özellikleri ihtiyaçlara göredir. Yüksek fırın çürufu agregaları için korozyon ve kırma değerleri ise standart değerlere göre oldukça yüksektir. Yüksek fırın çüruf agregalarının kırılmış granite göre su emilimi çok daha fazladır. Çüruf agregaları, beton imalatında kullanılmadan incelenmesi gerekir.(Devi ve Gnanavel, 2014)

Yüksek fırın çürufunun beton özelliklerine olumlu etkileri;

- Taze betondaki işlenebilirliğini artırır.
- Priz alma süresini arttırır.
- Betondaki terlemeleri azaltır.
- Hidratasyon ısını azaltır.
- Sertleşmiş betondaki su geçirimsizliğini azaltır.
- Sertleşmiş betondaki sülfata dayanıklılığı yükseltir.

Yüksek fırın çürufunun beton özelliklerine olumsuz etkileri ise;

- Taze betonların soğuk havada daha uzun sürede priz almasına sebep olur.
- Taze betonda daha fazla hava sürükleyici kullanarak istenilen oranda sürüklenmiş hava elde edilir.
- Sertleşmiş betonda ilk günlerde istenilen dayanım artışı beklenenden daha yavaş olur. (Erdoğan, 2010)

2.3. Alkali Solüsyonlar

Qureshi ve Ghosh (2013) yaptıkları çalışmalarında su emme kapasitesi ve alkaliyle aktif hale getirilmiş çüruf hamurundaki görünür boşluk yapısı ile SiO₂ içeriği arasında bir bağlantı kurmuşlardır. SiO₂ miktarı %1.6 ile % 4.8 arasında değiştiğinde su emme ve belirgin boşluk yapısı gözlenmiştir. SiO₂ miktarı %6.4 olan içerikteki boşluk yapısında ve su emme kapasitesinde ani şekilde düşüş meydana gelmiştir. %1.6–4,8 oranlarında SiO₂ kullanılan hamurda ise daha yüksek bir su emme oranı ve

daha fazla boşluklu yapı gözlemlenmiştir. SiO₂ içeriğinin %6,4 ve %8 olduğunda ise, su emme oranları sırası ile %6.06 ve %9.37 olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar kullanılan silikatın homojen ve daha yoğun mikro oluşturduğunu göstermiştir. Geopolimerlerin üretimi esnasında Si ve Al oksitler çözünürken alkali aktivatörlere gereksinim duyulur. Bu sebeple en yaygın kullanılan alkali aktivatörler; sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum silikat ve potasyum hidroksittir.(Palomo,Grutzeck ve Blanco, 1999)

Sodyum hidroksitlerin hem geopolimer yapısına hem de basınç dayanımındaki artışa yönelik etkileri oldukça fazladır. Bu artışın yanı sıra sodyum hidroksit katı parçacıkları birbirine bağladığından çözünmeyi de olumlu etkiler. (Panias vd.2007)

Tokyay ve Ayturan (2010) yaptıkları çalışmada geopolimer üretmiş ve üretimde sodyum hidroksit kullanmışlardır. Ürettikleri bu geopolimerlere 48 saat süresince 65°C sıcaklıkta kür uygulamış ve bu şekilde malzemelerde 2,3-39,6 MPa arasında basınç dayanımı elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada 8 M sodyum hidroksitle aktif edilmiş kaolenler 20 saat süresince 85°C'de kür uygulanmıştır. Bu uygulamanın ardından bir günlük basınç dayanımlarında 70-80 MPa arası değerlerde olmuştur. (Fernandez vd., 2005)

Beton üretiminde kullanılan kimyasal katkıları, betondaki akışkanlığı artırır, yüksek ve erken dayanım kazandırır, geçirimsizliği artırır bunun yanında da priz süresini değiştirir. (Topçu, 1996)

(Shaikh,2014) yaptığı çalışmada sodyum hidroksit konsantrasyonu yüksek ve daha fazla miktarda sodyum silikat içererek aktif hale getirilmiş geopolimer betonda kılcal geçirimsizliğin önemli seviyede azaldığını ve miktarı artan sodyum-alüminosilikat jelinin oluşumunu etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

(Wardhono,2015),uçucu kül ve yüksek fırın cürufu alkali çözeltilerle aktive edilen,ortam sıcaklığı içerisinde olgunlaştırılan harç numuneleri 0.5 cüruf ve 0.5 uçucu kül ile oluşturulan karışımda en iyi mukavemet sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

2.4. Geopolimer Betonların Özellikleri

Ukraynalı bir bilim adamı Glukhovsk yaklaşık70-80 yıl kadar önce inorganik ürünlerin ilk incelemelerini ve çalışmalarını yapmıştır. Glukhovsky yaptığı çalışmada yüksek kalsiyumlu cüruflar ile alkali çözeltileri karıştırarak ürettiği yüksek dayanımlı betonu dayanımı bina yapımında kullanmıştır. Glukhovsky geopolimerleri genel

olarak alkali aktive çimentolar olarak adlandırmıştır.1940'lı senelerde ise Purdon tarafından daha fazla katkı sağlamıştır. (Duxson vd., 2005)

Geopolimer bağlayıcı maddeler, NaOH (sodyum hidroksit) ve/veya Na_2SiO_3 sodyum-silikat çözeltisinin amorf üç boyutlu bir yapıda olan alüminosilikat malzeme ile tepkimesi sonucu sentezlenmekte olan inorganik polimerdir. Geopolimerizasyon işlemi sırasında alümino-silikatın kimyasal bileşimi ve doğası mekanik performansında belirleyici rol oynar. Genellikle geopolimer bağlayıcılarda istenilen dayanımı karşılamak amacıyla, üretimi esnasında kullanılmakta olan temel malzemelerinde belirli oranlarda alümin içeriği ve reaktif silis kullanılır. Bu içerikteki geopolimer üretiminde atıkların kullanılması gayet iyi bir çözüm sunmuş ve son yıllarda pek çok alanda kullanılmıştır. (Xu ve Van Deventer,2000) (Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2005)

Geopolimerler, yüksek fırın cürufu vb. endüstriyel atık malzemelerini ve uçucu kül beton bağlayıcıya dönüştürebilen alternatif bir üründür. Geopolimer bağlayıcı maddeler, geopolimer betonlar üretmek amacıyla agregalar ile kullanılmaktadır. Altyapılar inşa etmek, onarım yapmak ve ön dökümler için gayet idealdir. Çünkü erken dayanımları oldukça yüksektir. Priz süresi kontrol edilebilmeye elverişlidir ve onarıma gerek duyulmadan uzun süre boyunca bozulmazlar. Geopolimer betonlar, geleneksel betonların yerini alabilme potansiyeli yüksek olan sürdürülebilir bir malzemenin önemli elementlerinden birini oluşturan inorganik polimer bir kompozittir. Geopolimer kullanımının ve yaygınlaşmasının en önemli yararı CO_2 emiliminde % 90 a kadar ulaşan bir azalma ve polimerlerin endüstriyel ürünler kullanılarak üretilmesidir. Geopolimer ürünler doğal yollarla meydana gelen makro moleküllerin sentetik bağlarını içermekte olan organik ve inorganik olarak 2'ye ayrılır. İlk başlarda önerilen geopolimerler, esasında saf inorganik materyallere karşılık gelmekteydi, ancak bu organik içeriğe sahip geometaryelleri de içerecek biçimde genişletilebilir. Bu sebeple geopolimerizasyon sırasında organik ve inorganik türler arasında kurulan çapraz bağları göz önüne almak geopolimer üretimi için önemlidir. (Thomas ve Gupta, 2015)

Çimento üretiminde açığa çıkan CO_2 miktarlarını daha aza indirmek için geopolimer betonlar kullanılabilir. Geopolimer teknolojisi agrega ve çimento kaynaklı karbondioksit emisyonunu % 80 e kadar azaltabilir. Bunun yanında düşük büzülme, aside karşı yüksek direnci, yüksek basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri iyi bir

malzeme olması da olumlu özelliklerini arttırmıştır. 1940'tan günümüze ilk olarak alkali çözeltilerin betona zarar vermedikleri ve hidratasyon süresini hızlandırmasına rağmen yeni hidratasyon ürünlerinde işlemin kolaylaştığının keşfedilmesiyle tarihsel süreçte üzerinde çalışılacak araştırılacak bir malzeme haline gelmiştir.(Al Muhit vd., 2013)

Li ve Liu (2007)'nin çalışmalarında, uçucu külü ve yüksek fırın cürufunu geopolimer üretiminde katkı maddeleri diye kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufunun da kullanılmasının geopolimerlerin 30°C ve 70°C sıcaklıklarda 14 gün boyunca kür uygulandığında basınç dayanımlarında %40'a kadar varan (sırası ile 50 MPa ve 70 MPa) artış olduğu gözlenmiştir. % 70 yüksek fırın cürufu ilavesinden sonra, özellikle de 70 °C'deki kür uygulanmış örnekler için gözenek boyutlarında artış olduğu sonucuna varılmıştır.

2.5. Geopolimer Betonların Kimyasal Etkisi

Yüksek fırın cürufu kalsiyum içeriğine ek olarak, camsı madde oranları ve birleşimleri, tane boyutları ve karakteristik özellikleri etkin olan en temel faktörler içerisindedir.(Erdoğan ve Kurbetçi ,2003) Yüksek fırın cürufunun fırından çıkışından sonra hızlı bir şekilde soğutulması, en az 2/3'ü kadar cam faz içeriyor olması gerekir. İçindeki MgO, SiO₂ ve CaO miktarları toplamının da en az 2/3 oranı kadar olması ve (CaO + MgO)/ SiO₂ oranının 1'den daha fazla olması istenir. (Yeğinoğlu, 2003)

Kullanılan SiO₂ oranı fazla olan atıkların geopolimer üretiminde kullanımı, azalan inşaat maliyeti, artan dayanım, CO₂ emisyonunda azalma ve kirleticileri yok etme gibi birçok konuda avantaj sağlar. (Thomas,2018)(Al Muhit vd.2013) Geopolimerler, düşük enerji tüketimleri ve düşük emisyonları gibi kriterleri ile birtakım uygulamalarda OPC (Portland çimentosu) ile alternatif potansiyel bir bağlayıcı olmuştur. Geopolimerler, alüminyum silikattan yapılan 3 boyutlu Si-O-Al inorganik malzemedir. Bu özelliği bir inşaat malzemesi olmasını sağlamaktadır. (Liew vd., 2017)

Sodyum silikatla kombinasyonu olan potasyum ve sodyum hidroksitlerin etkisiyle doğal alümina silikatın aktivasyonlarıyla alakalı yeteri kadar çalışma yapılmamıştır. KOH, NaOH' e göre çok daha iyi reaksiyon etkisine sahiptir. Mineraller, KOH çözeltisi ile kıyaslandığında, özellikle NaOH'le arttırılan konsantrasyonlarda alkalinele daha yüksek çözünme yeteneğine sahip olma yolundadır.

Aynı zamanda bu mineraller tamamen geopolimerizasyondan sonra daha da yüksek basınç dayanımına sahip malzemeler oluşturabilir. Bu alkaliler ile aktive edilen malzemeler, geleneksel Portland çimentosuna dayalı olan bağlayıcıların tam aksine iyi özelliklere sahip olacakları şekilde düzenlenebilirler. Sülfata, yangına, asitlere karşı daha yüksek dirençli ve kuruma ve büzülmenin de azalması gibi avantajları da vardır.(Ren vd., 2019)

$\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ molar oranı (katı haldeki sodyum silikat modülü) ile yapılan birkaç çalışmada 0.93 ile 3.32 aralıklarında değiştirilmiştir. Na_2SiO_3 (susuz sodyum metasilikat, modül 0.93), $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-NH}_2\text{O}$ (spesifik olmayan sulu sodyum silikat, modül 2.06) ile kıyaslandığında işlenebilirliğinin daha iyi ve basınç dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. (Albitar vd., 2017)(Walkley vd., 2019)

Nuaklong vd. (2019) yaptıkları bir çalışmada yüksek kalsiyumlu uçucu kül kullanılmış ve numuneleri ısı kürüne tabii tutmuştur. Geri dönüştürülmüş agregalı geopolimer betonların performanslarını yükseltmek amacıyla nano- SiO_2 'nin zengin içerikli kabuk külü ile değiştirilmesi araştırıldığında, $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 4.17'ye çıkarıldığında geri dönüştürülmüş agregalı geopolimer betonun basınç mukavemetinin artmasında gayet etkili olduğu gözlemlenmiştir. Daha yoğun matris ve geliştirilmiş mikro yapısı sebebiyle pirinç kabuğu külleri içeren 28 günlük geri dönüştürülmüş agregalı geopolimer betonun basınç dayanımları 36.0 MPa ile 38.1 MPa aralığında değişmiştir. Bunun yanı sıra SiO_2 açısından zengin olan malzemelerin dâhil edilmesi, azaltılmış gözenekliliğe de bağlı olmakla birlikte geri dönüştürülmüş agregalar ile beraber kullanıldıklarında geopolimer betonların yangın sonrasında basınç mukavemetleri değerlendirilmiş ve basınç mukavemetlerinde azalma olduğu belirtilmiştir.

Tong vd. (2018) yaptıkları araştırmada metakolin, uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve alümina bileşenleri içermekte olan alümino-silikat kaynağından alkali ile aktifleştirilmiş birçok bağlayıcı üretmişlerdir. Alkali aktifleştirilmiş bağlayıcılar ve sodyum silikatlar geopolimer betonda alkali aktivatörler olmak amacıyla yaygın şekilde kullanılır. Genelde, bu alkali aktivatörler kullanılarak üretilen betonlar en yüksek mukavemet gelişimiyle, yoğun ve kararlı bir yapıyla azaltılmış geçirgenlikle sonuçlanır. Bunun yanı sıra sodyum silikatın kullanımı enerjiiyi ciddi miktarda arttırır. Ayrıca yapılan beton basınç testleri sonuçlarına göre

numunelerde elde edilen basınç dayanımları ise 28. gün itibari ile 60 MPa'a kadar ulaşmıştır.

2.6. Geopolimer Betonun Dayanımını Etkileyen Parametreler

2.6.1. Yükleme Hızının Basınç Dayanımına Etkisi

Betondaki basınç dayanımları, uygulanan yüklemdeki hız değişiminden etkilenir. Beton örneğine uygulanan gerilmedeki uygulama hızını arttırdıkça numuneler daha az gerilme altında kırılır. Başka bir ifadeyle, düşük hızda yükleme uygulanan numunedeki basınç dayanımları daha az olmaktadır. Yükleme süresinin 24-30 dakika sürdüğü ve yükleme hızının 0.02-0.18 kgf/cm²/sn olan örneklerdeki basınç dayanım değer sonuçları, yükleme hızı 2.1 kgf/cm²/sn olan örnekten elde edilen sonuçlara göre %15 daha az olduğu görülmüştür. Oluşan bu durumun sebebi, uygulanan yükün numuneye daha uzun süre uygulanması ile bir miktar kadar sünme oluşmasıdır. Sünme sonucu numunelerde meydana gelen kısalma, yükleme sonucu oluşacak kısalmanın değerini azaltmasından ötürü yavaş yüklenen numuneler daha az basınç dayanımına sahip olmaktadır.

Diğer bir yandan uygulanan yükleme hızı yüksek olan numune örneklerde sünme daha az olacağından daha büyük yük altında kırılıp, daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşmaktadırlar. Yükleme hızı 70 kgf/cm²/sn olan örneklerdeki gözlenen basınç dayanımları, hızı 2.1 kgf/cm²/sn olan örneklerden %10 daha fazla basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Sonuç olarak, yükleme hızı yavaş olan numune örneklerindeki dayanım, hızlı yüklenen numunelere göre daha düşüktür. (Erdoğan, 2003)

2.6.2. Sıcaklık Ve Kürleme Süresinin Etkisi

Atis vd.(2015) yaptıkları çalışmada uçucu külü sodyum hidroksitle etkinleştirip alkali etkin olan uçucu küllü geopolimer harçların kazandıkları mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Hazırladıkları harç karışımlarındaki Na konsantrasyonlarını % 4'ten % 20'ye arttırmışlar ve bunun yanında da kürleme sıcaklığını 45°C ile 115°C aralığında değiştirmişlerdir. Sonuç olarak sırası ile 120 ve 150 MPa'a kadar yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer numuneler elde etmişlerdir.

Kupaei vd.(2013) çalışmasında, 7 gün oda sıcaklığında sertleştirilmiş numunelerin 28 günde kazandıkları basınç mukavemetinin %60'ını kazandığı ancak 65 °C'lik yüksek sıcaklıkta sertleştirmiş numuneler için ise aynı 28 gündeki basınç

mukavemetinin %80'ini 7 günde kazandığı sonucuna varılmıştır. Bu edinilen sonuçlar geopolimer bağlayıcıların endüstriyel uygulamaları açısından oldukça önemli sonuçlar doğuracaktır.

Betonarme elemanlara yüksek sıcaklık uygulandığında öncelikle betonun hem mekanik hem de fiziksel özellikleri değişir. Oluşan bu değişiklikler betonun elastisite modülü ve basınç dayanımında azalma, parçalanma, çatlak oluşumu; çelikte ise öncelikle akma ve çekme dayanımında azalma oluşur. Yangın sebebiyle yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonarme yapılarda onarım veya yıkıma karar vermek amacıyla yerinde ve laboratuvarlarda birçok deney yapılmalıdır. Yerinde yapılan incelemelerde ilk önce görsel incelenir. Yani betondaki çatlaklar, oluşan dağılmalar ve renk değişimleri araştırılır. (Guisse vd., 1996)Yapılan görsel denetim veya görsel inceleme, yangın sonrası betonun mukavemeti hakkında fikir verir.

Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun mekanik özelliklerinin yanı sıra renginde de bir takım değişiklikler oluşur. Bu farklılıklar özellikle silisli agregalarla üretilmiş olan betonlarda daha belirgindir.(Andrade vd.2003).Örnek olarak rengi pembe veya kırmızıysa sıcaklık 300-600°C, griyse 600-900°C, bejse 900-1000°C'ye kadar yükseldiğini ifade eder. (Neville,2000)(Georgali ve Tsakiridis, 2005). Başka bir çalışmada ise rengi pembe olan betonun elastisite modülünün ve dayanımının büyük ölçüde azaldığı, sarımsı-bej veya beyazımsı-gri renkteki betonun gevrek ve zayıf olduğu belirtilmiştir. Renklerdeki bu değişimlerin sebepleri ise metal içermekte olan kimyasal bileşenlere bağlanmıştır (Andrade vd.2003).Genelde beton sıcaklığı 600°C'ye ulaştığı zaman dayanımının %50'sini, sıcaklık 800°C'ye ulaştığı zaman yaklaşık %80'ini kaybettiği görüldüğünden aslında renk incelemelerinin betonların hangi sıcaklıklara maruz kaldığının dolayısıyla da basınç dayanımındaki oluşan değişiklikler hakkında da bilgi vermektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi yüksek sıcaklığın etkisiyle oluşan betondaki renk değişimlerinin betonun mevcut durumunu anlamada önemli parametre olduğu görülmektedir.(Yüzer vd., 2004)

2.6.3. Aşınma Ve Erozyon Etkileri

Aşınma, beton yüzeylerinde (döşemeler, zemin betonları, yol betonları) kuru sürtünmenin etkisiyle zaman içerisinde oluşan ve artan kütle kaybına denir. Aşındırıcı etkiler; araç tekerleğinden, yaya trafiğinden, ağır cisimlerin sürüklenmelerinden ve iş makinalarının paletlerinden kaynaklanır. Aşınma direnci betonlar da özellikle yol betonlarda oluşacak bozulmanın azalması bakımından önem arz etmektedir. Aşınma

direnci yüksek agrega kullanımı ve düşük su/çimento oranına sahip bir geçirimsiz betonun aşınma direnci diğer betonlara göre daha yüksek olacaktır. Erozyon ise içerisinde askı halinde parçacıkların bulunduğu sıvıların özel olarak yüksek hızlı geçişlerde beton yüzeylerini çizerek aşındırması olayıdır. Buna daha çok beton borularda ve su yapılarında rastlanmaktadır. (Yeğınobalı vd., 1999)

2.6.4. Donma-Çözünme

Betonun tekrarlı olarak donma - çözülme etkisine maruz kalması betondaki oluşacak fiziksel etkilerdendir. Donma - çözülme olayının etkisindeki bölgelerde köprü ve yol gibi yapılarda buz çözücü etkisi olan tuz kullanılması ile beraber klor etkisi sebebiyle donma-çözünmeye sebebiyet vermektedir. Ortam koşulları, kullanılan malzemeler ve rutubet vb. etkenler de donma – çözülme nedeniyle oluşan hasarları arttırabilir. (Vanderhost ve Jansen, 1990)

Betonda devamlı tekrarlanan donma – çözülmeyle betonlarda hasarla oluşmaya başlar. Betonda oluşan hasarlar çatlama ile veya beton yüzeyinde oluşmaya başlayan dökülmeler ve soyulmalarla kendini gösterir. Yüzeyde oluşan hasarlar çevrede en fazla karşılaşılan bir durumdur. Fakat beton uzun süre içinde donma – çözülme etkisinde ise o zaman kesit boyunca çatlaklar görülür. Beton tazeyken don olayının meydana gelmesiyle dayanım kayıpları oluşabilir. Normal şartlarda priz almaya başlarken ki süreçte don olayı oldukça tehlikelidir. Bu sebeple soğuk hava şartlarında beton dökerken gereken tüm önlemler alınmalıdır.

2.6.5. Kimyasal Durabilite Etkisi

Çimentosuz betonlar geleneksel çimentoyla üretilen betonlar gibi kimyasal solüsyonlardan etkilenirler. Betonların sahip olması gereken en önemli özelliklerden birisi de kimyasal etkilere karşı iyi bir durabilite performansı göstermesidir. Betonlar genellikle sodyum klorür, sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve sülfürik asit gibi kimyasal etkilere maruz kalmaktadır. Bu kimyasal saldırılar sonucunda beton dış yüzeyden başlayarak iç yüzeylere doğru bozulmaktadır. Bu bozulma sonucunda beton numune yüzeylerinde şişme, çatlama, parça dökülmesi gibi etkiler sonucu beton yüzey alanı azalmaktadır. Bu yüzey alanının azalmasına bağlı olarak ise betonun sahip olduğu basınç mukavemeti düşmektedir. Bu sebeplerden dolayı betonlar kimyasal etkilere karşı yeteri kadar durabiliteye sahip olmalıdır. Kimyasal etkilerden en tehlikeli olanları arasında sülfürik asit saldırısı yer almaktadır. Betonların sülfürik asite karşı iyi bir

durabilite özelliği göstermesi genel olarak diğer kimyasal etkilere karşı da iyi bir durabilite performansı göstereceği anlamına gelmektedir.

Çimentosuz betonlarla gerçekteştirilen çalışmada farklı geopolimer ve alkali aktive edilmiş beton numuneleri % 5 sülfürik asit etkisine maruz bırakılmıştır. Bu amaçla, %100 yüksek fırın cürufllu, %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufllu ve %100 uçucu küllü geopolimer betonlar üretilmiştir. Bu betonlarda alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve 14 M sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Ayrıca geopolimer betonları Portland çimentolu betonlarla karşılaştırabilmek amacı ile geleneksel betonlarda test edilmiştir. Sülfürik asit etkisine maruz betonlardan en iyi durabiliteyi %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufllu betonlar gösterirken, en kötü performansı ise %100 uçucu küllü geopolimer betonlar göstermiştir. Bu kötü performansın sebebinin, geopolimerizasyona uğramamış uçucu kül parçacıklarından meydana geldiği belirtilmiştir.(Altundal, 2019).

Yapılacak bu çalışmada ise %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufllu betonların 3 değişik miktarda; 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 , ve 600 kg/m^3 ve 0.45 ve 0.55 olmak üzere iki farklı alkali aktivatör/bağlayıcı oranlarında betonlar üretilmiştir. Çalışmada amacımız, laboratuvar şartlarında kürlenmiş %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufllu alkali aktive edilmiş betonların değişik zaman aralıklarında basınç mukavemetlerinin gelişimini ve % 5 sülfürik asit etkisi altında durabilite performansını araştırmaktır. Böylece alkali aktive edilmiş betonların yapılarda kullanılması için gereken yönetmeliklerin/standartların oluşmasını sağlamak için ön ayak olacaktır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu aşamada kullandığımız malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri ile üretilen geopolimer betonlara uyguladığımız deneyler ile birlikte bu deneylerin yapıları hakkında bilgi verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri

3.1.1. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufunun farklı beton karışımlarının hazırlanmasındaki esneklik gibi faktörler, cürufun ayrı öğütülerek bir beton katkısı olarak kullanılmasını oldukça avantajlı hale getirmektedir. Bu yapmış olduğumuz çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel bileşimleri Çizelge 3.1’de verilmiştir ve Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. Yüksek fırın cürufu

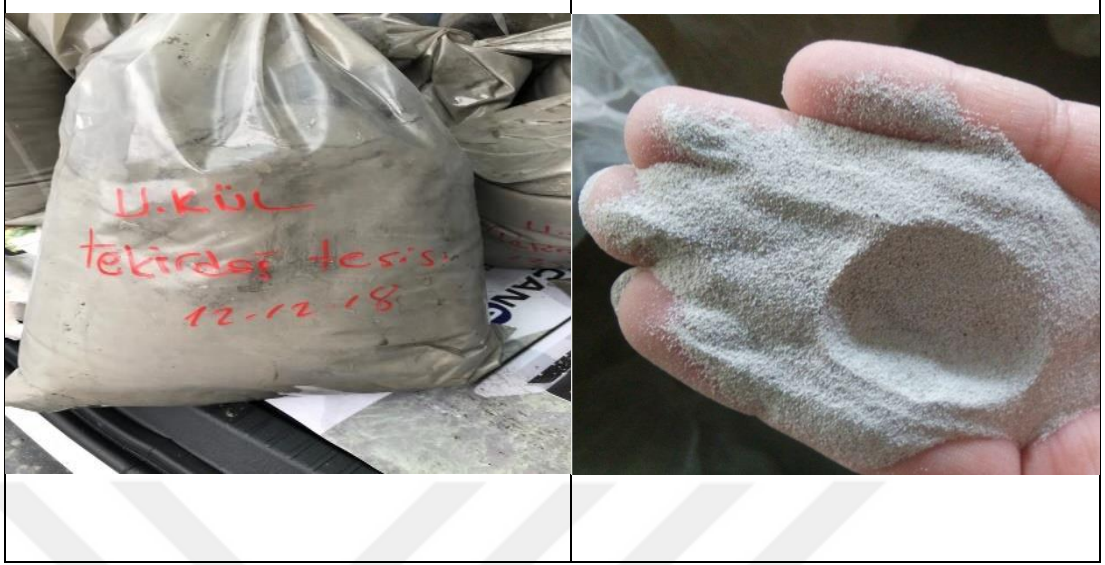
Çizelge 3.1. Deneyleerde kullanıldığımız yüksek fırın cürufunun özellikleri

Kimyasal analiz	Sonuçlar (%)
CaO	37,92
SiO ₂	37,97
Al ₂ O ₃	13,27
Fe ₂ O ₃	1,16
MgO	5,64
SO ₃	0,23
K ₂ O	0,56
Na ₂ O	0,84
Cl	0,0150
S	0,78
TiO ₂	0,66
Mn ₂ O ₃	0,55
Kızdırma kaybı	0,01
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,95
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	5131

3.1.2. Uçucu kül

Uçucu küller betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay puzolandır ve genellikle endüstride kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin termik santral fırınında yakılması sırasında yukarı yükselen uçucu küller orada depolanır. Çizelge 3.2

kullanılan uçucu külün kimyasal ve fiziksel özelliklerini göstermektedir. Şekil 3.2’de ise kullanılan F-tipi uçucu kül gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deneysel ortamda kullanılan F-tipi uçucu kül

Çizelge 3.2. Deneysel ortamda kullanılan uçucu kül özellikleri

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

3.1.3. Agregalar

Yapmış olduğumuz çalışmada, kaba ve ince agrega kullanıldı. İri agrega boyutu 16 mm ile 4 mm boyutları arasında değişmektedir. İnce agregalar, 4 mm boyutundan daha küçüktür. Çizelge 3.3’de iri ve inci agrega mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Kullanılan iri agrega Şekil 3.3’de verildi.

Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan agregaların özellikleri

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



Şekil 3.3. Kullanılan iri agrega

3.1.4. Alkali aktivatör

Çalışmamızda, alkali aktivatör olarak bir sodyum hidroksit ve sodyum silikat sıvısı karışımı oluşturuldu. Sodyum içeren alkali aktivatörler, potasyum içeren alkali aktivatörlere göre daha ucuz olmasından ötürü çalışmamızda sodyum içeren alkali aktivatör seçilmiştir. Bu araştırmada % 97-98 saflıkta NaOH kullanılmıştır ve karışımdan en az 6 saat önce suda eritilmiştir ve oluşan yüksek ısıyı düşürmek için laboratuvarında tutulmuştur. Temin edilen sodyum silikat aktivatörünün özelliği Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Sodyum silikat özelliği

Bileşen	Değer
SiO ₂	%22 - %25
NaO ₂	%10 - %12
Yoğunluğu	1.39 g/cm ³
Görünümü	Viskoz sıvı, Renksiz, Belirsiz

3.1.5. Kimyasal Katkı

Kullanılan geopolimer betonların akışkanlığı kimyasal katkı ile sağlanmıştır. Çizelge 3.5’de geopolimer betonların üretilmesinde kullanılan akışkanlaştırıcı malzemesinin detaylı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan kimyasal katkının özellikleri

Özellikler	Kimyasal katkı
Ürünün adı	YAPRHEO HYPER SCC 900
Rengi	Opak
Durum	Sıvı
Özgül ağırlığı	1,069 g/cm ³
Katı madde ağırlığı	31.93 %
Suda çözünebilir klorür	0.0376 %
pH değeri	6.03

3.2. Deneysel Metod

3.2.1. Küp Kalıp

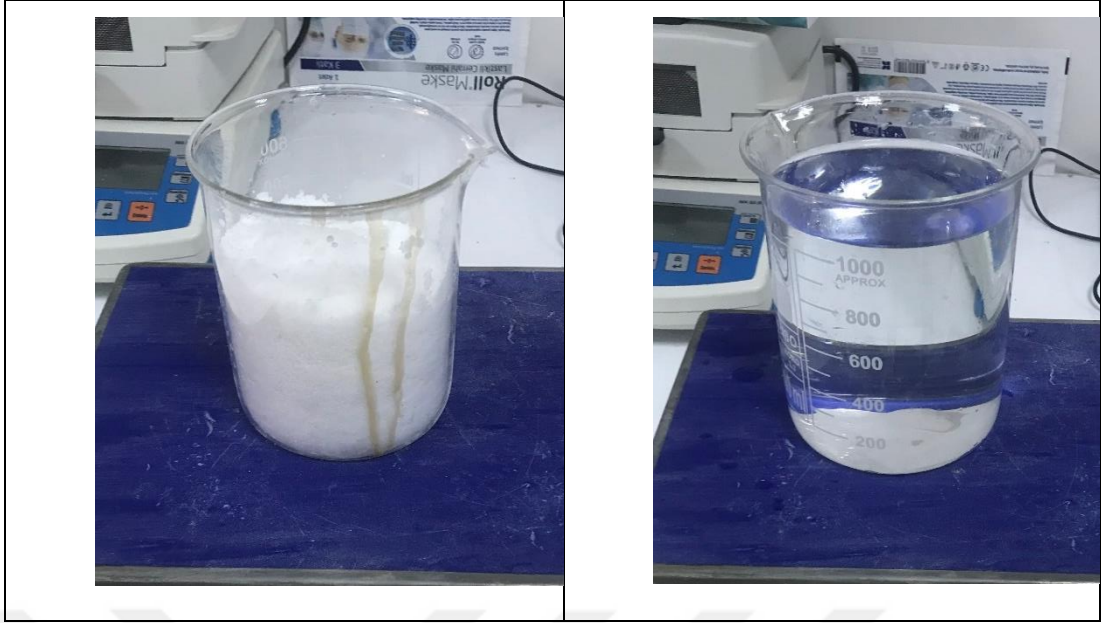
Deneylerde, basınç dayanımı ve kimyasal durabilite deneyinde kullanılacak olan numunelerin dökülebilmesi için Şekil 3.4'deki gibi 150 mm x 150 mm x 150 mm küp kalıpları kullanılmıştır. Kalıp kullanımından önce kalıplar iyice temizlendikten sonra kalıpların yağlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.4. Kullanılan kalıplar

3.2.2. Alkali Aktivatörler Hazırlıkları

Deneylerde alkali solüsyon olarak sodyum hidroksitle sodyum silikatın karışımı kullanılmıştır. Mikserin kapasitesini de dikkate alınarak üretilecek geopolimer betonlarda 1482 gr sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanması amacıyla, 525 gr sodyum hidroksitle 957 gr su karıştırılıp karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan solüsyon, geopolimer beton dökümü öncesinde hazırlanmıştır ve bu karışımının yüksek ısısını azaltmak amacıyla 6 saat laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir. Şekil 3.5'de karıştırılacak olan sodyum hidroksit ile su gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması

3.2.3. Karışım Hazırlanması

Geopolimer beton, kuruma rötresi kontrol edilebildiğinde ince ve dar yapı elemanları için kullanımı elverişli, Portland çimentolu betonlara kıyasla hidrasyon ısısı daha düşük, donatı korozyonuna karşı daha etkili ve asit saldırıları karşısında daha dirençli bir beton türü olmasından dolayı standartlaşması gerektiği düşünülmektedir. Böylece yapıların imal edilmesinde kullanımı mümkün olabilecektir. Geopolimer beton, çimento yerine cüruf, uçucu kül gibi malzemelerden oluşan ve su yerine alkali solüsyonlar kullanılarak üretilmektedir. Bu çalışmada ise farklı bağlayıcı miktarı ve alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı ile üretilen betonların mekanik ve kimyasal durabilite performanslarının incelenmesi hedeflenmiştir. Üretilen beton karışımlarının 1 m^3 için malzeme miktarları Çizelge 3.6 – 3.11’de gösterilmiştir. Elde edilen numuneler S50FA50 numuneleri olmasından dolayı %50 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile %50 F-tipi uçucu kül kullanılmıştır. Toplam bağlayıcı miktarları 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 , ve 600 kg/m^3 olarak değişmektedir. Alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı oranı olarak ise 0.45 ve 0.55 olacak şekilde 2 farklı alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranı seçilmiştir.

Çizelge 3.6. S50FA50-400-0.45 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agrega	No I	488
	No II	488
İnce Agrega	Kum	313
	Kırma Kum	313
Yüksek fırın cürufu		200
Uçucu kül		200
Kimyasal katkı		7.58
Na ₂ SiO ₃		128.57
NaOH		51.43
İlave Su		30

Çizelge 3.7. S50FA50-400-0.55 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agrega	No I	456
	No II	456
İnce agrega	Kum	293
	Kırma Kum	293
Yüksek fırın cürufu		200
Uçucu kül		200

Kimyasal katkı	7.58
Na ₂ SiO ₃	157.14
NaOH	62.86
İlave Su	30

Çizelge 3.8. S50FA50-500-0.45 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agrega	No I	412
	No II	412
İnce Agrega	Kum	265
	Kırma Kum	265
Yüksek fırın cürufu		250
Uçucu kül		250
Kimyasal katkı		3.03
Na ₂ SiO ₃		160.71
NaOH		64.29
İlave Su		37.50

Çizelge 3.9. S50FA50-500-0.55 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agrega	No I	372
	No II	372
İnce Agrega	Kum	239
	Kırma Kum	239
Yüksek fırın cürufu		250
Uçucu kül		250
Kimyasal katkı		3.03
Na ₂ SiO ₃		196.43
NaOH		78.57
İlave Su		37.50

Çizelge 3.10. S50FA50-600-0.45 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agrega	No I	336
	No II	336
İnce Agrega	Kum	216
	Kırma Kum	216
Yüksek fırın cürufu		300
Uçucu kül		300

Kimyasal katkı	2.27
Na ₂ SiO ₃	192.86
NaOH	77.14
İlave Su	45

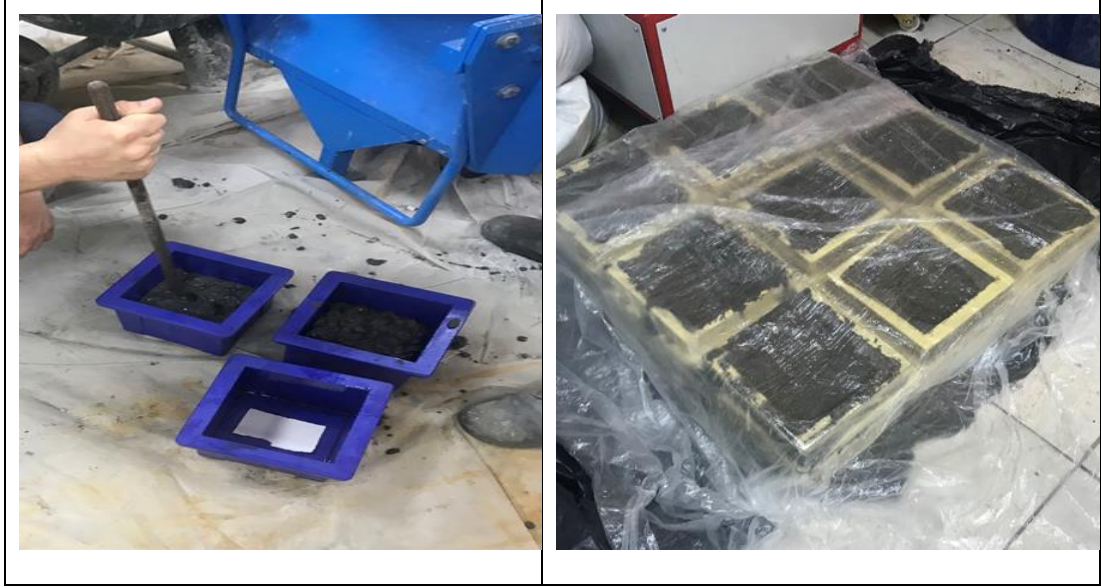
Çizelge 3.11. S50FA50-600-0.55 geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agrega	No I	288
	No II	288
İnce Agrega	Kum	185
	Kırma Kum	185
Yüksek fırın cürufu		300
Uçucu kül		300
Kimyasal katkı		2.27
Na ₂ SiO ₃		235.71
NaOH		94.29
İlave Su		45

3.2.4. Geopolimer Betonların Üretimi

Geopolimer beton yapım aşamasında standart karıştırma yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle iri ve ince agregalar beton üretimi için Şekil 3.6’da gösterildiği gibi mikserde eklenmiştir. Sonrasında ise uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi bağlayıcı malzemelerde mikserde ilave edilerek 2 dakika boyunca mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra sodyum silikat ve sodyum hidroksit içeren alkali aktivatörler ile kimyasal katkıların yarısı mikserde konularak 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. En son olarak ise kimyasal katkı ile ilave su ayrı bir kova içerisinde karıştırıldıktan sonra mikserde eklenmiştir ve elde edilen sıvı karışım 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra beton numune kalıplarına hava boşluğu kalmayacak şekilde yerleştirildi. Hava boşluğu oluşmaması için numunelere şişleme ve titreşim uygulanmıştır ve Şekil 3.6’ da süreç gösterilmiştir.





Şekil 3.6. Geopolimer betonların üretimi

3.2.5. Kürleme

Elde edilmiş betonların kalıplarının sökülmesinden sonra 90.,120., ve 150.,günlerde test uygulanması amacıyla laboratuvarda muhafaza edilmiştir. Betonlara herhangi bir ısı ve/ya su kürü uygulanmaksızın laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Buradaki amacımız normal şartlarda geopolimer numunelerin basınç dayanımlarının zamanla ve sülfürik asit etkisinde performanslarını incelemektir.

3.2.6. Sülfürik asit çözeltisi

Laboratuvarda kürlenmiş alkali aktive edilmiş beton numunelerinin ağırlıklarının ölçülmesinden sonra %5 sülfürik asit çözeltisine sahip kovaların içerisine yerleştirilmiştir. 90. gün ve 120. Gün ve 150.gün bitiminde numuneler sülfürik asit kovalarından Şekil 3.7’de gösterildiği gibi çıkarılıp fotoğraf çekimleri, ağırlık ölçümleri ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır.



Şekil 3.7. Numunelerin %5 sülfürik asit çözeltisinde tutulması ve çıkarılması

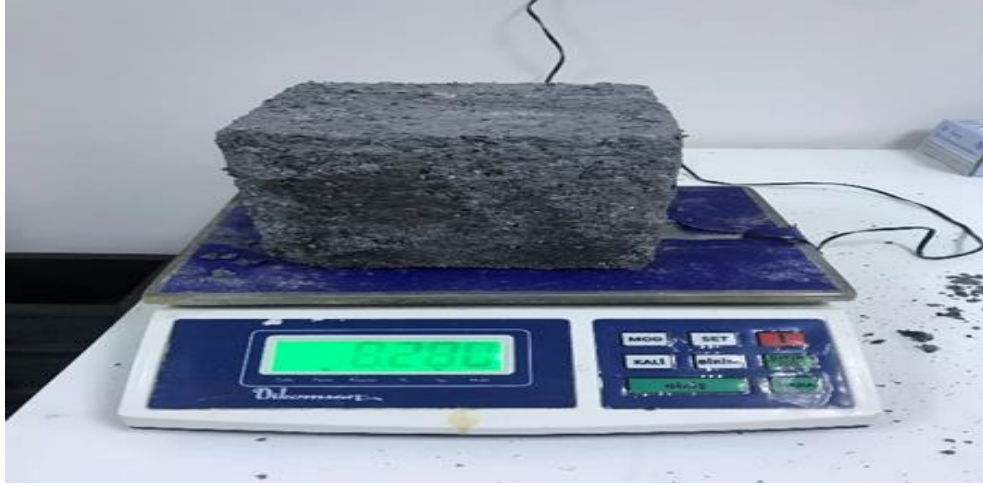
3.2.7. Numune Ağırlıklarının Değişimi

Hazırlanan numunelerin sülfürik asit öncesindeki yani 28 günlük ağırlıkları ölçülmüştür. Sonrasında ise 120. ve 150. günlerde hem asitteki hem de laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin ağırlıkları ölçülerek kaydedildi. Betonların sülfürik asit sonrası ağırlıklarında meydana gelen değişim aşağıdaki formülle hesaplanmıştır. Numuneler ağırlıkları tartılmadan önce sülfürik asit çözeltilerinden çıkarıldıktan sonra 24 saat numunelerin kuruması için beklenilmiştir. Daha sonra ağırlık ölçümleri ve fotoğraf çekimleri yapılmıştır. Şekil 3.8’de numunelerin tartılması gösterilmiştir.

$$\text{Ağırlıkta \% değişim} = [(D-C)/C] \times 100. \quad (3.1)$$

C = Başlangıç Ağırlığı (28.günde su küründen sonra ölçülen ağırlık)

C = Son ağırlık (Belirli zaman sonra Asite maruz kaldıktan sonraki ağırlık)



Şekil 3.8. Numunelerin sülfürik asit etkisi sonrası ağırlıklarının tartılması

3.2.8. Basınç Dayanımı Testleri

Betonun tanımlanması ve sınıflandırılması basınç dayanımlarına göre yapılır. Basınç dayanımı deneyleri AS1012.9-1999'a göre gerçekleştirilmiştir. Maksimum 2000 kN kapasiteli bir test makinesi kullanıldı. Elde edilen numunelerin kuvvet/alan formülünden basınç mukavemeti MPa (N/mm^2) cinsinden belirlenmiştir. Şekil 3.9'da basınç deneyine tabii tutulan numunelerin fotoğrafları gösterilmiştir.





Şekil 3.9. Küp numunelerin basınç testlerinin yapılması

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

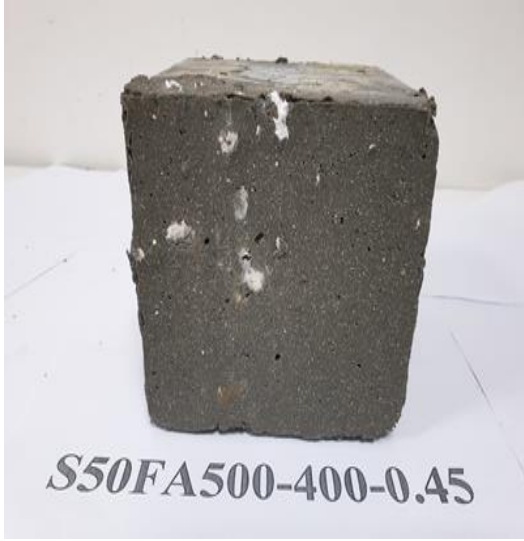
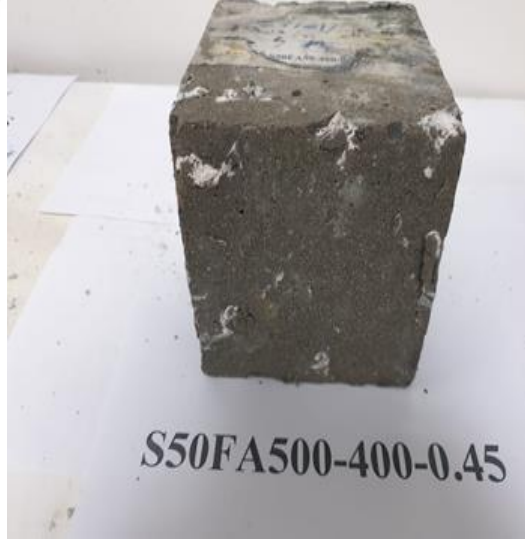
Yapılan tez kapsamında 5% sülfürik asite maruz %50 yüksek fırın cürufu ve %50 F-tipi uçucu kül ile üretilmiş alkali aktive edilmiş numunelerin dayanım ve sülfürik asit durabilite performansları incelenmiştir. Numuneler 28 gün kontrol (laboratuvar) ortamında, 120 gün ve 150 gün hem kontrol ortamında hem de 5% sülfürik asit ortamında bekletilmiş ve sülfürik asit etkisindeki farklı alkali aktive edilmiş beton numunelerin dayanım ve durabilite performansı araştırılmıştır. Çalışmada yüksek fırın cürufu ve F-tipi uçucu kül miktarları $200 + 200 \text{ kg/m}^3$, $250 + 250 \text{ kg/m}^3$ ve $300 + 300 \text{ kg/m}^3$ olacak şekilde kullanılmıştır. Alkali/bağlayıcı oranları 0.45 ve 0.55 olarak seçilip hem bağlayıcı malzeme miktarı hem de alkali/bağlayıcı oranlarının değişimiyle alkali aktive edilmiş numunelerde dayanım ve durabilite etkisi araştırılmıştır. Elde edilen uçucu küllü ve cürufu numuneler üzerinde asite maruz bırakıldıktan sonra numune yüzeylerinde meydana gelen değişim (görsel denetim), numunelerin ağırlıklarında zamana ve asit etkisine maruz kalması dolayısıyla değişim (ağırlıkta değişim) ve numunelerin basınç dayanımlarında asit sonrası meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan deneyler 3 ana başlık altında araştırılmıştır.


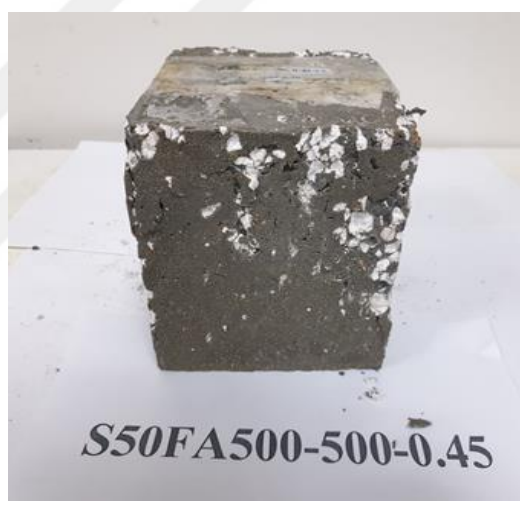
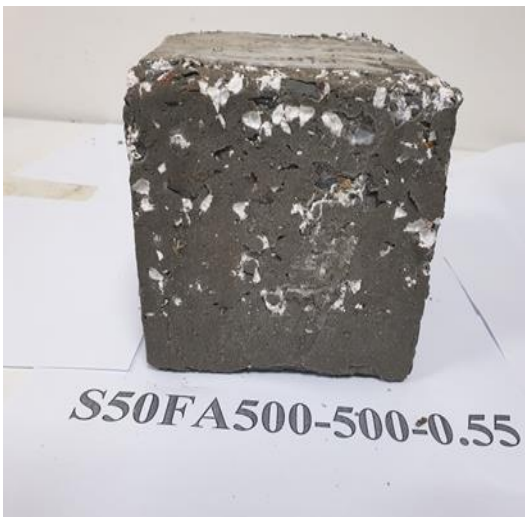
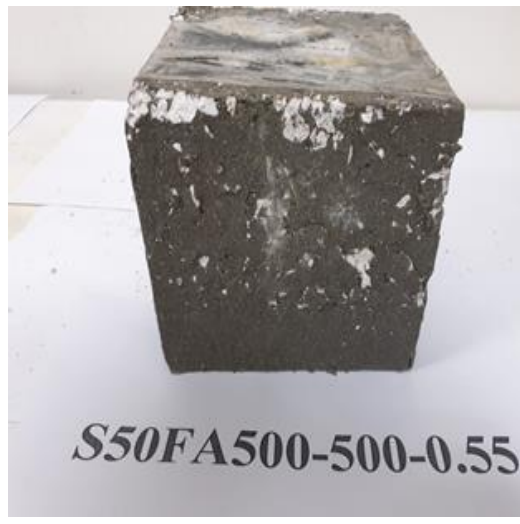
4.1. Görsel İnceleme

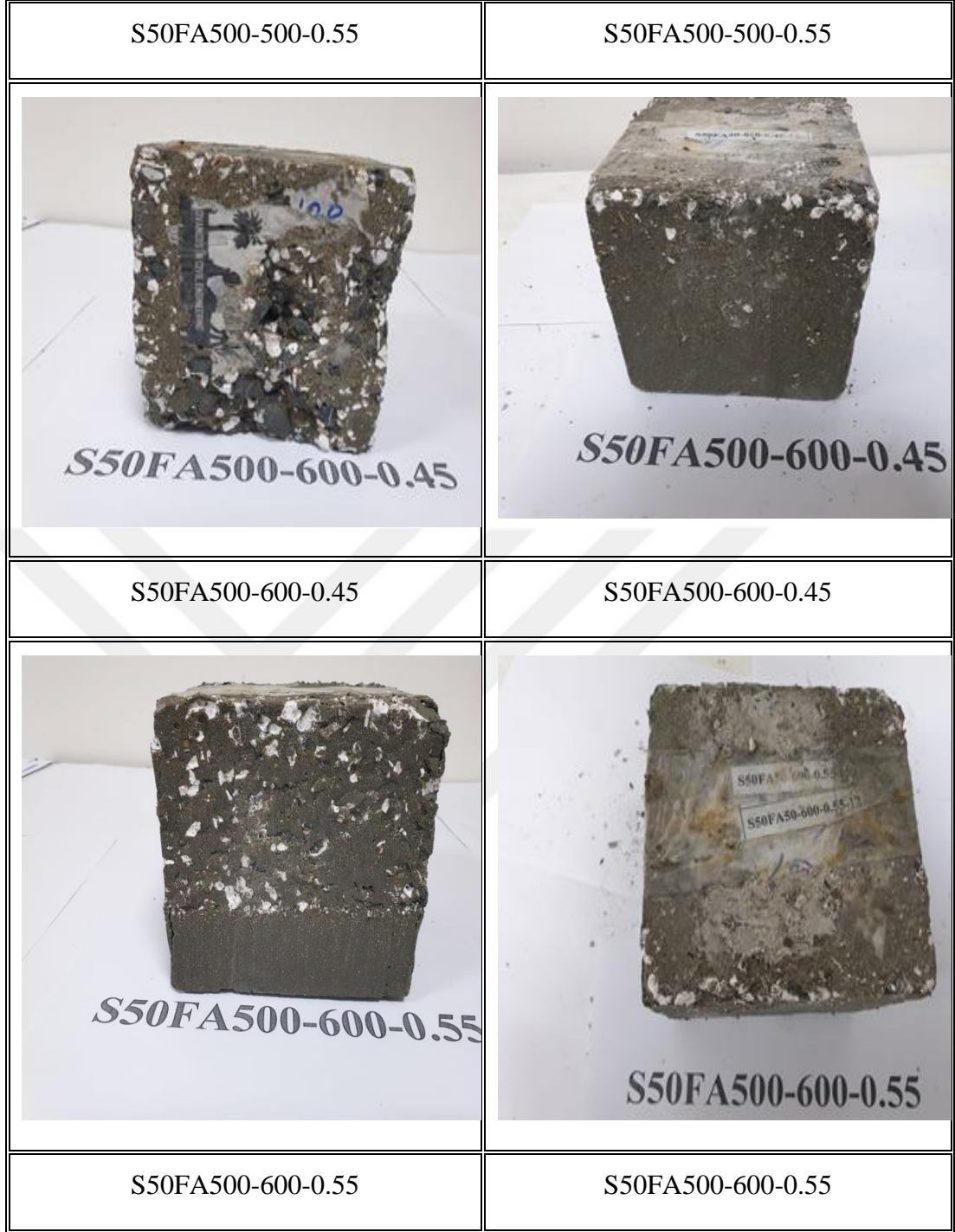
F-tipi uçucu kül ve yüksek fırın cüruf bazlı alkali aktive edilmiş beton numunelerin, laboratuvar ortamı (kontrol) 28. günde, %5 sülfürik asit etkisinde ve laboratuvar ortamında 120. günde ve %5 sülfürik asit etkisinde ve laboratuvar ortamında 150. günde en dış yüzeyinde oluşan değişim Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Sülfürik asit etkisinde olan alkali aktive edilmiş betonların dış kısımlarında alçıtaşı oluşmasından dolayı beyaz beyaz leke ve harç parçacıkların yüzeylerden dökülmesi görülmektedir. 5% sülfürik asite maruz numunelerde dış kısımlarında erozyonlar, kalsiyum monosülfoalüminatlarla kalsiyum hidroksitler arasında kimyasal tepkime sebebiyle oluşan beyaz renkli alçı kristal tabakalarından kaynaklanmaktadır. Meydana gelen alçıtaşı ürünlerinin beton dış yüzeylerini yumuşatması sebebiyle pul pul dökülmelere daha sonra da basınç dayanımlarının azalmasına sebep olmaktadır.

Şekil 4.1’de mevcut alkali aktive edilmiş numunelerin dış yüzey fotoğrafları incelendiğinde numunelerin asit ortamına maruz kalma süresi arttığında yüzeyde meydana gelen bozulma miktarının fazla olduğu görülmüştür. Beyaz leke miktarının artmasıyla ve dış kısımlarda oluşan çatlakların genişliği ve uzunluğu arttıkça bozulma miktarı fazlaşmaktadır. Bu arada betonda oluşan beyaz renklerden ötürü beton rengi griden beyaza dönmeye başlamıştır. Numunelerde oluşan bozulma miktarı 600 kg/m^3 bağlayıcı miktarı olan betonlarda en çok, 500 kg/m^3 bağlayıcı miktarı olan betonlarda orta ve 400 kg/m^3 bağlayıcı miktarı olan betonlarda ise en az olduğu görsel olarak gözlemlenmektedir. Yani bağlayıcı miktarı arttıkça betondaki yüzey bozulmasının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. 0.45 ve 0.55 alkali/bağlayıcı oranlarına sahip alkali aktive edilmiş beton numuneleri karşılaştırıldığında ise belirgin bir fark olmadığı ve benzer oranda beyaz leke ve bozulma görülmektedir. Burada 0.45 ve 0.55 alkali/bağlayıcı oranlarına sahip betonlarda benzer dış yüzey bozulması elde edilmiştir.

120 GÜN	150 GÜN
 <p><i>S50FA500-400-0.45</i></p>	 <p><i>S50FA500-400-0.45</i></p>
S50FA500-400-0.45	S50FA500-400-0.45

 <p><i>S50FA500-400-0.55</i></p>	 <p><i>S50FA500-400-0.55</i></p>
<p>S50FA500-400-0.55</p>	<p>S50FA500-400-0.55</p>
 <p><i>S50FA500-500-0.45</i></p>	 <p><i>S50FA500-500-0.45</i></p>
<p>S50FA500-500-0.45</p>	<p>S50FA500-500-0.45</p>
 <p><i>S50FA500-500-0.55</i></p>	 <p><i>S50FA500-500-0.55</i></p>



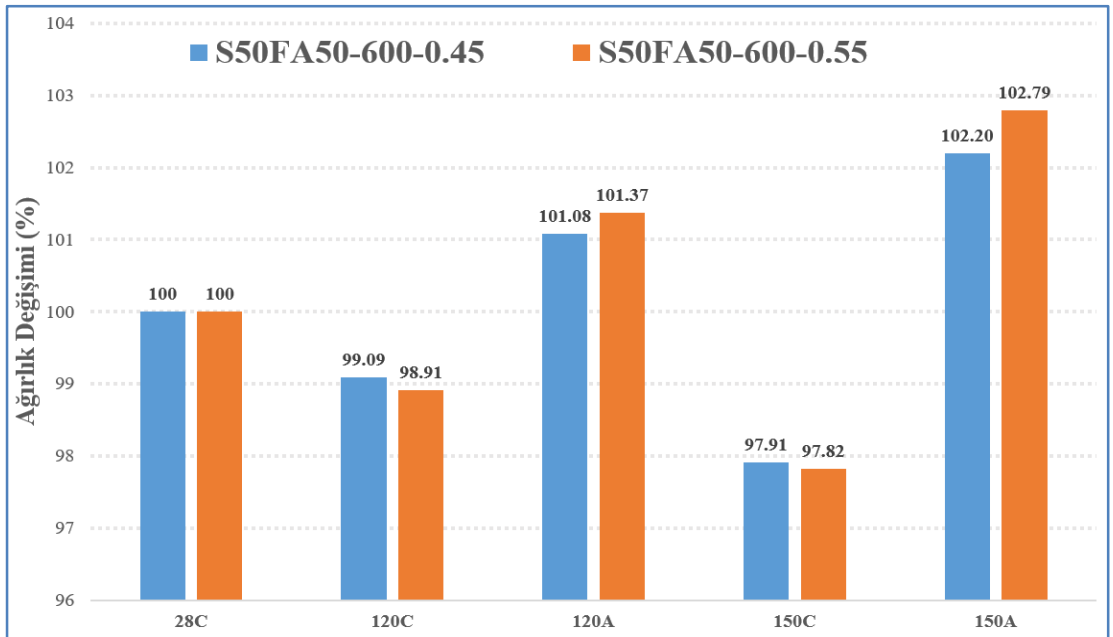
Şekil 4.1. 120. Gün ve 150. Gün Asite Maruz Kalan Numunelerde Oluşan Değişim

4.2. Ağırlıkta Meydana Gelen Değişme

Numunelerin ağırlıklarında zamanla meydana gelen değişim betonlardaki bozulmayı ifade etmektedir. Şekil 4.2’ de 300 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 300 kg/m³ yüksek fırın cürufu içeren alkali aktive edilmiş numunelerin ağırlıklarında meydana gelen değişimler belirtilmiştir. Şekil 4.2’de C laboratuvar ortamında (kontrol) tutulan numuneleri gösterirken, A ise % 5 sülfürik asite maruz kalan numune ortamını

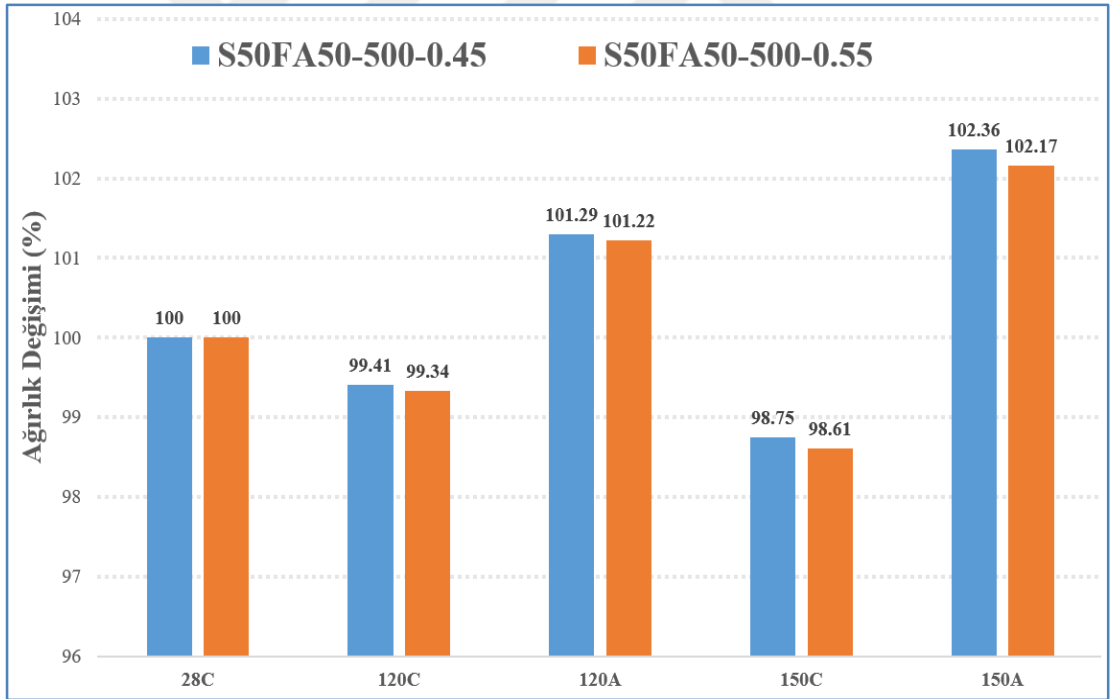
belirtmektedir. 28, 120 ve 150 ifadeleri ise betonların yaşını gün olacak şekilde belirtmektedir. Aşağıdaki şekillerde gösterilen 28C, toplam olarak 28 gün laboratuvarında (kontrol) tutulan betonları göstermektedir. 120C ise 120 gün boyunca laboratuvarında tutulmuş, 120A ise 28 gün laboratuvarında tutulduktan sonra 92 gün asite maruz bırakılan betonları temsil etmektedir. 150C ve 150A ise sırasıyla 150 gün laboratuvarında tutulan numuneleri ve 28 gün laboratuvar + 122 gün sülfürik asitte bekletilen betonları temsil etmektedir.

Şekil 4.2, alkali aktive edilmiş beton küp numunelerin 120.gün ve 150.gün ağırlıklarının 28.gün ağırlığına göre yüzde (%) ne kadar bir değişim oluştuğunu ifade etmektedir. Bağlayıcı miktarı olarak 600 kg/m^3 kullanılmıştır. Şekil 4.2 incelendiğinde, 120 gün laboratuvarında (kontrol) bırakılmış 0.45 alkali/bağlayıcı oranına sahip alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerinin ağırlığı % 0.91 azalırken, 120 gün asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %1.08 artmıştır. 150 günde kontrol ortamında bekletilen numune ağırlıkları %2.09 düşerken, %5 sülfürik asite maruz kalması durumunda numune ağırlığı %2.20 artmıştır. 0.55 alkali/bağlayıcı oranına sahip AAE beton numunelerine bakıldığında 120 gün laboratuvar ortamı koşullarında bekleyen numune ağırlıkları % 1.09 düşerken, 120 gün asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %1.37 artmıştır. 150 günde kontrol ortamında bekletilen numune ağırlıkları %2.18 düşerken, asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %2.79 artmıştır.



Şekil 4.2. 600 kg/m^3 Bağlayıcılı S50FA50 AAE Beton Numunelerinin Ağırlık Değişimi

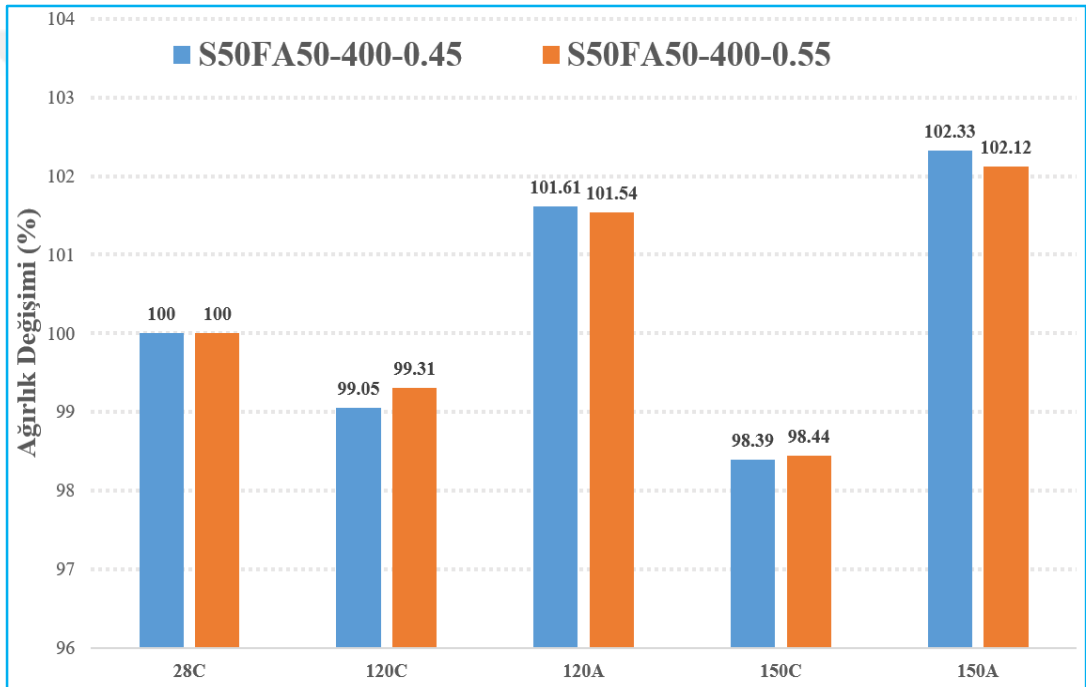
Şekil 4.3’de alkali aktive edilmiş (AAE) beton küp numunelerin 120.gün ve 150.gün ağırlıklarının 28.gün ağırlığına göre yüzde (%) ne kadar bir değişim olduğunu ifade etmektedir. Bağlayıcı miktarı olarak 500 kg/m³ beton kullanılmıştır. Şekil 4.3 incelendiğinde, 120 gün laboratuvarında (kontrol) bırakılmış 0.45 alkali/bağlayıcı oranına sahip alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerinin ağırlığı %0.59 azalırken, 120 gün asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %1.29 artmıştır. 150 günde kontrol ortamında bekletilen numune ağırlıkları %1.25 düşerken, %5 sülfürik asite maruz kalması durumunda numune ağırlığı %2.36 artmıştır. 0.55 alkali/bağlayıcı oranına sahip AAE beton numunelerine bakıldığında 120 gün laboratuvar ortamı koşullarında bekleyen numune ağırlıkları %0.66 düşerken, 120 gün asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %1.22 artmıştır. 150 günde kontrol ortamında bekletilen numune ağırlıkları %1.39 düşerken, asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %2.17 artmıştır.



Şekil 4.3. 500 kg/m³ Bağlayıcı S50FA50 AAE Beton Numunelerinin Ağırlık Değişimi

Şekil 4.4’de alkali aktive edilmiş (AAE) beton küp numunelerin 120.gün ve 150.gün ağırlıklarının 28.gün ağırlığına göre yüzde (%) ne kadar bir değişim olduğunu ifade etmektedir. Bağlayıcı miktarı olarak 400 kg/m³ beton kullanılmıştır. Şekil 4.4 incelendiğinde, 120 gün laboratuvarında (kontrol) bırakılmış 0.45

alkali/bağlayıcı oranına sahip alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerinin ağırlığı %0.95 azalırken, 120 gün asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %1.61 artmıştır. 150 günde kontrol ortamında bekletilen numune ağırlıkları %1.61 düşerken, %5 sülfürik asite maruz kalması durumunda numune ağırlığı %2.33 artmıştır. 0.55 alkali/bağlayıcı oranına sahip AAE beton numunelerine bakıldığında 120 gün laboratuvar ortamı koşullarında bekleyen numune ağırlıkları %0.69 düşerken, 120 gün asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %1.54 artmıştır. 150 günde kontrol ortamında bekletilen numune ağırlıkları %1.56 düşerken, asite maruz kalmış AAE beton numunelerinin ağırlıkları ise %2.12 artmıştır.



Şekil 4.4. 400 kg/m³ Bağlayıcı S50FA50 AAE Beton Numunelerinin Ağırlık Değişimi

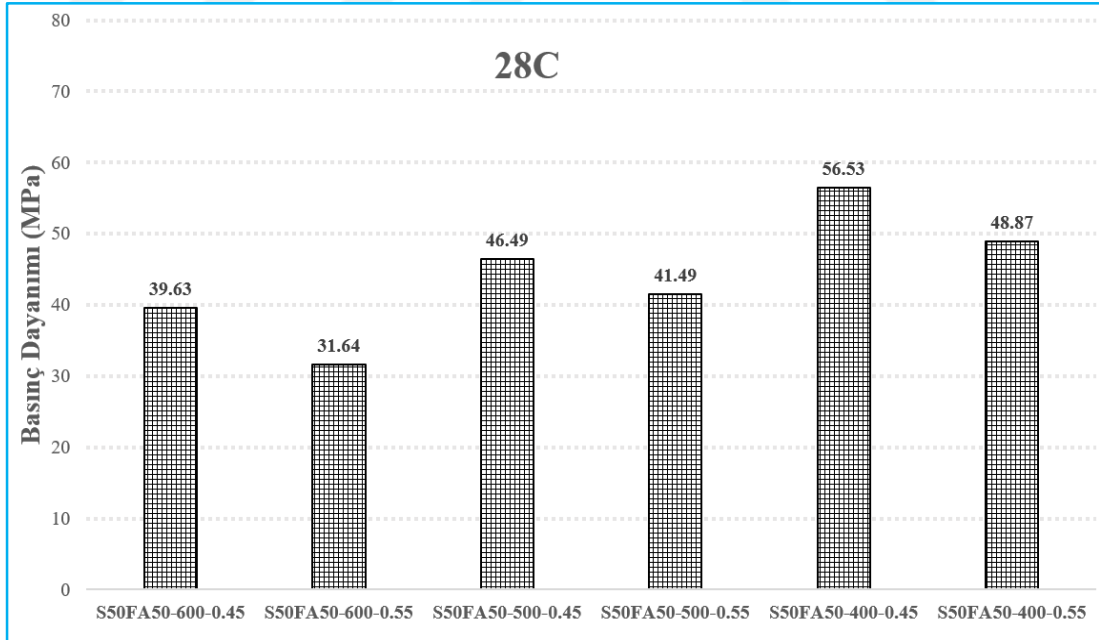
AAE betonlardaki ağırlıkların sonuçlarını incelediğimizde asite maruz bırakılan ortamlarda bekletilen numunelerin hepsinde hem 120. hem de 150. günlerde ağırlıklarında artma meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak AAE beton numunelerde sülfürik asit emilmesinden dolayı numunelerin bünyesine asit solüsyonunu çekmesi dolayısıyla numune ağırlıklarında artış meydana gelmektedir. Bu da betonda bozulmalara sebep olmaktadır. Laboratuvar ortamında kontrol amacıyla bekletilen numunelerde ise zamana bağlı olarak beton hacimindeki su kaybı ve devam eden alkali aktivasyon reaksiyonları sebebiyle ağırlıkta azalış gözlemlenmiştir. 5% sülfürik asit etkisine maruz kalan AAE beton numunelerde 150.günde oluşan ağırlık artışı

120.güne nazaran daha fazladır. AAE beton numunelerinin asit solüsyonuna maruz kalmasına paralel olarak asit emilmesinden ötürü ağırlık artışı görülmektedir.

4.3. Geopolimer Betonda Mekanik Ve Dayanıklılık Testi

4.3.1. Basınç Dayanımı

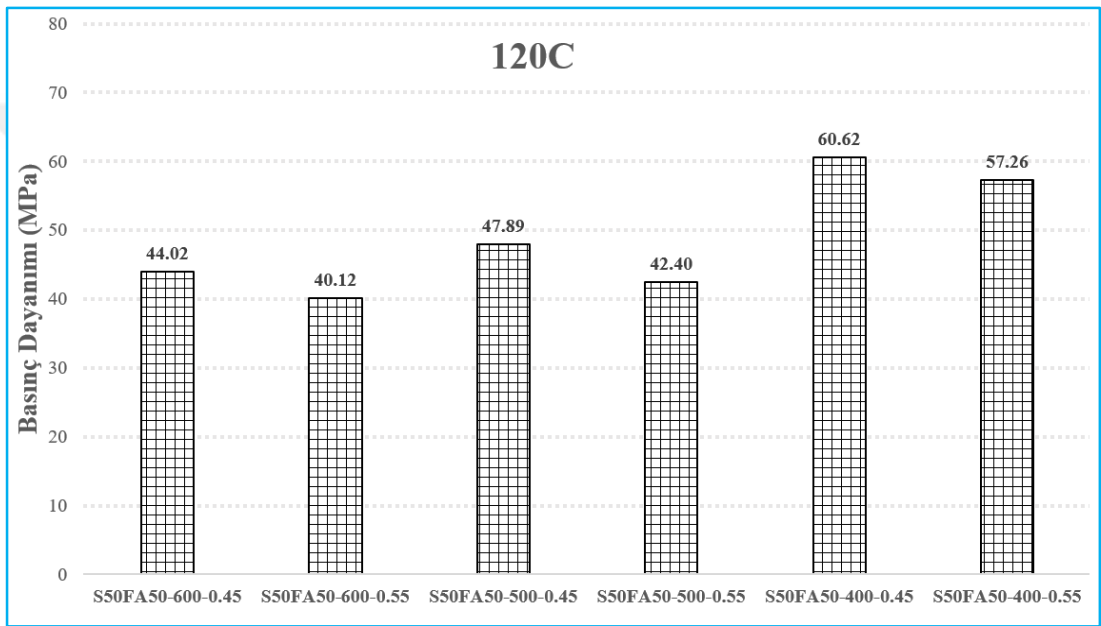
Şekil 4.5 alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerinin laboratuvar (kontrol) ortamında 28.gün basınç dayanım sonuçları MPa birimi ile gösterilmektedir. Bağlayıcı olarak 600 kg/m^3 (300 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 300 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 39.63 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 31.64 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 500 kg/m^3 (250 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 250 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 46.49 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 41.49 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 400 kg/m^3 (200 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 200 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 56.53 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 48.87 MPa elde edilmiştir.



Şekil 4.5. S50FA50 AAE Beton Numunelerin Kontrol Ortamında 28 Günlük Basınç Dayanımları

Şekil 4.6 alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerinin laboratuvar (kontrol) ortamında 120 günlük basınç dayanım sonuçları MPa birimi ile gösterilmektedir. Bağlayıcı olarak 600 kg/m^3 (300 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 300 kg/m^3 yüksek fırın

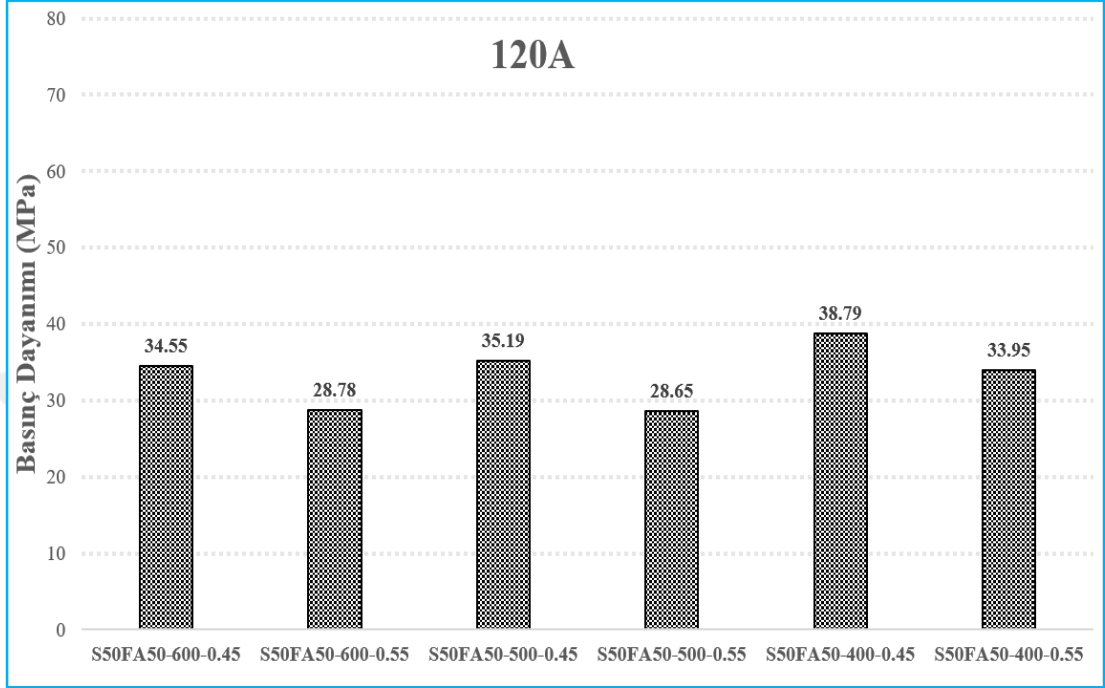
cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 44.02 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 40.12 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 500 kg/m³ (250 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 250 kg/m³ yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 47.89 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 42.40 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 400 kg/m³ (200 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 200 kg/m³ yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 60.62 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 57.26 MPa elde edilmiştir.



Şekil 4.6. S50FA50 AAE Betonların Kontrol Ortamında 120 Günlük Basınç Dayanımları

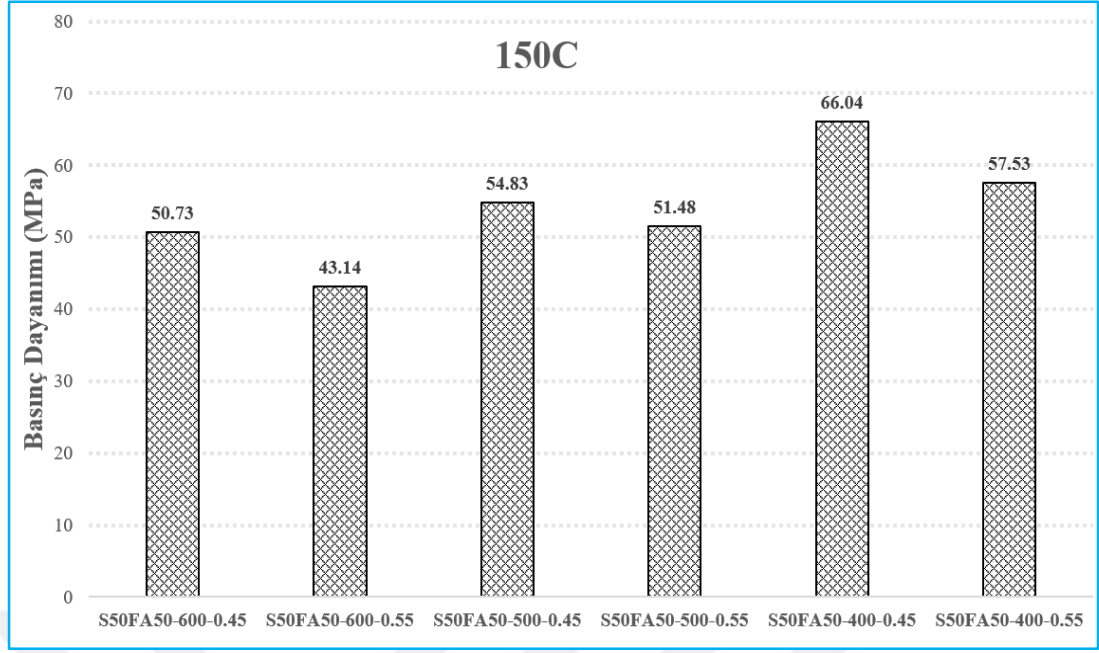
Şekil 4.7 alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerinin 5% sülfürik asit ortamında 120 günlük basınç dayanım sonuçları MPa birimi ile gösterilmektedir. Sülfürik asit etkisinden dolayı beton basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Bağlayıcı olarak 600 kg/m³ (300 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 300 kg/m³ yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 34.55 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 28.78 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 500 kg/m³ (250 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 250 kg/m³ yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 35.19 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 28.65 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 400 kg/m³ (200 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 200 kg/m³ yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı

olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 38.79 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 33.95 MPa elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi 120 gün 5% sülfürik asite maruz kalma sonucu AAE beton numunelerinin basınç dayanımlarında ciddi oranlarda azalma meydana gelmiştir.



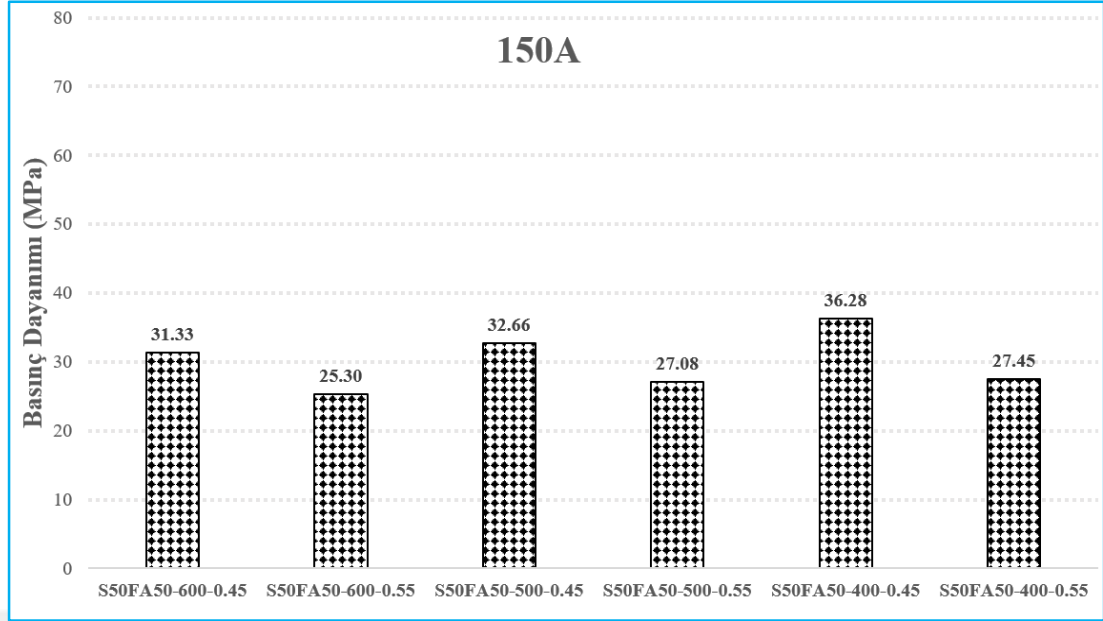
Şekil 4.7. S50FA50 AAE Betonların Sülfürik Asit Ortamında 120 Günlük Basınç Dayanımları

Şekil 4.8 alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerinin laboratuvar (kontrol) ortamında 150 günlük basınç dayanım sonuçları MPa birimi ile gösterilmektedir. Bağlayıcı olarak 600 kg/m^3 (300 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 300 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 50.73 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 43.14 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 500 kg/m^3 (250 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 250 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 54.83 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 51.48 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 400 kg/m^3 (200 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 200 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 66.04 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 57.53 MPa elde edilmiştir.



Şekil 4.8. S50FA50 Betonlarının Kontrol Ortamında 150 Günlük Basınç Dayanımları

Şekil 4.9 alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerinin 5% sülfürik asit ortamında 150 günlük basınç dayanım sonuçları MPa birimi ile gösterilmektedir. Sülfürik asit etkisinden dolayı beton basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Bağlayıcı olarak 600 kg/m^3 (300 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 300 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 31.33 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 25.30 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 500 kg/m^3 (250 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 250 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 32.66 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 27.08 MPa elde edilmiştir. Bağlayıcı olarak 400 kg/m^3 (200 kg/m^3 F-tipi uçucu kül ve 200 kg/m^3 yüksek fırın cürufu) ve alkali/bağlayıcı oranı olarak 0.45 seçilen AAE betonlarda basınç dayanımı 36.28 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda basınç dayanımı 27.45 MPa elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi 150 gün 5% sülfürik asite maruz kalma sonucu AAE beton numunelerinin basınç dayanımlarında en çok azalma meydana gelmiştir.



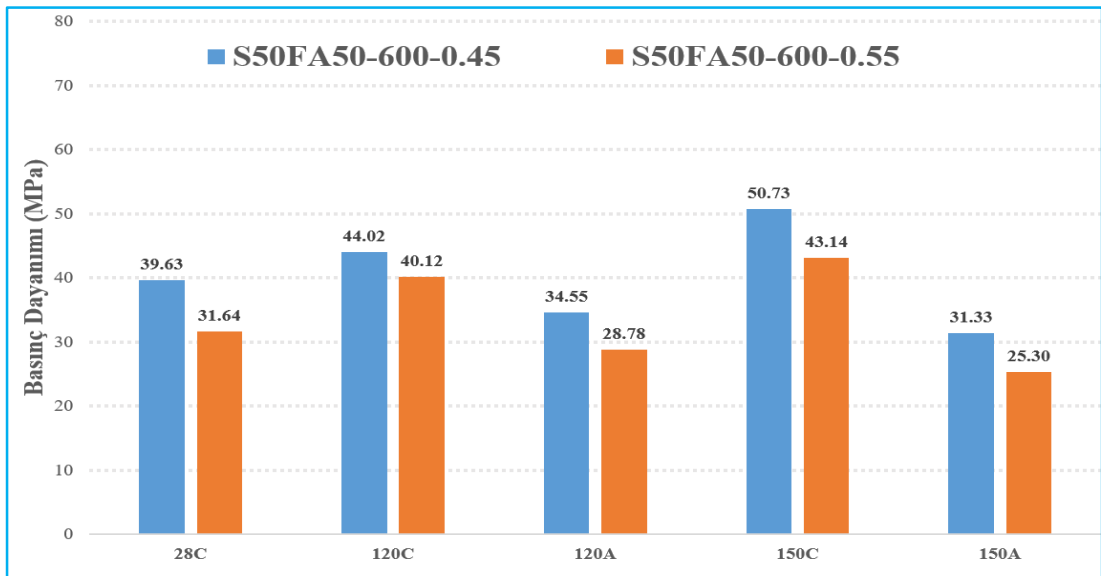
Şekil 4.9. S50FA50 Betonlarının Asit Ortamında 150 Günlük Basınç Dayanımları

28., 120., ve 150. günde laboratuvar ortamında tutulan AAE beton numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına göre aynı bağlayıcı miktarına sahip ve aynı ilave su miktarı kullanılan betonlarda alkali/bağlayıcı miktarının düşmesi basınç dayanımının artmasına sebep olmaktadır. Tüm AAE betonlarda 0.45 alkali/bağlayıcı oranına sahip betonların basınç dayanımı 0.55'e nazaran daha fazla olmuştur. Ayrıca bağlayıcı miktarının artmasıyla beton basınç dayanımındaki azalma karışıma konan ilave su ile açıklanabilir. Tüm karışımlarda S4 kıvama ulaşabilmek amacıyla bağlayıcı ağırlığının %7.5 miktarı karışıma ilave su olarak konulmuştur. Bu da AAE betonlarda sodyum hidroksit molaritesinin düşmesine paralel olarak basınç dayanımında azalmaya sebep vermiş olabilir. Diğer bir sebep ise alkali aktivasyona uğramamış uçucu kül miktarından kaynaklanabilir.

%5 sülfürik asit etkisine maruz bırakılan AAE S50FA50 beton numunelerinin 120. günlük performansları incelendiğinde, 400 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip betonlar diğer betonlara nazaran daha yüksek basınç dayanımı göstermesine rağmen, 150. gündeki performanslar karşılaştırıldığında tüm AAE beton numuneleri %5 sülfürik asit etkisinde neredeyse benzer basınç dayanımı değerleri göstermiştir. Bunun sebebi olarak ise, uzun süre yoğun sülfürik asit çözeltisine maruz kalan betonlarda gerçekleşen yüzey bozulmasından/yumuşamadan ötürü agrega bağlayıcı arasındaki aderansın bozulmasından dolayı betonun iyi bir dayanım performansları gösterememesi olarak açıklanabilir.

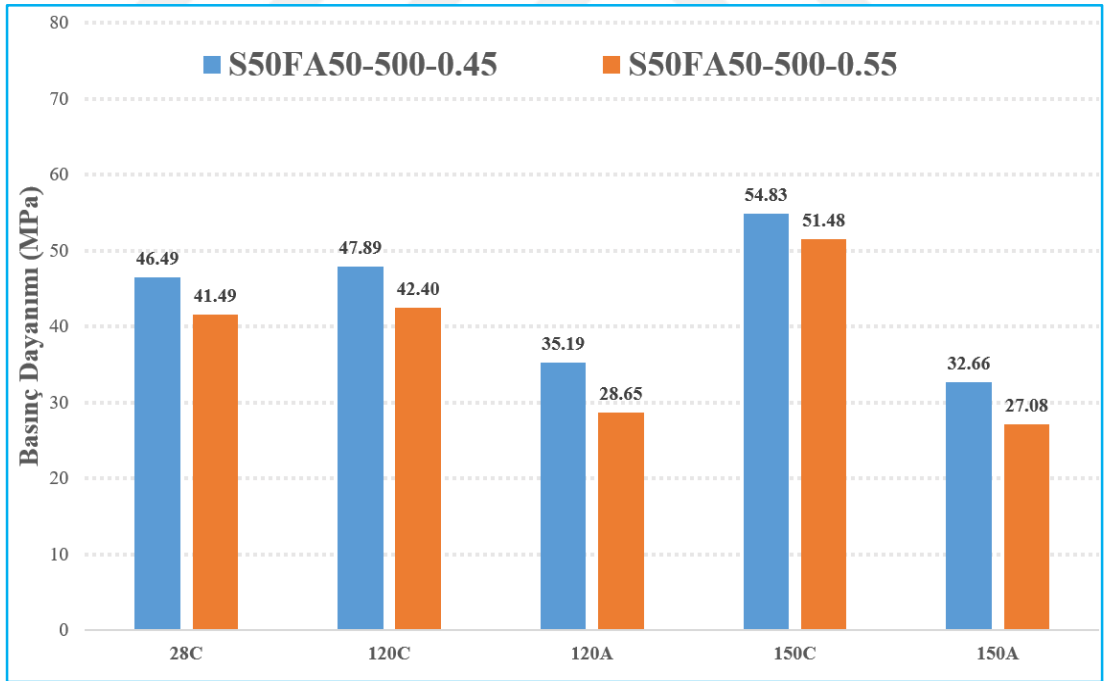
Şekil 4.10 - 4.15’lerde farklı miktarlarda bağlayıcı malzeme içeren ve farklı alkali/bağlayıcı oranlarına sahip AAE beton numunelerinin 28. (28C), 120. (120C) ve 150. (150C) günlerde laboratuvar (asite maruz kalmayan-kontrol) ortamında bekletilen numunelerde, 120. (120A) ve 150. (150A) günlerde ise 5% sülfürik asitte bekletilen numunelerin basınç dayanım sonuçları MPa birimi ile gösterilmiştir.

Şekil 4.10’da 300 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 300 kg/m³ yüksek fırın cürufu içeren AAE beton numunelerinin 28. günde kontrol (28C), 120. günde kontrol (120C) ve 150. günde kontrol (150C) ortamlarında, ayrıca 5% sülfürik asite maruz kalan ortamlarda 120. (120A) ve 150. (150A) basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 28. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 39.63 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 31.64 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 120. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 44.02 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 40.12 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 120. günde 5% sülfürik asit ortamında basınç dayanımı 34.55 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 28.78 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 150. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 50.73 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 43.14 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 150. günde 5% sülfürik asit ortamında basınç dayanımı 31.33 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 25.30 MPa elde edilmiştir.



Şekil 4.10. 600 kg/m³ Bağlayıcı İçeren S50FA50 AAE Numunelerinin Basınç Dayanımı

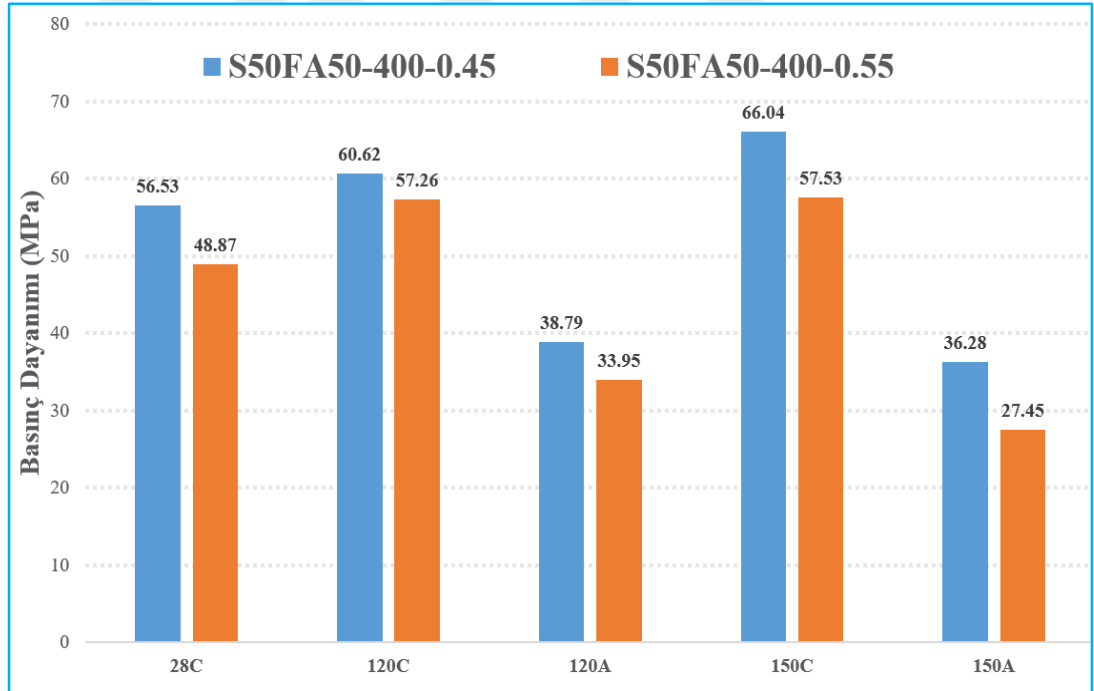
Şekil 4.11’de 250 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 250 kg/m³ yüksek fırın cürufu içeren AAE beton numunelerinin 28. günde kontrol (28C), 120. günde kontrol (120C) ve 150. günde kontrol (150C) ortamlarında, ayrıca 5% sülfürik asite maruz kalan ortamlarda 120. (120A) ve 150. (150A) basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 28. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 46.49 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 41.49 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 120. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 47.89 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 42.40 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 120. günde 5% sülfürik asit ortamında basınç dayanımı 35.19 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 28.65 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 150. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 54.83 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 51.48 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 150. günde 5% sülfürik asit ortamında basınç dayanımı 32.66 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 27.08 MPa elde edilmiştir.



Şekil 4.11. 500 kg/m³ Bağlayıcı İçeren S50FA50 AAE Numunelerinin Basınç Dayanımı

Şekil 4.12’de 200 kg/m³ F-tipi uçucu kül ve 200 kg/m³ yüksek fırın cürufu içeren AAE beton numunelerinin 28. günde kontrol (28C), 120. günde kontrol (120C) ve 150. günde kontrol (150C) ortamlarında, ayrıca 5% sülfürik asite maruz kalan ortamlarda

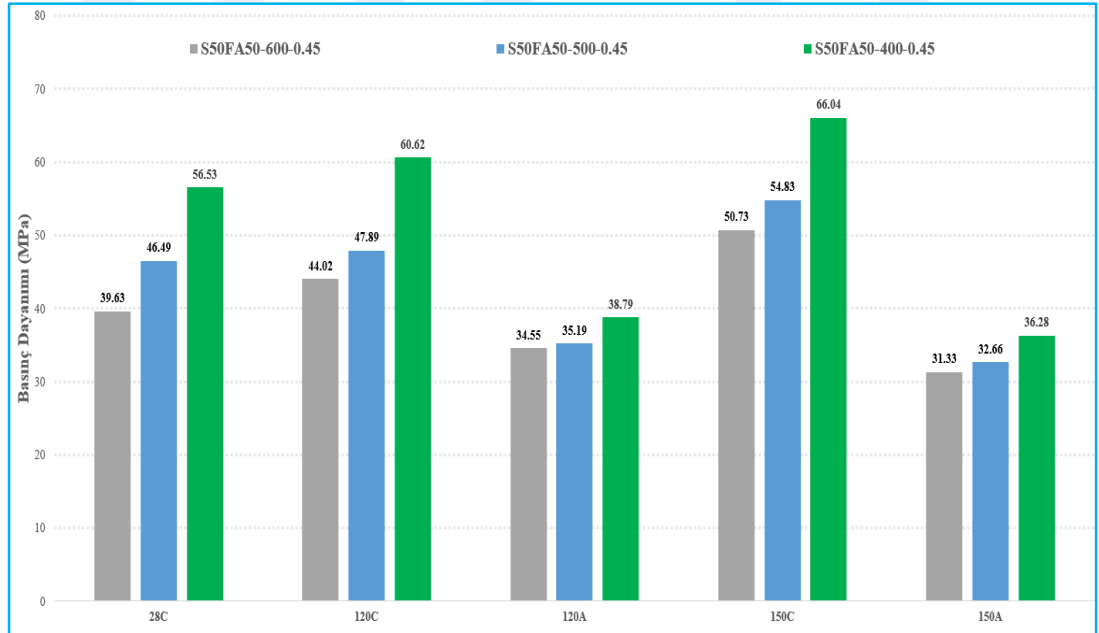
120. (120A) ve 150. (150A) basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 28. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 56.53 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 48.87 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 120. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 60.62 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 57.26 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 120. günde 5% sülfürik asit ortamında basınç dayanımı 38.79 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 33.95 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 150. günde laboratuvar ortamında basınç dayanımı 66.04 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 57.53 MPa elde edilmiştir. Alkali/bağlayıcı oranı 0.45 olan AAE betonların 150. günde 5% sülfürik asit ortamında basınç dayanımı 36.28 MPa iken, alkali/bağlayıcı oranı 0.55 olan AAE betonlarında ise 27.45 MPa elde edilmiştir.



Şekil 4.12. 400 kg/m³ Bağlayıcı İçeren S50FA50 AAE Numunelerinin Basınç Dayanımı

Şekil 4.13'te 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımları MPa olarak gösterilmiştir. 28 günlük numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 39.63 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 46.49 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 56.53 MPa olarak elde edilmiştir. 120 günlük kontrol ortamındaki

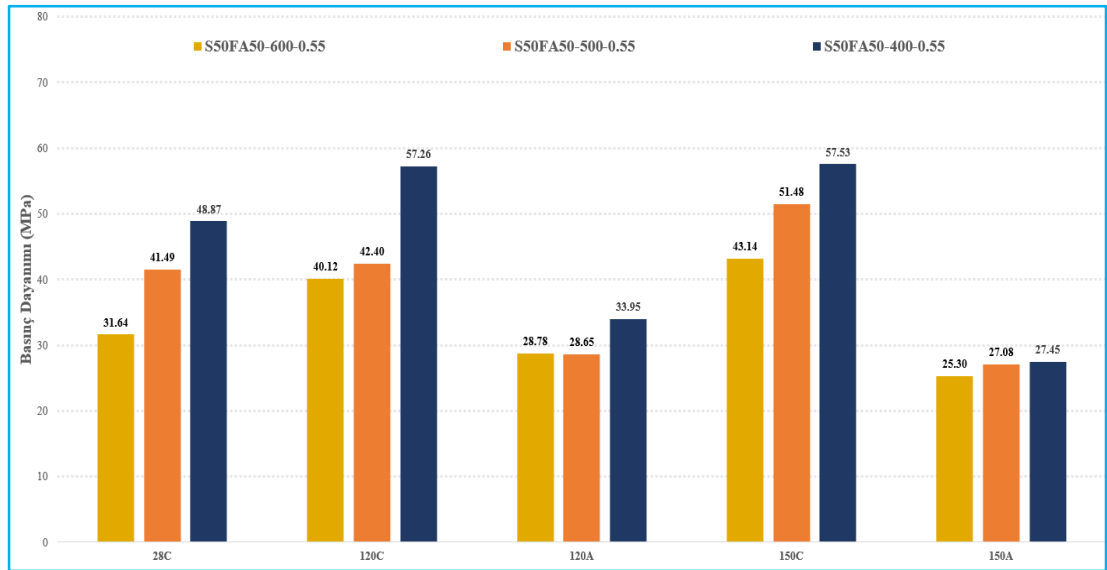
numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 44.02 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 47.89 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 60.62 MPa olarak elde edilmiştir. 120 günlük asit ortamındaki numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 34.55 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 35.19 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 38.79 MPa olarak elde edilmiştir. 150 günlük kontrol ortamındaki numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 50.73 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 54.83 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 66.04 MPa olarak elde edilmiştir. 150 günlük 5% sülfürik asit ortamındaki numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 31.33 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 32.66 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 36.28 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.13. 0.45 Alkali /Bağlayıcı Oranına Sahip AAE Beton Numunelerin Basınç Dayanımı

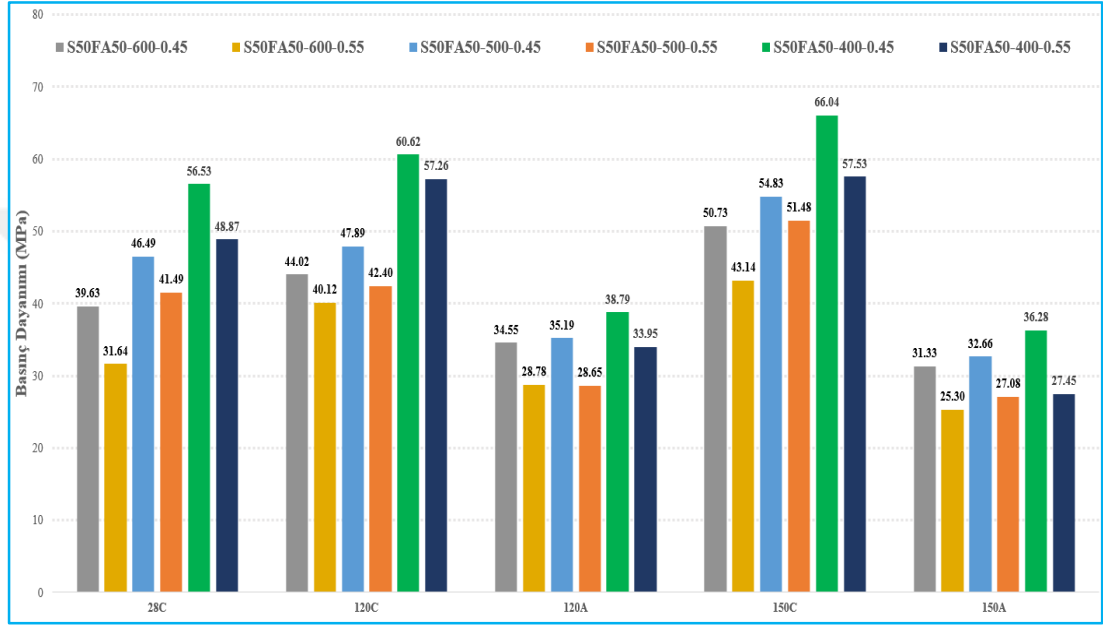
Şekil 4.14’de 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımları MPa olarak gösterilmiştir. 28 günlük numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 31.64

MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 41.49 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 48.87 MPa olarak elde edilmiştir. 120 günlük kontrol ortamındaki numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 40.12 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 42.40 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 57.26 MPa olarak elde edilmiştir. 120 günlük asit ortamındaki numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 28.78 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 28.65 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 33.95 MPa olarak elde edilmiştir. 150 günlük kontrol ortamındaki numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 43.14 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 51.48 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 57.53 MPa olarak elde edilmiştir. 150 günlük 5% sülfürik asit ortamındaki numunelerde 600 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 25.30 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 27.08 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı S50FA50 AAE beton numunelerinin basınç dayanımı 27.45 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14. 0.55 Alkali /Bağlayıcı Oranına Sahip AAE Beton Numunelerin Basınç Dayanımı

Şekil 4.15'te S50FA50 AAE beton numunelerinin tamamının farklı ortamlardaki basınç dayanımı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, maksimum basınç dayanımı 150 gün laboratuvar ortamlarında tutulan 0.45 alkali/bağlayıcı oranına ve 600 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip AAE beton numunelerde 66.04 MPa çıkmıştır. Minimum basınç dayanımına sahip AAE beton numuneleri ise 150 gün boyunca sülfürik asitte tutulan 0.55 alkali/bağlayıcı oranına ve 600 kg/m³ total bağlayıcı miktarına sahip betonlarda 25.30 MPa elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Tüm S50FA50 AAE Beton Numunelerinin Farklı Ortamlarda Basınç Dayanımı

SONUÇLAR

Bu çalışmada %50 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %50 F-tipi uçucu kül kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş (AAE) beton numunelerin dayanım ve durabilite performansları incelenmiştir. Bu amaçla, 400 kg/m³, 500 kg/m³ ve 600 kg/m³ bağlayıcı miktarına ve 0.45 ile 0.55 alkali /bağlayıcı oranlarına sahip AAE beton numuneleri laboratuvar (kontrol) ve %5 sülfürik asit ortamlarında 120. ve 150. güne kadar bekletilmiştir. Bu AAE beton numunelerinden elde edilen dayanım ve durabilite sonuçlarına göre;

- Görsel inceleme sonuçlarına göre, bağlayıcı miktarı arttıkça AAE betonlardaki yüzey bozulmasının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Fakat 0.45 ve 0.55 alkali/bağlayıcı oranlarına sahip alkali aktive edilmiş beton numuneleri karşılaştırıldığında benzer oranda beyaz leke ve bozulma görülmektedir.

- Ağırlık değişimi sonuçlarına göre asit etkisine maruz kalan AAE numunelerde asit emiliminden ötürü tüm numunelerde ağırlık artışı meydana gelmiştir ve bu ağırlık artışı zamanla (150. günde) en fazla olmuştur. Kontrol ortamında bekletilen numunelerde ise su kaybından ve devam eden alkali aktivasyon reaksiyonlarından ötürü ağırlık kaybı meydana gelmiştir ve oluşan ağırlık kaybı zaman geçtikçe artmıştır. Elde edilen ağırlık değişimi sonuçlarına göre 150.gün sonunda tüm betonlarda asit etkisinden ötürü benzer ağırlık artışı (~%2.5) meydana gelmiştir.

- Laboratuvar (kontrol) ortamında bırakılan aynı bağlayıcı miktarına sahip AAE betonlarda alkali/bağlayıcı oranı düştükçe basınç dayanımının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Tüm AAE betonlarda 0.45 alkali/bağlayıcı oranına sahip betonların basınç dayanımı 0.55 alkali/bağlayıcı oranına nazaran daha yüksektir.

- Laboratuvar (kontrol) ortamında tutulan AAE numunelerinin basınç dayanımı bağlayıcı miktarı arttıkça azalmaktadır. Bu sonucun bağlayıcı miktarının artmasıyla karışıma eklenen ilave suyun artmasıyla açıklanabilir. Kontrol ortamında en fazla basınç dayanımı 400 kg/m³ bağlayıcı ve 0.45 alkali/bağlayıcı oranına sahip betonda elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise 600 kg/m³ bağlayıcı ve 0.55 alkali/bağlayıcı oranına sahip betonda elde edilmiştir.

- %5 sülfürik asit etkisine maruz bırakılan numunelerde ise, 120. Günde 400 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip betonlar diğer betonlara nazaran daha yüksek basınç dayanımı göstermesine rağmen, 150. gündeki performanslar karşılaştırıldığında tüm

AAE beton numuneleri %5 sülfürik asit etkisinde neredeyse benzer basıncı dayanımı değerleri göstermiştir. Elde edilen sonuçlardan da 400 kg/m³ bağlayıcıya sahip AAE betonlarda asit etkisiyle bozulmanın en çok olduğu, 600 kg/m³ bağlayıcıya sahip AAE betonlarda ise en az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- 0.45 alkali/bağlayıcı oranına sahip numunelerin sülfürik asit performansı 0.55 alkali/bağlayıcı oranına sahip numunelerden daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



KAYNAKÇA

- Akman, S. (1987). Yapı Malzemeleri. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 1.
- Al Muhit, B. A., Foong, K. Y., Alengaram, U. J. ve Mohd, Z. J. (2013). Geopolymer concrete : A building material for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13,1.
- Al Muhit, B. A., Foong, K. Y., Alengaram, U. J. ve Mohd, Z. J.(2013). Geopolymer concrete : A building material for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13,1.
- Albitar, M., Mohamed Ali, M. S., Visintin, P. ve Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136, 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056>
- Altundal, M. B. (2019). Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde mekanik davranışı / Mechanical behavior of fly ash and slag based geopolymer concretes under 5% sulfuric acid attack.
- Andrade, C., Alonso, C. ve Khoury, G.A.(2003).Relating Microstructure to Properties, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM).
- Arıoğlu, E. ve Yüksel, A. (2002). Yeraltı Yapılarında Pükürtme Beton. İstanbul: TMMOB Maden Müh. Odası Çalışma Raporu.
- Arıoğlu, E., Yüksel, A., ve Yılmaz, A.O. (2008). Pükürtme Beton Bilgi Föyleri – Çözümlü Problemler, İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 142.
- Atiş, C. D., Görür, E. B., Karahan, O., Bilim C., İlkentapar, S. ve Luga, E.(2015). Very High Strength (120 MPa) Class F Fly Ash Geopolymer Mortar Activated at Different NaOH Amount, Heat Curing Temperature and Heat Curing Duration. *Construction and Building Materials*, 96, 673-678.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S.T., ve Çapar, Ö.F. (2010). Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi, 2. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildirileri,1,506-513.
- Darsanasiri, A. G., Matalkah, F., Ramli, S., Al-Jalode, K., Balachandra, A. ve Soroushian, P. (2018). Ternary alkali aluminosilicate cement based on rice husk ash, slag and coal fly ash. *Journal of Building Engineering*, 19, 36-41.
- Devi, V. S., ve Gnanavel, B. K. (2014). Properties of concrete manufactured using steel slag. *Procedia Engineering*, 97, 95-104.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M. ve Deventer, J. S. J.(2005). Understanding The Relationship Between Geopolymer

Composition, Microstructure And Mechanical Properties, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 269, 47-58

Dünder, B., Atabey, İ.İ., ve Yurt, Ü.(2017).Osmaniye ilinde hazır beton santrallerinde üretilen beton kalitelerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi.

Erdoğan, T.Y. (2010). Beton.ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

Erdoğan, T.Y .(2003).Beton,METU Yayınları.

Erdoğan, T.Y.(1993). *Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı. Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi Yayınları*, 48-71.

Erdoğan, Ş., ve Kurbetçi, Ş.(2003).Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri, 426,115-120.

Fernández-Jiménez, A. ve Palomo, A. (2003).Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements, 82,2259–2265.

Fernandez-Jimenez, A., ve Palomo, A. (2005).Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator, Cement and Concrete Research, 35, 1984-1992.

Georgali, B., ve Tsakiridis, P.E.(2005).Microstructure of Fire-Damaged Concrete. A Case Study. Cement and Concrete Composites, 27, 255-259.

Gourley, J. T.(2014).Geopolymers in Australia, Journal of the Australian Ceramic Society, 50,102–110.

Guisse, S.E., Short, N.R. ve Purkiss, J.A., (1996).Colour Analysis for Assessment of Fire Damaged Concrete.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>

<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/> (erişim tarihi 05.12.2017)

Kaplan, M.F.(1959).Flexuraland Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates,72, 1193- 1208.

Kawakami, H.(1992).Effect of Aggregate Type on the Mechanical Properties of Concrete.179–186.

Kocataşkın, F.(1991). Betonun Dünü Bugünü Yarını. 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası,23-42.

Kupaei, R. H., Alengaram, U. J., ve Jumaat, M. Z. B. (2013). A Review on Fly AshBased Geopolymer Concrete. Electronic Journal of Structural Engineering, 13,1.

- Li, Z., ve Liu, S.(2007).Influence of slag as additive on compressive strength of fly ash-based geopolymer, 19, 470–474.
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Li, L., Jaya, N. A., Abdullah, M.M.A.B., Tan, S. J., ve Hussin, K.(2017). Formation of one-part-mixing geopolymers and geopolymer ceramics from geopolymer powder. *Construction and Building Materials*, 156, 9–18.
- Manso, J.M., Polanco, J.A., Losanez, M., ve Gonzalez, J.J. (2006). Durability of Concrete made with EAF Slag as Aggregates, *Cement and Concrete Composite*.
- Neville, A.M.(2000).Properties of Concrete, 581-585.
- Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., Sata, V., ve Chindaprasirt, P. (2019). Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 119797.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., ve Blanco, M. T. (1999).Alkali – activated fly ashes A cement fort he future, *Cement and Concrete Research*, 29,1323-1329.
- Panias, D., Giannopoulou, I. P., ve Perraki, T.(2007), Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochem*, 301,246-254.
- Qureshi, M. N., ve Ghosh, S.(2013). Alkali-Activated Blast Furnace Slag as a Green Construction Material, 24-28.
- Ramyar, K., Çelik, T., ve Marar, K.(1995). Taş Tozunun Beton Özelliklerine Olan Etkisi-Endüstriyel atıkların İnşaat Sektöründe kullanılması, TMMOB İnş.Müh. Odası Bildiriler Kitabı.
- Rattanasak, U., ve Chindaprasirt, P.(2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, 22, 1073-1078.
- Ren J., Guo S. Y., Su J., Zhao T. J., Chen J. Z. ve Zhang S. L.(2019). A novel TiO₂/Epoxy resin composited geopolymer with great durability in wettingdrying and phosphoric acid solution. *Journal of Cleaner Production*, 227, 849–860. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.203>
- Shaikh, F. U. (2014). Effects of Alkali Solutions on Corrosion Durability of Geopolymer Concrete. *Advances in Concrete Construction*, 2, 109-123.
- Simşek, O.(2004).Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık.
- Thomas, B. S., ve Gupta, R. C.(2015).Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber, *Journal of Cleaner Production*. 102,78–87.
- Thomas, B. S.(2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3913–3923.

- Tokyay, M. ve Ayturan, P. (2010), Mineral katkıların alkali ile aktive edilmesi, 15-89, 77-91
- Tokyay, M.(2013). Betonda Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Silis Dumanının rolü. Beton 2013 Kongresi Çağrılı Bildiriler,2,201-238.
- Tong, K. T., Vinai, R., ve Soutsos, M. N. (2018). Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. Journal of cleaner production, 201, 272-286.
- Topçu, Ğ. B. (1996). Akığkanlağtırıcı ve Dona Dayanım Katkılarının Beton Özelliklerine Etkisi,4,45-53.
- TS 706 EN 12620(2009).Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü.
- Uğurlu, A.(1993). Taşunu Kullanımının Beton Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Mühendislik Haberleri, TMMOB yayını.
- Vanderhost, N.M., ve Jansen, D.J.(1990).The Freezing and Thawing Environment: What is Severe?, Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete (editor David Whiting), 122, 181-200.
- Villaquirán-Caicedo, M. A., ve Gutiérrez, R. M. (2018). Synthesis of ceramic materials from ecofriendly geopolymer precursors. Materials Letters, 230, 300-304.
- Walkley, B., Ke, X., Hussein, O. H., Bernal, S. A., ve Provis, J. L. (2019). Incorporation of strontium and calcium in geopolymer gels. Journal of Hazardous Materials, 382, 121015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121015>
- Wardhono , A., Law, D. W., ve Strano, A. (2015). The Strength of Alkali-Activated Slag/Fly Ash Mortar Blends at Ambient Temperature. Procedia Engineering, 125, 650-656.
- Xu, H., ve Van Deventer, J. S. J.(2000).The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, International Journal of Mineral Processing, 59,247–266.
- Yeğınobalı, A.(1999). Betonun Dayanıklılığı I, Fiziksel Etkenler, T.Ç.M.B. Çimento ve Araştırma Enstitüsü Seminer Notları.
- Yeğınobalı, A.(2003).Çimentoda yeni standartlar ve mineral katkıları, Türkiye Mühendislik Haberleri, 426,56-61.
- Yurt, Ü. ve Emiroğlu M.(2018).Kendiliğinden Yerleşen Betonların Düşük Sıcaklıklardaki Davranışının Tahribatsız Yöntemlerle İncelenmesi, Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi,3,8-15.
- Yüzer, N., Aköz, F., ve Kızılkanaat, A.B.(2004).Yüksek Dayanımlı Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisi.TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi.

Zareei, S. A., Ameri, F., Shoaie, P., ve Bahrami, N. (2019). Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study. *Construction and Building Materials*, 201, 11-32.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARABAŞ,Celal
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri :
Telefon :
Faks :
e-mail :

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İST.GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ	
Lisans	ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ	2013
Lise	HİZAN LİSESİ	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-2018	BİTLİS	İNŞAAT MÜHENDİSİ
2018-2020	İSTANBUL	İNŞAAT MÜHENDİSİ
2021-(DEVAM)	AYDIN	İNŞAAT MÜHENDİSİ

Yabancı Dil

İNGİLİZCE(Orta Düzeyde)

Hobiler

Basketbol,Masa Tenisi,Gezmek