

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**FARKLI BAĞLAYICI MİKTARLARINA SAHİP
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İKAMELİ UÇUCU KÜLLÜ
GEOPOLİMER BETONLARIN DURABİLİTESİ**

Yüksek Lisans Tezi

NURSENA ÖZBEY

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi ANIL NİŞ**

İstanbul, 2021

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Nursena ÖZBEY

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : Farklı Bağlayıcı Miktarlarına Sahip Yüksek Fırın Cürufu
İkameli Uçucu Küllü Geopolimer Betonların Durabilitesi

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Türü : Yüksek Lisans

Tezin Tarihi : 06.07.2021

Sayfa Sayısı : 85

Tez : Dr. Öğr. Üyesi Anıl NIŞ

Danışmanları

Dizin Terimleri : Geopolimer beton, Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Türkçe Özet : Atmosfere daha az karbondioksit salınımı olabilmesi ve dolayısıyla daha çevreci bir beton üretebilmek için çimento kullanılmadan üretilen geopolimer betonların kullanımı yaygınlaşmalıdır. Bu tez kapsamında daha çevreci olan geopolimer beton üretilmiş ve incelenmiştir.

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

İmzası

Nursena ÖZBEY

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**FARKLI BAĞLAYICI MİKTARLARINA SAHİP
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İKAMELİ UÇUCU KÜLLÜ
GEOPOLİMER BETONLARIN DURABİLİTESİ**

Yüksek Lisans Tezi

NURSENA ÖZBEY

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi ANIL NİŞ**

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.

Nursena ÖZBEY

.../.../2021



İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Nursena ÖZBEY'in "Farklı Bağlayıcı Miktarlarına Sahip Yüksek Fırın Cürufu İkameli Uçucu Küllü Geopolimer Betonların Durabilitesi" adlı tez çalışması, jüri tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza
Başkan
Doç. Dr. Savaş ERDEM

İmza
Üye
Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ
(Danışman)

İmza
Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mukhallad
Mohammed Mawlood AL-
MASHHADANI

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 2021

İmzası
Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ
Enstitü Müdürü

ÖZET

Beton ülkemizde ve dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Geleneksel betonlar çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddesi kullanılarak üretilirler. Betona bağlayıcı özellik katan çimento üretimi esnasında atmosfere salınan karbondioksit (CO_2) sebebiyle çevre kirliliği görülmektedir. Bu sebeple çimentoya alternatif olabilecek bağlayıcı malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Daha çevreci ve sürdürülebilir malzemeler kullanılarak yapılan geopolimer betonlar bu ihtiyacı karşılamak için üretilmiştir. Geopolimer betonlarda bağlayıcılığı çimento yerine uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık malzemeler sağlar. Bu da atmosfere salınan karbondioksit (CO_2) miktarını bir hayli azaltır. Günümüzde Portland çimentosu kullanılmadan geleneksel betona alternatif olarak üretilen geopolimer betonların dayanım ve durabilite çalışmaları hala devam etmektedir. Bu tez çalışmasında da uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların farklı koşullardaki dayanım ve dayanıklılığı incelendi. Çalışma kapsamında %100 uçucu kül kullanılarak üretilen (FA100-400, FA100-500, FA100-600) geopolimer betonlar ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül kullanılarak üretilen (C20FA80-400, C20FA80-500, C20FA80-600) geopolimer betonlar üretildi. Üretilen betonlarda alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45 olarak kullanıldı ve sodyum silikat ve sodyum hidroksit 1/1 oranında birleştirilip karışıma ilave edildi. Üretimi tamamlanan geopolimer beton numunelerinin bir kısmı 90 gün normal koşullarda kür edilirken bir kısmı da 88 gün normal koşullar ile $70^{\circ}C$ de 48 saat ısı kürüne tabii tutuldu. Kür işlemi biten numunelerin bir kısmının fotoğrafları çekildi, ağırlıkları ve basınç değerleri ölçüldü. Kalan numunelerin de bir kısmı %5 sülfürik asit içeren çözeltide 28 gün bekletildi. 28 günün sonunda asit sonrası numuneler fotoğraflandı, ağırlıkları ölçüldü ve basınç dayanımları hesaplandı. Daha sonra üretilen geopolimer betonların dayanım ve durabilite performansları belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu, Geopolimer Beton, Alkali Aktivatörler, Sülfürik Asit,

SUMMARY

Concrete is the most widely used building material in our country and in the world. Conventional concretes are produced using cement, aggregate, water and, if necessary, additives. Environmental pollution is observed due to the carbon dioxide (CO_2) released into the atmosphere during cement production, which adds binding properties to concrete. For this reason, there was a need for binder materials that could be an alternative to cement. Geopolymer concretes made using more environmentally friendly and sustainable materials have been produced to meet this need. In geopolymer concretes, waste materials such as fly ash and blast furnace slag provide binding property instead of cement. This greatly reduces the amount of carbon dioxide (CO_2) released into the atmosphere. Strength and durability studies of geopolymer concretes, which are produced to be an alternative to conventional concrete, are still ongoing. In this thesis, the strength and durability of geopolymer concretes produced by using fly ash and blast furnace slag under different conditions were investigated. Within the scope of the study, geopolymer concretes of 100% fly ash (FA100-400, FA100-500, FA100-600) and 20% blast furnace slag and 80% fly ash (C20FA80-400, C20FA80-500, C20FA80-600) geopolymer concretes were produced. For the geopolymer concrete production, alkali activator/binder ratio was used as 0.45 and sodium silicate and sodium hydroxide were combined at a ratio of 1/1. Some of the geopolymer concrete samples were cured under normal conditions for 90 days, while others were cured for 88 days under normal conditions and then cured at 70°C for 48h. Photographs were taken for some of the samples, and their weights and compressive strength values were measured. The remaining samples were kept in a solution containing 5% sulfuric acid for 28 days. At the end of 28 days, the samples were photographed, their weights were measured and their compressive strengths were calculated. Then compressive strength and sulfuric acid performance of the geopolymer concretes were evaluated.

Key Words: Fly Ash, Ground granulated blast Furnace Slag, Geopolymer Concrete, Alkaline Activators, Sulfuric acid

İÇİNDEKİLER

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

BİRİNCİ BÖLÜM

1.1. Araştırmanın Önemi.....	5
2.2. Tezin Ana Hattı	5

İKİNCİ BÖLÜM

GEOPOLİMER BETONUN BİLEŞENLERİ

2.1. Agrega	6
2.2. Uçucu Kül	7
2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı.....	8
2.3. Yüksek Fırın Cürufu	9
2.3.1. Betonda yüksek fırın cürufu kullanımı.....	10
2.4. Alkali Aktivatörler	11
2.5. Geopolimer Beton Özellikleri	13
2.6. Geopolimer Betonun Kimyasal Etkileri	16
2.7. Geopolimer Betonun Durabilitesini Etkileyen Faktörler	17
2.7.1. Betonda büzülme.....	18
2.7.2. Aşınma	18
2.7.3. Isıya karşı dayanıklılığı	18
2.7.4. Alkali - Silika reaksiyonları	19
2.7.5. Asit etkisi.....	20
2.8. Geopolimer Betonda Dayanımı Etkileyen Faktörler	20
2.8.1. Geopolimer betonlarda su miktarı	20
2.8.2. Kür süresi ve sıcaklık	21
2.8.3. SiO ₂ / Na ₂ O oranı	22
2.8.4. Donma - Çözülmenin olayları	22
2.8.5. Kullanılan alkali aktivatör oranı.....	22

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

KULLANILAN MALZEMELER.....	24
3.1.1. Agregalar	24
3.1.2. Uçucu kül	25
3.1.3. Yüksek fırın cürüfu	26
3.1.4. Alkali aktivatörler.....	27
3.1.5. Kimyasal katkı.....	28
3.2. Deneysel Yöntem Ve Çalışmalar	29
3.2.1. Kalıplar	29
3.2.2. Alkali aktivatörlerin hazırlanması	30
3.2.3. Karışımların hazırlanması	31
3.2.4. Geopolimer beton üretimi	33
3.2.5. Kütleme	34
3.2.6. Sülfürik asit çözeltisi	35
3.2.7. Ağırlık değişimi.....	36
3.2.8. Basınç dayanım testi.....	37

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Görsel İncelemeler	38
4.2. Ağırlıklardaki Değişim.....	42
4.3. Basınç Dayanımındaki Değişimler	47
SONUÇLAR	65
KAYNAKÇA	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
°C	Santigrad
MPa	Megapaskal
M	Molar
NaOH	Sodyum Hidroksit
KOH	Potasyum Hidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum Silikat
C	Karbon
CaO	Kalsiyum oksit(Sönmemiş Kireç)
SO ₃	Kükürt trioksit
K ₂ O	Potasyumoksit
N	Azot
S	Kükürt
H	Hidrojen
SiO ₂	Silisyum Dioksit
Na ₂ O	Sodyum Oksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
Fe ₂ O ₃	Demir (II) Oksit
Ca	Kalsiyum
Si	Silisyum
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
Kısaltmalar	Açıklamalar
OPC	Normal Portland Çimento
AAEB	Alkali Aktive Edilmiş Beton
FA100	%100 Uçucu kül
C20FA80	%20 Yüksek fırın cürufu, %80 uçucu kül

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1. Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları	8
Çizelge 3.1. Deney için kullanılan agregaların özellikleri.....	25
Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan uçucu kül özellikleri	26
Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan yüksek fırın cürufunun özellikleri	27
Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan sodyum silikat (Na_2SiO_3) özellikleri.....	28
Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan kimyasal katkı maddesinin özellikleri	29
Çizelge 3.6. FA100-400-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler.....	31
Çizelge 3.7. C20FA80-400-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler.....	31
Çizelge 3.8. FA100-500-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler.....	32
Çizelge 3.9. C20FA80-500-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler.....	32
Çizelge 3.10. FA100-600-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler.....	32
Çizelge 3.11. C20FA80-600-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler.....	33

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1. Uçucükülün alkali aktivasyonun gösterimi	13
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan iri agregalar.....	24
Şekil 3.2. Deneyde kullanılan uçucu kül	25
Şekil 3.3. Deneyde kullanılan yüksek fırın cürufu	26
Şekil 3.4. Deneyde kullanılan sodyum hidroksit (NaOH).....	28
Şekil 3.5. Deneyde kullanılan kimyasal katkı maddesi	29
Şekil 3.6. Deneyde kullanılan kalıplar.....	30
Şekil 3.7. Sodyum hidroksit çözeltisi için kullanılan su ve NaOH.....	30
Şekil 3.8. Beton döküm aşamaları	34
Şekil 3.9. Beton numunelerinin %5 sülfürik asit çözeltilerinde bekletilmesi ve çıkarılması.....	36
Şekil 3.10. Geopolimer beton numunelerinin ağırlıklarının ölçülmesi.....	37
Şekil 3.11. Beton numunelerinin basınç dayanımlarının ölçülmesi	37
Şekil 4.2. C20FA80-400 ve FA100-400 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları..	43
Şekil 4.3. C20FA80-500 ve FA100-500 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları..	44
Şekil 4.4. C20FA80-600 ve FA100-600 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları..	45
Şekil 4.5. 90 gün labarotuar ortamında bekletilen numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	48
Şekil 4.6. 88C2O ortamındaki numunelerin basınç dayanımı sonuçları	49
Şekil 4.7. 90C-28A ortamındaki numunelerin basınç dayanımı sonuçları	51
Şekil 4.8. 88C2O-28A ortamındaki numunelerin basınç dayanımı sonuçları	52
Şekil 4.9. C20FA80-400 ve FA100-400 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları..	54
Şekil 4.10. C20FA80-500 ve FA100-500 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları..	56
Şekil 4.11. C20FA80-600 ve FA100-600 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları..	58
Şekil 4.12. C20FA80 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları	60
Şekil 4.13. FA100 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları	61
Şekil 4.14. C20FA80 ve FA100 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	64

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca bana her türlü imkânı sağlayan İstanbul Gelişim Üniversitesi'ne ve değerli hocalarına, özellikle çalışmalarım süresince her konuda yardımcı olup beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ'e ve tezimin deney aşamasında yardımlarını esirgemeyen Yunus Emre OLCAY ve Serdar AKYILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili babam Ekrem ÖZBEY ve ilk öğretmenim olan canım annem Fatma ÖZBEY'e ve bana desteklerini esirgemeyen kardeşlerim M. Emir ÖZBEY ve A. Serdar ÖZBEY'e teşekkürü bir borç bilirim.

GİRİŞ

Beton; yüksek dayanıma sahip olduğu, ham maddelerine kolay erişilebildiği ve de bakım ve onarım maliyetleri diğer yapı malzemelerinden daha düşük olduğu için özellikle inşaat sektöründe en çok kullanılan malzemelerden biridir. (Zareei, Ameri, Shoaee, & Bahrami, 2019)

Beton üretilirken farklı fazda birçok malzeme bir araya getirilir. Birbirlerinin yetersiz, zayıf yönlerini düzelterek üstün olan özelliklerini kullanmak amacıyla bir araya getirilmiş farklı tür malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denir. (Onaran, 1995) Betonlar da farklı özelliklerdeki birçok malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşmuş kompozit malzemelerdir.

Klasik betonlar temel olarak agrega (ince ve iri agrega), kum, temiz su ve çimentonun belirli oranla karıştırılmasıyla oluşur. Ayrıca betonun durabilitesini arttırmak ve yetersiz özelliklerini iyileştirmek için mineral (puzolan) ve kimyasal katkı maddeleri kullanılır. Betonlar başta akıcı kıvamda olurlar, zaman içinde priz alarak sertleşirler ve dayanım kazanırlar. Bu özellikleri sayesinde kullanılacakları yerlere boşluksuz bir şekilde rahatlıkla yerleştirilir ve sıkıştırılırlar. (Kocataşkın, 1991)

Betonların farklı kullanım amaçları vardır. Hangi amaçla kullanılırsa kullanılsın 3 farklı niteliği muhakkak sağlamak zorundadır.

–Betonların basınç dayanımları yüksek olmalıdırlar.

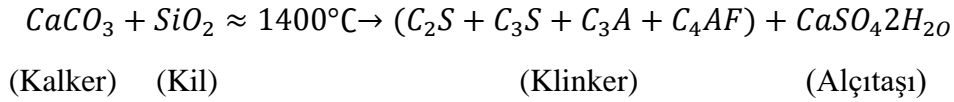
–Yüksek durabiliteye sahip olmalıdırlar.

–İşlenebilir kıvamda olmalıdırlar. (Akman, 1987)

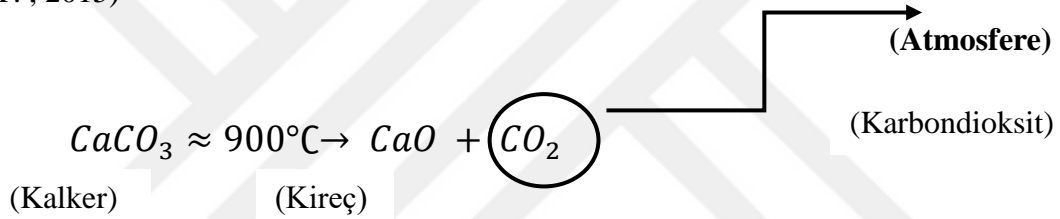
Günümüzde birçok endüstri çevreyi korumaya yönelik sürdürülebilir tasarımlara yönelmiş durumdadır. Bu sürdürülebilir ve çevreci çalışmalar zaman içinde zorunlu hale gelmiştir. Beton üretimiyle birlikte çimento üretimi sırasında yüksek enerji kullanılır. Kullandığımız enerjinin büyük bir kısmını ithal ettiğimiz için enerji fiyatları bir hayli fazladır. Ayrıca çimentonun üretimi esnasında atmosfere salınan karbondioksit (CO_2) miktarı da fazladır. Bu da çevre kirliliğine sebep olur.

Bu fiyat fazlalığı ve çevreye verdiği zarardan ötürü de sürdürülebilir değildir. (Thokchom, Ghosh, & Ghosh, 2009)

Betona bağlayıcılık özellik kazandıran malzeme çimentodur. Çimento temel olarak kalker ve kilin pişirilip bir araya getirilmesi ve belirli bir oranda alçıtaşının eklenip birlikte öğütülmesi sonucu oluşur. (Kocataşkın, 1965)



Kalkerin yapısında yüksek oranda kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) vardır. Kalsiyum karbonat belirli bir sıcaklıktan ($900^\circ C$) sonra karbondioksit (CO_2) ve kalsiyum oksit (CaO) yani söndürülmemiş kireç olarak ayrışır. Kalker pişirilirken açığa çıkan karbondioksit (CO_2) döner fırının bacasından atmosfere salınır. (Erdoğan T. , 2015)



Bu ve bunun gibi gazlar atmosfere salınır. Beton ve bununla beraber çimento üretimi karbon ayak izinde hatırı sayılır bir yere sahiptir. 2015 yılında yapılan araştırmalara bakıldığında dünyada çimento üretimi yaklaşık olarak 4 milyar tondur. Bu rakam Türkiye’de 75 milyon tonlarda görülmektedir. Bir ton çimento üretilirken yaklaşık 0,8 ton karbondioksit (CO_2) emisyonu oluşur. Türkiye için konuşacak olursak 75 ton çimento üretilirken yılda ortalama olarak 60 milyon ton civarında karbondioksit (CO_2) atmosfere yayılır. Atmosfere yayılan yüksek orandaki karbondioksit (CO_2) salınımını en aza indirmek ve doğaya daha az zarar vermek için kullanılan çimento miktarını azaltıp betonlar için alternatif bağlayıcılar bulunmalıdır. (Özcan & Güngör, 2019)

Geleneksel beton reçetelerine bakılacak olursa $1 m^3$ betonda yaklaşık olarak $300-370 kg/m^3$ çimento kullanılmaktadır. Ülkemizde olduğu gibi Dünyada da yapılan yapıların büyük bir kısmı beton ya da betonarme olarak inşa edildiği göz önüne alınacak olursa yıllık tüketilen çimento miktarı oldukça fazladır. İşte bu

yüzden geleneksel betona alternatif olmak ve kullanılan çimento miktarını azaltmak amacı doğrultusunda yeni nesil betonlar üretilmek istenmiştir. Bu yeni nesil betonların başında da geopolimer betonlar yer alıyor.

Geopolimer beton üretilirken atmosfere yayılan karbondioksit (CO_2) miktarı çimentonun üretiminde atmosfere yayılan karbondioksit (CO_2) miktarından yaklaşık olarak %80 daha azdır. Bu özelliği sayesinde geopolimer betonlar daha çevreci bir yapı malzemesi olma özelliği gösteriyor. (Davidovits, 1994)

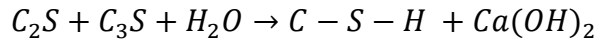


BİRİNCİ BÖLÜM

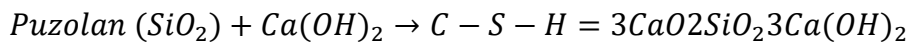
1978 yılında yapılan ve Davidovits'un yönettiği çalışmalarla birlikte geopolimer bağlayıcılar mühendislik alanlarında kullanılmaya başlandı. Diğer yapı malzemelerine göre daha çevreci olan geopolimer betonlar asit ve sülfata olan dirençleri ve istenilen dayanım ve dayanıklılığa sahip oldukları için normal betonlarla kıyaslanabilir duruma gelmiştir. Geopolimer betonlara bağlayıcılık özelliğini sağlayan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi atık olarak ortaya çıkan hammaddelerdir. Günümüz şartlarına göre uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonların maliyeti bir hayli düşüktür. Geopolimer betonlar dışarıdan gelen olumsuz koşullara karşı gösterdikleri direnç sayesinde alternatif bir beton olma özelliği gösterir. (Thokchom, Ghosh, & Ghosh, 2009)

Geopolimerlerin kimya, mineraloji, fizikokimya, jeoloji ve diğer mühendislik dalları olmak üzere birçok araştırma alanı vardır. Geopolimer betonlar oldukça fazla kullanım alanına sahiptir. Yangına dayanıklı bir malzeme olduğu için özellikle bu alanda olmak üzere mimari için önemli yere sahip taşlı yapılarda, düşük enerjiye sahip seramiklerde ve atık su tünelleri gibi çeşitli alanlarda kullanılır. Atık malzemeleri değerlendirerek üretimi gerçekleştirildiği için sıkça tercih edilen bir yapı malzemesidir. (Davidovits, 2013)

Puzolanlar yani mineral katkıları betonda tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık özellik göstermeyip çimento ile kullanıldığında bağlayıcılık özellik gösteren malzemelerdir. Çimento suyla reaksiyona girdiğinde $C - S - H$ jelleri ve $Ca(OH)_2$ meydana gelir. Betona bağlayıcılık özelliği kazandıran bu $C - S - H$ jelleridir. (POSTACIOĞLU, 1986)



Puzolanların içerisinde bulunan SiO_2 çimentonun suyla reaksiyonu sonucu meydana gelen $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girerek $C - S - H$ jellerini meydana getirir.



$$Puzolan olma şartı = SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 0,70$$

1.1. Araştırmanın Önemi

Atmosfere salınan karbondioksit (CO_2) miktarını azaltmak için Portland çimentosu kullanılarak üretilen geleneksel betonlar yerine uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi atık malzemeler kullanılarak üretilen geopolimer betonların kullanılması düşünülmektedir. Çevre dostu olan geopolimer beton kullanımının artması çevreye sağladığı yararın yanında ekonomik olması sebebiyle de tercih edilmektedir. Yapılan çalışma kapsamında Geopolimer betonlarda kullanılan farklı bağlayıcı miktarları ve oranlarındaki numuneler karşılaştırılmış olup farklı kür koşullarında ve %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki performansları incelenmiştir.

2.2. Tezin Ana Hattı

1. Bölüm, Özet: Tezin amaçları ve özetinin bulunduğu bölümdür.
2. Bölüm, Literatür Taraması ve Geçmişi: Geopolimer betonlar hakkında daha önce yapılan araştırmalardan yararlanılarak literatür taraması yapılmıştır. Ayrıca üretilen geopolimer betonlarda kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi bağlayıcı malzemeler ve bu malzemeleri aktive eden alkali solüsyonlar hakkında bilgi verilmiştir.
3. Bölüm, Deneysel Çalışma: Üretilen geopolimer betonlarda kullanılan malzemeler, karışımlar anlatılmış olup betonun döküm aşaması, kür metotları ve test yöntemlerinden bahsedilmiştir.
4. Bölüm, Test Sonuçları ve Tartışmalar: Yapılan deney sonucuna göre numunelerin görsellerinde, ağırlıklarında ve basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler karşılaştırılmıştır.
5. Bölüm, Sonuçlar: Tezin sonuçlarına yer verilen bölümdür.

İKİNCİ BÖLÜM

GEOPOLİMER BETONUN BİLEŞENLERİ

2.1. Agregada

Betonun iskeletini oluşturan temel malzeme agregadır. Agregalar, beton üretimi için uygun tane boyutuna sahip mineral yapı malzemeleridir. Agregalar doğadan alınabileceği gibi yapay olarak da üretilebilir. Son zamanlarda daha önce yapılmış ve hizmet ömrünü tamamlamış yapılardan elde edilen geri dönüştürülmüş malzemeler de agregada olarak kullanılmaktadır.

Beton kompozit bir malzeme olduğu için betonun özelliklerini de yapımında kullanılan malzemelerin kalitesi belirler. Beton hacminin yaklaşık olarak %75'ini agregalar oluşturur. Bu sebepten ötürü agreganın kalitesi, türü ve özellikleri üretilen betonun kalitesini, performansını ve durabilitesini yüksek ölçüde etkiler. Kaliteli bir beton üretmek için betonun kullanılacağı yere göre en uygun agreganın seçilmesi gerekir. Agreganın performansı da kayacın kalitesine bağlıdır. Ancak uygulamaya bakıldığında agreganın tane boyutu ve tane şekli (agregada granülometrisi), agreganın su emme kapasitesi ve porozitesi gibi özellikleri daha fazla önem arz eder. (Şengül, Taşdemir, & Sönmez, 2003)

Agregalar genel olarak 3 farklı şekilde sınıflandırılırlar. Bunlar: hafif agregada, ağır agregada ve normal agregadır. Ağır veya hafif bir beton üretimi olmayacaksa genelde normal agregalar kullanılır. Normal agregalar fırın kurusundaki tane yoğunlukları 2000 kg/m^3 ile 3000 kg/m^3 arasında değerler alan agregalardır. Agregalar ince ve iri taneler kapsamaktadır. Normal agregalarda iri agregada yani çakıl 4 mm açıklıklı kare eleklerin üzerinde kalan agregalardır. İnce agregada yani kum ise 4 mm açıklıklı kare eleklerden geçen agregalardır. (Doğangün, 2018)

Genellikle agregalar harçtan en verimli ve en ekonomik şekilde yararlanılacak granülometride olmalı, suyun etkisiyle yumuşamamalı, ezilmemeli veya dağılmamalı, çimento ile bir araya geldiğinde zararlı reaksiyonlar oluşturmamalı ve çimentonun bağlayıcılığına zarar vermemeli, zararlı kimyasallar ve kil içermemeli ve betonarmede kullanılacak donatıyı korozyona uğratmayacak şekilde olmalıdır. (Köken, Köroğlu, & Yonar, 2008)

Agregaların betonda kullanılabilmesi için çeşitli standartlara tabi olmaları gerekir. Örneğin agreganın su emme kapasitesi ve birim ağırlık değerlerine TS 3526 kullanılarak belirlenmektedir (TS 3526, 1981) veya agregaların aşınma dayanıklılığının tayini için TS EN1097-2 standardı kullanılarak belirlenmektedir. (TS EN 1907-2, 2000) Genel olarak ise betonda kullanılması gereken agreganın özelliklerini TS 706 EN 12620 standardına göre belirlenir (TS 706 EN 12620, 2009)

2.2. Uçucu Kül

Enerji üretimi için birçok malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında kömür önemli bir yere sahiptir. Ülkemizde kömürle çalışan birçok termik santral bulunmaktadır. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu baca gazları, cüruf ve uçucu kül gibi atıklar meydana gelir. Ülkemizde yılda 45 milyon ton civarında kömür yakılmaktadır ve bunun sonucunda ise 15 milyon ton civarında uçucu kül açığa çıkmaktadır. Termik santrallerde yakılan taş kömürün yaklaşık %10 - %15'i, linyit kömürün ise %20- %50'si uçucu kül olarak geri döner. Bu uçucu küllerin yaklaşık %75 - %85'i ortaya çıkan gazlar ile beraber kazandan çıkıp santrallerin bacalarına gider. Uçucu küllerin santrallerin bacalarından çıkıp etrafa dağılmasını engellemek için elektromanyetik yöntemlerle bu küller tutulur ve silolara yerleştirilip depolanır. (Güler, Güler, İpekoğlu, & Mordoğan, 2005)

Uçucu küllerin renkleri genel olarak gri tonlarındadır ve rengin tonu içindeki yanmamış karbon miktarına bağlı olarak değişir. (Aruntaş, 2006) Uçucu küller küresel tane şekline sahiptirler ve çapları 1 µm ile 200 µm arasındadır. Uçucu küllerin yoğunlukları ise 2.2 g/cm^3 ile 2.7 g/cm^3 arasındadır. (Erdoğan M. , 2006).

Uçucu külleri oluşturan temel elementler Si, Al, Fe, S ve Ca dur. Bu elementlerle de SiO_2 , CaO, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşikleri oluşur. Bunlarla birlikte bir miktar MgO, SO_3 ve Na_2O bulunabilir. Uçucu küllerin tipine göre bu bileşiklerin miktarı değişir. Genel olarak oranlara bakılacak olursa SiO_2 miktarı %25 ile %60, CaO miktarı %1 ile %40, Al_2O_3 miktarı %10 ile %30 ve Fe_2O_3 miktarı %1 ile %15 arasında olur. Bu oranların farklılığı uçucu kül tipini belirler. (Karateke, 2009)

Uçucu küller kimyasal olarak TS EN 197-1 ve ASTM C618 standartlarına göre sınıflandırılırlar. ASTM C618 standardına bakıldığında uçucu küller F tipi ve C tipi

olmak üzere 2 şekilde sınıflandırılırlar. F tipi uçucu küller bitümlü kömürden elde edilirler ve SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamalarının yüzdesi %70'den fazla olmalı ve CaO yüzdesi de %10'un altında olmalıdır. Bu özellikleri sebebiyle de puzolanik özellik gösterirler. C tipi uçucu küller de linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilirler ve SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamalarının yüzdesi %50'den fazla olmalı ve CaO yüzdesi de %10'dan fazla olmalıdır. Bu özellikleri sebebiyle de puzolanik özellik gösterir. Aynı zamanda C sınıfı uçucu küller içeriğindeki CaO miktarı fazla olduğu için bağlayıcılık özelliğe de sahiptirler. TS EN 197-1'e göre de uçucu küller iki şekilde sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmada V tipi uçucu küller silissi, W tipi uçucu küller de kalkersidir. (Türker, Erdoğan, Katnaş, & Yeğınobalı, 2009) Çizelgede 2.1'de F sınıfı ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal içerikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Değişik termik santral uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları

Kimyasal İçerik	F Sınıfı Kül (CaO<%10)	C Sınıfı Kül (CaO>%10)
SiO_2	43.6 - 64.4	23.1 - 50.5
Al_2O_3	19.6 - 30.1	13.3 - 21.3
Fe_2O_3	3.8 - 23.9	3.7 - 22.5
CaO	0.7 - 6.7	11.5 - 29.0
MgO	0.9 - 1.7	1.5 - 7.5
Na_2O	0 - 2.8	0.4 - 1.9
C (kızdırma kaybı)	0.4 - 7.2	0.3 - 1.9

Kaynak: (Erdoğan T. , 2015)

2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı

Uçucu küller beton üretiminde çimento ile birlikte kullanılabilirdiği gibi betonda kum yerine de kullanılabilir. Çimentonun üretimi esnasında klinkere katılarak uçucu kül katkı çimento olarak da işlem görebilir. Kumun yerine kullanıldığı takdirde özgül yüzey artar ve kumdan tasarruf edilir. Uçucu küller beton üretiminin birçok alanında kullanılabilir ancak bunlardan en avantajlı olanı çimentonun yerine kullanmaktır. Uçucu küller puzolanik özelliğe sahip oldukları için bağlayıcılık özellik gösterirler, bununla beraber daha büyük özgül yüzeye sahiptirler ve incelikleri çimentodan daha fazla olduğu için bağlayıcı hacmi daha fazla artar ve çimento gibi maliyeti fazla olan malzemedен tasarruf edilmiş olur. Yapılan araştırmalara göre ağırlıkça %20 oranlarında uçucu kül kullanımı betonun basınç dayanımını olumlu yönde etkilemektedir. (Topçu & Canbaz, 2001)

Üretimi gerçekleştiren uçucu küllerin yalnızca %25'i inşaat, kimya ve de tarım sektörlerinde kullanılıyor ve geriye kalan %75'i atık madde olarak imha ediliyor. Uçucu külün geri kullanılmasını en iyi sağlayan sektör inşaat sektörüdür. Uçucu kül inşaat sektöründe genellikle beton üretiminde, katkılı çimentolarda, tuğla üretiminde, gaz beton üretiminde, zemin stabilizasyonlarında ve dolgularda kullanılmaktadır. (Tangüler, Gürsel, & Meral, 2015)

Betonda uçucu kül kullanımının birçok olumlu sonucu vardır. Bunlar;

–Uçucu küller atık bir madde olduğu için beton üretiminde ekonomiklik sağlar.

–Uçucu küller küresel yapıda oldukları için iç sürtünmeleri çimentoya göre daha azdır bu da betonda akıcılığı yani işlenebilirliği artırıp su/çimento oranını düşürür.

–Uçucu küllerin inceliği daha az olduğu için taze betonun içerisindeki suyu daha çok çeker bu da terlemeyi azaltır.

–Uçucu kül kullanıldığı takdirde betona daha az çimento gerecektir. Betonda kullanılan çimento miktarı azaldığı için hidrasyon ısı düşer ve rötre çatlakları azalır. Ayrıca azalan çimentoyla birlikte C_3A miktarı da azaldığı için beton sülfata daha dayanıklı olur.

–Uçucu kül kullanılan betonların ilk günlerdeki dayanımı daha az olsa da serbest olan $Ca(OH)_2$ ler uçucu küllerle tepkimeye girerek C-S-H jelleri oluşmasını sağlar. Bu jeller betona bağlayıcılık özelliği kattığı için betonun nihai dayanıklılığını artırır. Aksi halde serbest halde kalan $Ca(OH)_2$ su ile temas ettiğinde erir ve betonda boşluklara sebep olur. Bu boşluklar da betonun geçirimsizliğini artırır. Bu yüzden uçucu kül kullanımı betonun su geçirimsizliğini azaltır.

–Uçucu kül kullanılan betonların priz süreleri daha uzundur. Bu da sıcak havalarda daha kolay beton üretmeye sebep olur. (Tuygun, 2002)

2.3. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufları demir ve çelik sanayinde yan ürün olarak elde edilirler. Yüksek fırın cürufu betonda yaygın olarak dayanıklılığı arttırmak, yüksek performanslı ve yüksek mukavemetli beton üretmek amacıyla kullanılır. Atık bir

madde olduğu için kaynak tasarrufu sağlarnasının yanında çevresel ve ekonomik yönden de faydaları olan puzolanik bir malzemedir. (Ulubeyli & Artir, 2015)

Çelik üretilirken çeliğın yaklaşık %25'i kadar çeliğın atık malzemesi olan cüruf olmaktadır. Yani bir ton çelik üretilirken yaklaşık 250 kilo kadar yüksek fırın cürufu elde edilir. Bu atık olan malzemeyi değerlendirmek için yüksek fırın cürufu beton ve çimentoya katkı maddesi olarak eklenir. (Bilgen, Kavak, Yıldırım, & Çapar, 2010)

Yüksek fırın cürufunun içeriğinde bazı esaslı bileşikler, silis ve kalsiyum alümina silis bulunur. Kimyasal bileşimine bakacak olursak CaO , SiO_2 ve Al_2O_3 den meydana gelirler. Yüksek fırın cürufunun aktivitesinde etkin olan temel faktörlere bakıldığında kalsiyum içeriklerinin yanında tanecik boyutları ve karakteristik özellikleri ile beraber camsı madde oranı ve camsı madde bileşimi önemli faktörlerdendir. Yüksek fırın cürufunun kullanılabilir olması için fırın çıkışlarında mutlaka hızlı soğutulması gerekir ve camsı faz içeriğinin en az 2/3 oranlarında olması gerekir. Ayrıca içeriğindeki CaO , SiO_2 ve MgO miktarlarının toplamının 2/3 oranlarında olması ve CaO ve MgO toplamlarının SiO_2 'e oranının 1'den fazla olması gerekmektedir. (Dorum, Koçak, Yılmaz, & Ali, 2009)

Yüksek fırın cürufunun içeriğindeki SiO_2 yaklaşık olarak %28 - %38 arasında, Al_2O_3 miktarı yaklaşık %8 - %24 arasında, CaO miktarı %30- %50 arasında ve MgO miktarı da yaklaşık %1 - %18 arasında olur. Yüksek fırın cürufunun içeriğinde bulunan CaO sebebiyle de kendiliğinden bağlayıcılık özelliği vardır. Bu da betonun basınç dayanımının daha fazla olmasını sağlar. Ayrıca yüksek fırın cürufunun içeriğinde kil ve silt bulunmadığı için daha iyi aderans ve daha iyi sürtünmeye sahiptir. (Keklik, 2020)

2.3.1. Betonda yüksek fırın cürufu kullanımı

Demir ve çelik üretimimin atık maddesi olan yüksek fırın cürufunun birçoğu inşaat malzemesi olarak kullanılır. Çevre kirliliğini azaltmak, enerji tasarrufu sağlamak ve üretim maliyetlerini en az seviyeye indirmek için yüksek fırın cürufu gibi atık olan yan ürünlerin inşaat malzemesi olarak kullanılıp geri dönüştürülmesi gerekmektedir.

Her cüruf aynı özelliği göstermediği için her cürufun kullanım alanı da farklıdır. Yüksek fırın cürufunun özellikleri soğutulmasına bağlı olarak değişir. Havada soğutulmuş olan yüksek fırın cürufu yoğun ve sert bir yapıya sahiptir. Bu yüzden de agrega olarak kullanıma uygundur. Peltelenmiş yüksek fırın cürufunun yoğunluğu düşük olduğu için hafif agrega olarak kullanılır. Granüle cüruf ise güçlü bağlayıcı özelliği ve uzun süreli mukavemeti sayesinde betona eklenebilir. Genel olarak inşaattaki kullanım alanlarını inceleyecek olursak; beton ve çimento sanayinde, beton ve asfalt agregalarında, tuğla ve briket yapımında kullanıma uygundur. (Aygün, 2019)

Yüksek fırın cürufu beton teknolojisinde agrega olarak kullanıldığı gibi beton üretiminde çimento yerine de kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde CO_2 yayılımı büyük ölçüde azalır. Bu da çevre kirliliğinin azaltılmasına yönelik atılmış önemli bir adımdır. Yüksek fırın cürufu betona çimento yerine belirli oranlarda eklendiğinde betonların erken yaştaki dayanımlarının düşük olduğu ancak dayanım kazanma hızlarının yüksek olduğu ve nihai dayanımlarının cürufsuz betonlara nispeten daha yüksek olduğu görülür. Ayrıca kullanılan çimento miktarı azaldığı için betonun hidrasyon ısı da düşer. Yüksek fırın cürufunun betonda kullanılmasıyla birlikte taze betonun işlenebilirliği artar. Yüksek fırın cürufunun tanecik boyutu çimentoya göre daha küçük olduğu için de yavaş tepkimeye girer bu sebeple de priz süresi uzundur. Bu da sıcak havalarda beton dökümünü kolaylaştırır. Ayrıca ince öğütülmüş oldukları için betonda terleme olayı azalır ve bu de betondaki ayrışmayı azaltır. Buna bağlı olarak da rötre çatlakları azalır ve betonun su geçirimsizliği düşer. (Çam, 2019)

Yüksek fırın cürufu öğütülerek tanecik boyutları küçültülür ve puzolanik özellik gösterir. Bu sayede yüksek fırın cürufu kullanılan taze ve sertleşmiş betonların özellikleri iyileşmekte ve çevre koşullarına karşı daha dayanıklı betonlar üretilmektedir. (Bilim & Atış, 2011)

2.4. Alkali Aktivatörler

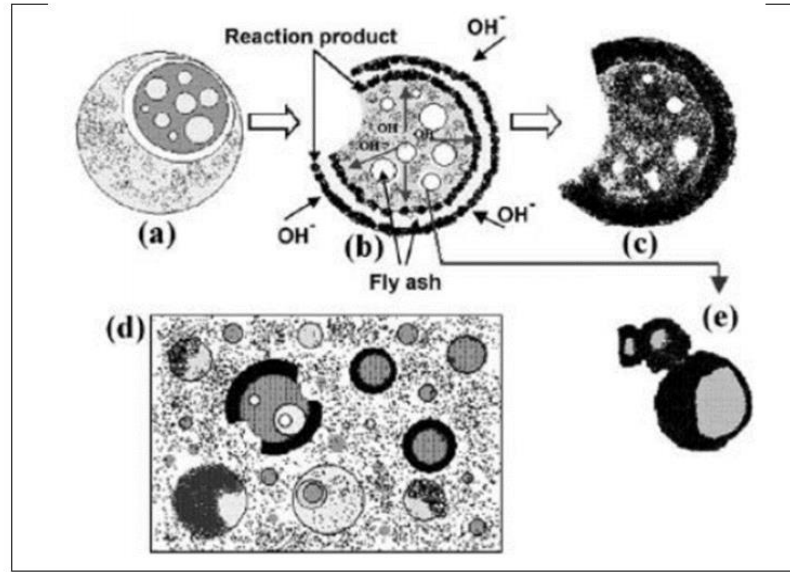
Çimentonun üretimi esnasında atmosfere yayılan CO_2 miktarını azaltmak, dolayısıyla CO_2 den kaynaklanan çevre kirliliğini önlemek için çimento kullanmadan veya en az seviyede çimento kullanarak beton üretmek gerekmektedir. Çimentonun

betona sağlamış olduğu bağlayıcılığı elde etmek için alternatif bağlayıcı malzemeler kullanılmalıdır. Bunlar atık madde olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkı maddeler yani puzolanlardır. Puzolanik malzemeler betonda tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcı özellik göstermezler. Bu malzemeleri çimento yerine kullanabilmek için alkali aktivatörlerden yararlanırız.

Puzolanların içeriğinde bulunan SiO_2 ve Al_2O_3 alkalilerle aktive edilip betonda bağlayıcılık özellik gösterir. Aktivasyon için ise sodyum hidroksit (NaOH) ve cam suyu dediğimiz sodyum silikat (Na_2SiO_3) en yaygın kullanılan aktivatörlerdendir. (Palomo, Grutzeck, & Blanco, 1999)

Alkali aktivatörler kullanılarak bağlayıcılık kazanan puzolanlar ile üretilen betonlar incelendiğinde çimento ile üretilen betonlara kıyasla erken ve nihai dayanımları daha yüksektir. Ayrıca bu betonların hidrasyon ısıları daha düşüktür ve kimyasallara karşı daha dayanıklıdırlar. Ancak bu betonlarda ani prizle birlikte mikro çatlak oluşumu, çiçeklenme ve yüksek büzülme meydana gelir. (Görür, 2015).

Uçucu küllerin aktivatörler ile reaksiyona girmesi sonucu amorf yapıya sahip ‘geopolimer’ oluşur. Yüksek fırın cürufunun aktivatörler ile reaksiyonu sonucunda ise çimentonun suyla reaksiyonu sonucu oluşan ve betona bağlayıcılık özellik katan C-S-H jellerine benzeyen hidrate kalsiyum silikat meydana gelir. (Aydin, 2010) Uçucu külün aktivatörler ile reaksiyonu sonucu yapısında bulunan alüminyum ve silikanın parçalanması Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Uçucukülün alkali aktivasyonun gösterimi
Kaynak: (Shi & Qian, 1999)

2.5. Geopolimer Beton Özellikleri

Son yıllarda geopolimerler özellikle çimento ve çimento esaslı bağlayıcıların yerine kullanılabilen, yüksek performanslı kompozitler ve seramiklerin üretiminde kullanılan bağlayıcılardır. Doğal olarak ortaya çıkan veya atık madde olan birçok malzemenin kullanılması ve geri kazanılması açısından önemli bir yere sahiptir. (Andiç Çakır, Ramyar, Tuyan, Üzüm, & Boyacı, 2016)

Ukraynalı bilim insanı Glukhovsk 70 – 80 sene önce inorganik malzemeler üzerine ilk çalışmalarını yapmıştır. Bu araştırmacının yapmış olduğu çalışmalarda yüksek kalsiyuma sahip cüruflarla alkali çözeltilerin karışımından elde ettiği ve yüksek dayanıklılığa sahip malzemeleri bina inşaatında kullanmıştır. Ukraynalı araştırmacı Glukhovsk elde ettiği bu malzemeye alkali aktive çimentolar adını vermiştir. (Duxson, Provis, Luckey, Mallicoat, Kriven, & Deventer, 2005)

1940 yıllarında ise Purdon'un çalışmaları ile alkali ile aktive edilen bağlayıcılar büyük ölçüde gelişme göstermiştir. Purdon, yüksek fırın cürufunu sodyum hidroksit ile birlikte aktive ederek oluşan reaksiyonun iki aşamada gerçekleştiğini öne sürmüştür. İlk aşamaya bakıldığında, silika, alüminyum ve kalsiyum hidroksit serbest kalır. İkinci aşamada ise alkali çözelti yenilenir ve silika ve alümin hidratlar oluşumunu gerçekleştirir. (Purdon, 1940)

1980'li yıllarda Davidovits ise çalışmalarında yüksek fırın cürufu kullanmak yerine kaolen kullanmıştır. Yaptığı araştırmalarda düşük sıcaklıklarda alkali silikatla kaolenin reaksiyonundan kısa bir süre sonra sertleşerek mukavemet kazanmış ve kimyasal maddelere ve çevre koşullarına dayanıklı malzemeler üretmiştir. Fazla miktarda alümina içeren ve inorganik hammaddelerden üretilen bu malzemelere geopolimer adı verilmiştir. Böylece Davidovits geopolimer ismini literatüre kazandırmıştır. (Xu & Deventer, 2000)

Geopolimerlerin birçok avantajı vardır. Bu avantajlardan belki de en önemlisi hazırlama tekniklerinin kolay olmasıdır. Geopolimerler, kolaylıkla reaktif olan alümino-silikatlarla güçlü alkali çözeltilerin karıştırılıp oda koşullarında kür edilmesiyle üretilirler. Üretim itibarıyla çimento ile üretilen normal betonların üretimine benzerdir. Kürlenme bittikten kısa bir süre sonra ideal bir basınç dayanımına sahip olurlar. (Li, Ding, & Zhang, 2004)

Geopolimerler gösterdikleri mükemmel kimyasal ve fiziksel özellikleri sebebiyle prefabrik yapı endüstrisinde, heykeltçilik ve süsleme sanatlarında, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemelerinde, beton esaslı yol kaplamalarında, zemin iyileştirmelerinde kullanılabilir. Ayrıca, refrakter seramik malzemelerin üretiminde, zehirli nükleer atıkların depolanmasında, zorlu iklim şartlarına ve yangınlara dayanıklı duvar kaplamalarının üretiminde, güçlendirme çalışmalarında, tarihi yapıların taşıyıcı sistemlerini restore ederken, uçaklarda ve yarış arabası endüstrisinde ve nükleer santrallerde kullanımı mümkündür. Gelişmiş teknolojiyle birlikte seçilen kimyasallara ve bu kimyasalların kullanım oranlarına göre ve hammaddelerde yapılan fiziksel iyileştirmeler sayesinde geopolimer malzemelere istenilen fiziksel özellikleri kazandırmak mümkündür. (Davidovits, 2008)

Geopolimerler, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi atık malzemeleri bağlayıcı bir malzeme olarak kullanmayı sağlar. Geopolimerlere bağlayıcılık kazandırmak amacıyla kullanılan bu atık maddeler geopolimer betonlarda agregalar ile birlikte kullanılmaktadır ve bu atık malzemeleri aktif hale getirmek için alkali aktivatörler kullanılır. Geopolimer betonların erken dayanımları oldukça yüksektir. Priz süreleri kontrol edilebilirdir ve uzun süreler onarıma gerek kalmadan kullanılabilirler. Geopolimer betonlar, klasik betonların yerini doldurabilme

potansiyelindedir. Geri dönüştürülebilir atık malzemelerle üretildiği için de sürdürülebilirliği vardır. Geopolimerlerin kullanımının yaygınlaşmasının temel nedenlerinden biri atmosfere salınan CO₂ miktarında yüksek ölçüde azalma olması ve endüstriyel atıklar kullanılarak üretilmesidir. (Thomas & Grupta, 2015)

Geopolimer beton üretimi sayesinde çimento üretimi sırasında açığa çıkan CO₂ miktarı %80'e kadar azalmaktadır. Ayrıca geopolimer betonların büzülmeleri düşük, aside karşı dirençleri yüksek ve yüksek basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri olduğu için tercih edilen iyi bir yapı malzemesidir. (Al Muhit, Foong, Alengaram, & Mohd, 2013)

Normal beton ile karşılaştırıldığında, geopolimer betonların avantajları aşağıdaki gibidir:

- Bol hammadde kaynakları: Herhangi bir puzolanik bileşik veya kaynak (Alkali çözelti içinde kolayca çözülen silikatlar veya alüminli silikatlar) geopolimer betonun üretim kaynağı olarak yeterlidir. Atık olan maddeler kullanılarak üretilebilirler.

- Enerji tasarrufu ve çevreyi koruma: Geopolimer betonlar normal betonlara kıyasla büyük enerji tüketimine sahip değildir. Normal betonlara göre 3/5 daha az enerji sarfiyatı sağlar. Ek olarak, atmosfere daha az karbondioksit (CO₂) salınımı gerçekleşir.

- Basit hazırlama tekniği: Geopolimer betonlar basitçe aşağıdaki yöntemlerle üretilebilir: alümino-silikat reaktif malzemeleri ve kuvvetli alkali çözeltileri karıştırıp daha sonra oda sıcaklığında kürlenir. Kısa bir süre içinde, normal Portland çimentolu betonlara benzer şekilde hızlı dayanım kazanabilmektedir.

- İyi hacim kararlılığı: Geopolimer betonlar normal betona göre 4/5 daha düşük büzülmeye sahiptir.

- Kısa sürede makul dayanım kazanımı: Geopolimer betonlara ısı kürü uygulayarak basınç dayanımını %70 daha artırılabilir.

• Mükemmel durabilitesi: Geopolimer betonların en olumlu özelliklerinden biri de olumsuz çevre koşullarına karşı normal betonlara göre daha uzun süre dayanması. (Li, Ding, & Zhang, 2004)

2.6. Geopolimer Betonun Kimyasal Etkileri

Geopolimerizasyon süreci yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi alümino-silika yapıdaki atık maddeler ile alkali aktivatörlerin düşük ısılarda bir araya getirilip tepkimeye girmeleri ile başlar. Bu tepkimeler sonucunda oluşan yeni ürün istenilen üretilme amacına uygun fiziksel özellikleri karşılama; katı hammaddelerin kompozisyonu ile kullanılan kimyasalların yeterli molar oranlarda bir araya getirilmesi sonucu tepkimeye girmesi, ısı kuru uygulanması ya da kalsinasyon işlemi süresi ve kalsinasyon ısısına bağlı olarak farklılık gösteren moleküler yapısıyla bağlantılıdır. (Davidovits, 2008)

Geopolimerin kimyasal yapıları büyük ölçüde bilinir. Ancak buna rağmen örnekler genellikle boyutsal yapıdadır ve şekilsizdir. Yüksek fırın cürufunun içeriğinde bol miktarda kalsiyum bulur. Bu da C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jellerinin oluşmasına katkı sağlar. Bilindiği üzere betona bağlayıcılık özelliğini bu jeller kazandırır. Bu da betonun dayanımını olumlu yönde etkiler. (Erdoğan S. , 2014) Kalsiyum içeriği yüksek yüksek fırın cürufuları kullanılarak üretilen geopolimer betonların basınç mukavemetleri de yüksek olur. Bu nedenle geopolimer beton üretilirken basınç mukavemeti yüksek betonlar elde etmek için uçucu kül içerikli geopolimer beton üretmek yerine yüksek fırın cürufu içerikli geopolimer beton üretmek daha avantajlı olacaktır. Bu sayede ısı kuru uygulamaksızın normal oda sıcaklığında veya laboratuvar ortamlarında dayanım kazanabilecektir. Eğer sadece düşük kalsiyumlu uçucu kül bağlayıcı olarak geopolimer betonların üretilmesi amacıyla kullanılırsa bu durumda geopolimer betonların taşıyıcı eleman olarak kullanılabilmesi için yüksek ısı kuru uygulanması zorunlu hale gelmektedir. Bu da uçucu küllü geopolimer betonların normal yapılarda kullanımını çok zor hale getirmektedir çünkü büyük çapta kolon kiriş, döşeme ve temel gibi betonarme yapı elemanlarını yüksek sıcaklıklarda ısı kuru uygulamak pek mümkün değildir. Bu sebeple C-S-H oluşumunu sağlayan ve yüksek oranda kalsiyum içeren öğütülmüş

granüle yüksek fırın cürufu gibi malzemeler kullanmak yapıların inşaatında kullanılabilmesi açısından son derece yararlı bir adım olacaktır.

Geopolimerler inorganik polimer ailesine ait bir malzemedir. Geopolimerlerin kimyasal birleşimi her ne kadar zeolitik malzemelere benzese de amorf bir yapıya sahiptir. Geopolimerizasyon prosesi Si ve Al mineralleri ile başlayıp güçlü alkali koşullarda gerçekleşen ve üç boyutlu polimerik zincir (Si-O-Al) oluşarak sonuçlanan kimyasal bir reaksiyondur. (Rangan, 2010)

OPC betonları ile yapılan kimyasal dayanım deneyleri ile geopolimer betonlarda kullanılan malzemeler sülfata maruz bırakıldığında karışık mekanizmalar olduğu gözlemlenmiştir. Başka bir sebep ise sülfat içerikli çözeltiler ile çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan ürünlerin reaksiyonudur ve bu reaksiyonlar farklı şekillerde ortaya çıkmaktadır. OPC betonlarda sülfat ile yapılan tepkimelerde kalsiyum hidroksit (CH), kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ve birçok farklı çimentonun alüminat faktörlerini kapsayan reaksiyonlar ile belirginleşir. (Jiang, Silsbee, Breval, & Roy, 1997)

Sülfat saldırıları sonucu betonda oluşan çatlaklar ve hacimsel genişleme doğrudan veya dolaylı bir şekilde ortaya çıktığı reaksiyonlar neticesinde alçıtaşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) oluşmasının yanı sıra betonda bozulmalar ve C-S-H jellerinde tahribat meydana gelir. Bunların sonucunda ise beton numunelerinin yüzeylerinde yumuşama oluşur ve bu yumuşama zamanla yüzeyde parçalanmalara sebep olur. Sıcaklıkla birlikte sertleşerek dayanım kazanan uçucu kül içerikli geopolimer betonlar sülfat saldırılarına karşı direnç gösterir. Sodyum sülfat ile yapılan araştırmalarda uçucu kütle üretilen geopolimer beton numuneleri bir yıla kadar sodyum sülfat içerisinde bırakılır. Buna rağmen numunelerin yüzeylerinde herhangi bir bozulma veya çatlığa rastlanmamış ve betonun dayanım değerlerinde gözle görülür değişiklikler olmamıştır. (Rajesh, Joe, & Mammen, 2014)

2.7. Geopolimer Betonun Durabilitesini Etkileyen Faktörler

Çeşitli fiziksel ve kimyasal etmenler nedeniyle betonların dayanıklılığında azalma meydana gelebilir. Fiziksel etmenlere sürekli maruz kalan betonların yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar betonun geçirimsizliğini artırır. Aynı

şekilde sürekli zararlı kimyasallara maruz kalan betonlarda da benzer sonuçlar görülür ve beton gözenekli bir yapıya bürünür. Bu gözenekler zamanla büyür ve betonun geçirimli olmasına sebep olur. Bu da betonun durabilitesini azaltır. Endüstriyel fabrika atıklarının asit etkisinde bulunması durumunda karışımda yer alan atık suyun pH seviyesi 4 ve daha az olduğu takdirde ve geopolimer betonlara zarar verebilecek metallere sahip olduğunda geopolimer beton numunelerinin mukavemeti olumsuz etkilenir ve betonun hizmet ömrü azalır. Bu olumsuz koşulları ortadan kaldırarak geopolimer beton üretilmesi sağlanmalıdır.

2.7.1. Betonda büzülme

Geopolimerler üretilirken betonlar en az şekil değiştirmeye maruz kalacak şekilde üretim tamamlanmalıdır. Bu şekil değiştirmelerden biri de terleme neticesinde beton içindeki suyun buharlaşmasından kaynaklanan şekil değişikliğidir. Bu tür şekil değiştirmeler büzülme kaynaklı şekil değiştirmelerdir. Büzülme genel olarak zaman içinde betonun içindeki suyun azalmasıyla beton hacminde meydana gelen azalma olarak tanımlanır. Rötire olarak da bilinen büzülme olayı hem taze betonda hem de sertleşmiş betonda gözlemlenebilir.

2.7.2. Aşınma

Tekrarlı yüklere maruz kalan beton yüzeyleri yıpranır ve zamanla aşınır. Bu aşınma betonun durabilitesini azalttığı gibi hizmet ömrünü de azaltır. Aşınmaya engel olabilmek için betonun basınç dayanımının yüksek olması ve seçilen agregaların darbelere karşı dayanıklı olması gerekir. Ayrıca aşınmayı engellemek veya en aza indirmek için boşluk oranı az olan beton üretmek gerekir. Boşluk oranının azaltılması için de uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi ince taneli malzemelerin yeni nesil beton içerisinde kullanılmasına ihtiyaç vardır. Bu malzemeler kullanılarak üretilen betonların dayanımları da aşınmaya karşı olan dirençleri de çok yüksek olacaktır.

2.7.3. Isıya karşı dayanıklılığı

Yüksek fırın cürufu katkılı geopolimer betonların, OPC ile üretilen betonlara göre bazı üstün özellikleri vardır. Yüksek fırın cürufu kullanılan geopolimer betonların basınç dayanımları daha yüksektir ve yüksek sıcaklık ve kimyasallara

direnci OPC ile üretilen betonlara kıyasla daha yüksektir. Yüksek sıcaklık altındaki ısı dikkate alındığında uçucu kül katkılı geopolimer betonların da kullanımı uygundur ancak çimento ısıya maruz kaldığında çatlak oluşumuna sebep olur. Bu da betonda boşluk oluşmasına sebep olur. Zuda ve arkadaşları yaptığı çalışmada uçucu kül kullanarak birçok geopolimer beton üretmiş ve bunları farklı deneylere tabi tutmuştur. Yaptıkları çalışmalar neticesinde ürettikleri geopolimer betonların istenilen basınç dayanımlarını 400°C sıcaklığa maruz kalmasına rağmen koruduklarını gözlemlemişlerdir. Zuda geopolimer betonların içeriğinde bulunan ve alkali aktivatörler ile oluşan alümino silikat malzemesinin yüksek sıcaklıklarda ısıya karşı yüksek direnç gösterdiğini belirtmiştir. (Poon, Azhar, Anson, & Wong, 2003)

2.7.4. Alkali - Silika reaksiyonları

OPC içinde bulunan Na_2O ve K_2O gibi alkaliler betondaki agregaların içinde bulunan reaktif silikalar ile tepkimeye girer ve alkali-silika reaksiyonları oluşur. Bu reaksiyon sonucunda alkali-silika jelleri meydana gelir. Bu jeller yüksek miktarda su çekme kapasitesine sahiptir. Su çeken betonda büyük genleşmeler meydana gelir. Bu genleşmeler zamanla beton yüzeyince çatlaklar oluşmasına sebep olur.

Amerika'da 1920-1930 yılları arasında üretilip kullanılan betonların yüzeylerinde sebebi bilinmeyen çatlaklar oluştuğu ve betonların bir zaman sonra yıkıldığı görülmüştür. Beton üretilirken kullanılan malzemeler yönetmeliklere uygun olmasına rağmen beton döküldükten birkaç sene sonra beton yüzeyinde haritaya benzer çatlaklar oluşmaktadır. Belli bir müddet sonra oluşan çatlaklardan jel çıkması gözlemlenmektedir ve betonda oluşan çatlaklardan beton patlamaları rapor edilmiştir. 1940 lı yıllarda Stanton bu çatlakların kimyasal tepkimeler sonucunda oluştuğunu belirtmiştir. İşte bu kimyasal tepkimelere alkali- silika reaksiyonları adı verilmektedir (Stanton, 1940) Betonda alkali-silika reaksiyonu beton durabilitesi etkileyen en önemli etkenler arasında yer almaktadır.

Allouche ve Patil alkali-silika reaksiyonlarının betonlar üzerindeki etkisini araştırmak için çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar neticesinde geopolimer betonların OPC ile üretilen betonlara kıyasla alkali-silika reaksiyonlarına karşı dirençlerinin daha fazla olduğunu göstermişlerdir (Wang, Shah, & Mishulovich, 2004)

2.7.5. Asit etkisi

Geçirimsizliği yüksek olan sertleşmiş betonlara içeriğinde asit bulunan sular sızdığında betonda genişlemeye sebep olan kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesine neden olur. Bu reaksiyonlar zamanla betona zarar verir. Asitlerin vermiş olduğu bu zararı azaltmak için geçirimsizliği düşük betonlar üretmek gerekir. Aside maruz kalacak olan beton yüzeyi bitümlü veya reçineli maddeler ile kaplanmalıdır (Erdoğan T. , 2015) Asit etkisine maruz kalan beton veya betonarme elemanlarda ilk önce dış yüzeyde renk değişimleri, çatlak oluşumu başlar ve daha sonra çimento matrisi ve agrega daneleri aşınarak kesit kaybına sebep olurlar. Bu asit etkisinden dolayı önce yumuşama ve daha sonra oluşan yüzey alanı azalması sonucu betonların basınç dayanımlarında asit tipine, yoğunluğuna ve asitin beton yüzeylerine etkiye süresine de bağlı olarak çok fazla dayanım düşüşleri görülmektedir.

2.8. Geopolimer Betonda Dayanımı Etkileyen Faktörler

Basınç dayanımı beton için oldukça önemli bir parametredir. Geopolimer beton numunelerinde reaksiyon ürünlerinin miktarındaki artış basınç dayanımında artışa sebep olur. Geopolimer bağlayıcıların oluşturduğu reaksiyonlar sıcaklık etkisiyle artmaktadır. Bu sebeple yüksek sıcaklıkta kür edilen farklı geopolimer betonların basınç dayanımlarında artış gözlemlenir (Bakharev, 2005)

Geopolimer betonlarda kullanılan puzolanların tane boyutları da basınç dayanımını etkilemektedir. Bağlayıcı olarak kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi hammaddeler öğütülüp ince taneli bir forma geldiğinde yüzey alanlarında artış meydana gelir. Yüzey alanı artan taneciklerin reaksiyon hızları da artar. Reaksiyon hızındaki artış geopolimer betonun basınç dayanımını da arttırır. (He, Jie, Zhang, Yu, & Zhang, 2013)

2.8.1. Geopolimer betonlarda su miktarı

Geopolimer betonlarda dayanımı etkilenen faktörlerden biri de karışım suyu oranıdır. Geopolimer betonlarda işlenebilirliği arttırmak için betonlara fazladan su ilave edilir. İlave edilen bu suyla birlikte betonda su/bağlayıcı oranı artar ve betonda dayanım kaybı gözlemlenir (Hillerborg, 1985) OPC ile üretilen betonlarda olduğu gibi geopolimer betonlarda da su/bağlayıcı oranı düşük tutulmalıdır. İdeal

su/bağlayıcı oranı 0,36 – 0,44 değerleri arasında olmalıdır (A., K., & E.N, 2008) Su miktarının gerekenden fazla olması durumunda kullanılan alkali aktivatör konsantrasyonunun azalmasına dolayısıyla dayanım kaybına sebep olmaktadır.

Su/bağlayıcı oranı yüksek olan geopolimer betonlarda fazladan eklenen suyla birlikte beton içerisindeki gerilmeler de artar. Bu gerilmeler ile birlikte betonun içyapısında istenmeyen boşluklar meydana gelir. Bu boşluklar betonun durabilitesini düşürdüğü gibi beton basınç dayanımını da olumsuz yönde etkiler.

2.8.2. Kür süresi ve sıcaklık

Geopolimer betonların basınç dayanımlarını içerisine konulan malzemelerin kalitesi etkiler. Bunun yanı sıra beton döküldükten sonraki bakımı ve beton kürü de basınç dayanımını büyük ölçüde etkiler. Uçucu küller yüksek sıcaklık altında daha aktif oldukları için uçucu kül kullanarak üretilen betonları ısı ile kür etmek basınç dayanımlarında pozitif etki oluşturur. Ayrıca yüksek sıcaklık altında beton içerisindeki reaksiyonlar daha hızlı olacağı için betonları ısı ile kür etmek daha avantajlı olur. Özellikle uçucu külleri aktifleştirerek geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırmak için yüksek ısı kürü uygulamasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Joseph ve Mathew 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada uçucu kül kullanarak yaptıkları geopolimer betonun agrega içeriğinin beton mukavemeti üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) ve cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat (Na_2SiO_3) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Üretilen taze geopolimer betonlar 72 saat boyunca 60°C - 120°C'lik ısı kürüne tabii tutulmuşlardır. Kür süresi biten beton numuneler kalıplardan çıkarılıp 3, 7, 28 gün oda sıcaklığında, laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saat boyunca 100°C'de kür edilen 28 günlük beton numunenin basınç dayanımı 58 MPa olarak kaydedilmiştir. Joseph ve Mathew bu çalışmanın sonucunda geopolimer betonda erken dayanımın sağlanabilmesi için uygun sıcaklık ve kürlenme süresinin önemli olduğunu, 100°C de 24 saat kürlenmiş 28 günlük küp betonda numunede basınç dayanımının % 96,4'ünün 7 gün içinde elde edilebilir olduğunu raporlamışlardır. Ayrıca üretilen geopolimerlerde beton basınç dayanımı 100°C'ye kadar artış sağlarken 100°C üzerindeki sıcaklıklarda bu artış azalmaktadır. (Joseph & Mathew, 2012)

2.8.3. SiO₂ / Na₂O oranı

Geopolimer betonun basınç dayanımını etkileyen faktörlerden biri de SiO_2 / Na_2O oranıdır. Alkaliler ile silikatların oluşturduğu çözeltide SiO_2 / Na_2O oranı çözeltide çözünen alkali oranının polimerizasyon derecesini yüksek oranda etkiler. Bu da sentezlenmiş olan jel ürünlerin ve geopolimerlerin basınç dayanımlarını yüksek oranda etkiler. (Draft, 1985)

2.8.4. Donma - Çözülmenin olayları

OPC ile üretilen betonlarda olduğu gibi geopolimer betonlarda da düşük sıcaklık altında betondaki kapiler boşluklarda bulunan sular donar. Sıcaklık yükseldiğinde ise donan bu sular tekrar erir. Boşluklarda yer alan su donunca suyun hacmiyle birlikte boşluk hacminde de artış gözlemlenir. Bu donma – çözünme olayları sık sık tekrar ettiği takdirde boşlukların hacmi sürekli artar. Bu da betondaki boşluk miktarını artırır ve betonun su geçirgenliği artar. Bu olay betonun dayanımını ve dayanıklılığını azaltır.

2.8.5. Kullanılan alkali aktivatör oranı

Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) birlikte kullanıldıklarında geopolimer betonun mekanik performansında artış gözlemlenir. Geopolimer betonlarda kullanılan alkali aktivatörler betonun basınç dayanımını etkilediği gibi kimyasal ve fiziksel etkilere karşı davranışıyla betonun durabilitesini yani hizmet ömrünü de etkiler. Bu sebeple geopolimer betonlarda kullanılan alkali aktivatörlerin oranı (sodyum silikat/sodyum hidroksit) iyi belirlenmelidir. Daha önce yapılmış olan bir çalışmada sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının geopolimer betonun erken basınç dayanımını ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirdiği raporlanmıştır. Yani sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ile geopolimer betonun basınç dayanımı doğru orantılıdır (Hardjito, Wallah, Sumajouw, & Rangan, 2004)

Yapılan bir çalışmada (Niş, 2019), %50 F-tipi uçucu kül ile %50 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilmiş alkali aktif betonların basınç dayanımının değişimi farklı molarite ve farklı sodyum silikat/hidroksit oranının değişimi ile beraber incelenmiştir. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı olarak 1, 1.5, 2, ve 2.5 kullanılmıştır ve ayrıca deneylerde kullanılan sodyum hidroksit

molaritesi 6M, 10M, ve 14M olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca gecikmiş ısı kürü uygulaması da yapılarak gecikmiş ısı kürünün alkali aktive edilmiş betonların basınç dayanımlarını nasıl etkiledikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, alkali aktive edilmiş uçucu küllü ve cürüflü betonların basınç dayanımı sodyum silikat/sodyum hidroksit oranından, sodyum hidroksite molaritesinden ve gecikmiş ısı küründen oldukça çok etkilendiği rapor edilmiştir. Alkali aktive edilmiş beton numunelerdeki en yüksek basınç dayanımı 14 M sodyum hidroksite sahip numunelerde elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise 6 M sodyum hidroksite sahip alkali aktive edilmiş beton numunelerde elde edilmiştir. Benzer şekilde en yüksek ortalama basınç mukavemeti sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2 olan alkali aktive edilmiş beton numunelerde elde edilirken, en düşük ortalama basınç dayanımı ise sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2.5 olan alkali aktive edilmiş beton numunelerde elde edilmiştir. Araştırmacı, yüksek alkali oranının alkali aktive edilmiş betonların mekanik dayanımı için zararlı olabileceğini belirtmiştir. Bunlara ek olarak gecikmiş ısı kürü uygulamasının da alkali aktif edilmiş beton basınç dayanımlarını olumlu etkilediği belirtilmiştir. Gecikmiş ısı kürü uygulaması sonucu sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1.5 olan alkali aktive edilmiş betonların basınç dayanımındaki artış en çok %122 olarak elde edilmiştir. Gecikmiş ısı kürü sonucu alkali aktive edilmiş beton numunelerinde basınç dayanımındaki artışın % 43 ile en az olduğu durumun ise sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2.5 olarak üretilmiş alkali aktive edilmiş beton numuneler olduğu belirtilmiştir (Niş, 2019)

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde ekonomik ve çevre dostu olduğunu savunduğumuz geopolimer betonun üretimi için kullanılan malzemelerin özelliklerinden, geopolimer beton üretiminden, malzemelerin kullanım şeklerinden ve yapılan deneyin aşamalarından bahsedilmiştir.

KULLANILAN MALZEMELER

3.1.1. Agregalar

Yapılan çalışmada agrega olarak iri ve ince agrega kullanılmış olup ince agrega büyüklüğü 0 mm ile 4 mm arasında, iri agrega büyüklüğü de 4 mm ile 16 mm arasındadır. Çalışmada iki çeşit ince agrega kullanılmıştır. Bunlar kum ve kırma kumdur. Kırma kum kumdan daha büyük tane boyutuna sahiptir ancak her ikisinin de tane büyüklüğü 4 mm den daha küçüktür. Çalışmada iki çeşit de iri agrega kullanılmıştır. Bunlar No I ve No II dir. No I olan iri agreganın tane boyutu 4 mm ile 8 mm arasındayken No II olan iri agreganın tane boyutu 8 mm ile 16 mm arasındadır. Çalışmada kullanılan iri agrega Şekil 3.1’de verilmiştir. Çizelge 3.1’de agregaların özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan iri agregalar

Çizelge 3.1. Deney için kullanılan agregaların özellikleri

Özellikler	1 Nolu Agreg	2 Nolu Agreg
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 parçalanmayalara karşı direnci	%20	%20

3.1.2. Uçucu kül

Uçucu kül puzolanik özellik gösteren, termik santrallerin bacalarında biriken atık bir maddedir. Betonda çimentoyla veya alkali aktivatörler ile kullanıldığında bağlayıcılık özellik gösterirler. Uçucu küllerin bileşenleri termik santralde yakılan kömürün çeşidine göre değişir. İçeriğinde bulunan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO miktarları uçucu külün çeşidine göre değişir. Bu çalışmada F tipi düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül kullanılmıştır. Yani uçucu küller bitümlü kömürden elde edilmiştir ve içeriğinde bulunan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 toplamları %70'den fazladır. Ayrıca CaO yüzdesi %10'dan azdır. Şekil 3.2'de deneyde kullanılan uçucu kül gösterilmiştir. Çizelge 3.2'de ise kullanılan uçucu külün özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Deneyde kullanılan uçucu kül

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan uçucu kül özellikleri

Bileşenler	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. Yüksek fırın cürufu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu da uçucu kül gibi puzolanik özellik gösteren bir atık maddedir. Demir üretilirken yan ürün olarak meydana gelirler. Beton üretiminde dayanıklılığı arttırmak ve yüksek mukavemeti sağlamak için kullanılırlar. Atık madde olarak üretildiği için de çevre dostudur ve ekonomiktir. Yüksek fırın cürufunun içeriğinde de CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ bulunur. Şekil 3.3'de deneyde kullanılan yüksek fırın cürufu gösterilmiştir. Çizelge 3.3'de ise kullanılan yüksek fırın cürufunun özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.3. Deneyde kullanılan yüksek fırın cürufu

Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan 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 (g/cm ³)	2,95
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	5131

3.1.4. Alkali aktivatörler

Geopolimer beton üretirken kullanılan puzolanları aktif hale getirmek için alkali aktivatörler kullanılmaktadır. Bu çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve cam suyu dediğimiz sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Potasyum bazlı alkali aktivatörler sodyum bazlı alkali aktivatörlere kıyasla daha pahalıdır. Bizim bu çalışmayı yapmaktaki amaçlarımızdan biri de daha ekonomik bir beton üretmek olduğu için bu çalışma kapsamında sodyum bazlı alkali aktivatörler kullanılmıştır. Yapılan çalışmada sodyum hidroksit (NaOH)/sodyum silikat (Na_2SiO_3) oranı 1'dir. Kullanılan sodyum silikat (Na_2SiO_3) sıvı formdadır ve bir kimya firmasından alınmıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) ise katı formdadır ve bir kimya firmasından alınmıştır. Sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanırken sodyum hidroksit katısı 6 saat önceden suyla karıştırılır. Suda çözünen sodyum hidroksit suyla tepkimeye girer ve ısı ortaya çıkar. Çözelti laboratuvar ortamında soğumaya bırakılır. Şekil 3.4'de çalışmada kullanılan sodyum hidroksitin özellikleri verilmiştir. Çizelge 3.4'de ise çalışmada kullanılan sodyum silikatın özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.4. Deneyde kullanılan sodyum hidroksit (NaOH)

Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan sodyum silikat (Na_2SiO_3) özellikleri

Bileşen	Değer
% SiO_2	% 22 - % 25
% NaO_2	% 10 - % 12
Yoğunluk	1,39 g/cm ³
Görünüm	Renksiz, belirsiz, viskoz sıvı

3.1.5. Kimyasal katkı

Bu çalışmada geopolimer betonda S4 kıvamını yakalayabilmek için kimyasal bir katkı olan süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.5’de çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı gösterilmiştir. Çizelge 3.5’de ise çalışmada kullanılan kimyasal katkının özellikleri verilmiştir. Kimyasal katkı polikarboksilat ether bazlı süper akışkanlaştırıcıdır.



Şekil 3.5. Deneyde kullanılan kimyasal katkı maddesi

Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan kimyasal katkı maddesinin özellikleri

Özellikler	Kimyasal Katkı
Ürün Adı	YAPRHEO HYPER SCC 900
Renk	Opak
Durumu	Sıvı
Özgül Ağırlık	1,069 g/cm ³
Katı Madde Ağırlığı	31,93 %
Suda Çözünebilir Klorür	0,0376 %
pH Değeri	6,03

3.2. Deneysel Yöntem Ve Çalışmalar

3.2.1. Kalıplar

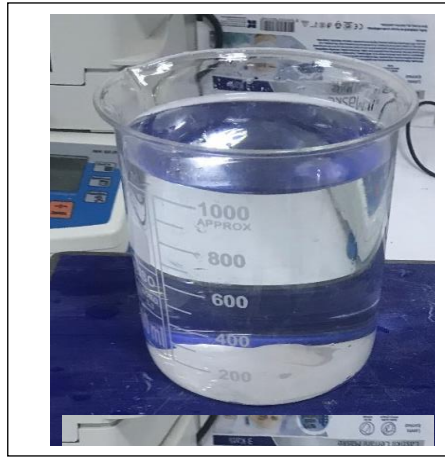
Yapılan çalışmada küp numuneler kullanılmıştır. Bu küp numunelerin boyutları 150 mm x 150 mm x 150 mm dir. Beton numuneler priz aldıktan sonra kalıptan rahatlıkla çıkması için yağlanır. Beton dökülmeden önce küp numunelerin içleri temizlenir ve kalıp yağı ile boş yer kalmayacak şekilde iyice yağlanır. Yağlanan kalıpların tabanına beton türünü ve numarasını karıştırmamak için önceden numune isimlerini belirten etiketler yerleştirilir. Priz alan betonları kalıptan ayırmak için kompresör yardımıyla kalıpların altındaki delikten hava verilir. Bu sayede betonlar hasar görmeden kalıplardan ayrılmış olur. Şekil 3.6'da yağlanan kalıplar gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Deneyde kullanılan kalıplar

3.2.2. Alkali aktivatörlerin hazırlanması

Yapılan çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Deneylerde sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı olarak 1 kullanılmıştır. Sodyum hidroksit suyla tepkimeye girdiği zaman yüksek ısı meydana gelir. Bu yüzden beton karışımına katılmadan 6 saat önce sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanmalı ve laboratuvar ortamında soğuması amacıyla bekletilmelidir. Aksi takdirde sıcak karışım erken priz sorununa yol açabilir. Şekil 3.7’de deneyde kullanılan sodyum hidroksit çözeltisi için kullanılan su ve sodyum hidroksit gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Sodyum hidroksit çözeltisi için kullanılan su ve NaOH

3.2.3. Karışımların hazırlanması

Geopolimer beton üretmek için yapılan çalışmada farklı puzolanlar kullanılarak üretilen betonların dayanımları ve sülfürik asit dayanıklılıkları karşılaştırılmıştır. Çalışmada puzolan olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Bağlayıcı miktarları ise 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 ve 600 kg/m^3 olmak üzere 3 farklı oran kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve soyum hidroksit 1/1 oranında birleştirilmiş ve karışıma ilave edilmiştir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı ise 0,45 olarak kullanılmıştır. Çizelge 3.6-3.11'de 1 m^3 beton üretiminde kullanılan malzeme miktarları yani bu çalışma için üretilen betonların reçeteleri verilmiştir. Bu çalışma kapsamında farklı bağlayıcıların beton dayanım ve dayanıklılığına olan etkileri detaylıca incelenmiştir. Üretilen betonlar ise çeşitli mekanik ve durabilite testlerine tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.6. FA100-400-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m^3)
İriagrega	No I	464
	No II	464
İnceAgrega	Kum	298
	Kırma Kum	298
Uçucukül		400
Kimyasalkatkı		9
Na_2SiO_3		90
NaOH		90
İlave Su		30

Çizelge 3.7. C20FA80-400-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m^3)
İriagrega	No I	464
	No II	464
İnceAgrega	Kum	298
	Kırma Kum	298
Uçucukül		320
Yüksekfıncürufu		80
Kimyasalkatkı		15
Na_2SiO_3		90
NaOH		90
İlave Su		30

Çizelge 3.8. FA100-500-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İriagrega	No I	382
	No II	382
İnceAgrega	Kum	246
	Kırma Kum	246
Uçucukül		500
Kimyasalkatkı		18
Na ₂ SiO ₃		112.50
NaOH		112.50
İlave Su		37.50

Çizelge 3.9. C20FA80-500-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İriagrega	No I	382
	No II	382
İnceAgrega	Kum	246
	Kırma Kum	246
Uçucukül		400
Yüksekfıncürufu		100
Kimyasalkatkı		24
Na ₂ SiO ₃		112.50
NaOH		112.50
İlave Su		37.50

Çizelge 3.10. FA100-600-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İriagrega	No I	300
	No II	300
İnceAgrega	Kum	193
	Kırma Kum	193
Uçucukül		600
Kimyasalkatkı		19.70
Na ₂ SiO ₃		135
NaOH		135
İlave Su		45

Çizelge 3.11. C20FA80-600-0.45-SS/SH:1 Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İriagrega	No I	300
	No II	300
İnceAgrega	Kum	193
	Kırma Kum	193
Uçucukül		480
Yüksekfırincürufu		120
Kimyasalkatkı		28.80
Na ₂ SiO ₃		135
NaOH		135
İlave Su		45

3.2.4. Geopolimer beton üretimi

Bu çalışmada geopolimer betonların üretiminde standart karıştırma yönteminden yararlanılmıştır. Betonun karıştırılacağı mikserin tabanına ilk olarak iri agregalar ve ince agregalar yerleştirilir ve mikser 2 dakika boyunca çalıştırılır. Bu sürede birbiriyle karışan agregaların üzerlerine alkali aktivatörler, ilave su ve kimyasal katkıları yani sıvı formunda olan malzemelerin yarısı eklenir ve mikser tekrar 2 dakika boyunca çalıştırılır. Daha sonra sıvıların kalanı da eklenir ve mikser tekrar 2 dakika çalıştırılır. Mikser yardımıyla iyice karıştırılıp homojen kıvamına yakın bir kıvam alan beton önceden temizlenip yağlanmış kalıplara kademeli bir şekilde yerleştirilir. Her bir kademe beton döküldükten sonra kalıplar şişlenir ve tokmaklanır. Bu sayede beton içerisinde hava boşluklarının oluşması engellenmiş olur. Kalıplara yerleştirilen betonların üst yüzeyleri bir mala yardımıyla düzeltilir. Bu sayede beton numunelerinin pürüzsüz bir yüzeyde olması sağlanır. Son olarak beton kalıpları düz bir zemin üzerine yerleştirilir ve üzerlerine naylon muşambalar serilir. Bu sayede beton içerisine eklenen alkali aktivatörlerin buharlaşması azaltılmış olur. Betonlar priz alana kadar kalıpların içinde bu şekilde bekletilirler. Şekil 3.8’de beton üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Beton döküm aşamaları

3.2.5. Kütleme

Üretilen ve kalıplara yerleştirilen betonlar priz alana kadar kalıplarda bekletilirler. Priz alıp sertleşen betonlar kalıplardan kompresör yardımıyla çıkarılır. Kalıpların altında bulunan deliklere kompresör ile hava verilir ve betonlar zarar görmeden kalıplardan çıkmış olur. Kalıptan ayrılan betonlar testlere tabi tutuluncaya

kadar laboratuvar ortamında düz bir bir zemin üzerinde bekletilirler. Betonlara su kürü uygulanmamış olup ısı (70°C ısıda fırın kürü) ve ortam (normal koşullar) kürüne tabii tutulmuştur. Buradaki amaç betonları normal şartlar altında ve ısıya tabii tutulmuş haliyle, zaman içindeki ve sülfürik asit etkisinde basınç dayanımlarını incelemektir.

3.2.6. Sülfürik asit çözeltisi

Laboratuvar ortamında ve ısı küre tabii tutulan beton numunelerinin ağırlıkları ölçülür ve daha sonra numunelerin isimleri karışmayacak bir şekilde (asit etkisiyle numunelerin isimleri silinebilir ve yüzey erozyonuna bağlı olarak numune isimleri kaybolabilir) boş kovaların içine yerleştirilir ve daha sonra sülfürik asit çözeltisi ayrı kaplarda hazırlanarak numunelerin bulunduğu kovalara dökülerek yerleştirilir. Sülfürik asit çözeltisi % 5 oranında sülfürik asit içerir. 28 gün boyunca sülfürik asit çözeltisinde bekleyen numuneler kovalardan çıkarılır ve 24 saat boyunca kurumak üzere düz bir zeminde bekletilir. Kuruyan numunelerin tek tek ağırlıkları ölçülür, fotoğrafları çekilir ve basınç dayanım testine tabii tutulurlar. Basınç dayanım testleri beton pres cihazıyla gerçekleştirilir. Şekil 3.9'da sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmış numuneler gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Beton numunelerinin %5 sülfürik asit çözeltilerinde bekletilmesi ve çıkarılması

3.2.7. Ağırlık değişimi

Beton numuneleri sülfürik asit çözeltisine konulmadan önce (kontrol betonları) ağırlıkları tek tek tartıldı. 28 gün sülfürik asit çözeltisinde bekletildikten sonra kurumması için kovalardan çıkarılan numuneler 24 saat sonra tekrar tartıldı. Şekil 3.10’da tartılan numune gösterilmiştir. Beton numunelerin sülfürik asit çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki ağırlık değişimi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\text{Ağırlığının yüzde değişimi} = [(Y-X)/X] \times 100$$

X=Başlangıçtaki ağırlık-numunenin asit öncesi ağırlığı

Y= Sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonra ağırlık-%5 asit sonrası ağırlık



Şekil 3.10. Geopolimer beton numunelerinin ağırlıklarının ölçülmesi

3.2.8. Basınç dayanım testi

Ağırlıkları ölçülen numuneler beton pres cihazına yerleştirilir ve betonların basınç dayanımları ölçülür. Betonlar tanımlanırken ve sınıflandırılırken basınç dayanımlarından yararlanır yani basınç dayanımı betonun özelliklerini gösterir. Bunun için basınç dayanımı betonlar için çok önemlidir. Beton pres cihazına yerleştirilen numuneler kuvvet(N)/alan(mm²) formülüyle MPa cinsinden basınç mukavemetleri ölçülmüştür. Deneyde kullanılan beton pres cihazı 2000 kN kapasitelidir. Beton basınç deneyleri AS1012.9-1999'a göre uygulanmıştır. Şekil 3.11'de basınç testine tabii tutulmuş beton numunesi gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Beton numunelerinin basınç dayanımlarının ölçülmesi

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM





BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada %100 uçucu kül ve %80 uçucu külle birlikte %20 yüksek fırın cürufu içerip alkali solüsyonlarla aktive edilen geopolimer betonların gecikmiş ısı (fırın) ve ortam kürüne tabii tutulduktan sonra %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılıp basınç dayanımları, ağırlık değişimleri ve görsel değişimleri karşılaştırılmış ve durabiliteleri incelenmiştir. Çalışmada bağlayıcı miktarları 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 ve 600 kg/m^3 olarak kullanılmıştır. Bu üç çeşit için bağlayıcı olarak hem %100 uçucu küllü (FA100-400, FA100-500, FA100-600) hem de %80 uçucu kül ile %20 yüksek fırın cürufu (C20FA80-400, C20FA80-500, C20FA80-600) kullanılmıştır. Kullanılan puzolanların bağlayıcılık özellik gösterebilmeleri için alkali aktivatörler (sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit 1/1 oranında birleştirilmiş ve karışıma ilave edilmiştir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı ise 0.45 olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen geopolimer betonlar 90 gün farklı kür koşullarında (ısı ve ortam) kür edildikten sonra tartılmıştır. Numunelerin bir kısmı asite maruz kalmadan (kontrol) basınç testlerine tabii tutulurken, bir kısmı da %5 sülfürik asit içeren çözeltide 28 gün bekletilmiştir. 28 gün sonunda numuneler asitten çıkarılıp görsel incelemeler için fotoğraflanmış, ağırlıkları ölçülmüş ve basınç dayanımları bulunmuştur.

4.1. Görsel İncelemeler

Yapılan çalışmalar sonucunda %100 uçucu kül ve %80 uçucu kül ile %20 yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer beton numunelerin bir kısmı 90 gün normal koşullarda kür edilirken bir kısmı da 88 gün normal koşullarda kür edilip 2 gün de ısı kürüne (70°C fırın kürü) tabii tutuldu. Kürleme işlemi biten numuneler 28 gün boyunca %5 sülfürik asit içeren çözeltide bekletildi. Sülfürik asit çözeltisinden çıkan numunelerin yüzeylerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.1 de gösterilmiştir. 28 gün boyunca sülfürik aside maruz kalan geopolimer beton numunelerin yüzeylerinde alçıtaşı oluşumuna bağlı beyaz lekeler oluşmuştur. Ayrıca yüzeyde çatlak oluşumları ve dökülmeler de gözlemlenmiştir. %5 sülfürik aside maruz bırakılan numunelerin yüzeylerinde meydana gelen erozyonun nedeni

kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ve kalsiyum monosülfoalüminatların kimyasal reaksiyonları neticesinde oluşan beyaz renkli alçı kristali oluşumdur. Oluşan bu beyaz lekeler ve bozulmalar geopolimer beton yüzeylerinin pul pul dökülmesine, beton yüzeyinde yumuşamalara ve zaman içinde de parça parça dökülmeye ve derin çatlaklara neden olur. Bu da geopolimer betonun durabilitesini bozmakta ve betonun hizmet ömrünü azaltmaktadır. Şekil 4.1’de gösterilen FA100-400-0,45, C20FA80-400-0,45, FA100-500-0,45, C20FA80-500-0,45, FA100-600-0,45, C20FA80-600-0,45 geopolimer beton numunelerin sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonraki durumları incelendiğinde bağlayıcı miktarı az olan FA100-400-0,45 ve C20FA80-400-0,45 numunelerde beyaz leke oluşumu ve çatlakların FA100-500-0,45, C20FA80-500-0,45, FA100-600-0,45 ve C20FA80-600-0,45 numunelerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi kullanılan puzolan miktarının artmasıyla birlikte tanecik inceliğinin de artması, porozite ve geçirgenliğin azalmasını ve buna bağlı olarak da durabilitenin arttığını, böylelikle bozulmaların, çatlak ve beyaz leke oluşumunun azaldığını söyleyebiliriz. Ayrıca numuneler görsel olarak denetlendiğinde, bağlayıcı olarak %80 uçucu kül %20 yüksek fırın cürufu içeren numunelerde gözlemlenen bozulmalar, bağlayıcı olarak % 100 uçucu kül içeren numunelerde gözlemlenen bozulmalardan daha fazladır. Yüksek fırın cürufunun içerdiği yüksek CaO sebebiyle beyaz leke ve çatlak oluşumuna bağlı bozulmaya oldukça müsaittir. Uçucu külün içeriğinde bulunan CaO miktarı çok düşük olduğu için de %100 uçucu kül içeren FA100 betonlardaki numune yüzeyinin bozulması C20FA80 numune yüzeylerinin bozulmasından daha azdır. Özellikle bağlayıcı miktarı 400 kg/m³ olan geopolimer betonlarda yüzey tamamen aşınmış ve agrega kopmaları gözlemlenmiştir. %20 öğütülmüş yüksek fırın cüruf içeren numunelerde çatlak oluşumu gözlemlenmiştir ve bu çatlak miktarı gecikmiş ısı kürü uygulanan cürüflü numunelerde daha fazla elde edilmiştir. Bu da cüruf içerikli numunelerde büzülme çatlaklarının oluştuğu anlamına gelmektedir. Daha sonra asit etkisine maruz kalmasından ötürü bu çatlaklar genişleyip numunelerin en dış kısmını olumsuz etkilemişlerdir. Numunelerde gecikmiş ısı kürü uygulanıp uygulanmaması numune yüzeyindeki bozulma miktarına önemli bir etkide bulunmamıştır çünkü hem %100 uçucu küllü hem de %20 cüruf ve %80 uçucu kül içeren numunelerde benzer bozulma oranları gözlemlenmiştir.

90 Gün Ortam Kürü	88 Gün Ortam Kürü + 2 Gün Isı Kürü
 <p data-bbox="327 683 837 739">FA100-400-S/H:1-0,45</p>	 <p data-bbox="933 683 1428 739">FA100-400-S/H:1-0,45</p>
FA100-400-0,45	FA100-400-0,45
 <p data-bbox="399 1400 837 1433">C20FA80-400-0,45</p>	 <p data-bbox="949 1377 1396 1411">C20FA80-400-0,45</p>
C20FA80-400-0,45	C20FA80-400-0,45



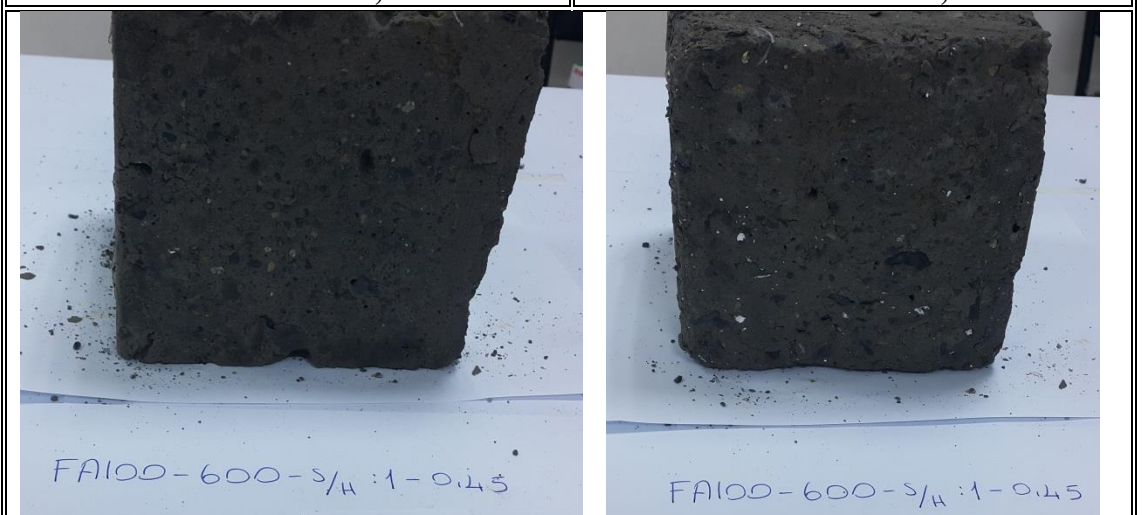
FA100-500-0,45

FA100-500-0,45



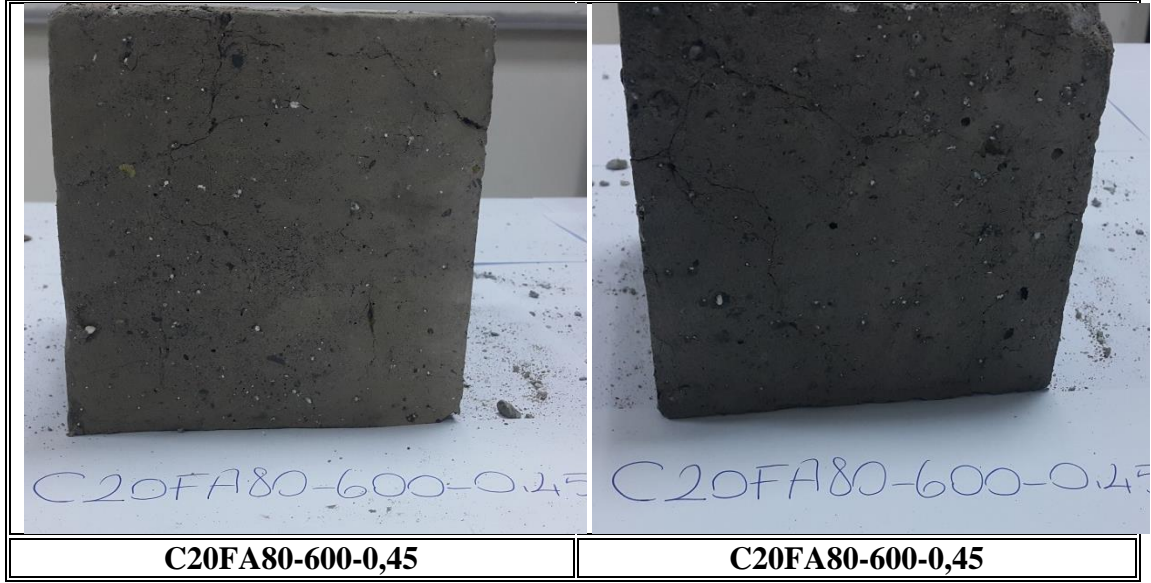
C20FA80-500-0,45

C20FA80-500-0,45



FA100-600-0,45

FA100-600-0,45

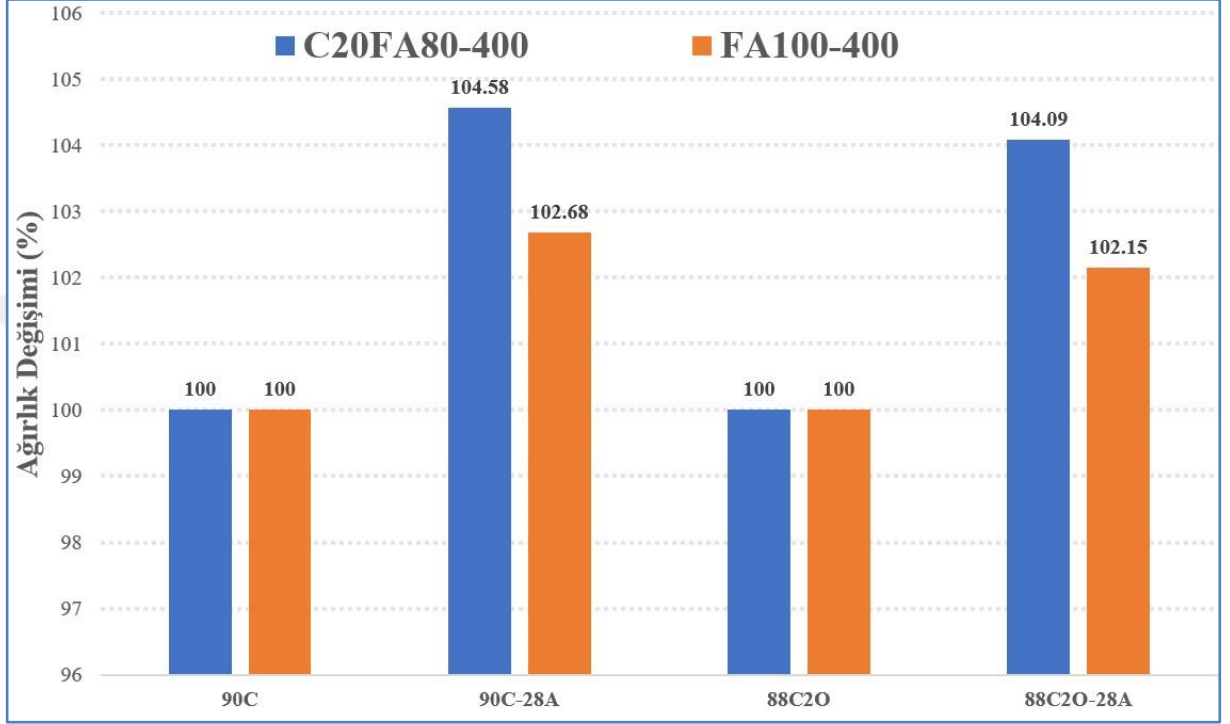


Şekil 4.1. 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin yüzeysel değişimlerinin incelenmesi

4.2. Ağırlıklardaki Değişim

Yapılan çalışma kapsamında üretilen geopolimer beton numunelerin ağırlıkları tek tek ölçülüp karşılaştırıldığında betonların ağırlıklarında değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişimler geopolimer beton numunelerinde bozulmalar olduğunu gösterir. Numunelerin %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra ağırlıklarındaki artışlar ve azalışlar üretilen betonun kimyasallar sonucu zarar gördüğünü gösterir. Şekil 4,2’de, Şekil 4,3’de ve Şekil’4,4’de verilen grafiklerde %5 sülfürik asit çözeltisinde 28 gün bekletilen numunelerin ağırlıklarındaki değişimler yüzdelik olarak gösterilmiştir. Grafikte 90C olarak ifade edilen, numunelerin 90 gün boyunca normal koşullarda yani laboratuvar ortamında kontrollü bir şekilde kür edildiğini gösterir. 90C-28A olarak ifade edilen, numunelerin 90 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 28 gün boyunca %5 sülfürik aside maruz bırakılmasını gösterir. 88C2O olarak ifade edilen, numunelerin 88 gün boyunca normal koşullarda kür edildikten sonra 2 gün de 70°C ısı kürüne yani fırın kürüne tabii tutulmasıdır. Son olarak 88C2O-28A ile ifade edilen ise 88 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 2 gün ısı kürüne tabii tutulan numunelerin kür işlemi bittikten sonra 28 gün boyunca %5 sülfürik asitte bekletildiğini gösterir. Grafikler incelendiğinde en fazla ağırlık değişimi %4,58’lik bir artışla C20FA80-400

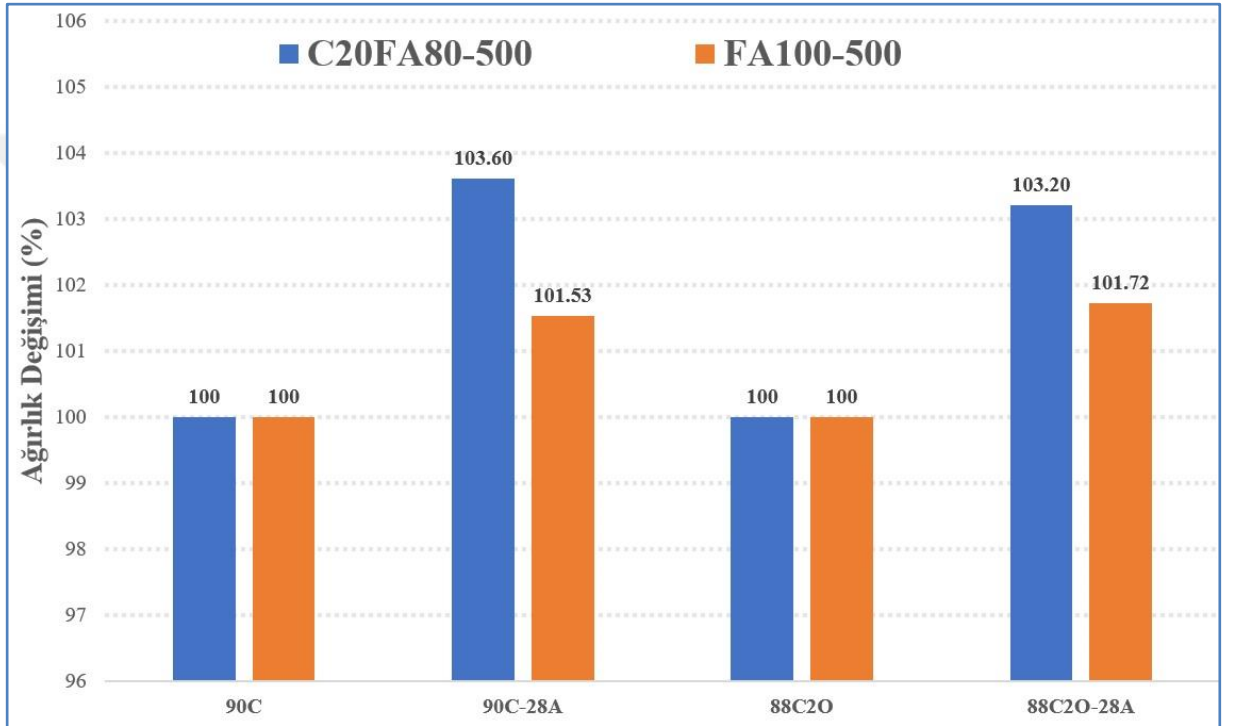
betonunda gözlemlenmiş, en az değişim ise %1,15'lik bir artışla FA100-600 betonunda gözlemlenmiştir. Bu da gösteriyor ki uçucu kül oranı artan numunelerin %5 sülfürik asit etkisindeki bozulması daha az oluyor. Bunun sebebi uçucu külde bulunan CaO miktarı az olduğu için aside karşı yüksek fırın cürufundan daha dayanıklıdır.



Şekil 4.1. C20FA80-400 ve FA100-400 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4,2'de verilen grafik incelendiğinde 90 gün normal koşullarda kür edilen numunelerin ve 88 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 2 gün ısı kürüne tabii tutulan numunelerin 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra ağırlıklarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Grafikte C20FA80-400 yani %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül kullanılarak ve FA100-400 yani %100 uçucu kül kullanılarak üretilen 400 kg/m³ bağlayıcı malzeme içeren numuneler baz alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Grafikteki verilere göre C20FA80-400 ve FA100-400 geopolimer betonlarında 90 gün normal koşullarda kür edilen numuneler 28 gün sülfürik aside maruz kaldıktan sonra ağırlıklarında sırasıyla %4.58 ve %2.68 oranında bir artış gözlemlenmiştir. 88 gün normal koşullarda 2 gün de ısı küründen sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine bırakılan C20FA80-400 ve FA100-400 geopolimer beton numunelerinin ağırlıklarında sırasıyla %4.09 ve %2.15 oranında artış

gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler detaylıca incelendiğinde C20FA80-400 yani yüksek fırın cürufu içeren numunelerin sülfürik asit etkisinde ağırlık değişimleri FA100-400 yani yüksek fırın cürufu içermeyen numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir. Ağırlıkta artmanın fazla olması bozulmanın daha fazla olduğu anlamına gelmektedir ve sonuçlar görsel denetim sonuçları ile uyumludur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmış ve gecikmiş ısı kürü uygulanmamış geopolimer beton numunelerin ağırlık değişimi sonuçları incelendiğinde ise her iki beton türünde de benzer ağırlık değişimleri elde edilmiştir.



Şekil 4.2. C20FA80-500 ve FA100-500 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4,3'de verilen grafikte C20FA80-500 yani %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül kullanılarak ve FA100-500 yani %100 uçucu kül kullanılarak üretilen 500 kg/m³ bağlayıcı malzeme içeren numunelere göre karşılaştırma yapılmıştır. C20FA80-500 beton numunesinde 90 gün normal koşullarda kür edilen beton numune 28 gün sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonra ağırlığında %3,60'lık bir artış gözlemlenmiştir. 88 gün normal koşullarda 2 gün de ısı küründen sonra 28 gün sülfürik aside bırakılan numunelerin ağırlıklarında ise %3,20'lik bir artış gözlemlenmiştir. FA100-500 betonu incelendiğinde ise 90 gün normal koşullarda kür edilen beton numuneler 28 gün sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonra ağırlığında

%1,53'lük bir artış gözlemlenmiştir. 88 gün normal koşullarda ve 2 gün ısı küründen sonra 28 gün sülfürik aside maruz bırakılan numunelerin ağırlıklarında ise %1,72'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu da gösteriyor ki C20FA80-500 betonunun sülfürik aside karşı direnci FA100-500 betonuna göre daha azdır. Grafiğe bakıldığında yüksek fırın cürufu içeren C20FA80-500 beton numunelerin %5 sülfürik asit etkisinde ağırlıklarının değişimi yüksek fırın cürufu içermeyen FA100-500 beton numunelerden daha fazla olduğu gözlemlenir. Benzer şekilde gecikmiş ısı kürü uygulanmış ve gecikmiş ısı kürü uygulanmamış geopolimer beton numunelerin ağırlık değişimi sonuçları incelendiğinde ise her iki beton türünde de benzer ağırlık değişimleri elde edilmiştir.



Şekil 4.3. C20FA80-600 ve FA100-600 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4,4'de verilen grafik incelendiğinde farklı koşullarda kür edilen geopolimer beton numunelerin %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakıldıklarında ağırlıklarında artış gözlemleniyor. C20FA80-600 yani %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül kullanılarak ve FA100-600 yani %100 uçucu kül ile üretilen 600 kg/m³ bağlayıcı içeren beton numunelere göre karşılaştırmalar yapılmıştır.90 gün boyunca normal koşullarda kür edilen C20FA80-600 geopolimer beton numunesi 28 gün sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonra ağırlığında %2,75'lik artış

gözlemlenmiştir. 88 gün normal koşullarda 2 gün de ısı yani fırın küründen sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine bırakılan numunelerin ağırlıklarında ise %2,69'luk artış gözlemlenmiştir. Normal koşullarda 90 gün kür edilen FA100-600 betonu incelendiğinde ise geopolimer beton numuneler 28 gün boyunca sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonra ağırlığında %1,46'lık artış gözlemlenmiştir. 88 gün normal koşullar altında ve 2 gün de ısı küründen sonra 28 gün boyunca %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan numunelerin ağırlıklarında ise %1,15'lik bir artış gözlemlenmiştir. Grafik incelendiğinde yüksek fırın cürufu katkılı C20FA80-600 geopolimer beton numunelerin %5 sülfürik asit çözeltisinde ağırlıklarının değişimi yüksek fırın cürufu içermeyen FA100-600 geopolimer beton numunelerden daha çok olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde gecikmiş ısı kürü uygulanmış ve gecikmiş ısı kürü uygulanmamış geopolimer beton numunelerin ağırlık değişimi sonuçları incelendiğinde ise her iki beton türünde de benzer ağırlık değişimleri elde edilmiştir.

Üretilen tüm geopolimer beton numunelerin %5 sülfürik asit çözeltisine maruz kaldıktan sonra ağırlıklarında artış gözlemlenmiştir. Aside maruz bırakılan numunelerin ağırlıklarında artış olması betonlarda bozulma meydana geldiğini gösterir. Geopolimer beton numunelerin ağırlıklarındaki artışın sebebi ise 28 gün boyunca maruz bırakıldığı çözelti kaynaklı asit emilimidir. Asit çözeltisine maruz bırakılan betonlarda çekme gerilmesini aşana kadar emilim kaynaklı ağırlık artışı gözlemlenir. Çekme gerilmesi aşıldığı takdirde ise asit etkisiyle zamanla numune yüzeylerinde çatlamlar ve dökülmelerden kaynaklı ağırlık kaybı gözlemlenebilir. Grafikler incelendiğinde geopolimer betonda kullanılan bağlayıcı miktarı arttıkça numunelerdeki ağırlık artışının azaldığı gözlemlenmiştir. C20FA80-600 ve FA100-600 betonlarındaki ağırlık kaybı en az olurken en fazla ağırlık kaybı C20FA80-400 ve FA100-400 betonlarında görülmüştür. Bu da gösteriyor ki kullanılan bağlayıcı miktarı ne kadar artarsa geopolimer betonun durabilitesi de o oranda artar ve betonun hizmet ömrü uzar. Ayrıca %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül kullanılarak üretilen C20FA80-400, C20FA80-500, C20FA80-600 betonlarda gözlemlenen ağırlık artışı %100 uçucu kül kullanılarak üretilen FA100-400, FA100-500, FA100-600 betonlardan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu da uçucu kül kullanımının geopolimer betonlardaki durabiliteyi arttırdığını gösterir. 90 gün normal koşullarda kür edilen betonların asit etkisindeki ağırlık artışı 88 gün normal koşullarda kür

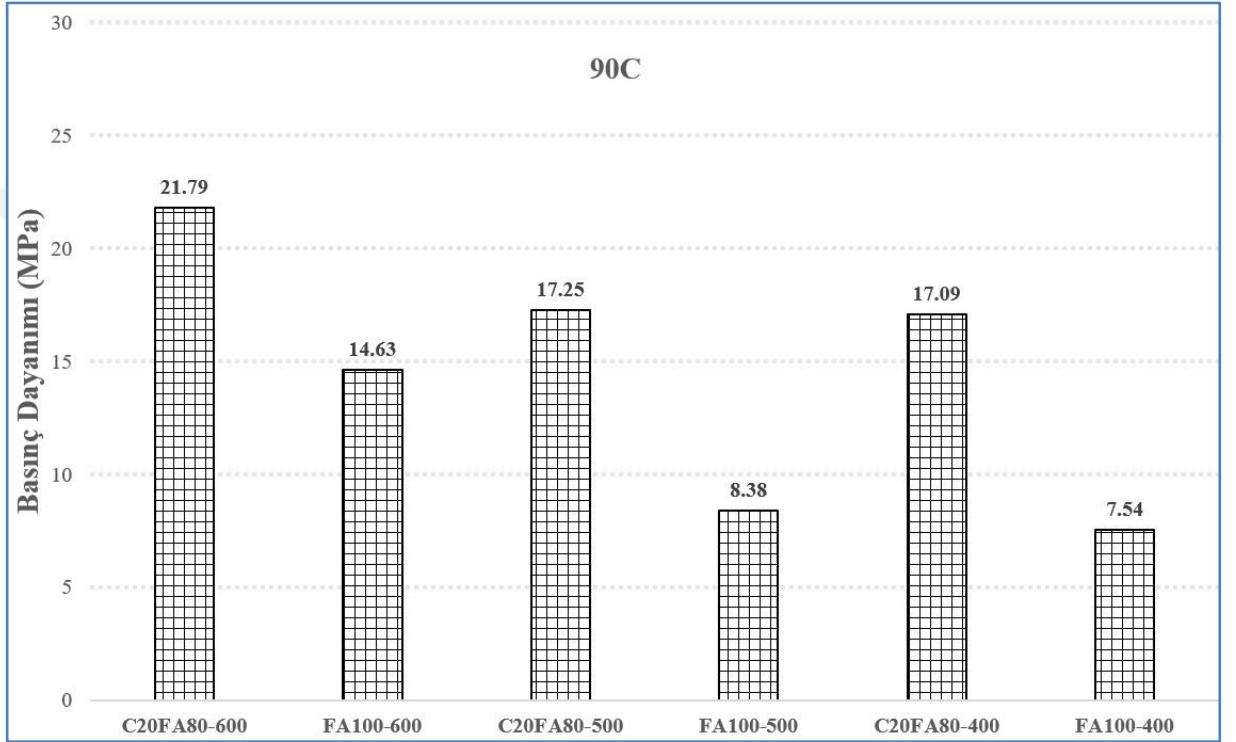
edilip 2 gün de ısı kürüne tabii bırakılan numunelerin asit etkisindeki ağırlık artışından genellikle daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yani ısı kürünün ağırlık artışında veya azalmasında çok fazla bir etkisi olmamıştır. Sonuçlara göre fazla miktarda atık malzemenin beton üretiminde değerlendirilmesi yaşadığımız çevremiz açısından önem arz etmektedir ve kullanılan bağlayıcının fazla olması betonda kullanılacak agrega ihtiyacını da azaltacağından önümüzdeki senelerde yaşanabilecek olası agrega kıtlığının ertelenmesini sağlayacaktır.

4.3. Basınç Dayanımındaki Değişimler

Yapılan çalışmalar neticesinde C20FA80-400, C20FA80-500, C20FA80-600, FA100-400, FA100-500, FA100-600 geopolimer betonların farklı kür koşullarından sonraki ve 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmasından sonraki basınç dayanımları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Betonların basınç dayanımları 2000 kN eksenel yük kapasitesine sahip beton basınç test cihazı ile belirlenmiştir. Basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde 150x150x150 mm küp numuneler kullanılmıştır.

Şekil 4.5’de bulunan grafikte üretilen C20FA80-600, FA100-600, C20FA80-500, FA100-500, C20FA80-400, FA100-400 geopolimer beton numunelerin 90 gün normal koşullarda kontrol altında kür edilmesinden sonraki basınç dayanımları gösterilmiştir. C20FA80-600 yani toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 21,79 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-600 yani toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı ise 14,63 MPa olarak ölçülmüştür. C20FA80-500 yani bağlayıcı miktarı toplamda 500 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 17,25 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-500 yani toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 8,38 MPa olarak ölçülmüştür. C20FA80-400 yani toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 17,09 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-400 yani toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı ise 7,54 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer beton 21,79 MPa ile C20FA80-600 olurken en düşük basınç

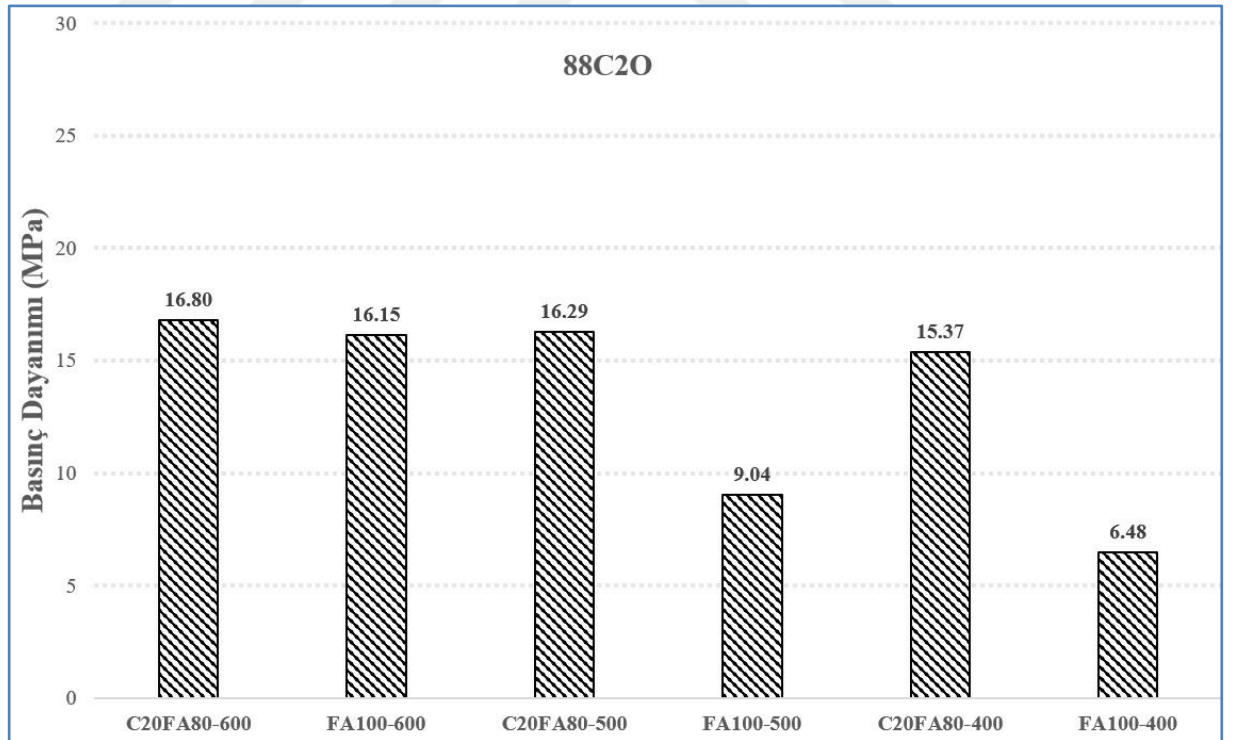
dayanımına sahip geopolimer beton ise 7,54 MPa ile FA100-400 olmuştur. Grafikteki veriler karşılaştırıldığında en yüksek basınç dayanımına sahip numuneler içeriğinde %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül bulunan C20FA80 betonlardır. Bunun sebebi yüksek fırın cürufunun içerisindeki kalsiyum oksit sayesinde geopolimer betonlarda N-S-A-H gel oluşumunun yanı sıra C-S-H jel oluşumundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca bağlayıcı miktarı arttıkça geopolimer betondaki basınç dayanımının arttığı da gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. 90 gün labarotuvan ortamında bekletilen numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

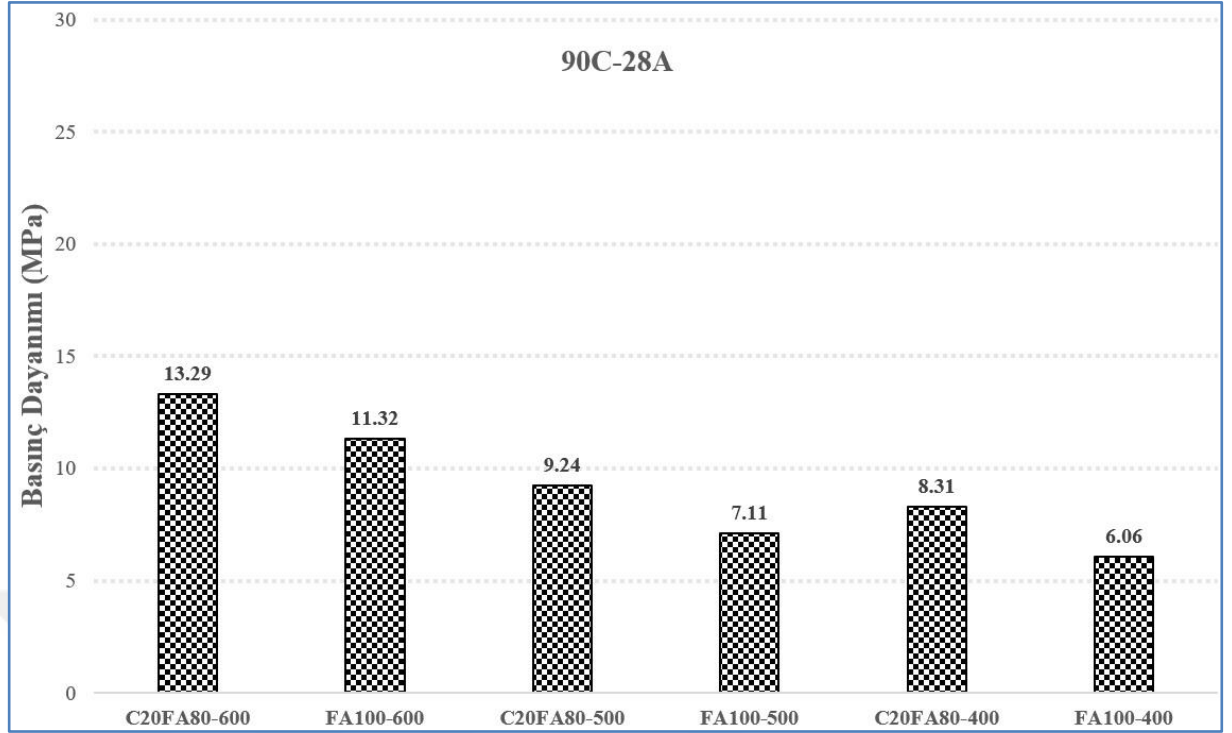
Şekil 4.6'da bulunan grafikte üretilen C20FA80-600, FA100-600, C20FA80-500, FA100-500, C20FA80-400, FA100-400 geopolimer beton numunelerinin 88 gün normal koşullarda kür edilip 2 gün de 70°C ısı kürüne tabii tutulmasından sonraki basınç dayanımları incelenmiştir. C20FA80-600 yani toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m³ olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 16,80 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-600 yani toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m³ olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı ise 16,15 MPa olarak ölçülmüştür. C20FA80-500 yani bağlayıcı miktarı toplamda 500 kg/m³ olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül

içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 16,29 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-500 yani toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 9,04 MPa olarak ölçülmüştür. C20FA80-400 yani toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 15,37 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-400 yani toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı ise 6,48 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer beton 16,80 MPa ile C20FA80-600 olurken en düşük basınç dayanımına sahip geopolimer beton ise 6,48 MPa ile FA100-400 olmuştur. Grafikteki veriler karşılaştırıldığında en yüksek basınç dayanımına sahip numuneler içeriğinde %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül bulunan C20FA80 betonlardır. Ayrıca bağlayıcı miktarı arttıkça geopolimer betondaki basınç dayanımının arttığı da gözlemlenmiştir ancak C20FA80 betonlarda bağlayıcı miktarı artmasıyla basınç değerlerindeki artış miktarı oldukça düşüktür. FA100 betonlarda ise bağlayıcı miktarı arttıkça basınç değerlerinde artış fazla olmuştur.



Şekil 4.5. 88C2O ortamındaki numunelerin basınç dayanımı sonuçları

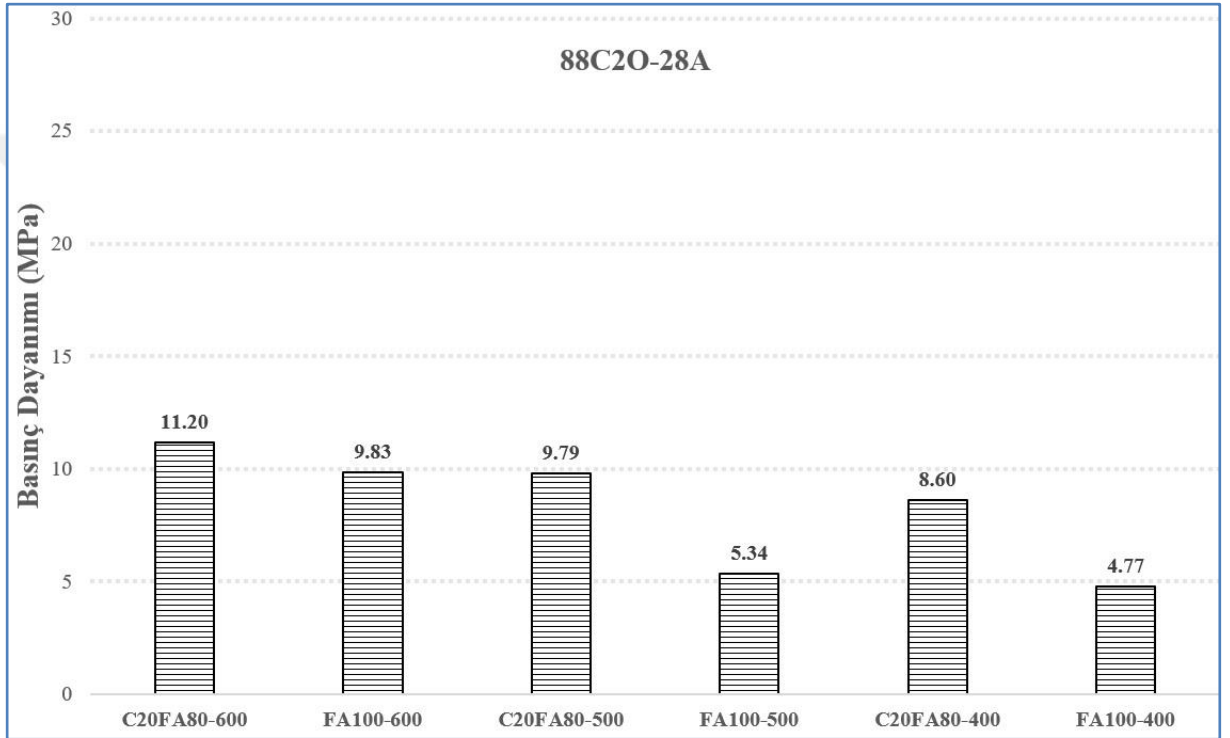
Şekil 4.7’de bulunan grafikte üretilen C20FA80-600, FA100-600, C20FA80-500, FA100-500, C20FA80-400, FA100-400 geopolimer beton numunelerin 90 gün normal koşullarda kür edilip 28 gün %5 sülfürik asit içeren çözeltilde bekletilmesinden sonraki basınç dayanımları gösterilmiştir. C20FA80-600 yani toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 13,29MPa olarak ölçülmüştür. FA100-600 yani toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı ise 11,32 MPa olarak ölçülmüştür. C20FA80-500 yani bağlayıcı miktarı toplamda 500 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 9,27 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-500 yani toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 7,11 MPa olarak ölçülmüştür. C20FA80-400 yani toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 8,31MPa olarak ölçülmüştür. FA100-400 yani toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı ise 6,06 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer beton 13,29 MPa ile C20FA80-600 olurken en düşük basınç dayanımına sahip geopolimer beton ise 6,06 MPa ile FA100-400 olmuştur. Grafikteki veriler karşılaştırıldığında en yüksek basınç dayanımına sahip numuneler içeriğinde %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül bulunan C20FA80 betonlardır. Ayrıca bağlayıcı miktarı arttıkça geopolimer betondaki basınç dayanımının arttığı da gözlemlenmiştir. Bu da gösteriyor ki yüksek fırın cürufu betonda dayanımı arttıran puzolanik bir malzemedir. Ayrıca geopolimer betonda kullanılan bağlayıcı miktarı ne kadar artarsa betonların durabilitesi de o kadar artmaktadır.



Şekil 4.6. 90C-28A ortamındaki numunelerin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.8’de bulunan grafikte üretilen C20FA80-600, FA100-600, C20FA80-500, FA100-500, C20FA80-400, FA100-400 geopolimer beton numunelerin 88 gün normal koşullarda kür edilip 2 gün de ısı kürü edilip 28 gün %5 sülfürik asit içeren çözeltide bekletilmesinden sonraki basınç dayanımları gösterilmiştir. C20FA80-600 yani toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 11,20 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-600 yani toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı ise 9,83 MPa olarak ölçülmüştür. C20FA80-500 yani bağlayıcı miktarı toplamda 500 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 9,79 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-500 yani toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 5,34 MPa olarak ölçülmüştür. C20FA80-400 yani toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan ve %20 yüksek fırın cürufu ile %80 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı 8,60 MPa olarak ölçülmüştür. FA100-400 yani toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan ve %100 uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımı ise 4,77 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer beton

11,20 MPa ile C20FA80-600 olurken en düşük basınç dayanımına sahip geopolimer beton ise 4,77 MPa ile FA100-400 olmuştur. Grafikteki veriler karşılaştırıldığında en yüksek basınç dayanımına sahip numuneler içeriğinde %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül bulunan C20FA80 betonlardır. Ayrıca bağlayıcı miktarı arttıkça geopolimer betondaki basınç dayanımının arttığı da gözlemlenmiştir ancak C20FA80 betonlarda bağlayıcı miktarı artmasıyla basınç değerlerindeki artış miktarı oldukça düşüktür. FA100 betonlarda ise bağlayıcı miktarı arttıkça betonların durabilitesi de o denli artmıştır.

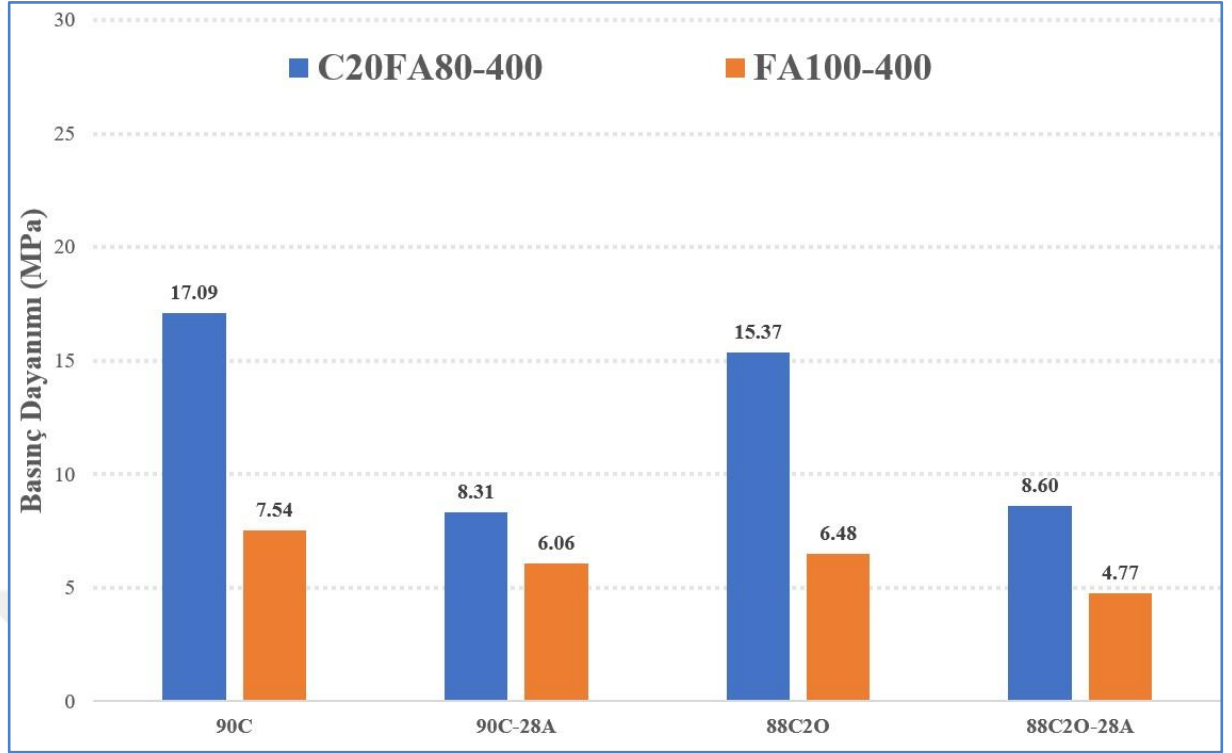


Şekil 4.7. 88C20-28A ortamındaki numunelerin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.9’da toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan, %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül içeren C20FA80-400 geopolimer betonu ile %100 uçucu kül içeren FA100-400 geopolimer betonlarının farklı koşullardaki basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Bu farklı koşullar arasında, 90 gün normal koşullarda kür edilip 28 gün de %5 sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımı sonuçları yer almaktadır. Ayrıca 88 gün normal koşullarda kür edilip 2 gün de ısı da kür edildikten sonraki, 88 gün normal, 2 gün de ısı küründen sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımları da Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

Şekil 4.9 sonuçları incelendiğinde 90 gün normal koşullarda kür edilen C20FA80-400 numunesinin basınç dayanımı 17,09 MPa olurken FA100-400 numunesinin basınç dayanımı 7,54 MPa olmuştur. 90 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan C20FA80-400 numunesinin basınç dayanımı 8,31 MPa olurken FA100-400 numunesinin basınç dayanımı 6,06 MPa olmuştur. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edilen C20FA80-400 numunesinin basınç dayanımı 15,37 MPa olurken FA100-400 numunesinin basınç dayanımı 6,48 MPa olmuştur. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan C20FA80-400 numunesinin basınç dayanımı 8,60 MPa olurken FA100-400 numunesinin basınç dayanımı 4,77 MPa olmuştur. Grafıklere göre en yüksek basınç dayanımı 17,09 MPa ile 90 gün normal koşullarda kür edilen C20FA80-400 geopolimer betonu olmuştur. En düşük basınç dayanımı ise 4,77 MPa ile 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan FA100-400 geopolimer beton numuneleri olmuştur.

Şekil 4.9'da ayrıca 400 kg/m^3 bağlayıcıya sahip geopolimer betonların gecikmiş ısı kürü uygulaması sonucu asit durabilitesini ne derecede etkilediği de incelenebilir. Gecikmiş ısı kürü uygulanmamış C20FA80-400 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 17.09 MPa değerinden 8.31 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %51 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmamış FA100-400 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 7.54 MPa değerinden 6.06 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %20 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan C20FA80-400 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 15.37 MPa değerinden 8.60 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %44 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmış FA100-400 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 6.48 MPa değerinden 4.77 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %26 olmuştur.



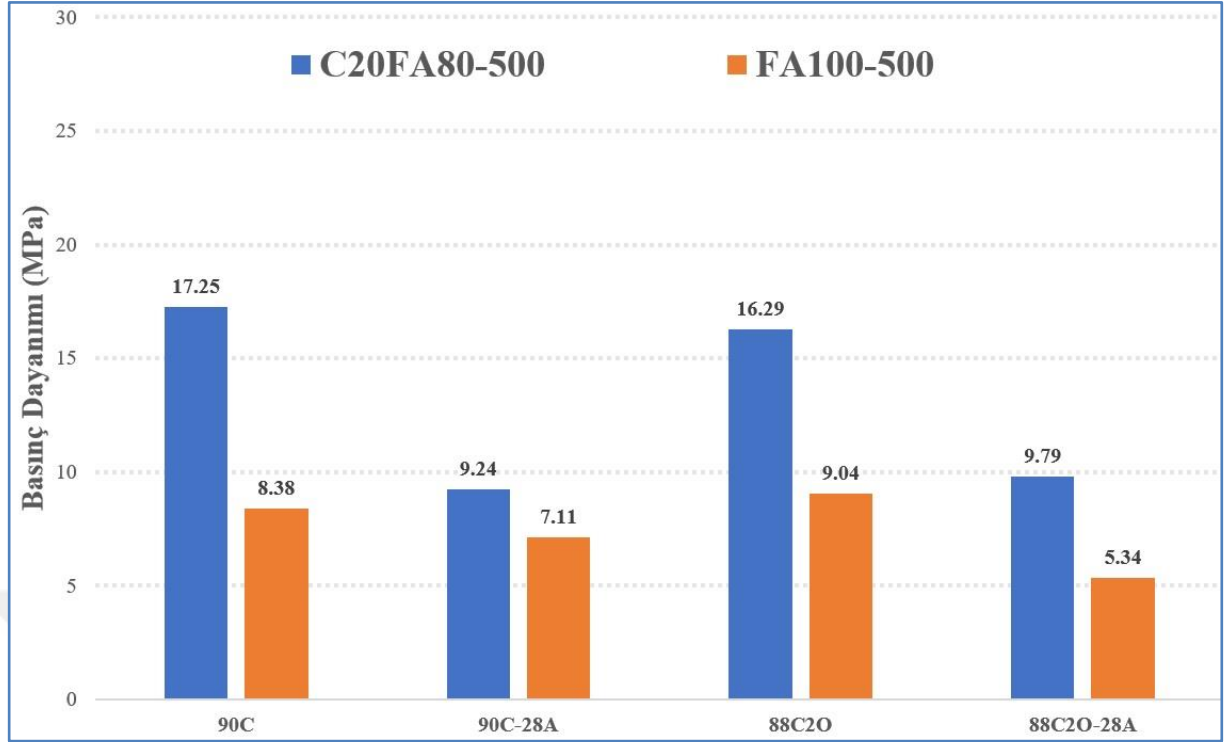
Şekil 4.8. C20FA80-400 ve FA100-400 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.10'da toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan, %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül içeren C20FA80-500 geopolimer betonu ile %100 uçucu kül içeren FA100-500 geopolimer betonlarının farklı koşullardaki basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Bu farklı koşullar arasında, 90 gün normal koşullarda kür edilip 28 gün de %5 sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımı sonuçları yer almaktadır. Ayrıca 88 gün normal koşullarda kür edilip 2 gün de ısı da kür edildikten sonraki, 88 gün normal, 2 gün de ısı küründen sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımları da Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Şekil 4.10 sonuçları incelendiğinde 90 gün normal koşullarda kür edilen C20FA80-500 numunesinin basınç dayanımı 17,25 MPa olurken FA100-500 numunesinin basınç dayanımı 8,38 MPa olmuştur. 90 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan C20FA80-500 numunesinin basınç dayanımı 9,24 MPa olurken FA100-500 numunesinin basınç dayanımı 7,11 MPa olmuştur. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edilen C20FA80-500 numunesinin basınç dayanımı 16,29 MPa olurken FA100-500

numunesinin basınç dayanımı 9,04 MPa olmuştur. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan C20FA80-500 numunesinin basınç dayanımı 9,79 MPa olurken FA100-500 numunesinin basınç dayanımı 5,34 MPa olmuştur. Grafiklere göre en yüksek basınç dayanımı 17,25 MPa ile 90 gün normal koşullarda kür edilen C20FA80-500 geopolimer betonu olmuştur. En düşük basınç dayanımı ise 5,34 MPa ile 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan FA100-500 geopolimer betonu olmuştur.

Şekil 4.10'da ayrıca 500 kg/m³ bağlayıcıya sahip geopolimer betonların gecikmiş ısı kürü uygulaması sonucu asit durabilitesini ne derecede etkilediği de incelenebilir. Gecikmiş ısı kürü uygulanmamış C20FA80-500 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 17.25 MPa değerinden 9.24 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %46 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmamış FA100-500 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 8.38 MPa değerinden 7.11 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %15 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan C20FA80-500 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 16.29 MPa değerinden 9.79 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %40 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmış FA100-500 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 9.04 MPa değerinden 4.77 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %41 olmuştur.



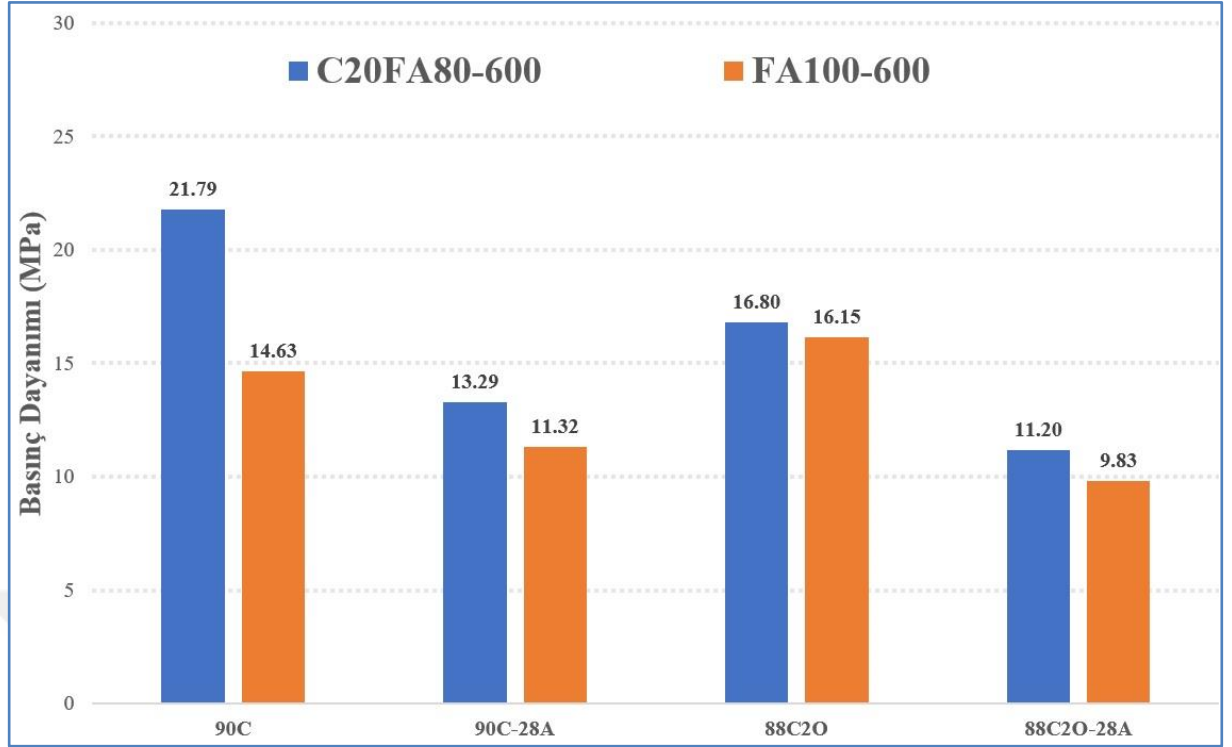
Şekil 4.9. C20FA80-500 ve FA100-500 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.11’de toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan, %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül içeren C20FA80-600 geopolimer betonu ile %100 uçucu kül içeren FA100-600 geopolimer betonlarının farklı koşullardaki basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Bu farklı koşullar arasında, 90 gün normal koşullarda kür edilip 28 gün de %5 sülfürik aside maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımı sonuçları yer almaktadır. Ayrıca 88 gün normal koşullarda kür edilip 2 gün de ısı da kür edildikten sonraki, 88 gün normal, 2 gün de ısı küründen sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımları da Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

Grafikler incelendiğinde 90 gün normal koşullarda kür edilen C20FA80-600 numunesinin basınç dayanımı 21,79 MPa olurken FA100-600 numunesinin basınç dayanımı 14,63 MPa olmuştur. 90 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan C20FA80-600 numunesinin basınç dayanımı 13,29 MPa olurken FA100-600 numunesinin basınç dayanımı 11,32 MPa olmuştur. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edilen C20FA80-600 numunesinin basınç dayanımı 16,80 MPa olurken FA100-600 numunesinin basınç

dayanımı 16,15 MPa olmuştur. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan C20FA80-400 numunesinin basınç dayanımı 11,20 MPa olurken FA100-600 numunesinin basınç dayanımı 9,83 MPa olmuştur. Grafiklere göre en yüksek basınç dayanımı 21,79 MPa ile 90 gün normal koşullarda kür edilen C20FA80-600 geopolimer betonu olmuştur. En düşük basınç dayanımı ise 9,83 MPa ile 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan FA100-600 geopolimer betonu olmuştur.

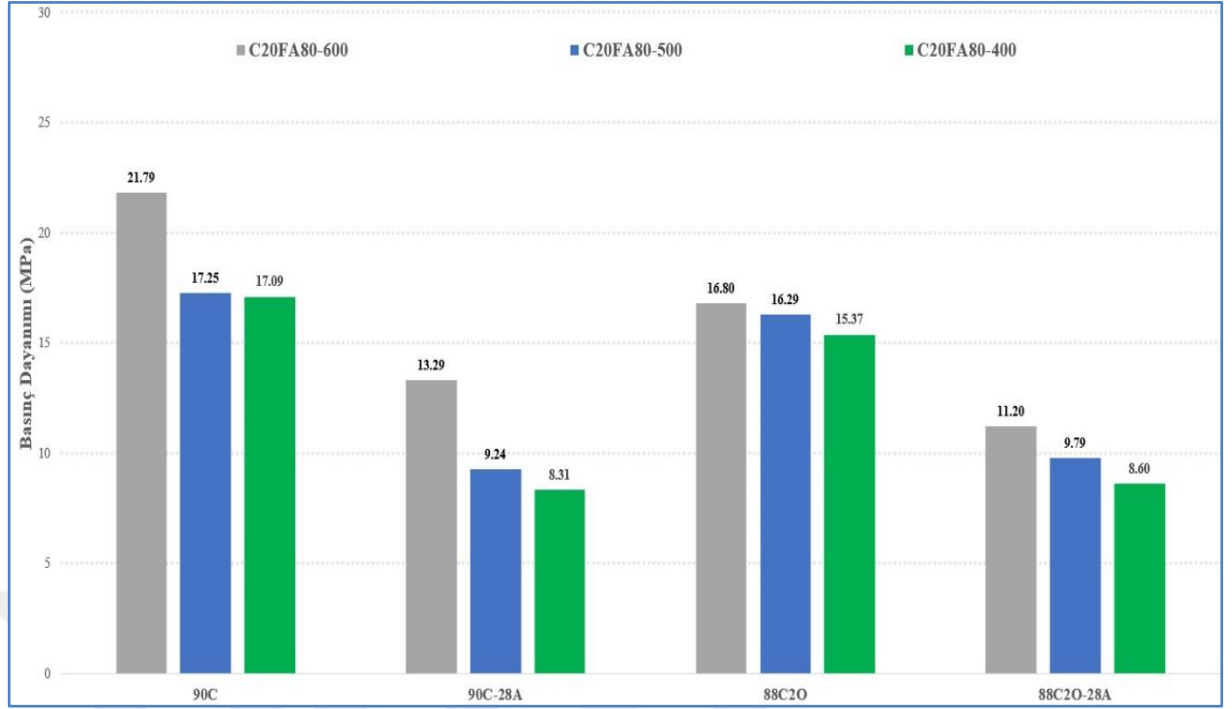
Şekil 4.11'da ayrıca 600 kg/m³ bağlayıcıya sahip geopolimer betonların gecikmiş ısı kürü uygulaması sonucu asit durabilitesini ne derecede etkilediği de incelenebilir. Gecikmiş ısı kürü uygulanmamış C20FA80-600 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 21.79 MPa değerinden 13.29 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %39 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmamış FA100-600 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 14.63 MPa değerinden 11.32 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %23 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan C20FA80-600 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 16.80 MPa değerinden 11.20 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %33 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmış FA100-600 numunelerinde asit etkisinden dolayı basınç dayanımı 16.15 MPa değerinden 9.83 MPa değerine düşmüştür ve dayanım kaybı yaklaşık %39 olmuştur.



Şekil 4.10. C20FA80-600 ve FA100-600 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.12’de bulunan grafikte içeriğinde bulunan bağlayıcıların %20’si yüksek fırın cürufu, %80’i uçucu kül olan C20FA80 geopolimer beton numunelerinin farklı bağlayıcı miktarlarındaki ve farklı koşullardaki basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Grafikte ilk olarak 90 gün normal koşullarda kür edilen beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan C20FA80-600 geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımı 21,79 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan C20FA80-500 geopolimer betonda ise 17,25 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan C20FA80-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 17,09 MPa olarak gözlemlenmiştir. 90 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisinde bekletilen beton numunelerin toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan C20FA80-600 geopolimer betonda basınç dayanımı 13,29 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan C20FA80-500 geopolimer betonda ise 9,24 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan C20FA80-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 8,31 MPa olarak gözlemlenmiştir. Aynı şartlarda kürlenip sülfürik aside maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Bu da sülfürik

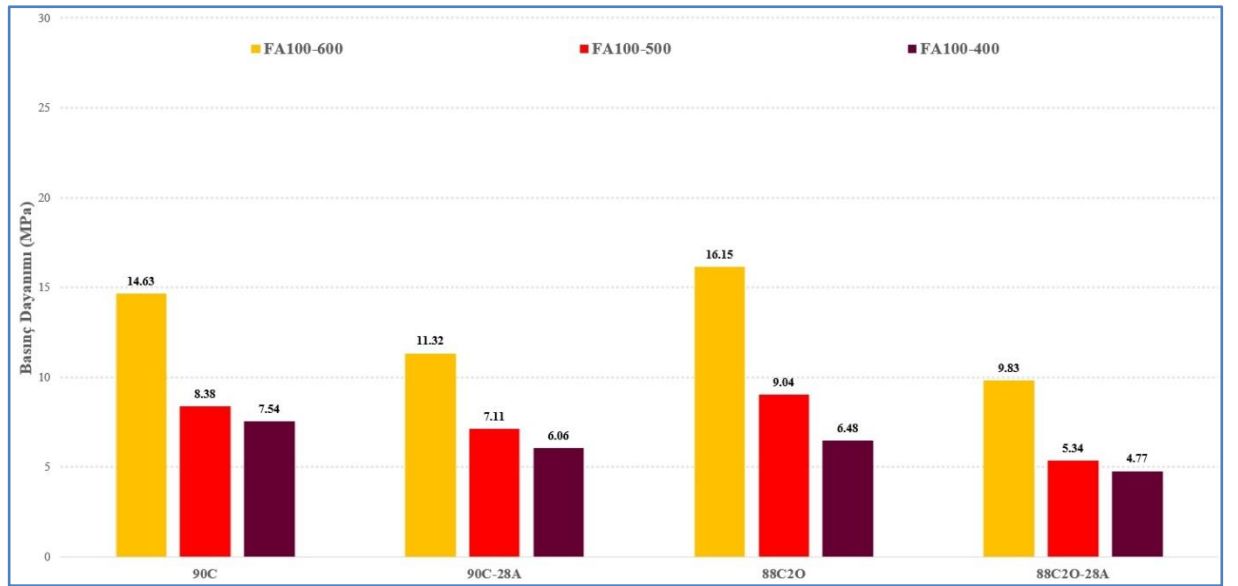
asidin betonlarda bozulmalar meydana getirdiğini gösterir. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan C20FA80-600 geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımı $16,80 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan C20FA80-500 geopolimer betonda ise $16,29 \text{ MPa}$ basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan C20FA80-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da $15,37 \text{ MPa}$ olarak gözlemlenmiştir. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan beton numunelerin toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan C20FA80-600 geopolimer betonda basınç dayanımı $11,20 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan C20FA80-500 geopolimer betonda ise $9,79 \text{ MPa}$ basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan C20FA80-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da $8,60$ olarak gözlemlenmiştir. Aynı şartlarda kürülen sülfürik aside maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu da sülfürik asidin geopolimer betonlarda bozulmalar meydana getirdiğini gösterir. Aynı şekilde 2 gün ısı kürüne tabii tutulan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları da normal kür edilen geopolimer beton numunelere göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Isı kürüne tabii tutulan betonlarda ısının beton yüzeylerde çatlaklar oluşturmaya ve buna bağlı olarak geopolimer betonun basınç dayanımında azalmaya neden olduğu söylenebilir.



Şekil 4.11. C20FA80 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.13’de bulunan grafikte içeriğinde bulunan bağlayıcıların %100’ü uçucu kül olan FA100 geopolimer beton numunelerinin farklı bağlayıcı miktarlarındaki ve farklı koşullardaki basınç dayanımları verilmiştir. Grafikte ilk olarak 90 gün normal koşullarda kür edilen beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan FA100-600 geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımı $14,63 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan FA100-500 geopolimer betonda ise $8,38 \text{ MPa}$ basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan FA100-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da $7,54 \text{ MPa}$ olarak gözlemlenmiştir. 90 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisinde bekletilen beton numunelerin toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan FA100-600 geopolimer betonda basınç dayanımı $11,32 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan FA100-500 geopolimer betonda ise $7,11 \text{ MPa}$ basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan FA100-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da $6,06 \text{ MPa}$ olarak gözlemlenmiştir. Aynı şartlarda kürlenip sülfürik aside maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Bu da sülfürik asidin betonlarda

bozulmalar meydana getirdiğini gösterir. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan FA100-600 geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımı $16,15 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan FA100-500 geopolimer betonda ise $9,04 \text{ MPa}$ basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan FA100-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da $6,48 \text{ MPa}$ olarak gözlemlenmiştir. 88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan beton numunelerin toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan FA100-600 geopolimer betonda basınç dayanımı $9,83 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan FA100-500 geopolimer betonda ise $5,34 \text{ MPa}$ basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan FA100-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da $4,77 \text{ MPa}$ olarak gözlemlenmiştir. Aynı şartlarda kürlenip sülfürik aside maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu da sülfürik asidin geopolimer betonlarda bozulmalar meydana getirdiğini gösterir. 2 gün ısı kürüne tabii tutulan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları normal kür edilen geopolimer beton numunelere göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Uçucu kül ısı sayesinde daha fazla aktif olduğu için ısı kürüne tabii tutulan FA100 geopolimer betonların basınç dayanımları diğer betonlara göre daha fazladır.



Şekil 4.12. FA100 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.14'de bulunan grafikte içeriğinde bulunan bağlayıcıların %100'ü uçucu kül olan FA100 ve içeriğinde bulunan bağlayıcıların %20'si yüksek fırın cürufu, %80'i uçucu kül olan C20FA80 geopolimer beton numunelerinin farklı bağlayıcı miktarlarındaki ve farklı koşullardaki basınç dayanımları verilmiştir. Grafikte ilk olarak 90 gün normal koşullarda kür edilen beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan C20FA80-600 geopolimer betonda basınç dayanımı 21,79 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan C20FA80-500 geopolimer betonda ise 17,25 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan C20FA80-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 17,09 MPa olarak gözlemlenmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan FA100-600 geopolimer betonda basınç dayanımı 14,63 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan FA100-500 geopolimer betonda ise 8,38 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan FA100-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 7,54 MPa olarak gözlemlenmiştir. Bu da gösteriyor ki yüksek fırın cürufu katkılı C20FA80 numunelerin basınç dayanımı %100 uçucu kül içeren FA100 numunelerden daha yüksektir. Ayrıca geopolimer betonlarda kullanılan toplam bağlayıcı miktarı arttıkça betonun basınç dayanımı da artar.

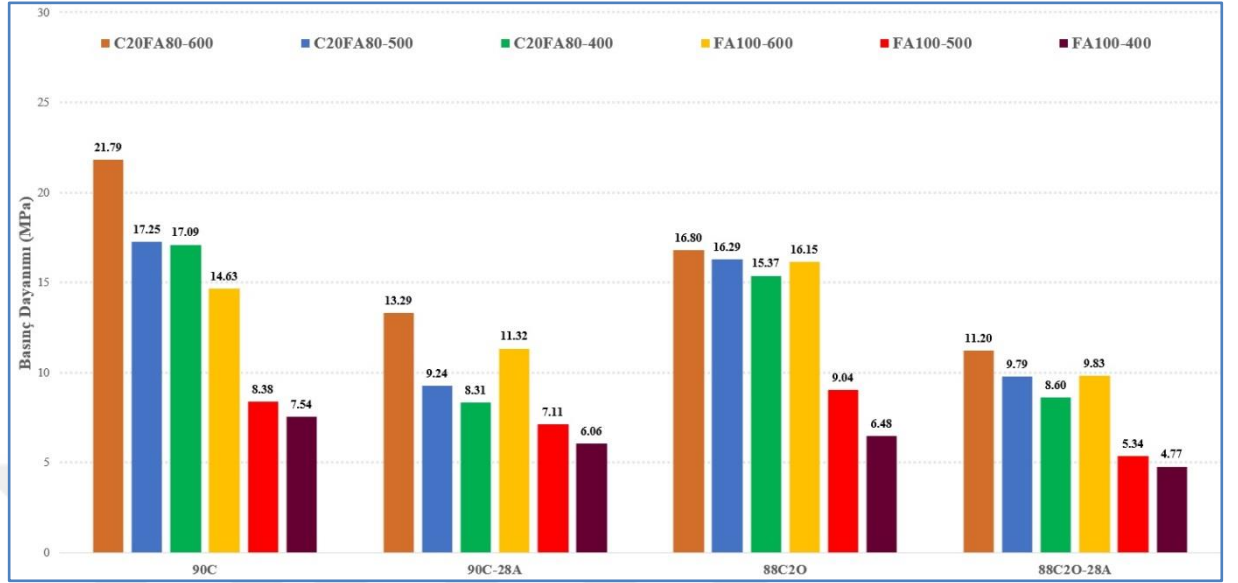
90 gün normal koşullarda kür edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisinde bekletilen beton numunelerin toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan C20FA80-600 geopolimer betonda basınç dayanımı 13,29 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan C20FA80-500 geopolimer betonda ise 9,24 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan C20FA80-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 8,31 olarak gözlemlenmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m^3 olan FA100-600 geopolimer betonda basınç dayanımı 11,32 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m^3 olan FA100-500 geopolimer betonda ise 7,11 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olan FA100-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 6,06 MPa olarak gözlemlenmiştir. Bu da gösteriyor ki %5 sülfürik asit çözeltisinde kalan numunelerde bozulmalar meydana geliyor ve beton basınç dayanımı düşüyor. Yüksek fırın cürufu katkılı C20FA80 numunelerin basınç dayanımı %100 uçucu kül

içeren FA100 numunelerden daha yüksektir. Ayrıca geopolimer betonlarda kullanılan toplam bağlayıcı miktarı arttıkça betonun basınç dayanımı da artar.

88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m³ olan C20FA80-600 geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımı 16,80 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m³ olan C20FA80-500 geopolimer betonda ise 16,29 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m³ olan C20FA80-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 15,37 olarak gözlemlenmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m³ olan FA100-600 geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımı 16,15 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m³ olan FA100-500 geopolimer betonda ise 9,04 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m³ olan FA100-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 6,48 MPa olarak gözlemlenmiştir. Bu da gösteriyor ki yüksek fırın cürufu katkılı C20FA80 numunelerin basınç dayanımı %100 uçucu kül içeren FA100 numunelerden daha yüksektir. Ayrıca geopolimer betonlarda kullanılan toplam bağlayıcı miktarı arttıkça betonun basınç dayanımı da artar.

88 gün normal koşullarda, 2 gün de ısı kürü edildikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılan beton numunelerin toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m³ olan C20FA80-600 geopolimer betonda basınç dayanımı 11,20 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m³ olan C20FA80-500 geopolimer betonda ise 9,79 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m³ olan C20FA80-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 8,60 olarak gözlemlenmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı 600 kg/m³ olan FA100-600 geopolimer betonda basınç dayanımı 9,83 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 500 kg/m³ olan FA100-500 geopolimer betonda ise 5,34 MPa basınç dayanımı görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m³ olan FA100-400 geopolimer betonun basınç dayanımı da 4,77 olarak gözlemlenmiştir. Bu da gösteriyor ki %5 sülfürik asit çözeltisinde kalan numunelerde bozulmalar meydana geliyor ve beton basınç dayanımı düşüyor. Yüksek fırın cürufu katkılı C20FA80 numunelerin basınç dayanımı %100 uçucu kül içeren FA100 numunelerden daha

yüksektir. Ayrıca geopolimer betonlarda kullanılan toplam bağlayıcı miktarı arttıkça betonun basınç dayanımı da artar.



Şekil 4.13. C20FA80 ve FA100 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında %100 uçucu kül (FA100-400, FA100-500, FA100-600) ile %80 uçucu kül ve %20 yüksek fırın cürufu (C20FA80-400, C20FA80-500, C20FA80-600) geopolimer betonlar sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ile üretilmiştir. Üretilen geopolimer beton numuneler hem laboratuvar ortamında hem de gecikmiş ısı (fırın) kürü uygulanarak %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılıp basınç dayanımları, ağırlık değişimleri ve görsel değişimleri karşılaştırılmış ve durabiliteleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 ve 600 kg/m^3 bağlayıcı miktarları, sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranı ise 1/1 oranında kullanılmış olup, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı olarak 0,45 seçilmiştir. Üretimi tamamlanan geopolimer beton numunelerin bir kısmı 90 gün normal (laboratuvar) koşullarında bir kısmı da 88 gün normal (laboratuvar) koşullarına ilave 70°C 'de 48 saat kür edilmiştir. Geopolimer numunelerin kontrol ortamında ve %5 sülfürik asit etkisinde numune fotoğrafları çekilmiş, ağırlıkları ölçülmüş ve basınç dayanımları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Numuneler görsel olarak denetlendiğinde, bağlayıcı olarak %80 uçucu kül %20 yüksek fırın cürufu içeren numunelerdeki bozulmalar, bağlayıcı olarak % 100 uçucu kül içeren numunelerdeki bozulmalardan (yüzeyde çatlak oluşumu, erozyon ve beyaz lekeler) daha fazladır. Her iki beton türünde de bağlayıcı miktarının artması ile numune yüzeyindeki bozulmalar gözle görülür şekilde azalmıştır. Ayrıca gecikmiş ısı kürü uygulamasının numune yüzeyindeki bozulma miktarında gözle görülür bir etkisi olmamıştır.

- Ağırlık değişimi sonuçlarına göre geopolimer betonda kullanılan bağlayıcı miktarı arttıkça numunelerdeki ağırlık artışının azaldığı yani bozulmanın azaldığı gözlemlenmiştir. C20FA80-600 ve FA100-600 betonlarındaki ağırlık kaybı en az olurken en fazla ağırlık kaybı C20FA80-400 ve FA100-400 betonlarında görülmüştür. Ayrıca gecikmiş ısı kürü uygulamasının numune ağırlıklarındaki değişimde katkısı belirgin değildir. Isı kürü uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde neredeyse benzer ağırlık değişimleri elde edilmiştir. Ayrıca %20 yüksek fırın cürufu ve %80 uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda

gözlemlenen ağırlık artışı %100 uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonlardan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

- Basınç dayanımı sonuçları karşılaştırıldığında ise %20 öğütülmüş yüksek fırın cürufu uçucu küllü betonların dayanımını artırmıştır. Sonuçlara göre gecikmiş ısı kürü uygulaması sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1 olan geopolimer beton numunelerin hem kontrol ortamında hem de 5% sülfürik asit etkisindeki basınç dayanımını azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca geopolimer betonlardaki dayanım ve durabilitenin bağlayıcı miktarının artmasıyla arttığı belirlenmiştir. En yüksek dayanım ve durabilite 600 kg/m^3 bağlayıcıya sahip C20FA80-600 numunelerinde elde edilirken, en düşük dayanım ve durabilite 400 kg/m^3 bağlayıcıya sahip FA100-400 numunelerinde elde edilmiştir. Özellikle uçucu küllü geopolimer betonlarda iyi bir basınç dayanımı ve iyi bir işlenebilirlik için en az 600 kg/m^3 uçucu kül kullanmak gerekebilir çünkü hem dayanım ve durabilite 500 kg/m^3 uçucu küllü geopolimer betonlara göre çok daha iyidir.

- İşlenebilirlik artışı için bağlayıcının %7.5 oranı kadar ilave su kullanımı geopolimer betonların işlenebilirliğini olumlu etkilerken, dayanımı oldukça fazla düşürmüştür. İlave su kullanımı geopolimer betonlarda bağlayıcı miktarının % 5 değerini aşmaması tavsiye edilmektedir.

- Sonuçlara göre fazla miktarda atık malzemenin geopolimer beton üretiminde değerlendirilmesi yaşadığımız çevremiz açısından oldukça önem arz etmektedir ve kullanılan bağlayıcının fazla olması betonda kullanılacak agrega ihtiyacını da azaltacağından önümüzdeki senelerde yaşanabilecek olası agrega kıtlığının ertelenmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- A., A., K., M., & E.N, K. (2008). "Taftan pozzolan-based geopolymer cement,". *IUST International Journal of Engineering Science* , vol. 19, no. 3, pp. 1-5.
- Akman, S. (1987). *Yapı Malzemeleri*. İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.
- Al Muhit, B., Foong, K., Alengaram, U., & Mohd, Z. (2013). Geopolymer concrete : A building material for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering* , 13(1).
- Andiç Çakır, Ö., Ramyar, K., Tuyan, M., Üzüm, O., & Boyacı, O. (2016). *Doğal ve atık malzemelerle geopolimer harç ve beton geliştirilmesi*. İzmir: 213M506 Nolu TÜBİTAK Projesi.
- Aruntaş, H. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* , 21, 1.
- Aydın, S. (2010). Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi . *Doktora Tezi* .
- Aygün, G. (2019). Yüksek fırın cürufu ve atık manyezit tozundan yapı malzemesi üretim koşullarının araştırılması ve özelliklerinin incelenmesi . *Yüksek lisans tezi* . Master's thesis, Sakarya Üniversitesi.
- Bakharev, T. (2005). *Resistance of geopolymer materials to acid attack* (Cilt 35 (4)). Cem. Concr. Res.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S., & Çapar, Ö. (2010). Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi. 2. *Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi* , 1 , 506- 513. Mersin.
- Bilim, C., & Atış, C. (2011). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri. *Politeknik Dergisi* , 14(2), 101-107.
- Çam, A. (2019). İnce agrega yerine kullanılan granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi* . Bartın: Master's thesis, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Davidovits, J. (2013). *Bir inceleme* .
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement. A review. 21 , 1-11. Geopolymer Institute, Technical papers.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*. France: Saint Quantin.
- Davidovits, J. (2013). GeopolymerInstitute, Teknik belgeler. *Bir inceleme* .

- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes. *Vol. 1*, s. pp. 131-149. Kiev: Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials.
- Doğangün, A. (2018). *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., & Ali, U. (2009). YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN ÇİMENTO YÜZEY ÖZELLİKLERİNE VE HİDRATASYONA ETKİLERİ. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* , 019, 47-58.
- Draft, R. (1985). ““Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, ””. *Mechanics of Composite Materials and Structures* , 18, 285-290.
- Duxson, P., Provis, J., Luckey, G., Mallicoat, S., Kriven, W., & Deventer, J. (2005). *Understanding The Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure And Mechanical Properties, Colloids and Surfaces A: Physicochem* (Cilt 269). Eng. Aspects.
- Duxson, P., Provis, J., Lukey, G., Mallicoat, S., Kriven, W., & Deventer, J. (2005). *Jeopolimer Kompozisyon Arasındaki İlişkiyi Anlamak*.
- Erdoğan, M. (2006). Türkiye döküm bentoniti potansiyeline genel bir bakış: Güncel durum, öngörüler ve sorunlar. *Kibited. 1(1)* , 1-5.
- Erdoğan, S. (2014). *Are geopolymers environmentally friendly?* Ankara: Materials of Construction Laboratory, METU Department of Civil Engineering, Ankara. Cement Concrete World.
- Erdoğan, T. (2015). *Beton*. Ankara: ODTÜ Yayınları.
- Görür, E. (2015). Alkali İle Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora Tezi* .
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H. (2005). Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı* , 19 , 419-423. Türkiye.
- Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D., & Rangan, B. (2004). ““on the development of fly ash-based geopolymer concrete., ””. *ACI Materials Journal* , 101, 6.
- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., & Zhang, G. (2013). *Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites* (Cilt 37). Cem. Concr. Compos.

- Hillerborg, A. (1985). “The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy GF of Concrete, ”. *Mechanics of Composite Materials and Structures* , 18, 291–296.
- Jiang, W., Silsbee, M., Breval, E., & Roy, M. (1997). *Alkali-activated cementitious materials in chemically aggressive environments* (Cilt 2). London: In: Young JF, editor. Mechanisms of chemically degradation of cement-based systems. E and FN SPON.
- Joseph, B., & Mathew, G. (2012). *Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete* (Cilt 19(5)). Scientia Iranica.
- Karateke, S. (2009). F Tipi Uçucu Kül Kullanılmış Betonların Kül Etkinlik Katsayıları. Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Keklik, U. (2020). Silis dumanı içeren geopolimer betonların% 5 sülfürik asit etkisinde durabilite performanslarının incelenmesi . Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kocataşkın, F. (1991). Betonun Dünü Bugünü Yarını. 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton. s: 23-42. Kardeşler Matbaası, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Kocataşkın, F. (1965). Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyoruz? İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası .
- Köken, A., Köroğlu, M., & Yonar, F. (2008). Atık Betonların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği. *Selçuk-Teknik Dergisi* , 7(1), 86-97.
- Li, Z., Ding, Z., & Zhang, Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology Conference Proceedings*, (s. 56).
- Niş, A. (2019). Compressive strength variation of alkali activated fly ash/slag concrete with different NaOH concentrations and sodium silicate to sodium hydroxide ratios. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies* , 4(2), 351-360.
- Onaran, K. (1995). *Kompozit Malzemeler. Malzeme Bilimi*. İstanbul.2014: Bilim Teknik Yayınevi.
- Özcan, U., & Güngör, S. (2019). Sürdürebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknolojisi* , 176-182.
- Palomo, A., Grutzeck, M., & Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research* , 29(8) , 1323-1329.
- Poon, C., Azhar, S., Anson, M., & Wong, Y. (2003). *Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures*” *Cement and Concrete Composites*.

retrieved from [http// www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 25, 83–89. adresinden alınmıştır

- POSTACIOĞLU, B. (1986). *Bağlayıcı Maddeler* (Cilt Cilt-1). İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi.
- Purdon, A. (1940). The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry* , 59, 191–202.
- Rajesh, A., Joe, M., & Mammen, R. (2014). Study of the Strength Geopolymer Concrete with Alkaline Solution of Varying Molarity,engineeringcivil.com. *IOSR Journal of Engineering* , 4, 19–24.
- Rangan, B. (2010). Proceedings of the International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete. 68-106. Bombay, Hindistan.
- Shi, C., & Qian, J. (1999). *High Performance Cementing Materials from Industrial Slags*. Resources, Conservation and Recycling.
- Stanton, T. (1940). “*Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate*” (Cilt Vol. 66). Proceedings, American Society of Civil Engineers.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C., & Sönmez, R. (2003). Agregatürünün betonun donma-çözülme dayanıklılığına etkisi. 3. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu* , 3-4.
- T. 3. (1981). Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Tangüler, M., Gürsel, P., & Meral, Ç. (2015). Türkiye'de uçucu küllü betonlar için yaşam döngüsü analizi. 9. *Ulusal Beton Kongresi* , 431-441.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2009). Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid. *International Journal of Natural Sciences and Engineering* , 77-82.
- Thomas, B., & Gupta, R. (2015). *Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber*. Journal of Cleaner Production. Elsevier Ltd, 102, pp. 78–87. doi: 10.1016/j.jclepro.
- Topçu, İ., & Canbaz, M. (2001). Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi* , 14(2), 11-23.
- TS 3526, T. 3. (1981). Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS 706 EN 12620, T. 7. (2009). Beton Agregaları. Türk Standartları Enstitüsü.

- TS EN 1907-2, T. E.-2. (2000). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Tuygun, C. (2002). *Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, A. (2009). *TÜRKİYE'DEKİ UÇUCU KÜLLERİN SINIFLANDIRILMASI VE ÖZELLİKLERİ*. ANKARA: TÇMB.
- Ulubeyli, G., & Artir, R. (2015). *Sustainability for Blast Furnace Slag: Use of some construction wastes* (Cilt 195). Procedia - Social and Behavioral Sciences.
- Wang, K., Shah, S., & Mishulovich, A. (2004). ‘‘Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKDfly ash binders’’ (Cilt 34). Cement and Concrete Composites.
- Xu, H., & Deventer, J. (2000). *The Geopolymerisation Of Alumino-Silicate Minerals*. Int. J. Miner. Process.
- Zareei, S., Ameri, F., Shoaiei, P., & Bahrami, N. (2019). *Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study* (Cilt 201). Construction and Building Materials.