

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**UÇUCU KÜL BAZLI GEOPOLİMER BETONLARDA
GECİKMİŞ ISI KÜRÜ ETKİSİNİN VE YÜKSEK FIRIN
CÜRUFU İKAMESİNİN DAYANIM VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Yüksek Lisans Tezi

SERDAR AKYILDIRIM

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi ANIL NİŞ

İstanbul, 2021

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Serdar AKYILDIRIM

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : Uçucu Kül Bazlı Geopolimer Betonlarda Gecikmiş Isı Kürtü Etkisinin Ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Dayanım Ve Durabilite Özelliklerine Etkileri

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

nabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Türü : Yüksek Lisans

Tezin Tarihi : 06.07.2021

Sayfa Sayısı : 81

Tez : Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

Danışmanları

Dizin Terimleri : Geopolimer beton, Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Türkçe Özet : Çimento kullanılmadan üretilen geopolimer betonlar standartlaşma aşamasına geldiğinde kullanımı yaygınlaşacak ve ülkemiz için hem enerji maliyetlerini düşürür hem de çevre dostu, daha az karbondioksit salınımından dolayı sürdürülebilir beton olarak nitelendirilebilecektir.

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

İmzası

Serdar AKYILDIRIM

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**UÇUCU KÜL BAZLI GEOPOLİMER BETONLARDA
GECİKMİŞ ISI KÜRÜ ETKİSİNİN VE YÜKSEK FIRIN
CÜRUFU İKAMESİNİN DAYANIM VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Yüksek Lisans Tezi

SERDAR AKYILDIRIM

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.

Serdar AKYILDIRIM

.../.../2021



İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Serdar AKYILDIRIM'ın "Uçucu Kül Bazlı Geopolimer Betonlarda Gecikmiş Isı Kürü Etkisinin Ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Dayanım Ve Durabilite Özelliklerine Etkileri" adlı tez çalışması, jürimiz 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

Durabilitenin dayanımla birlikte betonlarda aranmakta en önemli özellik olduğu bilinmektedir. Betonun durabilitesini etkileyip çevreci beton üretilmesi için çimentonun bir kısmı veya tamamının yerine yüksek fırın cürufu, uçucu kül tarzında mineral katkıları kullanılmaktadır. Fakat geleneksel Portland çimentosu yerine bu tip mineral katkıları kullanılsa da bu katkıların miktarı genellikle Portland çimento miktarından az olmaktadır. Geleneksel Portland çimentolarının üretimi esnasında hem CO₂ salınımı gerçekleşerek küresel ısınmaya davetiye çıkarmaktadır hem de yüksek enerji maliyetlerinden ötürü Portland çimentoya alternatif çevre dostu bağlayıcı malzemelerin kullanılması önem arz etmektedir. Bu tez çalışmamızda, %75 oranında uçucu kül ve %25 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile üretilmiş uçucu kül bazlı geopolimer betonlarda dayanım ve durabilite özellikleri irdelenmiştir. Bu amaçla üç farklı bağlayıcı miktarlarına (400 kg/m³, 500 kg/m³, 600 kg/m³) sahip uçucu kül bazlı geopolimer betonlarda ayrıca alkali solüsyon/bağlayıcı oranları olarak ise 0.45 ile 0.55 seçilerek hem bağlayıcı miktarının hem de alkali solüsyon/bağlayıcı miktarının dayanım ve durabilite özelliklerini ne derece etkilediği irdelenmiştir. Alkali solüsyon sodyum hidroksitle sodyum silikatın 1/2.5 oranlarında karışımından oluşmaktadır. Bunun yanı sıra üretilen uçucu kül bazlı geopolimer betonların hem laboratuvar ortamında hem de %5 sülfürik asit ortamındaki durabilitesi farklı zamanlarda incelenmiştir. Ayrıca numunelerinde bir kısmında gecikmiş ısı kürü uygulaması yapılarak gecikmiş ısı kürünün uçucu kül bazlı geopolimer numunelerde dayanım ve durabilite performanslarının incelenmesi hedeflerimiz arasından biridir. Deneylede numune yüzeyinin asit etkisiyle değişimi, ağırlık değişimi ve basınç mukavemeti değişimi gibi özellikler 150x150x150 mm küp numuneler kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar bağlayıcı miktarının, alkali solüsyon/bağlayıcı oranının ve gecikmiş ısı kürü uygulamasının geopolimer beton numunelerin dayanım ve durabilitesini oldukça etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu yeni nesil betonların yapıların inşaatında kullanılabilmesi amacıyla bu yeni nesil betonlar üzerinde çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, Geopolimer beton, Alkali Aktivatörler, Cüruf

SUMMARY

It is known that durability is the most important property to be sought in concrete together with strength. Mineral additives such as blast furnace slag and fly ash are used instead of some or all of the cement in order to affect the durability of concrete and produce environmentally friendly concrete. However, although this type of mineral additives are used instead of traditional Portland cement, the amount of these additives is usually less than the amount of Portland cement. During the production of traditional Portland cements, both CO₂ emission occurs and invites global warming, and it is important to use environmentally friendly binder materials alternative to Portland cement due to high energy costs. In this thesis, the strength and durability properties of fly ash-based geopolymer concretes produced with 75% fly ash and 25% ground granulated blast furnace slag were investigated. For this purpose, in fly ash-based geopolymer concretes with three different binder amounts (400 kg/m³, 500 kg/m³, 600 kg/m³), the alkali solution/binder ratios are selected as 0.45 and 0.55, and the amount of both binder and alkali solution/binder is selected. It has been examined to what extent it affects the strength and durability properties. The alkaline solution consists of a mixture of sodium hydroxide and sodium silicate in 1/2.5 ratios. In addition, the durability of the produced fly ash-based geopolymer concretes both in the laboratory environment and in the 5% sulfuric acid environment was investigated at different times. In addition, one of our goals is to examine the strength and durability performances of the delayed heat curing on fly ash-based geopolymer samples by applying delayed heat curing in some of the samples. In the experiments, properties such as the change of the sample surface with the effect of acid, change in weight and change in compressive strength were investigated using 150x150x150 mm cube samples. It was concluded that the amount of binder, alkali solution/binder ratio and delayed heat curing application affected the strength and durability of geopolymer concrete samples. In order to use these new generation concretes in the construction of structures, studies are needed on these new generation concretes.

Key Words: Fly Ash, Geopolymer concrete, Alkaline Activators, Dross

İÇİNDEKİLER

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

BİRİNCİ BÖLÜM

1.1. Tezin Amacı	8
2.2. Yapılan Çalışma Kapsamı	9

İKİNCİ BÖLÜM

GEOPOLİMER BETONUN BİLEŞENLERİ

2.1 Alkali Aktivatörler	10
2.1.1 Alkali-Sodyum Silikat	10
2.1.2. Alkali-Sodyum Hidroksit.....	11
2.1.3. Alkali-Kalsiyum Hidroksit	11
2.1.4. Alkali-Potasyum Hidroksit	11
2.2 Agregalar.....	12
2.3. Su	12
2.4. Uçucu Kül	13
2.5. F Tipi Uçucu Kül	14
2.5.1. Betonlarda Uçucu Kül Kullanımı	15
2.5.2. Uçucu Külde Isı Kürünün Önemi	15
2.6. Yüksek Fırın Cürufu	16
2.6.1. Betonda Cüruf Kullanımı.....	16
2.7. Betonlarda Durabilite Dayanıklılık İle İlişkili Bazı Kavramlar	16
2.7.1. Betonlarda Büzülme	16
2.7.2. Betonlarda Isı Dayanıklılıkları.....	17
2.8. Geopolimer Beton Özellikleri.....	17
2.9. Geopolimer Betonlarda Dayanımları Etkilemekte Olan Faktörler	18
2.9.1. Geopolimer Betonlarda Su Miktarları	18

2.9.2. Kür Koşulları İle Sıcaklık Etkisi.....	19
2.9.3. SiO ₂ / Na ₂ O Oranı.....	19

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	21
3.1.1. Alkali Aktivatörlerin Kullanımı.....	21
3.1.2. Agregasyon.....	22
3.1.3. Uçucu Kül	23
3.1.4. Yüksek Fırın Cürufu	24
3.1.5. Kimyasal Katkı	25
3.2. Deney Prosedürü	26
3.2.1. Küp Kalıplar	26
3.2.2. Alkali Aktivatör Hazırlığı.....	27
3.2.3. Karışım Hazırlanması	28
3.2.4. Geopolimer Betonların Üretimleri İle Dökümlerinin Yöntemleri.....	32
3.2.5. Kurlenme	34
3.2.6. Sülfürik Asit Solüsyon Hazırlıkları	34
3.2.7. Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim.....	35
3.2.8. Numunelerde basınç dayanım testi.....	36

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Görsel İnceleme	38
4.2. Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim	41
4.3. Geopolimer Numunelerin Basınç Dayanımları.....	45
SONUÇLAR	62
KAYNAKÇA	64

KISALTMALAR

°C	:	Santigrad
MPa	:	Megapaskal
Mm	:	Milimetre
Gr	:	Gram
M	:	Molar
NaOH	:	Sodyum Hidroksit
KOH	:	Potasyum Hidroksit
Na₂SiO₃	:	SodyumSilikat
C	:	Karbon
CaO	:	Kalsiyum oksit(SönmemişKireç)
SO₃	:	Kükürttrioksit
K₂O	:	Potasyumoksit
N	:	Azot
S	:	Kükürt
H	:	Hidrojen
SiO₂	:	SilisyumDioksit
Na₂O	:	SodyumOksit
Al₂O₃	:	AlüminyumOksit
MgO	:	MagnezyumOksit
Fe₂O₃	:	Demir (II) Oksit
Ca	:	Kalsiyum
H₂SO₄	:	Sülfürikasit
g/cm³	:	gram/santimetreküp
kg/m³	:	kilogram/metreküp
kg	:	kilogram
OPC	:	Normal Portland Çimento
AAEB	:	Alkali Aktive Edilmiş Beton
TSEN	:	Türk Standardları Enstitüsü

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 3. 1. Kullanılan sodyum silikat(Na_2SiO_3) aktivatörünün özelliği	21
Çizelge 3. 2. Çalışmada kullanılan agreganın özelliği.....	22
Çizelge 3. 3. F-tipi uçucu küllerin nitelikleri.....	24
Çizelge 3. 4. Çalışmadaki öğütülmüş yüksek fırın cürufu nitelikleri	25
Çizelge 3. 5. Çalışmada kullanılan kimyasal akışkanlaştırıcı özelliği.....	26
Çizelge 3. 6. S25FA75-400-0.45 geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarları.....	29
Çizelge 3. 7. S25FA75-400-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı	29
Çizelge 3. 8. S25FA75-500-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı	30
Çizelge 3. 9. S25FA75-500-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı	30
Çizelge 3. 10. S25FA75-600-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı	31
Çizelge 3. 11. S25FA75-600-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı	32

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 3. 1.Sodyum hidroksit (NaOH).....	22
Şekil 3. 2.Çalışmalarda Kullanılan iri ile ince agregalar	23
Şekil 3. 3.Çalışmada kullanılan F-tipi uçucu küller.....	23
Şekil 3. 4.Öğütülmüş fırın cürufu	24
Şekil 3. 5.Çalışmalarda kullandığımız küp kalıplar.....	26
Şekil 3. 6.Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması	27
Şekil 3. 7.Alkali aktivatörlerin hazırlanması	27
Şekil 3. 8.Beton üretim aşamaları	34
Şekil 3. 9.Numunelerimizin sülfürik asit solüsyonunda bekletilme ile çıkarılma işlemleri.....	35
Şekil 3.10.Sülfürik aside maruz kalan beton numunelerinin ağırlıklarının belirlenmesi	36
Şekil 3. 11.Küp numunelerin basınç testlerinin yapılması	37
Şekil 4. 1.Yüzey bozulmalarının farklı parametrelere göre değişmesi.....	41
Şekil 4. 2.S25FA75-600 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları	42
Şekil 4. 3.S25FA75-500 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları	43
Şekil 4. 4.S25FA75-400 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları	44
Şekil 4. 5.S25FA75-600 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	46
Şekil 4. 6.S25FA75-500 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	49
Şekil 4. 7.S25FA75-400 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	51
Şekil 4. 8.90 gün laboratuvar ortamında bekletilen numunelerinin basınç dayanımı sonuçları	52
Şekil 4. 9.90C-28A ortamında geopolimer numunelerinin basınç dayanımı sonuçları	53
Şekil 4. 10.88C2O numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	54
Şekil 4. 11.88C2O-28A numunelerinin basınç dayanımı sonuçları	56
Şekil 4.12.Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan beton numunelerinin basınç dayanımları.....	58
Şekil 4.13.0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip numunelerinin basınç dayanımı sonuçları	60
Şekil 4.14.0.45 ve 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip numunelerinin basınç dayanımı sonuçları	61

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince şahsıma maddi ve manevi desteklerini, inançlarını eksik etmeyen meslaktaşım Muhammet Zahit Atasoy'a her zaman yanımda olan ailem ile Aydanur Deli'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince etkisi olan Danışman hocamız Anıl Niş'e önce saygılarımı sonra teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Deneylerde yardımları dokunan Nursena Özbey ile Yunus Emre Olcay arkadaşlarıma ayrıyeten teşekkürlerimi sunarım.



GİRİŞ

Beton; çakıl, kum gibi maddelerin bir bağlama niteliği olan çimento ve su ile bir araya getirilmesinden ortaya çıkan inşaat yapı taşıdır. Beton dediğimizde aklımıza gelen öncelikle gri renkte sertleşmiş taştır. Bu yapı malzemesi, gri yahut ona yakın renkleri günümüzde bağlayıcı olarak kullanılmakta olan geleneksel Portland çimentosundan kaynaklanır. Çoğunlukla beton yapımında bağlayıcı olarak geleneksel Portland çimento kullansak da betona ayrıca çeşidi çok olan özellikler verebilmemiz için bağlayıcılık özelliği de olan değişik mineral katkıları kullanılmaktadır. Bu kullanılan katkılara örnek olarak silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. malzemeler verilebilir. Fakat günümüzde yapılarda standartları olan ve ülkemizde ve dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi geleneksel Portland çimentosudur (Hou, Ma, Zhu, & Li, 2014)

Günümüzde kullanımı yaygın olan ve aynı zamanda yapı malzemesi olan inşaat yapı malzemesi betondur. Beton kullanılmayan inşa hemen hemen yoktur. Kanal, baraj benzeri su yapılarının yanında bina, yol, köprü ve başka sanatsal yapıların inşaatında da beton kullanılır. Hem dekoratif malzeme hem de taşıyıcı eleman olarak beton karşımıza çıkmaktadır. Su geçirmezliği, dayanıklılığı, yangına karşı direnci, enerji verimliliği, ekonomik üretimi, yerinde üretim bakımından da öncelikle beton tercih sebeplerindedir. Beton üstelik hazır prekast yapı elemanlarında da kullanılmaktadır. Ayrıca nükleer radyasyona karşı koruma gerekli yerlerin inşaatında da beton malzemesi kullanılmaktadır. Yapıların çoğunluğunda kolayca şekil verilmesi bakımından, yaklaşık 50 sene neredeyse hiç tamirat gerektirmeden kullanılabilmesi bakımından, hem yangına hem de korozyona karşı diğer yapı malzemelerine göre çok yüksek durabilite göstermesi bakımından ve de üretiminde yerel malzemelerin kullanılması ve ithal ürünlere ihtiyaç olmaması bakımından beton malzemesi kullanılmaktadır. Yeryüzü ortalaması adına kişi başına düşen yıllık beton üretimini incelediğimizde bir ton civarlarında olduğunu görmekteyiz. (Hou, Ma, Zhu, & Li, 2014)

Beton malzemesinin yapılarda kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. Beton aşağı yukarı genel anlamda ve değişik şekillerde 5000 yıldan bu yana kullanılmaktadır. Eski Mısırlılar piramit yapımında kil harcını kullanmışlardır. Harç

kireçtaşı(CaCO_3) ısınması ile karbondioksit gazının (CO_2) çıkması sonucu elde edilmektedir. Elde etmiş olduğumuz kireç, agregayla birlikte hazırlanarak harç olarak kullanılmaktadır. Suyla birlikte sertleşen hidrolik çimentonun bulunması, Romalılara kadar uzanmaktadır. (Hou, Ma, Zhu, & Li, 2014)



BİRİNCİ BÖLÜM

Betonu oluşturun en önemli iki eleman çimento ve agregadır. Çimento yukarıda da değinildiği gibi bağlayıcı özellik gösteren bir malzemedir. Agregaya ise beton yapımında en çok kullanılan malzemedir. Gerek diğer malzemelere göre daha ekonomik olması, gerek sünme ve büzölmeye karşı yüksek dayanıklılık, gerek yüksek aşınma dayanımı gibi özelliklere sahip olması bakımından agregaya çok önemli bir malzemedir. Agregalar genellikle ince ve iri agregaya olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. İnce agregaya olarak kırma kum ve kum gibi 4 mm boyutundan daha küçük malzemeler kullanılırken, iri agregaya olarak 4 mm'den başlayıp 32 mm boyutuna kadar çıkabilen iri agregalar kullanılmaktadır. Bu agregaların betonda homojen olarak kullanılması için hem iri hem de ince agregaların belirli oranlarda karıştırılıp kullanılması gerekmektedir. Aksi takdirde hep ince agregaya kullanılarak üretilen betonlar çok yüksek su ihtiyacına gerek duyarken, sadece iri agregaya kullanımı da betonda boşluk oranının artmasına ve dolayısıyla beton basınç mukavemetinin azalmasına sebep olurlar. Ayrıca betonda elverişli karışım oranlarının seçilmesi; işlenebilme, dayanıklılık, mukavemet, ekonomi gibi faktörlerin dengeli bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. Betonun içindeki hava miktarı da önemli bir etkidir. Normal betonlarda bu miktar yaklaşık olarak % 0,3-3 civarlarındadır. Çimentonun cinsine ve agreganın durumuna göre çok fazla karışım oranı hesap yöntemi önerilmiştir. Fakat beton ile agregaya kullanılan beton kalitesinde en önemli iki faktördür (Doğangün, 2018)

Betonda karışım işi genellikle ilk önce agregaların karıştırılıp homojen bir dağılıma sahip oluncaya kadar ve ardından çimento eklenip homojen bir karışım elde edildikten sonra sıvı karışım olarak ise su ve kimyasal katkıların ilave edilmesiyle üretilmektedir. Günümüzde betonların üretimini beton santrali otomatik olarak yapmaktadır. Özellikle kontrollü olarak günümüzde kullanılan santral betonları hem dayanım hem de durabilite bakımından ilkel yöntemlerle üretilen betonlara göre çok daha iyi performans gösterirler. Çünkü ilkel yöntemlerle üretilen betonlarda göz kararı malzemeler tartılıp karıştırılırken aynı yapı elemanları içerisinde bile beton dayanımı farklılıklar göstermektedir. Şu an ise alınan sıkı tedbirler sayesinde

yapıların inşaatında tüm yapı elemanları benzer basınç dayanımı göstermektedir (Doğangün, 2018)

Betonda dayanıklılık dış etkilere kaynaklanan agresif elemanlara karşı dirençtir. Bu saldırgan elemanların içeriğindeki zararlı iyonlar betonu oluşturan bileşenlerinde tepkimeye girmesi muhtemeldir. Örnek olarak alkali-agrega ve ya alkali-silika tepkimesi gibi. Bu gibi zararlı iyonlar betonun durabilitesini olumsuz olarak etkilemektedir (Baradan & Aydın, 2013)

Beton farklı zarar veren etkileşimler altında bazı kimyasal reaksiyonlar sebebiyle elinde bulundurduğu mukavemeti zamanla kaybedebilir. Bunun sonucunda yapı elemanları maruz kalmış gerilmelere dayanamayarak ya kısmen zarar görebilir veya tamamen göçme tehlikesiyle karşı karşıya kalabilir (Baradan & Aydın, 2013)

Betonda standart basınç dayanımına bakınca 28 gün süresince 20(+/-2)°C sıcaklıkta, kireçli suda kür edilmiş %100 nemli ortamda, boyu 300 mm, çapı 150 mm silindirik numunelerin aksel basınç altında göstermiş olduğu dayanımı şeklinde tanımlanır. Günümüzde istediğimiz beton dayanımına sahip farklı beton türleri de üretilip kullanılmaktadır. Bu tip betonların arasında kütle betonları, hafif beton, ağır beton, kendiliğinden yerleşen beton, Öngerilmeli veya prefabrik beton, ardgermeli beton gibi uygulamalar günümüzde çoğunlukla kullanılmaya başlamıştır. Her farklı beton türünün geleneksel betonlara göre olumlu veya olumsuz yönleri mevcuttur. Örneğin hafif beton üretimi ile yapı ağırlığı azalarak daha az deprem kuvveti gelmekte fakat betonların basınç dayanımı azalmaktadır. Benzer şekilde kendiliğinden yerleşen beton türünde ise beton kendi ağırlığıyla vibrasyon uygulamadan donatıların arasından geçerek döküm tamamlanır fakat geleneksel betonlardan daha çok maliyetli olduklarından dolayı kullanımı çok yaygın değildir (Baradan & Aydın, 2013)

Betonun başlıca kullanım alanlarını inceleyecek olursak baraj yapımında, konutlarda, ticari yapılarda, yollar veya araba yollarında, deniz inşaatında, menfezler ve kanalizasyon, temeller, çitler, beton köprüler de kullanılır. Beton da kullanım alanlarına bakınca kullandığımız yere göre dayanıklılığı ve türü önemlidir. Son olarak beton binaların önemli parçası olduğundan, inşaat malzemesi olarak ahşaptan daha fazla kullanılır. (Bureau of Reclamation, 1963)

Çimento, kalker ile kil taşları karıştırılarak yüksek sıcaklıkta pişirildikten müteakiben öğütülmesinden elde edilmiş olan bağlayıcı bir malzemedir tanımı yapılır. Çimentonun suyla tepkimesinden sonra ilk önce hamur kıvamına gelen beton zamanlar sertleşerek katı hale dönüşmeye başlar. Priz olarak adlandırılan bu süreç, betonun döküldüğü ortamın koşullarına bağlı olmaktadır. Normal koşullar neticesinde katılma 1 ve 10 saat arasında gerçekleşmektedir. Genelde ortam sıcaklığının artması ile priz süreci hızlanmakta ve beton daha hızlı sertleşerek dayanım kazanmaya başlamaktadır. Katılma ile birlikte betonun dayanım kazanma durumu başlar. Fakat betonun tamamen dayanım kazanması çok uzun zaman alan bir süreç olmakta birlikte çoğu beton dayanımının %70'inden fazlasını 28 gün sonunda elde etmektedir. Bazı durumlarda bu basınç dayanımının gelişimi %90 oranının üzerine de çıkmaktadır (Murashev, Sigalov, & Baikov, 1968) Bu dayanımın tamamlanması farklı çimento türlerine bağlıdır. Ülkemizde şu an betonların yapımında kullanılmakta olan çimento türleri aşağıda verilmiştir.

Geleneksel Portland Çimentosu:Yapılarda en sık kullanılan türdür. Belli oranlardaki kil ve kalker taşının karıştırılıp pişirilmesinden takiben klinkerde öğütülmesiyle elde edilir (Özgür, 1996)

Yüksek Fırın Cüruf Çimentosu: Granüle yüksek fırın cürufuyla Portland çimentosu klinkeri karıştırılmasıyla az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesiyle elde edilmiş olur (Özgür, 1996)

Traslı Çimentolar: Traslar, alüminli ile silisli maddeleri kapsayan volkanik tüflerdir. Kendiliğinden bağlayıcı olmamalarına karşın, betonda kireçle bağlayıcı özelliği kazanırlar. (Ekinci, 2018)

Katkılı Çimento: Portland çimentosu klinkerin ağırlık olarak en çok %19'nun puzolanik malzemeye değiştirilmesi ile alçı taşı eklenmesiyle elde edilmiş olur. (Ekinci, 2018)

Diğer Çimentolar: Yukarıdaki çimento tiplerine ek olarak çeşitli çimento türleri bulunmaktadır. Bunlardan bazılarını, erken dayanımı yüksek çimento, sülfata dayanıklı çimento, uçucu küllü çimento, süper sülfat çimentosu olarak sıralayabiliriz (Ekinci, 2018)

Geopolimer: Geopolimer adı ilk kez 1978 senesinde Davidovits tarafından inorganik moleküllerinin meydana getirdiği yapılar için kullanılmıştır. Davidovits dile getirdiği günden bu yana, bu alanda bir hayli araştırmalar yapılmıştır.(Maraş, 2013) (Kantarıcı, 2013) Ayriyeten özdeş tip malzemeler için farklı adlar kullanılmıştır. Alkali bağlı seramikler, düşük sıcaklıklı alümin silikatlar ile hidroseramik gibi adlar en fazla kullanılanlardandır. (Rahier, Van Mele, Biesemans, Wastiels, & Wu, 1996) (Palomo & dela Fuente, 2003) Geopolimerlerin kullanımı ile özellikleri, mineraloji, organik kimya, fizokimya ile mühendislik gibi bir hayli bilimsel alanlarda günümüz de dâhil araştırılmaktadır. Geopolimerlerin uygulama kapsamaları çok fazladır. Bunlar bilhassa, yangına dayanan uzun ömürlü malzemelerde, çimentoda, dekoratif taşlı eserlerde ile beton üretimlerinde değerlendirilmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Davidovits, 2008)

Geopolimer betonu incelediğimizde kuruma rötresi bakımından dar ile ince yapı elemanları ile kullanıma elverişli olan, Portland çimento betonlarına nazaran donatı korozyonuna karşılık daha dirençli, hidrasyon ısısı daha az hem de asit saldırıları karşısında da daha dirençli olduğunu görmekteyiz. Bu özellikleriyle amorf cam yapıdaki geopolimer betonun bilhassa baraj, istinat duvarı yapımında, öngermeli köprü yapımında, betonarme su tankı, yangın ile ısıya uzun ömürlü yapı malzemelerinde, nükleer atıkların giderilmesinde, sağlığa zararlı kimyasallar ile kimyasallara dayanıklı ürün yapımında gerekli betonlarda kullanılma olasılığının yüksek olduğu tahmin edilmektedir (Lloyd & Rangan, 2010)

Kısaca geopolimer betonlar bilhassa yangın direnci, kimyasal direnç ve ısıl direnci de Portland çimentolu betonlara nazaran üstünlüklere sahiptir. Bu nitelikleriyle maden, askeri, atık yönetimi ile inşaat benzeri alanlarda uygulanma potansiyeline sahiptirler. (Aleem & Arumairaj, 2012)

Geopolimer Betonun Kimyası: Alkali aktive edilmiş olan bağlayıcılarının oluşumu ile geopolimerizasyon meydana gelmekte ve beton dayanım kazanmaktadır. Bununla beraber hammaddenin yanında alkali aktivatörlere tipi ve miktarı geopolimer betonların basınç dayanımlarının gelişiminde çok önemli rol oynamaktadır. Glukhovsly yaptığı çalışmada alkali aktivasyon mekanizmasının hammaddenin daha az istikrarlı yapısal bileşiklerine ayrılması ile ve yoğunlaşmış

yapıların meydana gelmesi arasındaki etkileşimi sonucunda oluşmuş olan reaksiyonlardan meydana geldiğini belirtmiştir (Yonar, 2014)

Atis çalışmalarını incelediğimizde; Portland çimentosunu kullanmayıp karşılık olarak, cürufu aktive edebilecek yepyeni bağlayıcı maddelerin kullanılmasının etkilerini araştırdıklarını görmekteyiz. Alkali aktivatör adına sodyum karbonat, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmıştır. 7 günlük, 28 günlük ile 90 günlük eğilmede çekme dayanımlarını, basınç dayanımlarını test etmiş ve 6 aylık bu süredeki kuruma rötrelerinin teker teker incelenmiş olduğunu görmekteyiz. Bununla beraberce, hâlihazırdaki numune hidrasyonlarının gelişmelerinde incelenmelerde bulunulmuştur. Priz başlangıç ve bitiş zamanları normal Portland çimentoyla kıyaslanmıştır. Sıvı halde bulunan sodyum silikat ile sodyum hidroksitle alkali aktive edilmiş numunelerin daha küçük bir zamanda; sodyum karbonat uygulanarak alkali aktive edilmiş numunelerde ise normal Portland çimentosu ile eş priz zamanda olduğu rapor edilmiştir. Silis modülünün yükselmesiyle sıvı akışkan durumda olan sodyum silikatların basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımına etkilerine çok yüksektir. Sodyum silikat ile sodyum hidroksitle etkinleştirilmiş durumdaki cüruf ile meydana getirilmiş harçlar ile sodyum karbonat ile meydana getirilmiş harçların taze hallerinin Portland çimentoya benzer olduğu belirtilmiştir. (E. & C.D, 2016)

Reddy tarafından yapılmış olan çalışmasında, geopolimer malzemelerin Roma antik tiyatrolarını ve Mısır piramitlerini incelediğimizde kullanılmış olan malzemelerin nitelikleri ile çokça benzer olduğunu belirtmiştir. Geopolimerlerde, kullanılmakta olan normal Portland çimentosu benzeri dayanımlar sağlanmakta fakat uçucu küllü geopolimer beton numunelerde C-S-H(kalsiyum silika hidratları) oluşturmadığı bilinmektedir. Ancak buna rağmen uçucu küllerin alümina, silika vb. aktivatörler yardımıyla dayanım kazandığı belirtilmiştir. Geopolimerlerin genel olarak 2 ana bileşeni mevcuttur. Bu bileşenler, kullanılan atık malzeme ürünleri ile alkali aktivatör malzemelerdir. Geopolimer betonlarda pirinç kabuğu külü, silis dumanı, cüruf ile uçucu kül benzeri çokça Al ile Si kapsamakta olan maddeler kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Geopolimer betonların, geleneksel Portland çimentosuna benzer dayanım ve durabiliteye sahip olduğu belirtilmektedir (Temuujin, Rickard, Lee, & Van Riessen, 2011)

1.1. Tezin Amacı

Günümüzde yapılarımızda en fazla tercih edilen yapı malzemelerinin arasında beton yer almaktadır. Beton farklı yapı malzemeleri ile kıyaslandığında korozyon bakımından, yangın bakımından, ekonomik bakımından diğer yapı malzemelerine göre daha üstün özellikler göstermektedir. Ahşap malzemeler ele alındığında ülkemizde çok katlı yapılamaması, böceklenme sorunu ve özellikle de yangına karşı çok ama çok hassas olmasından dolayı ülkemizde kullanımı kısıtlıdır. Aslında ahşap elastik bir malzeme ve deprem gibi tersinir yüklere direnci çok yüksek olmasına rağmen, yangın dayanımının düşük olmasından ötürü kullanılmamaktadır. Diğer yapı malzemesi çelik ise dünyada oldukça çok kullanılmaktadır. Fakat ülkemizde çelik fiyatlarının çok yüksek olması ve çelik montajında usta işçi gereksinimin fazla olması, yangına ve korozyona karşı dayanıksız olmasından dolayı çelik yapı kullanımı da oldukça sınırlıdır. Beton ise hem ülkemizde üretilmektedir hem de diğer malzemelerle kıyaslandığında daha ekonomiktir. Özellikle mevcut konu stokunun eski olması ve artan genç nüfus ile beraber beton malzemesine olan ihtiyacın ileride daha fazla artacağı çok açıktır. Günümüzde geleneksel Portland çimentosu ülkemizde çok yaygın olarak kullanılmakta fakat çimentonun üretimi esnasında çevreye çok fazla CO₂ salınımından dolayı bu çimentonun kullanımı çevremiz açısından olumsuz durum teşkil etmektedir. Çevreye verilen zararları minimuma indirmek, doğamızı korumak amacıyla çimentosuz betonların kullanımı büyük önem arz etmektedir. Günümüzde çimentosuz betonlar hakkında dayanım ile durabilite çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bağlayıcı malzeme seçiminde çoğunlukla uçucu kül ile beraber öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmaktadır. Bu malzemelerimizin iyi derecede durabilite özelliği ile yüksek dayanım göstermeleri için su yerine potasyum silikat, potasyum hidroksit, sodyum hidroksit, sodyum silikat tarzında alkali solüsyonların kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıyeten öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanıldığında ısı kürüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu nedenle, çimentosuz betonlarımızın yapılarda kullanımı ile yaygınlaşmasında önünün açılması amacıyla standartlara gereksinim duyulduğu çok açıktır. Tez çalışmam kapsamında çimentosuz betonlarda standartlaşma için adımlar atılmış olacaktır.

Yapılacak tez çalışmasında %75uçucu kül ile %25yüksek fırın cürufu kullanılıp çimentosuz betonların üretimi sağlanacaktır. Alkali solüsyon seçiminde sodyum hidroksit ile sodyum silikat kullanılacaktır. Elde edilecek olan alkali solüsyonların sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları 2.5 olacak biçimdedir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranları 0.45 ile 0.55 olmak üzere 2 çeşit olarak incelenecektir. Buna ek olarak üretilecek olan geopolimer numunelerin %5 sülfürik asit altında hem dayanım hem de durabilite performansları incelenecektir. Bu sebeple sülfürik asitin numuneler üzerindeki etkileri, numunelerin ağırlıklarındaki değişimler ile basınç mukavemetlerindeki artış ile azalmaların 90C, 90C-28A, 88C-20 gibi farklı ortam ve zamanlardaki incelemeleri gerçekleştirilecektir. Tez süresince bulunacak olan bulgular, çimentosuz betonların yapılarımızda kullanılabilmesi adına öncelikle gerçekleşmesine gerek duyulan standartlaşma konularında literatüre katkı sağlayacağı beklenmektedir. CO₂ azalması, yüksek enerji gereksiniminde azalma ile sürdürülebilir yapı malzemesi olması bakımından yapılarımızda kullanılması önce ülkemiz sonra insanlık için büyük fayda sağlayacaktır.

2.2.Yapılan Çalışma Kapsamı

Bölüm I - Özet ile Giriş: Bu bölümde ana hatlarıyla çalışmadan bahsedilip, tezin önemi ile amaçlarından bahsedilmiştir.

Bölüm II - Literatür Tarama: Bu bölümde geopolimer ile alkali aktive edilen betonların içerisindeki bağlayıcı malzemeler, alkali aktivatörler ile bu kapsamında yapılmış olan çalışmalar, önemli vurgular özetlenilerek ifade edilmiştir.

Bölüm III -Yapılan-Uygulanan Deneyler: Malzeme içerikleri, miktarları ile karışım oranlarından, betonların üretim aşamaları hakkında detaylı bilgi verilip, yapılan deneylerden yazılı, görsel şekilde bahsedilmektedir.

Bölüm IV - Sonuç: Son bölümünde yapılan deneylerden ne çıkarım yapıldığına, deneyler sonucunda çıkan sonuçların değerlendirilmesi ile literatüre ne kattığının incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

GEOPOLİMER BETONUN BİLEŞENLERİ

2.1 Alkali Aktivatörler

Genellikle, geopolimer beton üretimi amacıyla kullanılan sodyum hidroksit (NaOH), alkali aktivatör, sodyum silikat yahut sodyum hidroksit kapsayan potasyum hidroksit (KOH) karışımıdır (Temuujin, Van Riessen, & Williams, 2009) (Palomo, Grutzeck, & Blanco, 1999)

Palomo ile arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada uçucu külün etkinleştirilmesinde kullanılan alkali aktivatörlerin çok önemli olduğunu belirtmiştir. Ayrıca alkali aktivatör çözeltilerine bakınca yalnızca tek alkali kullanımına nazaran potasyum, silikat veyahut sodyum silikatın beraber bulunmasının uçucu külün aktifleştirilmesinde daha iyi rol aldığı ifade edilmektedir (Pacheo-Torgal, Castro-Gomes, & Jalali, 2008)

Yakın zamanda, geopolimer bağlayıcılarda üretim amacıyla alkali sıvılar kullanılıp araştırmaların arttığı görülmektedir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımlarının farklı oranlarda kullanımı literatürde en çok karşılaşılan durumdur. Esasında Silverstrim ile arkadaşları (1997) ve Van Jaarsveld ile arkadaşları, sodyum silikat ve hidroksit birleştiklerinde uçucu küllü betonların en çok aktif edildiği alkali solüsyonlar olduğu ifade edilmiştir (Keklik, 2020)

Geopolimer betonların üretimine baktığımızda genelde kullanılan alkali aktivatörlerin; potasyum hidroksit, potasyum silikat, kalsiyum hidroksit, sodyum hidroksit ile sodyum silikat olduğunu görmekteyiz. Bu alkali aktivatörlerin reaksiyon mekanizmalarının bulunması ve geopolimer betonlarda dayanım ve durabiliteyi ne denli değiştirdiği anlaşılabilirse, bu geopolimer betonların ülkemizde yapılacak yapıların inşaatında gerekli olan standartların oluşumuna büyük fayda sağlayacaktır.

2.1.1 Alkali-Sodyum Silikat

Sodyum silikatı(Na_2SiO_3) incelediğimizde, mineraller gruplandırılması içerisinde en yaygın diye bileceğimiz silikatların arasında bulunmaktadır. Silikatlar mevcut mineraller kapsamından %30'luk kısımları kapsamakta olup, dünyadaki

mineral hacminin toplam da %90'ını oluşturmaktadırlar. Normalde dünyada en fazla silikat minerallerinin bulunduğunu bilmekteyiz. Bu nedenle yeryüzünde en fazla bulunan 2 element O ile Si elementleri diyebiliriz (Kantarıcı, 2013)

2.1.2. Alkali-Sodyum Hidroksit

Kostik ismi ile bilinmekte olan sodyum hidroksit (NaOH), istenilen yeterli miktarlarda kolayca bulunabilmesi, ulaşılma yönünden kolaylığı ile ucuz olması sodyum hidroksitin avantajlarından olduğunu görmekteyiz. Renk bakımından incelediğimizde akkor derecesinde uçucu ile beyaz renkte katıdır, su içerisinde ise ısının yayınımla yardımıyla çözünme gerçekleşmekte fakat nem kapma durumunda hidroksit bozulur. Nitelik açısından potasyum hidroksitlere benzeyen ancak potasyum hidroksitlerden kısımca daha az miktarda yakıcı niteliği olan kuvvetli bir baz olduğu görülmektedir. (Elibol, 2012)

2.1.3. Alkali-Kalsiyum Hidroksit

Kalsiyum hidroksiti incelediğimizde sönmemiş kirece su eklenmeyle elde edilen kimyasal bir bileşik diye söyleyebiliriz. Toz halinde bulunma durumu ile kristal beyaz renkli olduğu görülmektedir. Ayriyeten suda çözünme durumunda hamurumsu görünüş vermekte olan bir alkali olduğunu görmekteyiz. Gelenekselleşmiş ismi hidratik kireçler veyahut söndürülmüş kireçlerdir. Şayet 500°C derecelerine kadar ısıtıldığında bozularak suya ve kalsiyum oksite dönüştüğünü bilinmektedir (Gomes, et al., 2003)

2.1.4. Alkali-Potasyum Hidroksit

360°C'de eriyen, akkor derecede incelediğimizde uçucu olan, suda çözünen, beyaz renginde katı bir maddedir. Alkali bazolan potasyum hidroksidi incelediğimizde geniş bir kullanım alanı vardır. Pillerde elektrolit olarak, endüstride ise arap sabunu üretiminde ve gübre yapımında kullanılmaktadır. Potasyum hidroksit karbondioksit tutucudur bu nedenle bitkisel deneylerde de yararlanılmaktadır. (Ekmen & Mermerdaş, 2018)

2.2 Agregalar

Beton üretiminde kullanılmakta olan kum, kırmataş, çakıl benzeri mineral kökenli malzemelerin yaygın ismi agrega olarak adlandırılmaktadır. Betonun içinde hacimsel olarak %60-75 oranlarında agrega tane boyutlarına uygun olarak iri(çakıl, kırmataş benzeri) ile ince(kum, kırma kum benzeri) agregalar kullanılır. Agregalar incelendiğinde aranan en önemli özellikleri şöyle sıralayabiliriz; Zayıf taneler içermemeleri(odun, deniz kabuğu, kömür benzeri), boşluksuz, sert ve dayanıklı olmaları, yassı ile uzun taneler içermemeleri, aşınma direnci yüksek olmaları, beton, toz ile toprağa zarar verebilecek maddeler içermemeleri, son olarak ise çimento ile zararlı reaksiyona girmemesi gerekmektedir (Alp, 2004)

Beton malzemeler de 1 m³karışım oranlarının bulunabilmesinde yapılan hesaplarda bilinmesi gerekli agrega özellikleri vardır, Bunlar; birim hacim ağırlık, agrega gradasyonu, özgül ağırlık, mevcut su durumları, maksimum agrega boyutları ile su emme kapasiteleri diye sıralayabiliriz. Agreganın özellikleri betonun özelliklerini nasıl etkiliyor ise beton karışımında yer alacak olan malzeme miktarları da beton performansını oldukça çok etkilemektedir (Erdoğan, 2003)

Agregaların maliyetine bakacak olursak çimentoya göre daha azdır. Yalnız agregaların kullanılmasında sebep sadece ekonomik değildir. Beton, çevre etkilerine karşın daha dayanıklı hale gelmiş olur ve çimento hamuruna göre hacim sabitliğini fazlasıyla iyi korur. Büzülmeye karşı da agregalar önemlidir (Smith, 2017) Geopolimer betonlarda da normal Portland çimentolu betonda kullanılan agregalar kullanılabilir. Agrega hacminin fazla olması geopolimer beton üretim maliyetini düşürmektedir.

2.3. Su

Geleneksel betonda kullanılacak bir bileşende sudur. Betonda incelediğimizde üç amaca yönelik su kullanımı mevcuttur. Bunlar:

- Betonda kullanılacak olan agregaların temiz olmalarını sağlama veya beton karma, üretim işleminin sonlanmasından sonra üretim araçlarını temizlemek maksatlı kullanılır.

-Yerine yerleştirilmiş taze betonun yüzeyine uygulanmakta olan "kür veya bakım suyu" olarak kullanılır.

- Hidratasyon reaksiyonları oluşumu için karışım suyu olarak kullanılır (Uyan, 1996)

Geopolimer betonlarda ise sodyum silikat sıvı bir malzemedir fakat sodyum hidroksit molaritesinin ayarlanmasında su kullanılmaktadır. Ayrıca yapılan geopolimer beton çalışmalarında suyun işlenebilirlik temin etmek maksadıyla kullanımı da yaygındır. Böylece daha az kimyasal katkı kullanılarak daha ekonomik beton üretilmesi mümkün olabilmektedir.

2.4. Uçucu Kül

Geopolimer yani çimentosuz betonların dayanım kazanabilmesi amacıyla bağlayıcı malzemelere ihtiyaç duyulur. Bunlardan biri ise uçucu küldür. Uçucu külleri inceleyecek olursak termik santrallerin bacalarındaki elektro filtreler yardımıyla tutulması sağlanan atık malzemelerdir. Bu nedenle bu atık malzemelerinin beton yapımında kullanılması çevre açısından ve enerji maliyetlerini düşürmek yönüyle çok büyük önem arz ettiğini görmekteyiz. Uçucu küller genel olarak düşük kalsiyum içeriği olanlar F-tipi uçucu kül, yüksek kalsiyum içeriği olanlar ise C-tipi uçucu kül olarak adlandırılmaktadırlar. Genel olarak F tipi uçucu küllerin daha fazla atık malzeme olarak elde edilmesinden ötürü literatürde daha yoğun kullanıldığını görmekteyiz. Uçucu küllerin taze betonlarda katkılarını şöyle sıralayabiliriz;

- Küresel yapıya hâkim olma durumlarından dolayı betonda işlenebilirliği iyileştirir.

- Su tutucu nitelikleri nedeniyle betonda terlemeyi önlerler.

- Betonların yavaş ancak uzun sürede dayanım kazanmalarına katkı sağlamaktadır.

- Betonlarda hidratasyon ısisını düşürmektedir ve bu da bize sıcak havalarda beton dökebilme imkanı sağlamaktadır.

- Su geçirimliliğini azaltır.

- Betonu bütün kimyasal tesirlere karşı daha dayanıklı hale getirmektedir (Subaşı, İşbilir, & Ercan, 2011)

Uçucu küller kendi yaygın nitelikleri kömür yakılma şekilleri ile yakılan kömürlerin niteliklerine ait biçimde değişkenlik göstermektedir. Genelde alüminli ile silis bileşimleri yardımıyla puzolanik nitelik gösterdikleri için beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanımı yaygındır (Türker, Erdoğan, Kantaş, & Yeğınobalı, 2007)

Davidovits 2008 yılında yapmış olduğu çalışmada Amerika'da alkali silika çözültisi ile uçucu külle üretilen CAFA isimli ürünü incelemiştir. Bu ürün üretiminde 90°C ye maruz bırakılıp 18 saat boyunca kür edilen beton örneklerinin 85MPa basınç dayanımına ulaştığı rapor edilmiştir (Davidovits, 2008)

Geopolimer betonlarda uçucu küller %100 oranlarında uygulanacağı gibi, daha farklı oranlarda değişik bağlayıcı malzemelerle de birlikte kullanılabilir. Uçucu kül kullanımı artarsa işlenebilirlik artar ve betonda terleme ile ayrışma engellenmiş olur. Küresel yapıda olmalarından dolayı uçucu küller kendiliğinden yerleşen betonların üretiminde kullanılması avantaj sağlamaktadır.

2.5. F Tipi Uçucu Kül

F-tipi uçucu küller düşük kalsiyum içerikli küller olarak da isimlendirilmektedir. Düşük kalsiyum oksit içermesi sebebiyle beton basınç dayanımlarında etkisi sınırlıdır. Ayrıca düşük kalsiyum içerikli uçucu küllerin aktivasyonu için çoğu zaman ısı kürüne ihtiyaç olabilir. Fakat atık malzemeler arasında dünyada en fazla bulunan atık malzemeler arasındadır. Eğer bu malzemeyi geri dönüşüm işinde kullanılamazsa bu atık malzemeler genelde boş arazilere hiçbir işlem yapılmaksızın boşaltılmaktadır. Bu da hem arazinin verimsizleşmesine hem de çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu kötü olayları önlemek veya minimuma indirmek amacıyla araştırmalar F-tipi uçucu külün nerelerde kullanılabileceğine yoğunlaşmıştır. Bu küllerin bir kullanılma yolu da betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanımındır.

2.5.1. Betonlarda Uçucu Kül Kullanımı

Çimento sanayisini incelediğimizde, inşaat sektörlerinde uçucu küllerinin en yaygınlaşmış şekilde kullanıldıkları alanların başlarında geldiğini görmekteyiz. 1980 yıllarından şimdiye kadar Türkiye'deki katkılı çimentonun, toplam çimento üretim oranının miktarı, %90'ın üzerinde olmaktadır (Öztekin & Cimilli, 1987)

Türkiye'de uçucu kül kullanarak yapılan yapılar başlangıç olarak 1967-1971 yılları arasında yapılmış olan Gökçekaya Barajında ve 1966-1972 seneleri arasında Porsuk Barajının inşaat yapımında kullanılmaktadır. Çimento fabrikalarında ilk kez uçucu kül kullanımları, 1970 senelerinin başlarında Balıkesir ile Afyondaki çimento üretim fabrikalarında baktığımızda Seyit Ömer ile Soma termik santrallerinden çıkma uçucu küllerin kullanımıyla gerçekleşmektedir. (Paşa, 2018)

2.5.2. Uçucu Külde Isı Kürünün Önemi

Üretilen uçucu kül miktarlarının betonlarda kullanımının ülkemiz açısından önem arz ettiğini görmekteyiz. Büyük miktarlarda uçucu küllerin nakliyesi, depolanması ile sonralarda yakılması veyahut gömülme işlemleri ekonomik ile çevre bakımından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle uçucu küllerin betonlarda kullanılması tavsiye edilmektedir. Uçucu küller yavaş şekilde dayanım kazanmalarından ötürü %100 oranlarda uçucu kül kullanımı betonun dayanımını olumsuz etkilememesi adına ısı kürüne ihtiyaç bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar neticesinde genelde uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerinin üretilmesi sırasında 70°C -100°C sıcaklıkları arasında en fazla 72 saat ile en az 24 saat boyunca kürlenmesi gerektiği tavsiye edilmektedir. Fakat bu sıcaklık ve süre zarfında kür işlemi uygulanması özellikle yerinde döküm yapılan betonlar için pek mümkün değildir fakat eğer yapılırsa da bu işlemin oldukça zor olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, uçucu küllerin yüksek derecede kalsiyum oksit içeriklerine sahip öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuyla beraber kullanılıp ısı kürlerine ihtiyaç duyulmadan üretimi, geopolimer betonların yapılarda kullanımı açısından önemli bir gelişme olabilir.

2.6. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısının içeriğinde, kalsiyum alümina silislerin bulunduğu bazik esaslı bileşen ile demirlerin üretiminin esnalarında erimiş halinde bulunmakta olan atık bir malzemedir (Erdoğan & Kurbetçi, 2003)

Sıcak fırınlarda yapılan işlemleri incelediğimizde sıcaklık değeri 1600°C'lere kadar ulaşmaktadır. Yüksek derecelerde eriyebilen maddelerin alttaki tabaka pik demiri ile üstteki tabaka cüruf olacak biçimde fırınların alt tabakalarında birikmiş olur. Erimiş halde olan yüksek fırın cürufları ile demir ocaklardan sıra ile çıkartılırlar. Yüksek fırın cürufunda o andaki sıcaklıklarla boşaltılmasının ve ne şekilde soğutulduğunun kesin niteliklerini önemli derecede belirlemektedirler (Erdoğan, 2004)

2.6.1. Betonda Cüruf Kullanımı

Betonlarda yüksek fırın cürufunda bağlayıcılık kazandırmanın çalışmalarını ilk olarak 1862 yılında Almanya ülkesinde Emil Langen aracılığıyla ortaya çıkmıştır (Engin, 2015) Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun katkı olarak adlandırdığımız betonlarda yüksek derecede aktif olabilme imkânına sahiptir. Bilhassa yüksek oranlarda tuz, asit ile sülfat etkilerine maruz betonlarda yüksek fırın cürufu kullanımları beton durabilitesine önemli katkılar sağlamaktadır. Yüksek fırın cürufu uçucu küle göre daha yüksek oranlarda betonun içerisinde kullanılabilir. Genellikle uçucu küle baktığımızda çimento ağırlığının %30 - %40 aralıklarında kullanılmaktayken yüksek fırın cürufunun betonun su ihtiyacını arttırmadan çimento ağırlıklarının %50-100 oranlarında kullanılabilir (Altındal, 2020)

2.7. Betonlarda Durabilite Dayanıklılık İle İlişkili Bazı Kavramlar

2.7.1. Betonlarda Büzülme

Betonlarda büzülme betonların hacminde zamanla azalma olması biçiminde adlandırılmaktadır. Betonda büzülme plastik büzülme, kimyasal büzülme ve termal büzülme olacak şekilde türleri vardır. Geopolimer betonlarda yüksek fırın cürufu malzemesinin kullanımında betonlarda terlemeyi azaltmasında ötürü büzülme açısından olumlu olmaktadır. Ayrıca geopolimer betonların üretimlerinde

kullanılacak olan malzeme ve içeriklerinin bilinmesi özellikle kütle ve perde betonlarının dökümlerinde büzülme açısından son derece önem arz etmektedir (Alnkaa, 2019)

2.7.2. Betonlarda Isı Dayanıklılıkları

CSH jeli ile başka kristal hidratlarının dehidrasyonu ile bozulması sonucu normal Portland çimentolu betonlarının 800-1000°C sıcaklık sonrasında kalan basınç dayanımlarının %20 ile %30 civarlarında olduğu görülmektedir. Yangın sırasında, yüksek sıcaklıkla erimiş olan tabakalar, serin olan iç tabakadan ayrılması ile parçalanma eğilimi gösterirler (Privanka & Ruben, 2019) Buna karşılık olarak, geopolimerlerin fiziksel ve kimyasal olarak bağlı olan suyun alümino-silikat yapısına zarar vermeden buharlaşması ile yer değiştirmesini sağlayan, mikro yapıda dağılmış halde olan nano gözeneklerinin varlığı sebebiyle yüksek yangın dayanıklılığına sahiptir (Duxson, Fernandez-Jimenez, Provis, Lukey, Palomo, & van Deventer, 2007)

2.8. Geopolimer Beton Özellikleri

Geopolimer beton özelliklerini incelediğimizde mekanik ile fiziksel özelliklere ilaveten kimyasal dayanıklılığa da sahip olduğu düşünülmektedir. Geopolimer betonların deniz suyu, magnezyum sülfat, asidik ortamlar ile alkali silika reaksiyonunun tesirlerine karşın yeterli durabiliteye sahiptirler fakat bu konuyla ilgili kesin bir tanı bulunmamaktadır. Özellikle sodyum silikat, sodyum hidroksit alkali aktivatör oranlarının değişimi, molaritenin değişimi, bağlayıcı malzemenin eğişi, kür koşullarının değişimi gibi faktörler geopolimer betonların dayanımını ve durabilitesini oldukça çok etkilemektedir. Dolayısıyla Geopolimer betonların farklı kimyasal etkilerine karşı durabilite deneyleri devam etmektedir. Geopolimer bağlayıcılarının geopolimerizasyonu neticesinde $Ca(OH)_2$ ile C_3A benzeri ürünlerin oluşmamasından, Geopolimer bağlayıcı betonlarının durabilite niteliklerinin geleneksel çimentoyla beraber üretilen betonlardan daha iyisinin olacağını beklemekteyiz. Ayrıca, geopolimer betonların yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olduğu rapor edilmiştir (Haddad & Alshbuol, 2016)

Geleneksel betonlarının yerini alabilme potansiyelinin fazla olması ve sürdürülebilirlik açısından olumlu olmasından dolayı inorganik malzeme olan geopolimerlerin kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir. Özellikle Geopolimer betonların kullanımının en önemli yararlarından biri CO₂ emiliminde %90'lara kadar ulaşan azalmadır (Thomas & Gupta, 2015)

Geopolimer betonu kullanmanın diğer faydaları özetlenecek olunursa: Zararlı sera gazı emisyonlarının oluşmama durumu, radyoaktif ışınlarının geçirgenliğinin az miktar da olması, çevre kirliliğinin ciddi anlamda az olması, yüksek dayanıklılık gerektiren çevresel koşullara karşı yüksek durabilite göstermesi, üretimi için gerekmekte olan bileşenlerinin endüstriyel atıkların geri dönüşümüyle oluşturuldukları için düşük maliyetler harcanması ve endüstriyel atık maddelerin geri dönüşümüyle çevre dostu ürün olması, ısı işlemlere karşı yüksek derecede dayanıklılık gösterme durumu gibi daha birçok çevre, ekonomik ve dayanıklılık anlamında yararları vardır (Li, 2004)

2.9. Geopolimer Betonlarda Dayanımları Etkilemekte Olan Faktörler

2.9.1. Geopolimer Betonlarda Su Miktarları

Geopolimer beton için su miktarını incelediğimizde Su/Geopolimer katı maddenin oranı ile geopolimer beton mukavemeti azaltmaktadır. Bu yöndeki etkileriyle Portland çimentolu betonlarla benzerdir. Su kullanımının alkali aktivatörler de molariteyi düşürme durumu nedeniyle suyun fazla olan kullanımları Geopolimer betonlarda dayanımda düşüşe yol açmaktadır (Thang, 2016)

Geopolimer bağlayıcılarının su ile betondaki işlenebilirliklerinin etkileri incelenmiş ve 8 saatlik zamanda 900°C sıcaklığında ısı kürü sonrası akış özellikleri ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde su/geopolimer bağlayıcı artışıyla beraber betondaki akıcılığında artmış olduğu saptanmıştır ancak bu oranın artması basınç mukavemetinde azalmaya neden olmuştur (Patankar, Ghugal, & Jamkar, 2014)

2.9.2. Kür Koşulları İle Sıcaklık Etkisi

Yapılan araştırmalar, 20°C ve 100°C aralarında sıcaklıkta, bir kaç gün ile bir kaç saat aralarında değişmekte olan zamanlarda uygulanan ısı kürü işlemlerinin geopolimerizasyon üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Araştırma sonuçları incelendiğinde ise kür sıcaklığının artmasıyla basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Bununla beraber, belli sıcaklığın üzerindeki uygulanmakta olan ısı kürün mukavemete olumlu bir katkısının olmadığı görülmüştür. Metakaolin esaslı geopolimerlerin üzerlerinde yapılmış olan birden fazla çalışmada 60°C-70°C üzerlerindeki kür işlemlerinin uzun zamanlı dayanım ve durabilite performansına zararlı olduğu tespit edilmiştir. Daha ileri sıcaklıklarda uygulanan kür işlemlerinin hızlı prize sebep olan reaktiviteye yol açtığı da görülmektedir. (Bing-hui, Zhu, Xue-min, Yan, & Si-yu, 2014)

McNulty yapmış olduğu bir çalışmada geopolimerlerin yüksek yangın dayanımları gösterdiklerini belirtmiş ve geopolimerle üretilen numunelerin yüksek sıcaklık tesirlerine dayanıklı malzemeler olduklarını bildirmiştir (McNulty, 2009)

2.9.3. SiO₂ / Na₂O Oranı

Evathi v.d. (2014), SiO₂/Na₂O molar oranları ile kürlenme şekillerinin Geopolimer harçlarının basınç mukavemetlerinin üzerlerindeki etkileri incelenmiştir. 60°C fırın kürü ile buhar kürü uygulanması sonucu numuneler teste sokulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre SiO₂/Na₂O oranının 1 olması durumunda numunelerin daha fazla basınç mukavemetlerine sahip oldukları rapor edilmiştir (Revathi, Saravanakumar, & Tharrini, 2014)

Literatürden de anlaşılabilceği gibi geopolimer beton numunelerin performanslarını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar arasında alkali aktivatörlerin tipi, oranı, molaritesi ve miktarı, bağlayıcı malzemenin tipi ve kimyasal içeriği, kür koşulları, ilave su kullanımı ve daha birçok unsur geopolimer betonların hem dayanım hem de durabilite performanslarının belirlenmesinde rol oynamaktadır. Bu kadar çok değişkenin olduğu ve bu değişkenlerin betonların dayanım ve durabilitesini ne derecede etkilediği bilinmezse geopolimer betonların standartlaşması çok zor olacaktır. Bu sebeple, çevreci yeni nesil geopolimer

betonların standartlaşma çalışmalarına ön ayak olmak, bu betonların yapılarda kullanımını için gerekli düzenlemelere yardımcı olabilmek amacıyla bu tez çalışmasının yapılması planlanmıştır. Bu tez çalışmasında deney kısımlarında da bahsedileceği üzere farklı bağlayıcı miktarı, farklı alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı oranı, değişik bağlayıcı malzemelerin kullanımının yanı sıra hem farklı kür koşullarının etkisi hem de %5 sülfürik asit etkisinde üretilen betonların performansları etraflıca irdelenmiştir. Elde edilen sonuçların hem literatüre olumlu katkı yapacağı hem de sonraki çalışmalara ön ayak olacak parametrelerin tasarlanacağı düşünülmektedir.



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmalarımızda kullanmış olduğumuz malzemeler ile malzemelerimizin özellikleri sonucunda üretilen Geopolimer betonlarına uygulamış olduğumuz deneyler, deneylerin yapıları ve aşamaları ile ilgili bilgiler verilmektedir.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Alkali Aktivatörlerin Kullanımı

Yapılan literatür taramasında sodyum silikat ve sodyum hidroksitten oluşan alkali aktivatörlerin potasyum hidroksit ve potasyum silikat tipi solüsyonlara göre daha ekonomik olduğundan dolayı tez kapsamında alkali aktivatör olarak sodyum silikat-sodyum hidroksitin bir karışımı kullanılmıştır. Sodyum hidroksit olarak %97-98 saflık oranında NaOH kullanılmıştır. Bu sodyum silikat-hidroksit karışımı beton dökümünden minimum 6 saat önce hazırlanıp, laboratuvarımızda soğuması için bekletilmiştir. Kullanmış olduğumuz sodyum silikatın(Na_2SiO_3) nitelikleri de Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı 1/ 2.5 oranında kullanılmıştır. Şekil 3.1'de ise deneylerde kullanılan NaOH gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1.Kullanılan sodyum silikat(Na_2SiO_3) aktivatörünün özelliği

Bileşen	Değer
%NaO ₂	%22-25
%NaO ₂	%10-12
Yoğunluğu:	1,39 g/cm ³
Görünümü:	Belirsiz, viskoz sıvı ile renksiz



Şekil 3. 1.Sodyum hidroksit (NaOH)

3.1.2. Agrega

Yapmış olduğumuz çalışmamızda agrega olarak iri agrega(4-16mm) ile ince agrega(0-4mm)kullanımını gerçekleştirdik. İnce agregaların büyüklükleri 4mm'den küçük olmaktadır. İri agregaların büyüklükleri ise4-16mm arasında değişmektedir. Kullanmış olduğumuz agregaya ait olan özellikler Çizelge 3.2'de gösterilmektedir. Ayrıca kullanmış olduğumuz agrega ise Şekil3.2 'de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 2.Çalışmada kullanılan agreganın özelliği

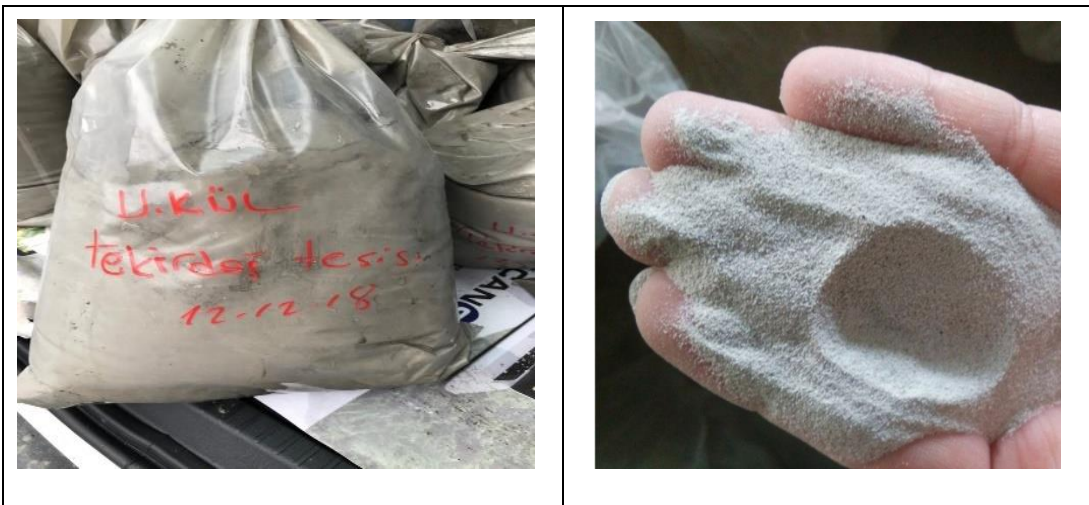
Özellikler	1 nolu agrega	2 nolu agrega
Dane yoğunluk :	$2,71 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$	$2,72 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$
Su emmesi :	%0,7	%0,6
Yassılık endeks :	%14,0	%9,0
İri agregalarda parçalanmaya karşı dirençler :	%20	%20



Şekil 3. 2.Çalışmalarda Kullanılan iri ile ince agregalar

3.1.3. Uçucu Kül

Betonlarımız da kullanmış olduğumuz uçucu kül, kömürün yakılmasıyla baca gazlarındaki filtreleme yapılaşması sonucu elde edilmektedir. Deneylerde kullanmış olduğumuz uçucu kül, Akçansa firması tarafından tedarik edilmiştir ve Şekil 3.3' de gösterilmektedir. Çizelge 3.3'de ise kullandığımız F-tipi uçucu külümüzün özellikleri verilmiştir. Bu özellikler Akçansa firması tarafından tarafımıza gönderilmiştir. Özelliklere bakıldığında uçucu külün içeriğindeki kalsiyum oksit (CaO) oranı %2'den küçük olduğu için F-tipi veya düşük kalsiyuma sahip uçucu kül olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 3. 3.Çalışmada kullanılan F-tipi uçucu küller

Çizelge 3. 3.F-tipi uçucu küllerin nitelikleri

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

3.1.4. Yüksek Fırın Cürufu

Literatür kısmında da değinildiği üzere yüksek fırın cürufunun atık bir malzeme olduğunu görmüştük. Ayrıca priz süresini uzatma, işlenebilirliği artırma, hidrasyon ısisını düşürme ile sertleşmiş olan betonda su geçirimliliğini düşürmek gibi birçok özelliği mevcuttur. Yüksek fırın cürufumuzun fiziksel ile kimyasal nitelikleri Çizelge 3.4 'de gösterilmektedir. Yüksek fırın cürufumuz ise Şekil 3.4 'de belirtilmektedir.



Şekil 3. 4.Öğütülmüş fırın cürufu

Çizelge 3. 4.Çalışmadaki öğütülmüş yüksek fırın cürufu nitelikleri

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

3.1.5. Kimyasal Katkı

Deneylerimizde üretmiş olduğumuz Geopolimer betonlarımızın S4 kıvamda olması kimyasal katkıyla sağlanmıştır. Kullanmış olduğumuz kimyasal katkının nitelikleri Çizelge3.5 'de gösterilmektedir. Yaprho Hyper SCC 900 isimli yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı geopolimer betonların üretiminde kullanılmıştır.

Çizelge 3. 5.Çalışmada kullanılan kimyasal akışkanlaştırıcı özelliği

Özellikler	Kimyasal katkı
Ürün adı :	YAPRHEO HYPER SCC 900
Durumu :	Sıvı
Renk :	Opak
Özgül ağırlık :	1,069 g/cm ³
Suda çözünebilir klorür :	% 0,0376
Katı madde ağırlığı :	% 31,93
PH değeri :	6,03

3.2. Deney Prosedürü

3.2.1. Küp Kalıplar

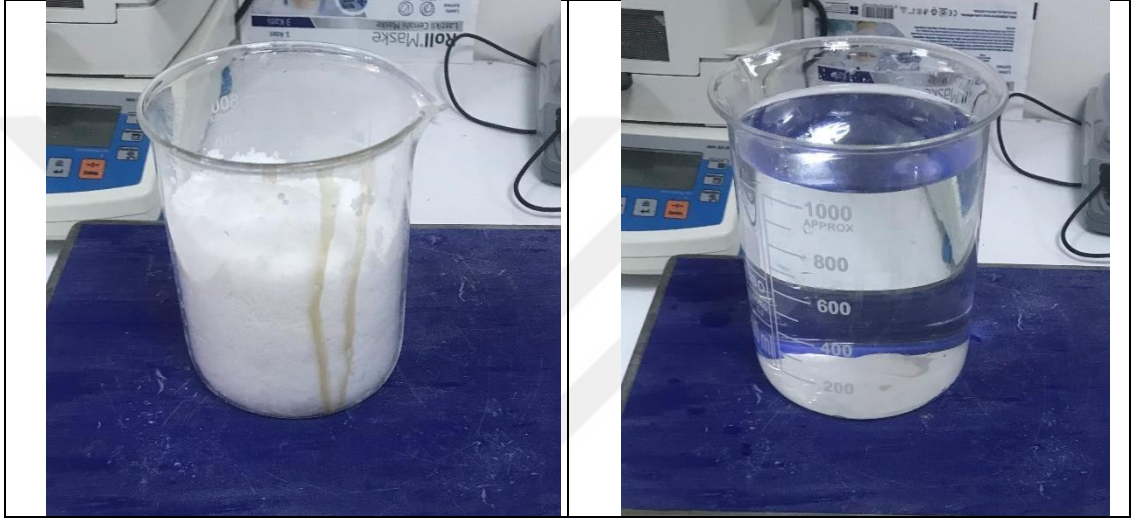
Yapmış olduğumuz çalışmalarda, 150mmx150mmx150mm boyutlarında küp kalıplarımız kullanılmıştır. Betonlarımızı dökmeden kalıplarımızı temizleyip yağlama işlemini gerçekleştirdik. Bu sayede kalıp sökümünde kolaylık sağlandı ve üretilen geopolimer beton numunelerine zarar verilmedi. Çalışmalarımızda kullanmış olduğumuz küp kalıpları Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 5.Çalışmalarda kullandığımız küp kalıplar

3.2.2. Alkali Aktivatör Hazırlığı

Deneylerde kullanmış olduğumuz alkali solüsyonlar; sodyum silikat ile sodyum hidroksit çözeltilerinin belli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturuldu. 1482 gr NaOH çözeltisinin elde edilmesi için 957gr su ile 525gr NaOH kullanılarak bir kap içerisinde hidroksit çözeltisi hazırlanmıştır. Bu karışım esnasında oluşan yüksek ısıyı azaltmak için beton dökmeden 6 saat önce bu çözelti hazırlanıp laboratuvar ortamında korunmuştur. Şekil 3.6 'da kullanılmak üzere hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisi gösterilmiştir.



Şekil 3. 6.Sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması



Şekil 3. 7.Alkali aktivatörlerin hazırlanması

3.2.3. Karışım Hazırlanması

Yapmış olduğumuz karışımlarda geopolimer betonumuzun üretilmesi için geleneksel Portland çimentosu yerine öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile F-tipi düşük kalsiyuma sahip uçucu kül malzemelerini kullandık. Aynı zamanda çalışmamızda solüsyon olarak sodyum hidroksit ile sodyum silikat eklenip üretilen bir betondur. Üretmiş olduğumuz betonlar S25FA75 betonları olarak isimlendirdik. Karışımlarımızda 1 m³ geopolimer numunelerde kullanmış olduğumuz malzeme miktarları aşağıdaki çizelgelerde gösterilmektedir.

S25FA75 geopolimer beton numunelerimizde%25 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile %75 F-tipi uçucu kül kullanılmaktadır. Toplam bağlayıcı miktarlarımız 400kg/m³, 500kg/m³ ile 600 kg/m³ olarak3 farklı şekilde kullanılmıştır. Alkali aktivatör/bağlayıcı miktarlarımızın oranları da 0.45 ile 0.55 olacak biçimde 2 değişik alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranları seçilmiştir.Farklı oranlarda bağlayıcı miktarları ve alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranları seçmemizdeki amacımız bağlayıcı miktarının ve alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı değişimiyle geopolimer betonlarda dayanım ve durabilite etkilerini incelemektir. Ayrıca bunlara ilaveten gecikmiş ısı kürü uygulamasını etkisini de yaptığımız tez çalışması kapsamında incelemiş olduk.

Çizelge 3. 6.S25FA75-400-0.45 geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarları

Malzemeler		Miktarı (kg/m ³)
Kaba agregalar	No 1	476
	No 2	476
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	306
	Kırma Kumun Miktarı	306
Öğütülmüş fırın cürufu		100
F-tipi kül		300
Kimyasal katkı		6.10
Sodyum silikat		128.57
Sodyum hidroksit		51.43
İlave Suyun Miktarı		30

Çizelge 3.7.S25FA75-400-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m ³)
Kaba agregalar	No 1	443
	No 2	443
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	285
	Kırma Kumun Miktarı	285
Öğütülmüş fırın cürufu		100
F-tipi kül		300
Kimyasal katkı		6.10
Sodyum silikat		157.14
Sodyum hidroksit		62.86
İlave Suyun Miktarı		30

Çizelge 3. 8.S25FA75-500-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m ³)
Kaba Agregalar	No 1	397
	No 2	397
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	255
	Kırma Kumun Miktarı	255
Öğütülmüş fırın cürufu		125
F-tipi kül		375
Kimyasal katkı		2.27
Sodyum silikat		160.71
Sodyum hidroksit		64.29
İlave Suyun Miktarı		37.50

Çizelge 3. 9.S25FA75-500-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m ³)
Kaba Agregalar	No 1	357
	No 2	357
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	229
	Kırma Kumun Miktarı	229
Öğütülmüş fırın cürufu		125
F-tipi kül		375
Kimyasal katkı		2.27
Sodyum silikat		196.43
Sodyum hidroksit		78.57
İlave Suyun Miktarı		37.50

Çizelge 3. 10.S25FA75-600-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m ³)
Kaba Agregalar	No 1	318
	No 2	318
İnce Agregalar	Kum Miktarı	204
	Kırma Kumun Miktarı	204
Öğütülmüş fırın cürufu		150
F-tipi kül		450
Kimyasal katkı		1.50
Sodyum Silikat		192.86
Sodyum Hidroksit		77.14
İlave Suyun Miktarı		45

Çizelge 3. 11.S25FA75-600-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m ³)
Kaba Agregalar	No 1	270
	No 2	270
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	173
	Kırma Kumun Miktarı	173
Öğütülmüş fırın cürufu		150
F-tipi kül		450
Kimyasal katkı		1.50
Sodyum silikat		235.71
Sodyum Hidroksit		94.29
İlave Suyun Miktarı		45

3.2.4. Geopolimer Betonların Üretimleri İle Dökümlerinin Yöntemleri

Geopolimer betonumuzun üretimlerinde, malzemelerin kullanımı ile sistemli çalışmak büyük önem arz etmektedir. Başlangıç olarak iri ve ince agregalarımızın, kimyasallarımızın ayarlanıp kontrolü, tüm malzemelerin oranları kilogramları ve kullanacağımız mikserin temizliği büyük önem arz etmektedir. Sonrasında homojen ve istediğimiz karışımı hazırlamak için mikserimizin en alt kısmına iri agregalarımızı sonra da ince agregalarımızı koyup 2 dakika boyunca karıştırma işlemini gerçekleştirdik. Sonrasında 2 ayrı kabımızda hazırladığımız alkali aktivatörler ile kimyasal katkımızın yarısını karışıma ekleyip 2 dakika süresince karışımını sağladık. Sonrasında kalan katkılarımızın yarısını ilave suyumuzla ilave edip ayrı bir kap içinde karışımı sağladıktan sonra mikserimize ilave edip 2 dakika süresince karıştırma işlemini devam ettirdik. Homojen şekilde karışım elde ettikten sonra yağlayıp hazırladığımız kaplarımıza 2 kademedede yerleştirip aynı zamanda içerde hava boşluğu kalmaması amacıyla tokmak ve şişleme işlemini gerçekleştirdik. Pürüzsüz iyi yüzey elde etme amacıyla geopolimer betonlarımızın üst yüzeylerini mala yardımıyla

düzeltiltik. Sonrasında kalıplarımızın üstünü temin ettiğimiz plastik naylonlarımız ile kapladık. Amacımız alkali aktivatörlerin buharlaşma yapmasını önlemektir. Daha sonra geopolimer beton numuneleri kalıptan kompresör yardımıyla çıkartarak numunelerimizi ayrı ayrı yerlerde muhafaza ettik. Tüm işlemlerimizi tamamladıktan sonra ise numunelerimizin üzerlerine isimlerini yazarak laboratuvarımızda beklettik. Şekil 3.8 'de betonlarımızın döküm aşamalarının görselleri gösterilmektedir.





Şekil 3. 8.Beton üretim aşamaları

3.2.5. Kürlenme

Üretmiş olduğumuz beton numunelerimizi yağlama sayesinde rahatlıkla kalıplardan çıkardıktan sonra 28 ile 90 günde test uygulamamız nedeniyle laboratuvarımızdaki koşullara uygun şekilde beklettik. Betonlarımızın bazılarına 88 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra gecikmiş ısı kürü uyguladık. Bu ısı k r ndeki amacımız geopolimer betonların dayanımına 90 gün sonrasına ne derecede etki ettiğini öğrenmektir. Hem laboratuvarında 90 gün bekletilmiş (90C) hem de gecikmiş ısı kürü uygulanan numunelerin (88C2O) 5% sülfürik asit etkisinde durabilitesini belirlemek amacıyla bu numuneler %5 sülfürik asit çözeltilerinde 28 gün bekletildi. Buradaki amacımız ise geopolimer numunelerimizin basınç dayanımlarının sülfürik asit etkileri altında incelemektir.

3.2.6. Sülfürik Asit Solüsyon Hazırlıkları

Beton numunelerimizi %5 oranlarında sülfürik asit içermekte olan kovalar şeklinde laboratuvarımızda hazırladığımız  zeltimize koymadan önce ağırlıklarını tartıp kovalarımıza yerleştirdik. 28. gün sonunda şekil 3.9 'da gösterdiğimiz üzere numuneleri asitli kovalardan çıkarma işlemine gerçekleştirip yüzey fotoğraf çekimlerini, yeni ağırlık ölçümlerini-asit sonrası ve basınç dayanım testlerini gerçekleştirdik.



Şekil 3. 9. Numunelerimizin sülfürik asit solüsyonunda bekletilme ile çıkarılma işlemleri

3.2.7. Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim

Numunelerimizi asite maruz bırakmadan önce ilk ağırlık ölçümlerini gerçekleştirdik. Sonrasında ise sülfürik asite maruz bıraktığımız numunelerimiz Şekil 3.10 'da gösterdiğimiz üzere tartılıp ilk ağırlıklarıyla karşılaştırma işlemimizi gerçekleştirdik. Numunelerimizdeki ağırlıklarda meydana gelen değişimleri hesaplamada aşağıda gösterilmiş formülden yararlanıp ağırlıktaki değişimler belirlenmiştir.

Ağırlıktaki yüzdece değişimi $=[(S-D)/D] \times 100$

D:İlk numune ağırlıkları

S:Sülfürik asit sonrasında ağırlığı



Şekil 3.10.Sülfürik aside maruz kalan beton numunelerinin ağırlıklarının belirlenmesi

3.2.8. Numunelerde basınç dayanım testi

Beton basınç dayanımları testlerimiz, betondaki özelliklerin tespit edilmesinde önemli bir role sahiptir. Betonlarımızın sahip oldukları mekanik özellikler basınç dayanımlarıyla ilişkilidir. Basınç dayanım deneylerimiz AS1012.9-1999'a göre gerçekleştirilip maksimum seviye olarak 2000kN kapasitesine sahip test makinesi kullanılmıştır. Elde ettiğimiz numunelerimizin kuvvet/alan formülünden yararlanıp basınç mukavemetleri MPa(N/mm²) cinsinden belirtilmektedir. Şekil 3.11'de basınç dayanım testlerimizden görseller gösterilmektedir.



Şekil 3. 11.Küp numunelerin basınç testlerinin yapılması

Çalışmalarda 90 gün normal koşul (90C), 88 gün normal+2 gün ısı kürü (88C20), 90 gün normal koşulun ardından 28 gün asit ortamında bulunma (90C-28A), 88 gün normal+2 gün ısı kürünün ardından 28 gün asite maruz bırakılan numunelerin (88C20-28A)sülfürik asit öncesi ve sonrası performansları belirlenmiştir. Elde edilen numunelerimiz üzerinde görsel denetim, ağırlık değişimi ve mukavemet değişimi sonuçları detaylıca irdelenmiştir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

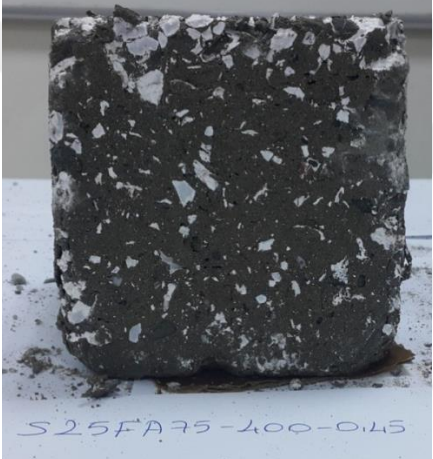



Tez çalışmamızda %5 sülfürik asit ortamına bıraktığımız %25 yüksek fırın cürufu ile %75 uçucu külün birlikte kullanımıyla ürettiğimiz uçucu kül bazlı geopolimer betonlarımızın asit ortamında durabilite ile mekanik dayanım performansları incelenmektedir. Numunelerimiz 90 gün normal koşullarda, 88 gün normal+2 gün ısı kürü ile 28 günde asit ortamında bekletilip performansları incelenmiştir. Tez çalışmamda uçucu kül ile yüksek fırın cürufunun miktarları $300 \text{ kg/m}^3+100 \text{ kg/m}^3$, $375 \text{ kg/m}^3+125 \text{ kg/m}^3$ ile $450 \text{ kg/m}^3+150 \text{ kg/m}^3$ olacak biçimde kullanılmıştır. Alkali/bağlayıcı oranlarımız 0.45 ile 0.55 olup 2 farklı oran kullanılmıştır. Burada amacımız değişen bağlayıcı miktarı ile alkali aktivatör/bağlayıcı oranlarının uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerinin durabilitesi ile mekanik dayanımlarının hangi oranlarda etkilendiğini araştırmaktır. Elde ettiğimiz numunelerimiz üzerlerinde asit etkisi sonrasında yüzeylerindeki değişmelerin görsel incelenmesi, numune ağırlıklarımızdaki zamana bağlı azalma yada artma, basınç dayanımlarındaki azalma gibi değişimler incelenmiş ve etraflıca yorumlanmıştır.

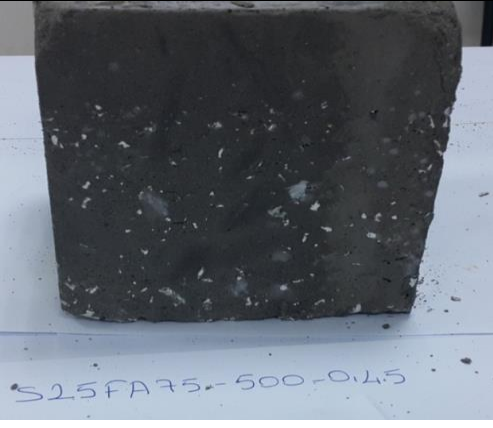





4.1. Görsel İnceleme

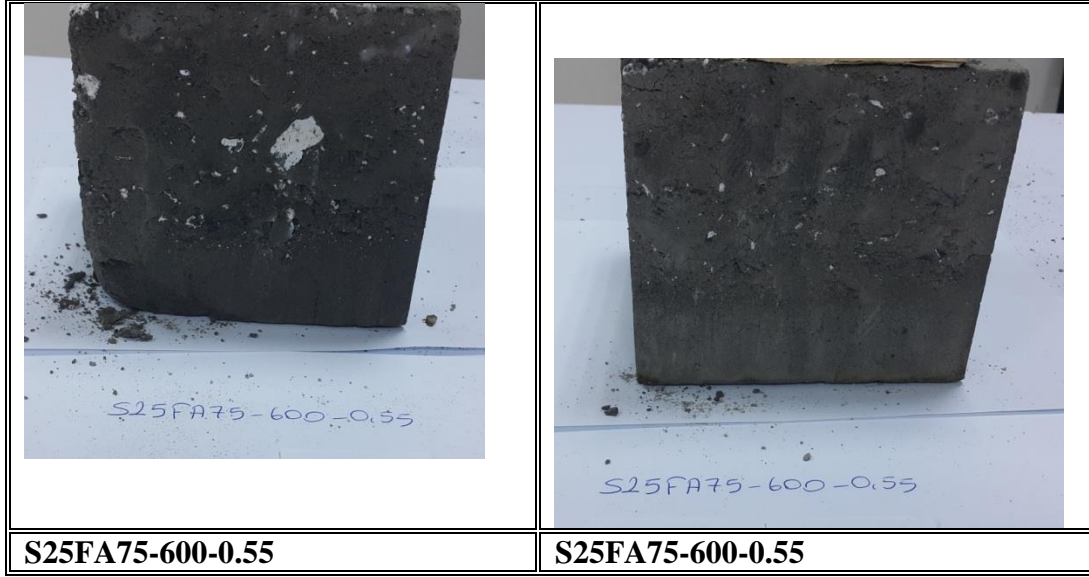
Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren geopolimer beton numunelerimizin 90 gün laboratuvar koşullarında bekledikten sonra 28 gün %5 sülfürik asite maruz bırakılması (90C-28A) ile 88 gün normal+2 gün ısı kürü ile 28 günde asit ortamındaki (88C2O-28A) yüzey fotoğrafları değerlendirilmiştir. Numune yüzeylerinde oluşan beyaz lekeler ayrıntılı şekilde çekilip, numunelerimizin dış kısımlarında asit etkileriyle oluşmuş değişimler Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

Asit içerisinde beklettiğimiz numunelerin yüzeylerindeki kalsiyum monosülfoalüminatlar, erozyon ile kalsiyum hidroksitlerle aralarındaki kimyasal reaksiyonla oluşan beyaz renkte alçı kristal tabakadan kaynaklanmaktadır. Oluşan alçıtaşı ürünlerinin betonumuzun dış yüzeyinde yumuşamaya neden olmasıyla mekanik dayanımda düşme ile pul pul dökülmelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Sonuçlara göre, 400 kg/m^3 bağlayıcı içeren geopolimer beton

numunelerinde yüzey bozulma oranı en fazla, 600 kg/m³ bağlayıcı içeren geopolimer beton numunelerinde yüzey bozulma oranı ise en az olduğu görülmektedir. Yüzeydeki bozulma miktarı kullanılan bağlayıcı miktarının artması ile azalmıştır. Ayrıca alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranlarının değişimiyle numunelerin yüzeylerindeki bozulma oranları incelendiğinde, alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı 0.55 olan numuneler, alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı 0.45 olan numunelere göre daha fazla bozulmuştur. Gecikmiş ısı kürünün bozulma oranına etkisi belirgin değildir neredeyse ısı kürü uygulanmamış numunelerle benzer bozulma oranları göstermiştir.

88C20 -28A	90C-28A
	
S25FA75-400-0.45	S25FA75-400-0.45
	
S25FA75-400-0.55	S25FA75-400-0.55

 <p>S25FA75-500-0.45</p>	 <p>S25FA75-500-0.45</p>
<p>S25FA75-500-0.45</p>	<p>S25FA75-500-0.45</p>
 <p>S25FA75-500-0.55</p>	 <p>S25FA75-500-0.55</p>
<p>S25FA75-500-0.55</p>	<p>S25FA75-500-0.55</p>
 <p>S25FA75-600-0.45</p>	 <p>S25FA75-600-0.45</p>
<p>S25FA75-600-0.45</p>	<p>S25FA75-600-0.45</p>



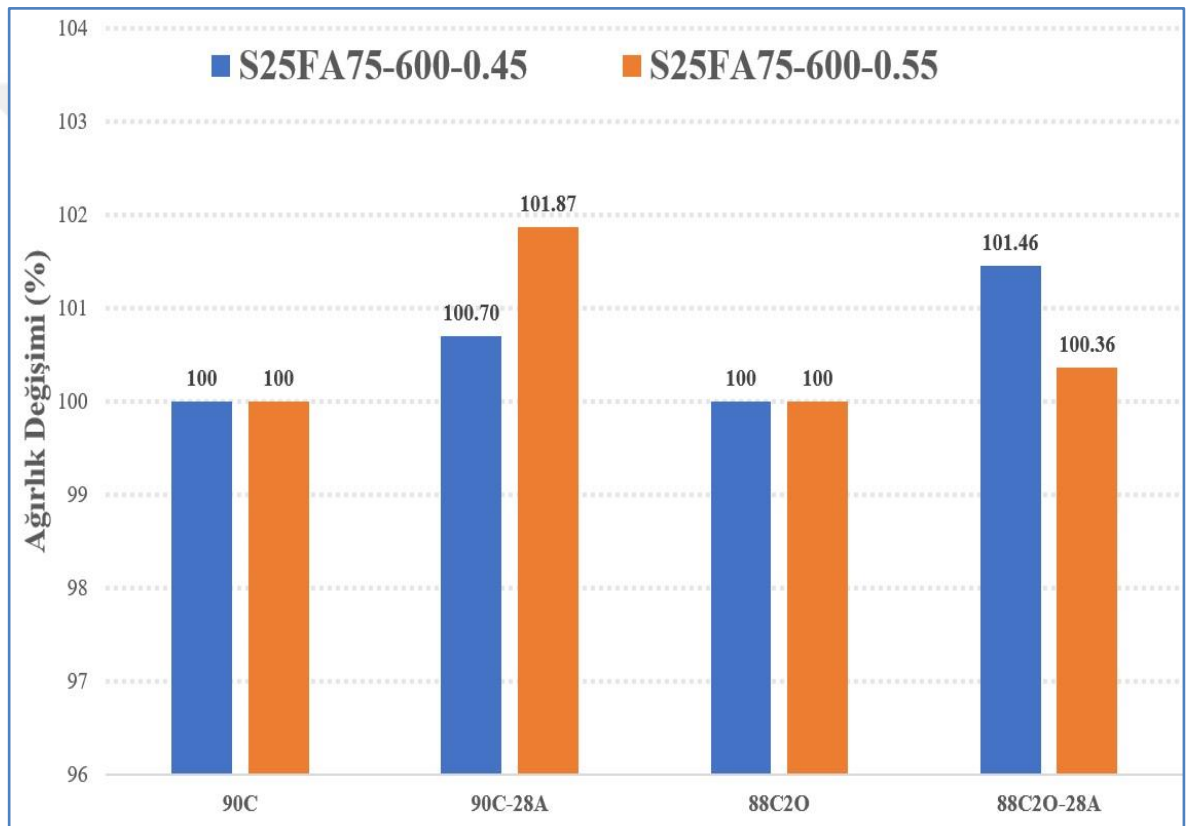
Şekil 4. 1.Yüzey bozulmalarının farklı parametrelere göre değişmesi

4.2. Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim

Numunelerimizdeki ağırlıkların zamanla değişimleri betondaki bozulmaya işaret etmektedir. Şekil 4.2'de 150 kg/m^3 yüksek fırın cürufu ile 450 kg/m^3 uçucu kül içermekte olan numunelerimizin ağırlıklarındaki değişimler gösterilmektedir. Şekil 'de C harf türü laboratuvar ortamlarında kontrol altında tutulmakta olan numuneleri göstermekteyken, A harf türü de %5 sülfürik asit altında numune ortamlarını ifade etmektedir. 2,88 ile 90 rakamları da gün olarak ifade edilmektedir. Çalışmamızdaki 90C'yi ifade edersek, 90 gün laboratuvar ortamında kontrol altında beklettiğimiz numuneleri göstermektedir. 28A, 28 gün boyunca asit ortamında beklediğini göstermektedir. Son olarak 88C2O,88 gün laboratuvar ortamında beklettiğimiz betonlarımızın 2 gün 70°C fırın kürü uygulanmasının sonucunda ortaya çıkan numunelerimiz olarak isimlendirilmiştir. 90C-28A, 90 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra numunelerimizin 28 gün sülfürik asite maruz bırakılmasını göstermektedir. 88C2O-28A, 88 gün normal ortamda bekletip 2 gün fırın kürü uyguladığımız numunelerin 28 gün asit ortamında bekletilmesinden sonraki numuneleri belirtmektedir.

Şekil 4.2'de 600 kg/m^3 bağlayıcılı (150 kg/m^3 yüksek fırın cürufu ile 450 kg/m^3 uçucu kül) uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerimizin farklı koşullardaki ağırlık değişimlerinin yüzde (%) olarak artan ile azalan değerlerini göstermektedir. S25FA75-600-0.45 ve S25FA75-600-0.55 numuneleri sırasıyla %25

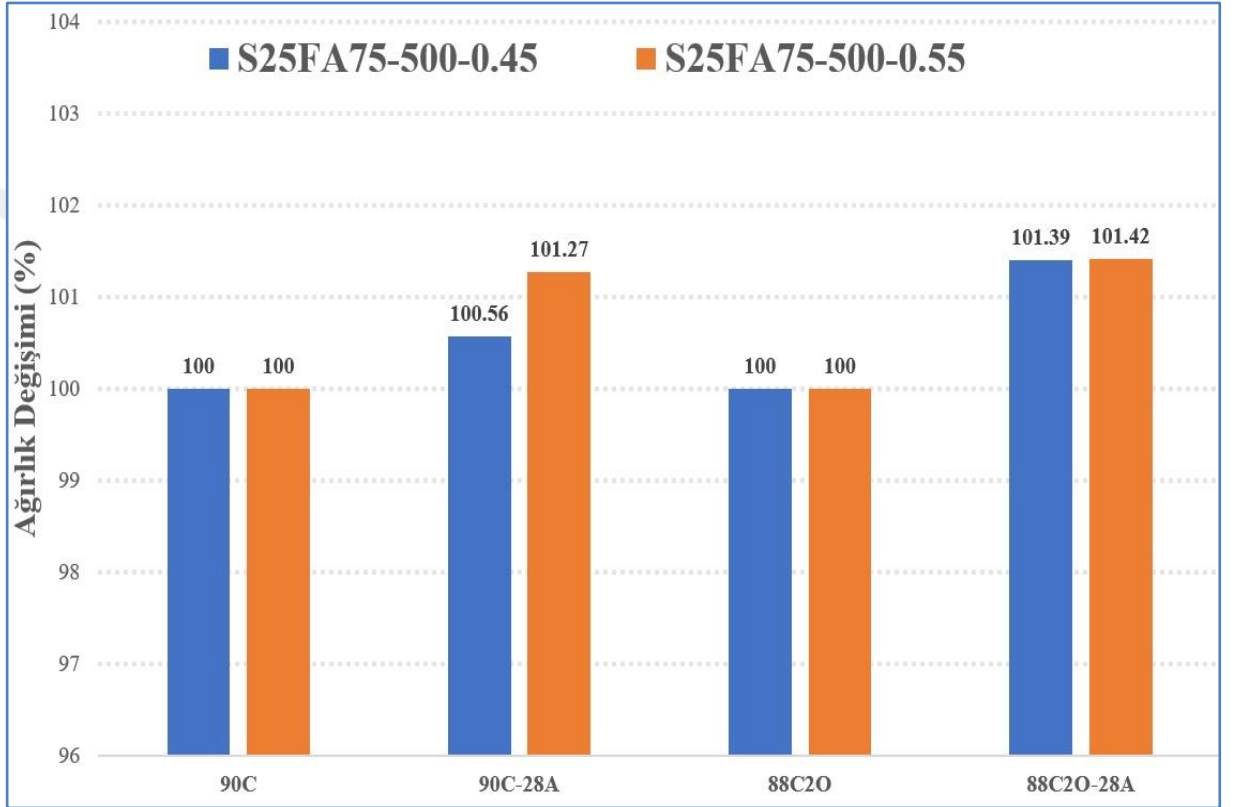
cüruf ve %75 uçucu kül içeren numuneleri, - 600 ise 600 kg/m^3 bağlayıcı miktarını, - 0.45 ve 0.55 ise alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranını ifade etmektedir. Grafiğe baktığımızda, S25FA75-600-0.45 ve S25FA75-600-0.55 uçucu kül bazlı numunelerde 90 gün laboratuvar ortamında küre tabii tutulan betonlar 28 gün %5 sülfürik asit ortamında kaldıktan sonra ağırlıkları sırasıyla %0.7 ve %1.87 artmıştır. 88 gün laboratuvar ortamında küre tabii tutulan betonlar 2 gün ısı kürü uygulanmış ve ardından 28 gün %5 sülfürik asit ortamında kaldıktan sonra S25FA75-600-0.45 ve S25FA75-600-0.55 uçucu kül bazlı numunelerde ağırlıklar sırasıyla %1.46 ve %0.36 artmıştır.



Şekil 4. 2.S25FA75-600 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.3'de 500 kg/m^3 bağlayıcılı (125 kg/m^3 yüksek fırın cürufu ile 375 kg/m^3 uçucu kül) uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerimizin farklı koşullardaki ağırlık değişimlerinin yüzde (%) olarak artan ile azalan değerlerini göstermektedir. S25FA75-500-0.45 ve S25FA75-500-0.55 numuneleri sırasıyla %25 cüruf ve %75 uçucu kül içeren numuneleri, - 500 ise 500 kg/m^3 bağlayıcı miktarını, - 0.45 ve 0.55 ise alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranını ifade etmektedir. Grafiğe

baktığımızda, S25FA75-500-0.45 ve S25FA75-500-0.55 uçucu kül bazlı numunelerde 90 gün laboratuvar ortamında küre tabii tutulan betonlar 28 gün %5 sülfürik asit ortamında kaldıktan sonra ağırlıkları sırasıyla %0.56 ve %1.27 artmıştır. 88 gün laboratuvar ortamında küre tabii tutulan betonlar 2 gün ısı kürü uygulanmış ve ardından 28 gün %5 sülfürik asit ortamında kaldıktan sonra S25FA75-500-0.45 ve S25FA75-500-0.55 uçucu kül bazlı numunelerde ağırlıklar sırasıyla %1.39 ve %1.42 artmıştır.

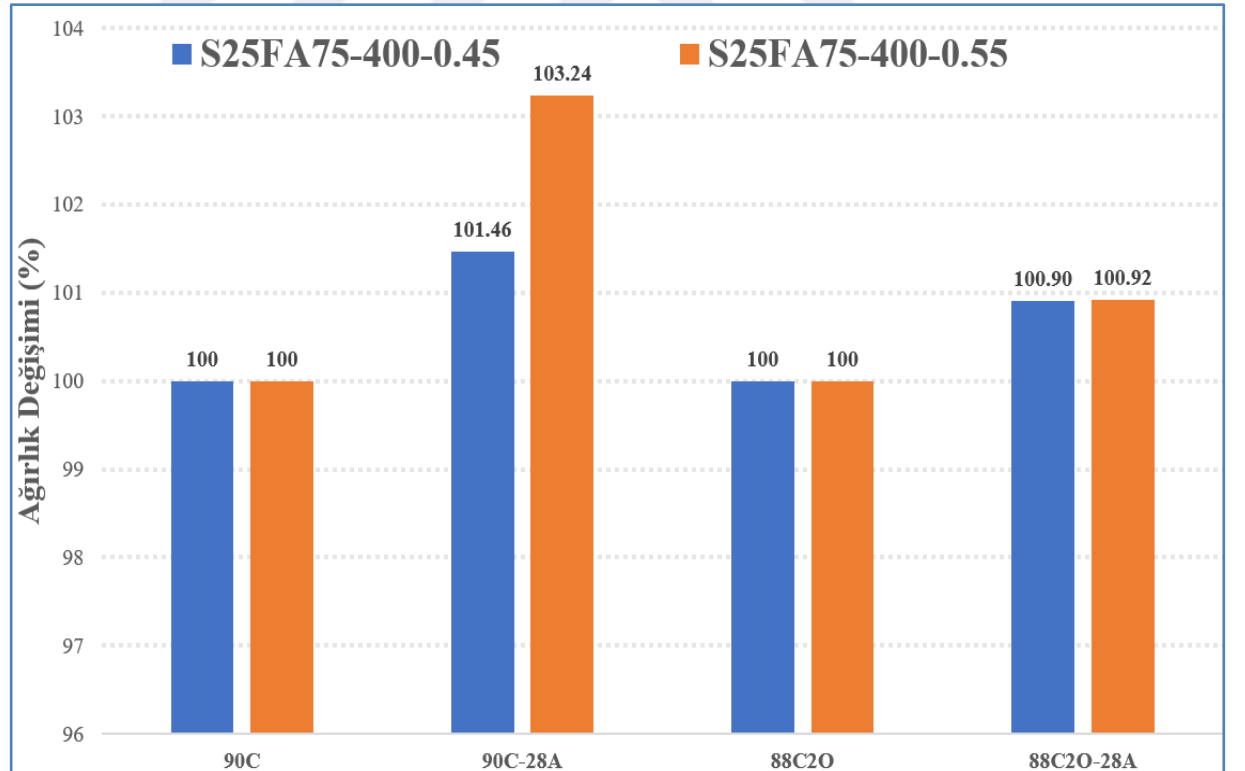


Şekil 4. 3.S25FA75-500 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.4'de 400 kg/m^3 bağlayıcı (100 kg/m^3 yüksek fırın cürufu ile 300 kg/m^3 uçucu kül) uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerimizin farklı koşullardaki ağırlık değişimlerinin yüzde (%) olarak artan ile azalan değerlerini göstermektedir. S25FA75-400-0.45 ve S25FA75-400-0.55 numuneleri sırasıyla %25 cüruf ve %75 uçucu kül içeren numuneleri, - 400 ise 400 kg/m^3 bağlayıcı miktarını, - 0.45 ve 0.55 ise alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranını ifade etmektedir. Grafiğe baktığımızda, S25FA75-400-0.45 ve S25FA75-400-0.55 uçucu kül bazlı numunelerde 90 gün laboratuvar ortamında küre tabii tutulan betonlar 28 gün %5

sülfürik asit ortamında kaldıktan sonra ağırlıkları sırasıyla %1.46 ve %3.24 artmıştır. 88 gün laboratuvar ortamında küre tabii tutulan betonlar 2 gün ısı kürü uygulanmış ve ardından 28 gün %5 sülfürik asit ortamında kaldıktan sonra S25FA75-400-0.45 ve S25FA75-400-0.55 uçucu kül bazlı numunelerde ağırlıklar sırasıyla %0.90 ve %0.92 artmıştır.

90C-28A ortamındaki numuneler incelendiğinde ise en fazla ağırlık artışı yani bozulma 400 kg/m^3 bağlayıcıya sahip uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerinde meydana gelmiştir. En az bozulma ise 500 kg/m^3 bağlayıcıya sahip uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerinde meydana gelmiştir. 600 kg/m^3 bağlayıcıya sahip uçucu kül bazlı geopolimer betonlar 500 kg/m^3 bağlayıcıya sahip uçucu kül bazlı geopolimer betonlardan daha fazla ağırlık artışı göstermiştir. Benzer şekilde 90C-28A ortamındaki numunelerin ağırlık değişimi sonuçlarına göre 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcı miktarına sahip geopolimer betonlar 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcı miktarına sahip geopolimer betonlardan daha az ağırlık artışı göstermiştir.



Şekil 4. 4.S25FA75-400 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

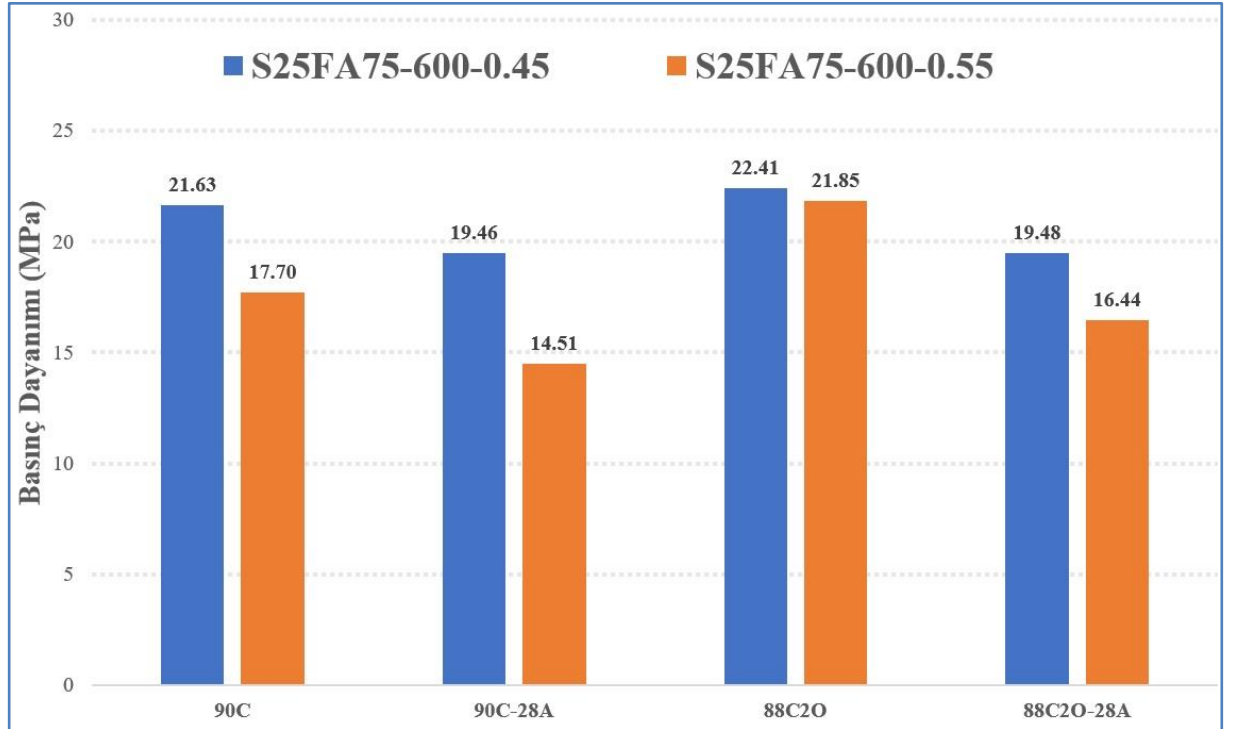
88C2O-28A ortamındaki numuneler incelendiğinde ise en az ağırlık artışı 400 kg/m³ bağlayıcı içeren geopolimer numunelerde en fazla ağırlık artışı ise 500 kg/m³ bağlayıcı içeren numunelerde olmuştur. Bu ağırlık değişimi şöyle açıklanabilir. İlk önce ortamdaki sülfürik asit solüsyonu emilimi dolayısıyla numune ağırlıklarında meydana gelen artış, parça dökülmesi sonucu oluşan ağırlık azalması ile dengelenmektedir. Eğer numuneler 28 gün yerine 56 veya 90 gün sülfürik asit çözeltisinde bekletilselerdi muhtemelen tüm betonlarda ağırlık azalması hâkim olacaktı. Yani matris ve agrega danelerinin dökülmesi sonucu numune yüzeylerinde meydana gelen kesit kaybı 400 kg/m³ bağlayıcı içeren numunelerde başlamıştır. Bu yorum görsel denetimde elde edilen yüzey bozulma değerleri ile uyusmaktadır. Çünkü en çok yüzey bozulması 400 kg/m³ bağlayıcı içeren geopolimer beton numunelerde oluşmuştur.

4.3. Geopolimer Numunelerin Basınç Dayanımları

Çalışmamızda S25FA75-600-0.45, S25FA75-600-0.55, S25FA75-500-0.45, S25FA75-500-0.55, S25FA75-400-0.45, S25FA75-400-0.45 uçucu kül bazlı geopolimer beton numunelerin değişik kür koşullarında ve %5 sülfürik asite 28 gün maruz kalmasından sonraki basınç mukavemetleri verilmiştir. Geopolimer beton numunelerin basınç mukavemetleri 2000 kN kapasiteli basınç press makinesi ile 150 mm x 150 mm x 150 mm numuneler üzerinde test edilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarının birimi MPa olacak şekilde belirlenmiştir.

Şekil 4.5’de toplam bağlayıcı miktarları 600 kg/m³, 150kg/m³ öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile 450kg/m³F-tipi uçucu kül, olan uçucu kül bazlı geopolimer S25FA75-600 numunelerinin değişik ortamlardaki basınç mukavemeti değerleri gösterilmektedir. Bu değişik ortamlar arasında, 90 gün laboratuvarında kürlenmiş numuneler (90C), 88 gün laboratuvarında kürlenmiş ve son iki ısı kürüne (88C2O), tabii tutulan numuneler yer almaktadır. Ayrıca, 90 gün normal koşulun ardından 28 gün asit ortamında bulunan (90C-28A), 88 gün normal+2 gün ısı kürünün ardından 28 gün asite maruz bırakılan numunelerin (88C2O-28A) sülfürik asit öncesi ve sonrası basınç mukavemet değerleri de belirlenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

Sonuçlar analiz edildiğinde 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan S25FA75-600-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 21,63 MPa bulunurken, S25FA75-600-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 17,70 MPa bulunmuştur. 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-600-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 19,46 MPa bulunurken, S25FA75-600-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 14,51 MPa bulunmuştur. 88 gün laboratuvarda kürlenene ve son iki ısı kürüne tabii tutulan S25FA75-600-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 22,41 MPa bulunurken, S25FA75-600-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 21,85 MPa bulunmuştur. 88 gün normal+2 gün ısı kürünün ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-600-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 19,48 MPa bulunurken, S25FA75-600-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 16,44 MPa bulunmuştur. Elde edilen basınç mukavemeti sonuçları arasında en yüksek ortalama basınç mukavemeti 22,41 MPa ile 88 gün normal koşullarda kür edilen ve ardından 70°C 48 saat küre tabii tutulan S25FA75-600-0.45 geopolimer numunelerinde bulunmuştur. En düşük ortalama basınç mukavemetiyse 14,51 MPa ile 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-600-0.55 numunelerinde bulunmuştur.



Şekil 4. 5. S25FA75-600 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

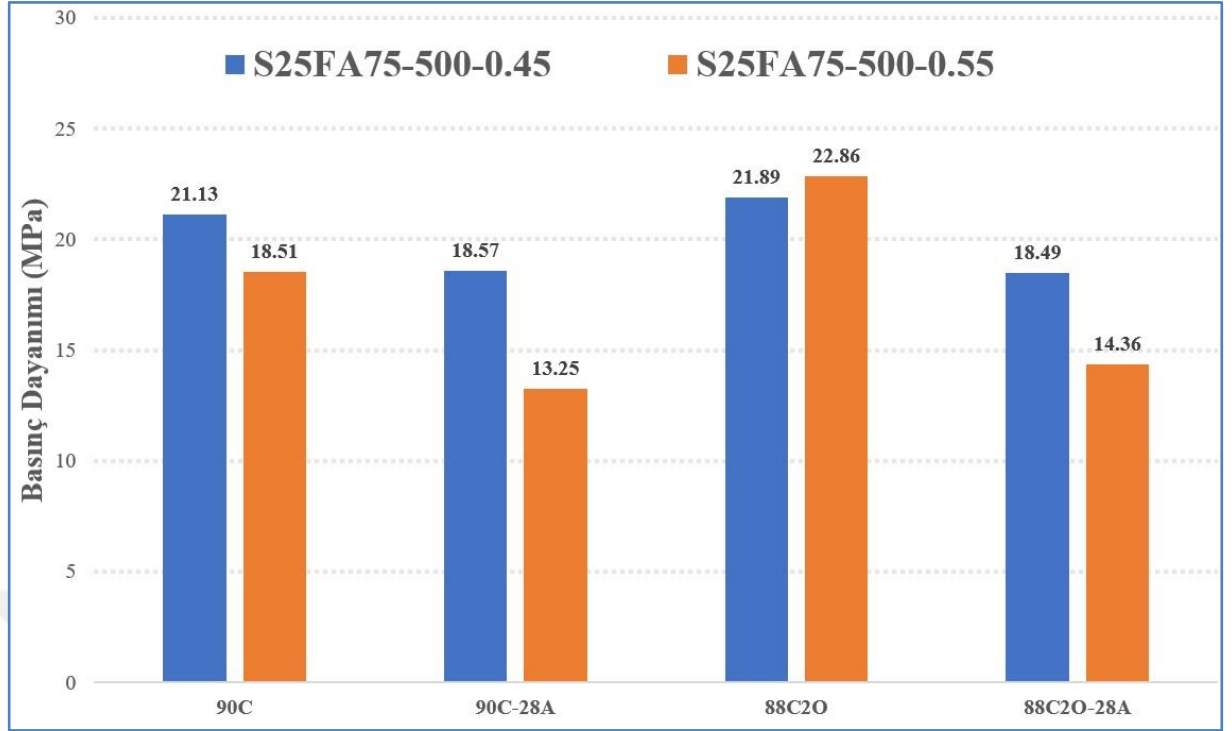
Şekil 4.5’de ayrıca 600 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip S25FA75-600 numunelerinin gecikmiş ısı kürü uygulaması sonucu asit durabilitesini ne derecede etkilediği de incelenebilir. Gecikmiş ısı kürü uygulanmayan S25FA75-600-0.45 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 21,63 MPa dayanımından 19,46 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %10 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmayan S25FA75-600-0.55 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 17,70 MPa dayanımından 14,51 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %18 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan S25FA75-600-0.45 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 22,41 MPa dayanımından 19,48 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %13 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan S25FA75-600-0.45 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 21,85 MPa dayanımından 16,44 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %25 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmayan numunelerde asit etkisiyle basınç mukavemeti kaybı gecikmiş ısı kürü uygulananlara göre daha az olmuştur.

Şekil 4.6’da ise toplam bağlayıcı miktarları 500 kg/m³, 125 kg/m³ öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile 375kg/m³ F-tipi uçucu kül, olan uçucu kül bazlı geopolimer S25FA75-500 numunelerinin değişik ortamlardaki basınç mukavemeti değerleri gösterilmektedir. Bu değişik ortamlar arasında, 90 gün laboratuvarda kürlenmiş numuneler (90C), 88 gün laboratuvarda kürlenmiş ve son iki ısı kürüne (88C2O), tabii tutulan numuneler yer almaktadır. Ayrıca, 90 gün normal koşulun ardından 28 gün asit ortamında bulunan (90C-28A), 88 gün normal+2 gün ısı kürünün ardından 28 gün asite maruz bırakılan numunelerin (88C2O-28A) sülfürik asit öncesi ve sonrası basınç mukavemet değerleri de belirlenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Sonuçlar analiz edildiğinde 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan S25FA75-500-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 21,13 MPa bulunurken, S25FA75-500-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 18,51 MPa bulunmuştur. 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-500-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 18,57 MPa bulunurken, S25FA75-500-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 13,25 MPa bulunmuştur. 88 gün laboratuvarda kürlenmiş ve son iki ısı kürüne tabii tutulan

S25FA75-500-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 21,89 MPa bulunurken, S25FA75-500-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 22,86 MPa bulunmuştur. 88 gün normal+2 gün ısı kürünün ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-500-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 18,49 MPa bulunurken, S25FA75-500-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 14,36 MPa bulunmuştur. Elde edilen basınç mukavemeti sonuçları arasından en yüksek ortalama basınç mukavemeti 22,86 MPa ile 88 gün normal koşullarda kür edilen ve ardından 70°C 48 saat küre tabii tutulan S25FA75-500-0.55 geopolimer numunelerinde bulunmuştur. En düşük ortalama basınç mukavemetiyse 13,25 MPa ile 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-500-0.55 numunelerinde bulunmuştur.

Şekil 4.6'da ayrıca 500 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip S25FA75-500 numunelerinin gecikmiş ısı kürü uygulaması sonucu asit durabilitesini ne derecede etkilediği de incelenebilir. Gecikmiş ısı kürü uygulanmayan S25FA75-500-0.45 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 21,13 MPa dayanımından 18,57 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %12 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmayan S25FA75-500-0.55 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 18,51 MPa dayanımından 13,25 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %28 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan S25FA75-500-0.45 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 21,89 MPa dayanımından 18,49 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %16 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan S25FA75-500-0.45 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 22,86 MPa dayanımından 14,36MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %37 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmayan numunelerde asit etkisiyle basınç mukavemeti kaybı gecikmiş ısı kürü uygulananlara göre daha az olmuştur.



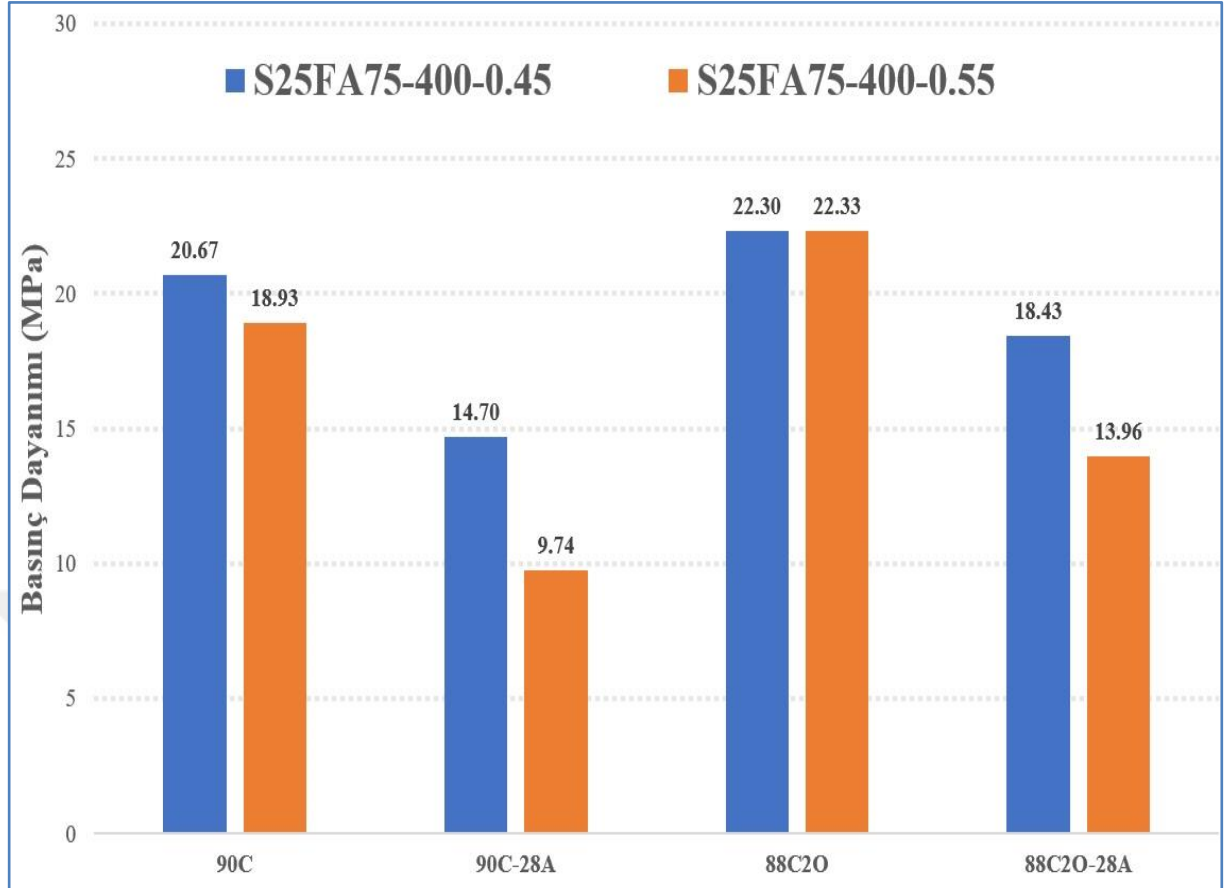
Şekil 4. 6.S25FA75-500 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.7’de ise toplam bağlayıcı miktarları 400 kg/m^3 , 100 kg/m^3 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile 300 kg/m^3 F-tipi uçucu kül, olan uçucu kül bazlı geopolimer S25FA75-400 numunelerinin değişik ortamlardaki basınç mukavemeti değerleri gösterilmektedir. Bu değişik ortamlar arasında, 90 gün laboratuvarda kürlenmiş numuneler (90C), 88 gün laboratuvarda kürlenmiş ve son iki ısı kürüne (88C2O), tabii tutulan numuneler yer almaktadır. Ayrıca, 90 gün normal koşulun ardından 28 gün asit ortamında bulunan (90C-28A), 88 gün normal+2 gün ısı kürünün ardından 28 gün asite maruz bırakılan numunelerin (88C2O-28A) sülfürik asit öncesi ve sonrası basınç mukavemet değerleri de belirlenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Sonuçlar analiz edildiğinde 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan S25FA75-400-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti $20,67 \text{ MPa}$ bulunurken, S25FA75-400-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti $18,93 \text{ MPa}$ bulunmuştur. 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-400-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti $14,70 \text{ MPa}$ bulunurken, S25FA75-400-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti $9,74 \text{ MPa}$ bulunmuştur. 88 gün laboratuvarda kürlenmiş ve son iki ısı kürüne tabii tutulan

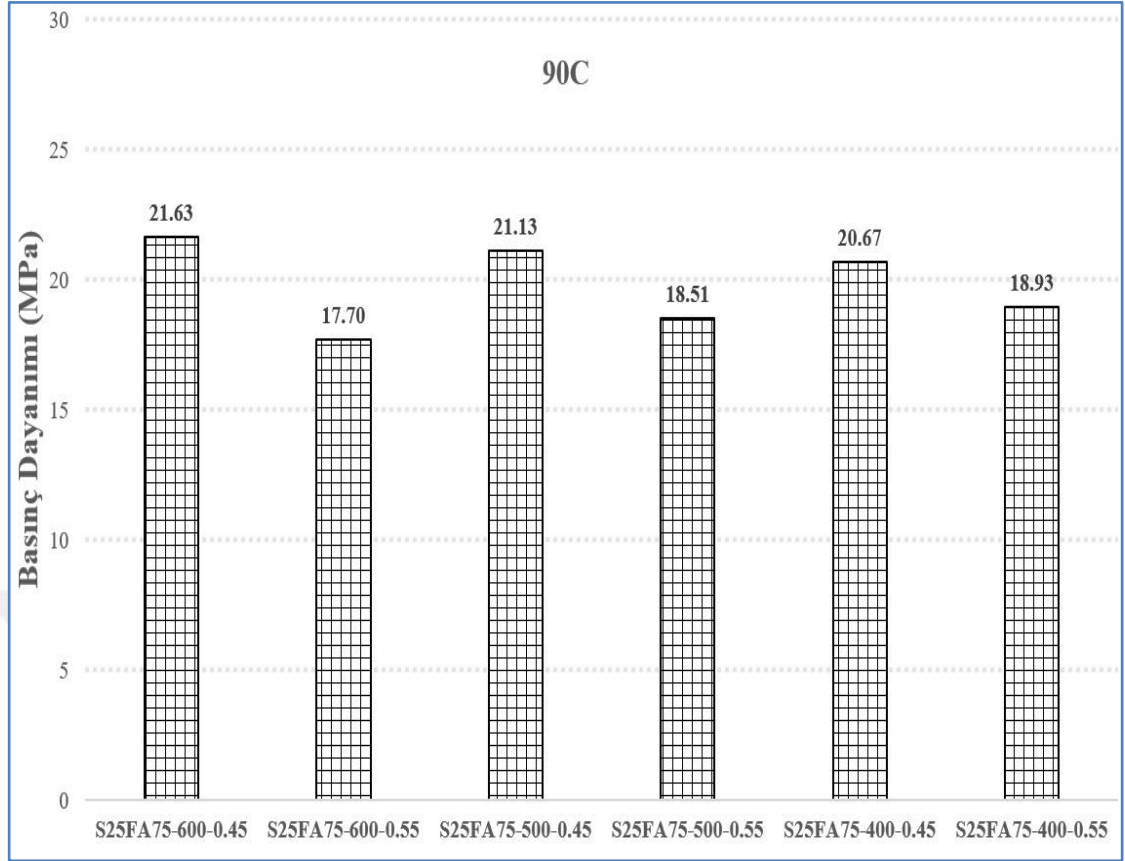
S25FA75-400-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 22,30 MPa bulunurken, S25FA75-400-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 22,33 MPa bulunmuştur. 88 gün normal+2 gün ısı kürünün ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-400-0.45 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 18,43 MPa bulunurken, S25FA75-400-0.55 numunelerinin ortalama basınç mukavemeti 13,96 MPa bulunmuştur. Elde edilen basınç mukavemeti sonuçları arasından en yüksek ortalama basınç mukavemeti 22,33 MPa ile 88 gün normal koşullarda kür edilen ve ardından 70°C 48 saat küre tabii tutulan S25FA75-400-0.55 geopolimer numunelerinde bulunmuştur. En düşük ortalama basınç mukavemetiyse 9,74 MPa ile 90 gün laboratuvar şartlarında bırakılan ardından 28 gün asite maruz bırakılan S25FA75-400-0.55 numunelerinde bulunmuştur.

Şekil 4.7’de ayrıca 500 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip S25FA75-400 numunelerinin gecikmiş ısı kürü uygulaması sonucu asit durabilitesini ne derecede etkilediği de incelenebilir. Gecikmiş ısı kürü uygulanmayan S25FA75-400-0.45 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 20,67 MPa dayanımından 14,70 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %29 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanmayan S25FA75-400-0.55 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 18,93 MPa dayanımından 9,74 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %49 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan S25FA75-400-0.45 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 22,30 MPa dayanımından 18,43 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %17 olmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan S25FA75-400-0.55 numunelerinin sülfürik asitten dolayı basınç mukavemeti 22,33 MPa dayanımından 13,96 MPa dayanımına azalmıştır ve mukavemet azalması yaklaşık %37 olmuştur. 600 kg/m³ ve 500 kg/m³ bağlayıcılı numunelerden farklı olarak, 400 kg/m³ bağlayıcılı geopolimer numunelerde gecikmiş ısı kürü uygulanmayan numunelerde asit etkisiyle basınç mukavemeti kaybı gecikmiş ısı kürü uygulananlara göre daha fazla olmuştur. Bunun sebebi geopolimerizasyona uğramamış uçucu kül parçacıkları neden olmuş olabilir.



Şekil 4. 7.S25FA75-400 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

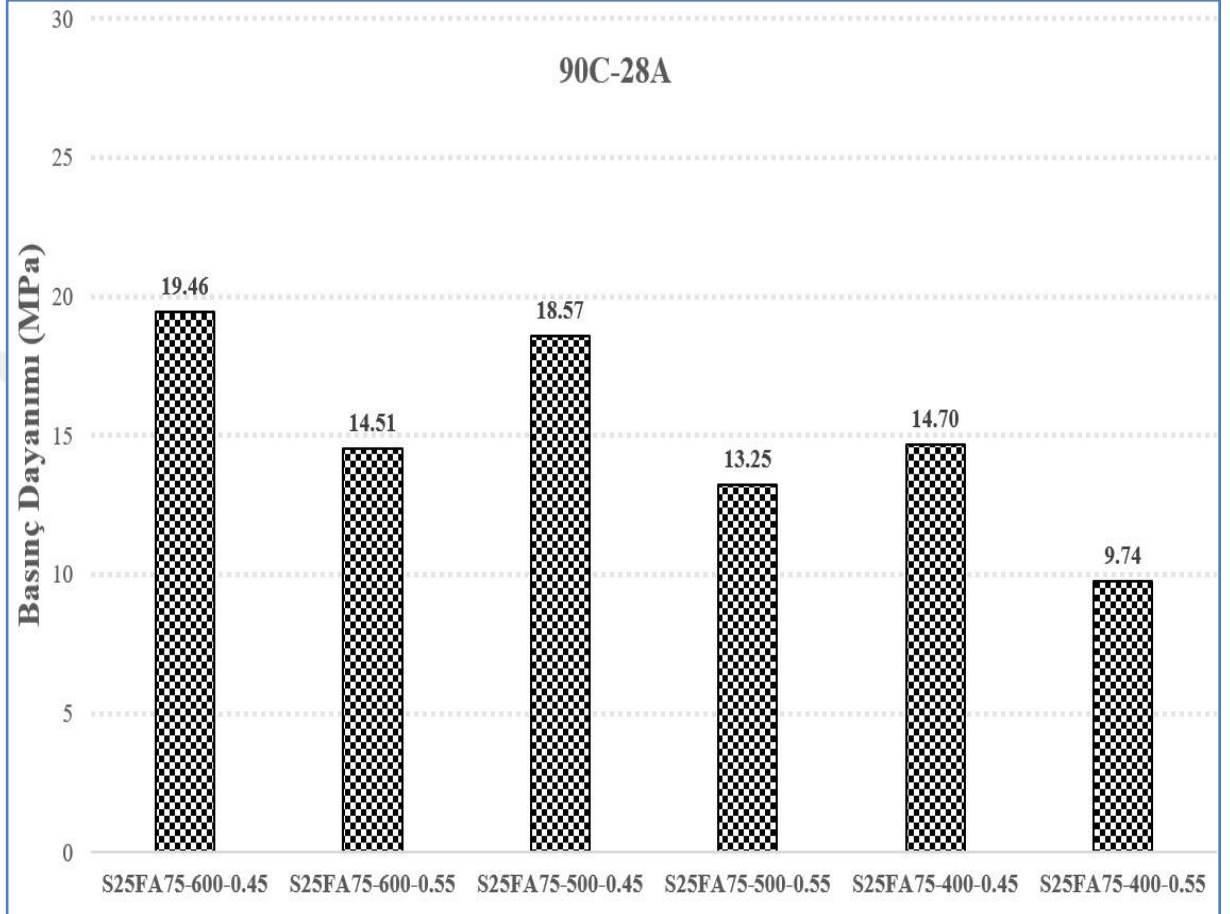
Şekil 4.8'de mevcut geopolimer S25FA75-600-0.45, S25FA75-600-0.55, S25FA75-500-0.45, S25FA75-500-0.55, S25FA75-400-0.45, S25FA75-400-0.55 betonların 90 gün laboratuvarında kür işlemine tabii tutulmasıyla (90C) elde edilen basınç mukavemeti değerleri verilmiştir. S25FA75-600-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 21,63 MPa bulunurken, S25FA75-600-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 17,70 MPa bulunmuştur. S25FA75-500-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 21,13 MPa bulunurken, S25FA75-500-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 18,51 MPa bulunmuştur. S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 20,67 MPa bulunurken, S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 18,93 MPa bulunmuştur. 90C ortamındaki S25FA75 numuneleri değerlendirildiğinde bağlayıcı miktarının değişmesiyle beton basınç mukavemeti değişmemiştir çünkü benzer mukavemet değerleri elde edilmiştir. Alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan numuneler, alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan numunelerden biraz daha düşük dayanım değeri göstermiştir.



Şekil 4. 8. 90 gün laboratuvar ortamında bekletilen numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.9’da S25FA75-600-0.45, S25FA75-600-0.55, S25FA75-500-0.45, S25FA75-500-0.55, S25FA75-400-0.45, S25FA75-400-0.55 betonların 90 gün laboratuvarda kür işlemine tabii tutulduktan sonra 28 gün %5 sülfürik asite maruz bırakılması sonucu (90C-28A) elde edilen basınç mukavemeti değerleri verilmiştir. S25FA75-600-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 19,46 MPa bulunurken, S25FA75-600-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 14,51 MPa bulunmuştur. S25FA75-500-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 18,57 MPa bulunurken, S25FA75-500-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 13,25 MPa bulunmuştur. S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 14,70 MPa bulunurken, S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 9,74 MPa bulunmuştur. 90C-28A ortamındaki S25FA75 numuneleri değerlendirildiğinde ise 600 kg/m³ ile 500 kg/m³ bağlayıcı numuneler benzer dayanım değeri gösterirken, 400 kg/m³ bağlayıcı numuneler daha düşük dayanım değeri göstermiştir. Bu sebeple durabilite çalışmaları için bağlayıcı miktarının S25FA75 geopolimer beton

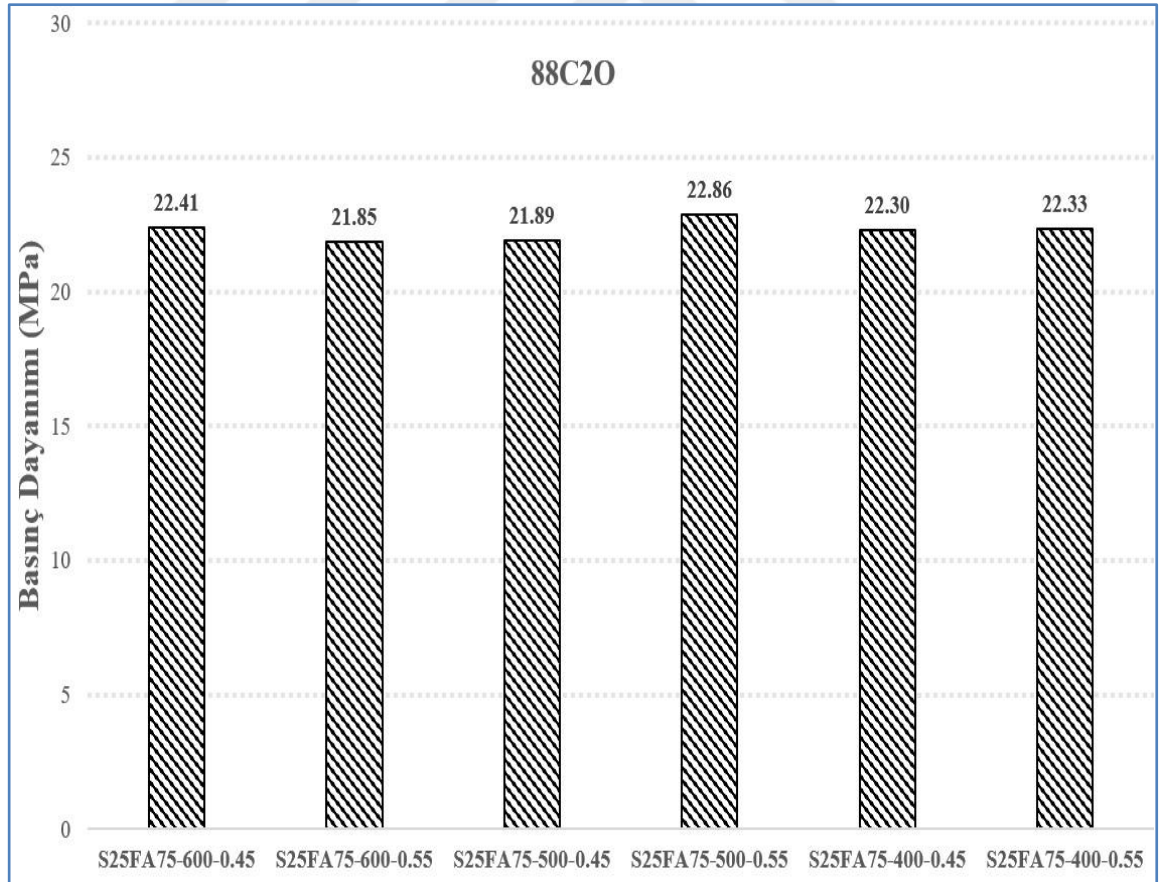
numunelerinde 500 kg/m^3 değerinden daha az olmaması tavsiye edilmiştir. 90C-28 ortamında da alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan numuneler, alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan numunelerden biraz daha düşük dayanım değeri göstermiştir.



Şekil 4. 90C-28 ortamında geopolimer numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

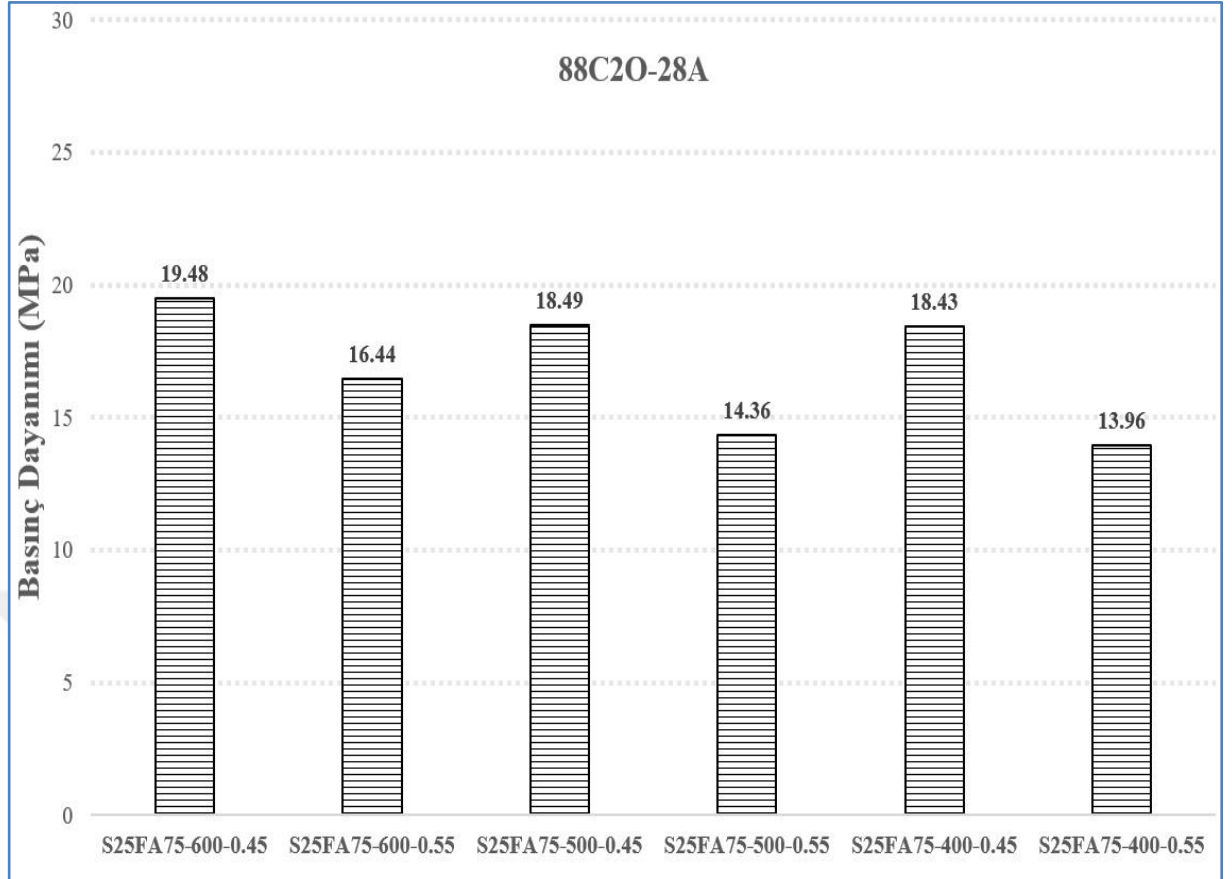
Şekil 4.10'de mevcut geopolimer S25FA75-600-0.45, S25FA75-600-0.55, S25FA75-500-0.45, S25FA75-500-0.55, S25FA75-400-0.45, S25FA75-400-0.55 betonların 88 gün laboratuvarında kür işlemine tabii tutulmasının ardından 2 gün ısı kürüne tabii tutulmuş (88C20) ortamında elde edilen basınç mukavemeti değerleri verilmiştir. S25FA75-600-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 22,41 MPa bulunurken, S25FA75-600-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 21,85 MPa bulunmuştur. S25FA75-500-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 21,89 MPa bulunurken, S25FA75-500-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 22,86 MPa bulunmuştur.

S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 22,30 MPa bulunurken, S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 22,33 MPa bulunmuştur. 88C20 ortamındaki S25FA75 numuneleri değerlendirildiğinde bağlayıcı miktarının değişmesiyle beton basınç mukavemeti değişmemiştir çünkü benzer mukavemet değerleri elde edilmiştir. Aynı şekilde alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan numuneler ile alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan numuneler benzer basınç mukavemeti değerleri göstermiştir. Buradan elde edilecek sonuç gecikmiş ısı kürünün geopolimer beton üzerindeki etkisi çok fazladır. Ayrıca karışımda kullanılan ilave su miktarını bağlayıcının %7.5 oranında seçilmesiyle benzer dayanım değeri elde edilmektedir. Yani 1 m³ betonda 400 kg bağlayıcı içeren geopolimer numunelerde 30 kg su, 500 kg bağlayıcı içeren geopolimer numunelerde 37,5 kg su, 600 kg bağlayıcı içeren geopolimer numunelerde ise 45 kg su kullanılmıştır. Bu şekilde üretilen ve gecikmiş ısı kürü uygulanan geopolimer beton numunelerde Şekil 4.10'da da görülebileceği gibi benzer basınç dayanımı değerleri bulunmuştur.



Şekil 4. 10.88C20 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.11’de mevcut geopolimer S25FA75-600-0.45, S25FA75-600-0.55, S25FA75-500-0.45, S25FA75-500-0.55, S25FA75-400-0.45, S25FA75-400-0.55 betonların 88 gün laboratuvar ardından 2 gün ısı kürüne tabii tutulmuş ve daha sonra 28 gün %5 sülfürik asite maruz kalmış (88C2O-28A) numunelerin basınç mukavemeti değerleri verilmiştir. S25FA75-600-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 19,48 MPa bulunurken, S25FA75-600-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 16,44 MPa bulunmuştur. S25FA75-500-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 18,49 MPa bulunurken, S25FA75-500-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 14,36 MPa bulunmuştur. S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 18,43 MPa bulunurken, S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunesinin basınç mukavemeti 13,96 MPa bulunmuştur. Gecikmiş ısı kürü uygulanan 88C2O ortamındaki S25FA75 numuneleri değerlendirildiğinde, 0.45 alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı oranına sahip betonlar benzer dayanım değeri verirken, 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı oranına sahip betonlarda ise bağlayıcı miktarının azalmasıyla durabilite azalmaktadır. En düşük dayanım 400 kg/m^3 , en yüksek dayanım ise 600 kg/m^3 bağlayıcıya sahip betonlarda mevcuttur.



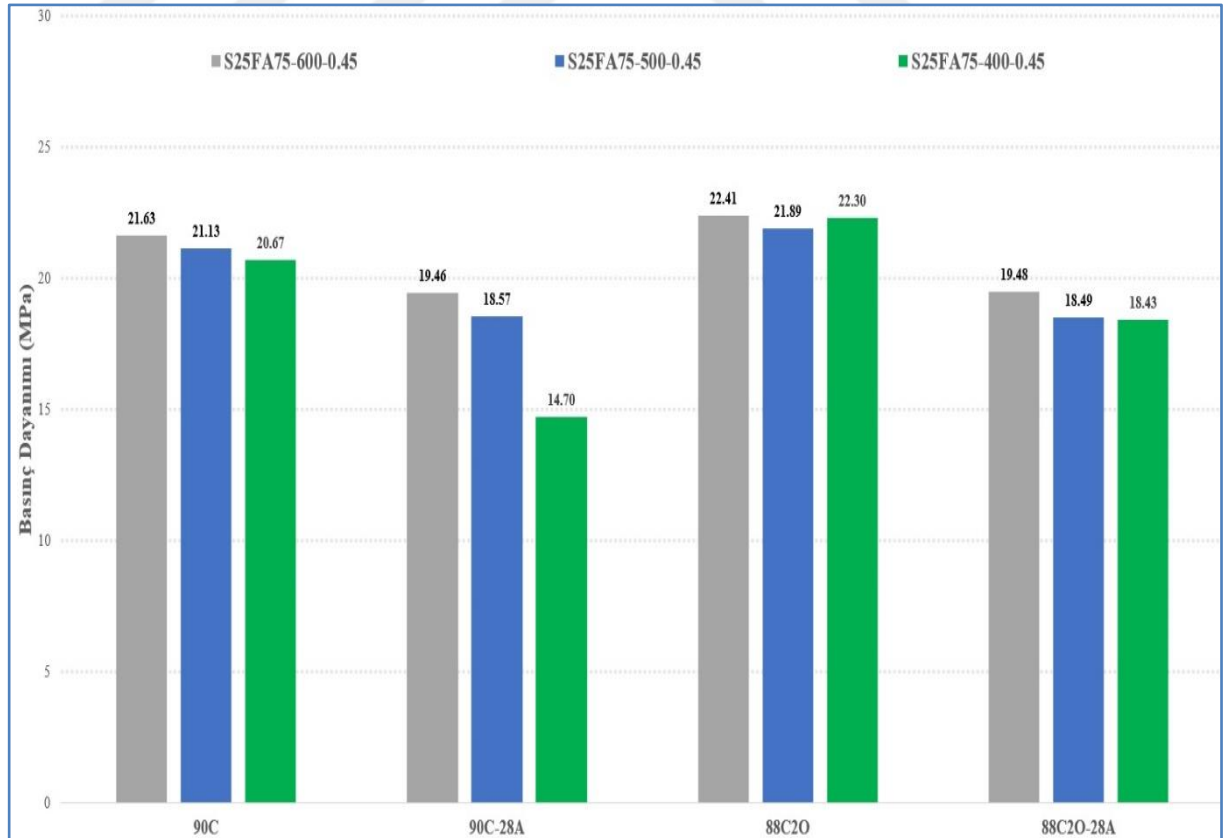
Şekil 4. 11.88C20-28A numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.12'de 0.45 alkali aktivatör/bağlayıcı oranlarına sahip %25 yüksek fırın cürufu ile %75 uçucu kül içermekte olan S25FA75-600-0.45, S25FA75-500-0.45, S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunelerinin 90C, 90C-28A, 88C20, 88C20-28A ortamlarındaki basınç mukavemeti değerleri gösterilmektedir. Alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan geopolimer numunelerin 90 gün laboratuvar ortamlarında (90C) basınç mukavemetleri değerleri incelendiğinde 600kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti 21.63MPa, 500kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti 21.13MPa, 400kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti 20.67MPa bulunmuştur. Basınç mukavemeti değerleri incelendiğinde en yüksek basınç dayanım S25FA75-600-0.45 geopolimer beton numunelerinde, en küçük basınç mukavemeti değerleri ise S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunelerinde görülmüştür.

90 gün laboratuvar ortamlarında bekletip sonrasında 28 gün asitte bekletilen geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemetleri değerleri incelendiğinde

600kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 19.46MPa, 500kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 18.57MPa, 400kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 14.70MPa bulunmuştur. Basınç mukavemetleri değerlerine göre en yüksek basınç dayanım değerleri S25FA75-600-0.45 geopolimer beton numunelerinde, en küçük basınç dayanım değerleri ise S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunelerinde elde edilmiştir.

88 gün laboratuvar ortamlarında bekletip sonrasında 2 gün süresince ısı kücü uygulanan (88C20) numunelerin basınç mukavemetleri değerlerine göre 600 kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 22.41 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 21.89 MPa, 400kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 22.30 MPa bulunmuştur. Basınç mukavemetleri değerleri incelendiğinde en yüksek basınç dayanım değerleri S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunelerinde, en küçük basınç dayanım değerleri ise S25FA75-500-0.45 geopolimer beton numunelerinde görülmüştür.



Şekil 4.12. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan beton numunelerinin basınç dayanımları

88 gün laboratuvar ortamlarında bekletip sonrasında 2 gün süresince fırın kürü uygulayıp ardından 28 gün süresince asitte bekletilen (88C2O-28A) numunelerinin basınç mukavemetleri değerlerine göre 600 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 19.48MPa, 500 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 18.49MPa, 400 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 18.43MPa bulunmuştur. Basınç mukavemetleri değerlerine göre en yüksek basınç dayanım değerleri S25FA75-600-0.45 geopolimer beton numunelerinde, en küçük basınç dayanım değerleri ise S25FA75-400-0.45 geopolimer beton numunelerinde görülmüştür.

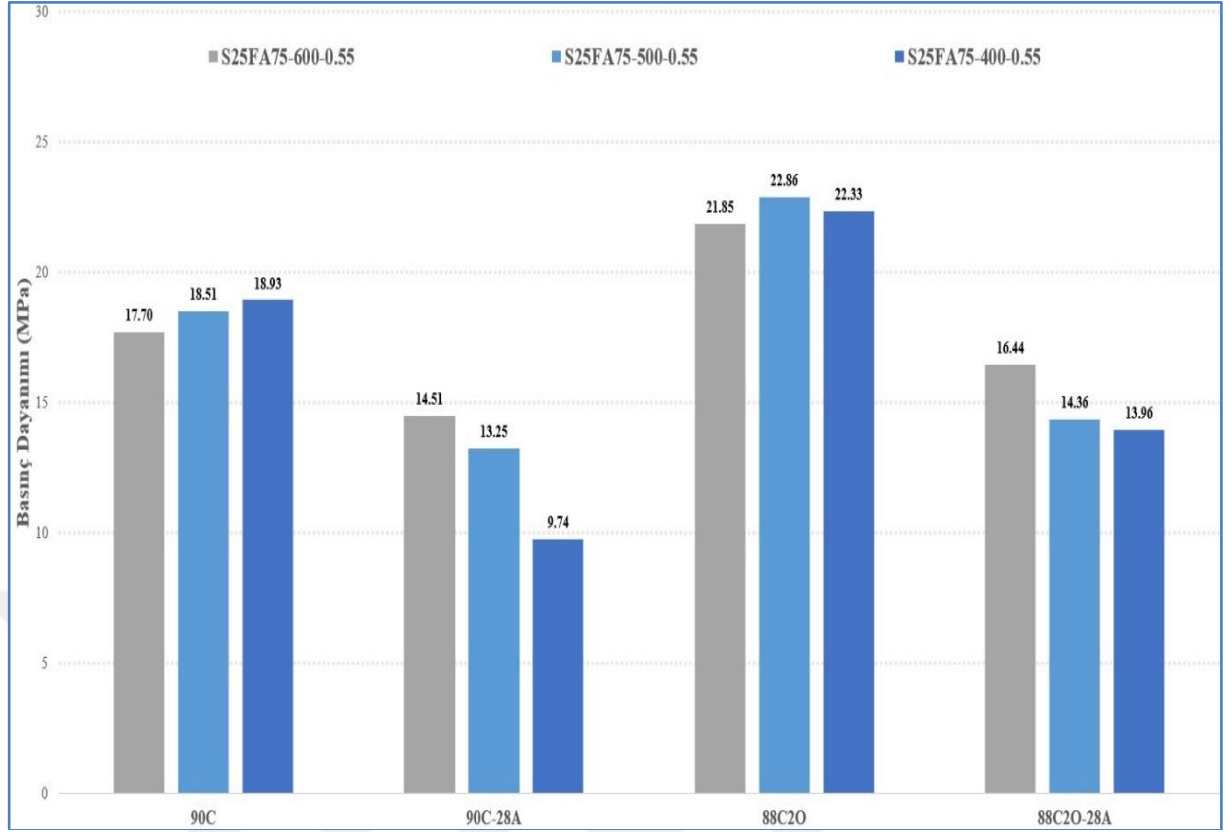
Şekil 4.13'de 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranlarına sahip %25 yüksek fırın cürufu ile %75 uçucu kül içermekte olan S25FA75-600-0.55, S25FA75-500-0.55, S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunelerinin 90C, 90C-28A, 88C2O, 88C2O-28A ortamlarındaki basınç mukavemeti değerleri gösterilmektedir. Alkali solüsyon/Bağlayıcı oranı 0.55 olan geopolimer numunelerin 90 gün laboratuvar ortamlarında (90C) basınç mukavemetleri değerleri incelendiğinde 600 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti 17,70 MPa, 500 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti 18,51 MPa, 400 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti 18,93 MPa bulunmuştur. Basınç mukavemeti değerleri incelendiğinde en yüksek basınç dayanım S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunelerinde, en küçük basınç mukavemeti değerleri ise S25FA75-600-0.45 geopolimer beton numunelerinde görülmüştür.

90 gün laboratuvar ortamlarında bekletip sonrasında 28 gün asitte bekletilen geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemetleri değerleri incelendiğinde 600 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 14,51 MPa, 500 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 13,25 MPa, 400 kg/m^3 bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 9,74 MPa bulunmuştur. Basınç mukavemetleri değerlerine göre en yüksek basınç dayanım değerleri S25FA75-600-

0.55 geopolimer beton numunelerinde, en küçük basınç dayanım değerleri ise S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunelerinde elde edilmiştir.

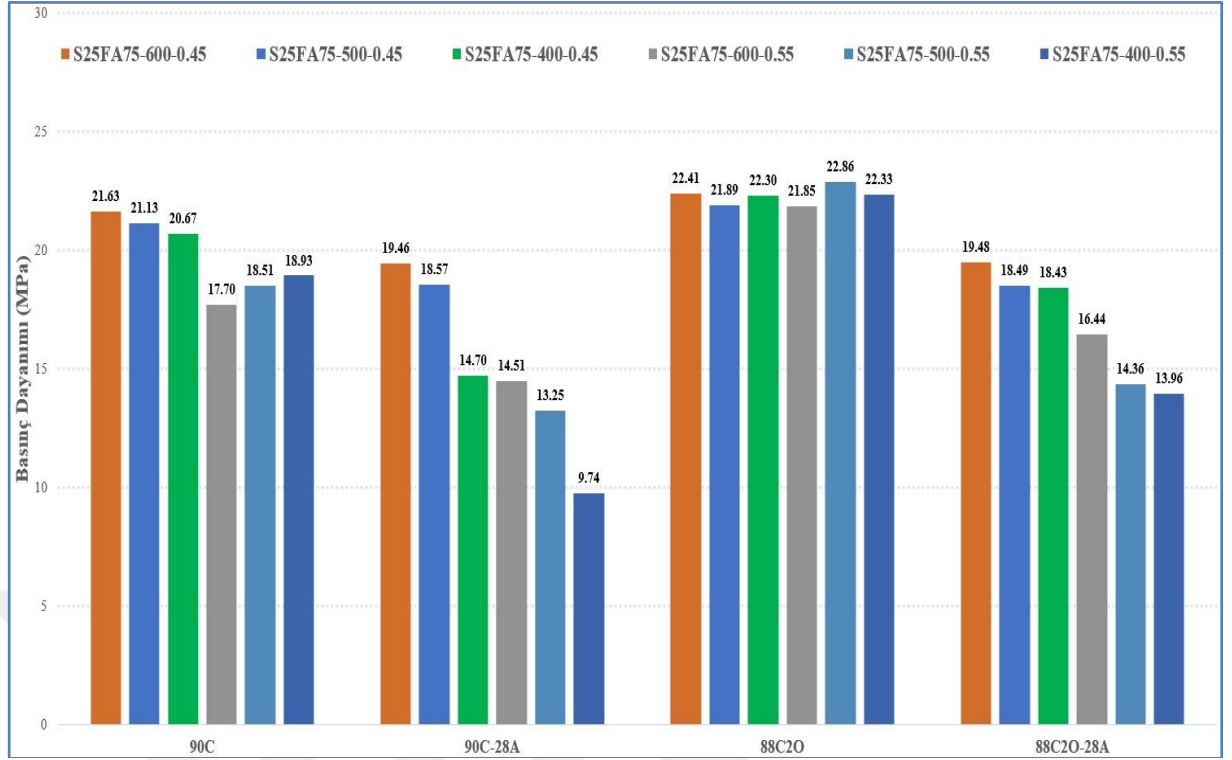
88 gün laboratuvar ortamlarında bekletip sonrasında 2 gün süresince ısı kürü uygulanan (88C2O) numunelerin basınç mukavemetleri değerlerine göre 600 kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 21,85 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 22,86 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 22.33 MPa bulunmuştur. Basınç mukavemetleri değerleri incelendiğinde en yüksek basınç dayanım değerleri S25FA75-500-0.55 geopolimer beton numunelerinde, en küçük basınç dayanım değerleri ise S25FA75-600-0.55 geopolimer beton numunelerinde görülmüştür.

88 gün laboratuvar ortamlarında bekletip sonrasında 2 gün süresince fırın kürü uygulayıp ardından 28 gün süresince asitte bekletilen (88C2O-28A) numunelerinin basınç mukavemetleri değerlerine göre 600 kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 16,44 MPa, 500 kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 14,36 MPa, 400 kg/m³ bağlayıcı miktarlarına sahip numunelerin ortalama basınç mukavemeti değerleri 13,96 MPa bulunmuştur. Basınç mukavemetleri değerlerine göre en yüksek basınç dayanım değerleri S25FA75-600-0.55 geopolimer beton numunelerinde, en küçük basınç dayanım değerleri ise S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunelerinde görülmüştür.



Şekil 4.13.0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.14 'de ise 0.45 ile 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı oranlarına sahip yani tüm geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemeti değerlerinin olduğu sonuçlar gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında ise en yüksek basınç dayanımına sahip numuneler 88 gün laboratuvarında bekletilen ardından 2 gün ısı kürü uygulanan S25FA75-500-0.55 geopolimer beton numunelerinde 22.86MPa olarak bulunmuştur. En düşük basınç dayanımına sahip olan numuneler ise 90 gün laboratuvarında bekletip 28 gün asite maruz kalan S25FA75-400-0.55 geopolimer beton numunelerinde 9.74 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 4.14 dikkatlice incelendiğinde asite maruz kalmayan numunelerin dayanım farkları birbirlerine çok yakinken, %5 sülfürik asit ortamına maruz kalan geopolimer beton numunelerinde ise hem bağlayıcı miktarının hem de alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı oranının etkisi rahatlıkla görülmektedir.



Şekil 4.14.0.45 ve 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

SONUÇLAR

Yapılan bu tez çalışması kapsamında uçucu kül bazlı geopolimer betonlarda gecikmiş ısı kürü etkisinin ve yüksek fırın cürufu ikamesinin dayanım ve durabilite özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla %25 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu %75 F-tipi uçucu kül içeren bağlayıcıya ikame edilerek farklı geopolimer betonlar elde edilmiştir. Çalışmada 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 ve 600 kg/m^3 bağlayıcı miktarları ve 0.45 ile 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı oranları ile üretilmiş geopolimer betonların %5 sülfürik asit ortamında dayanım ve durabilite özellikleri irdelenmiştir. Ayrıca gecikmiş ısı kürünün geopolimer betonlarda etkisi de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- 400 kg/m^3 bağlayıcı içeren numunelerde yüzey bozulma oranı en fazla, 600 kg/m^3 bağlayıcı içeren numunelerde ise yüzey bozulma oranının en az olduğu görülmektedir. Yüzeydeki bozulma miktarı kullanılan bağlayıcı miktarının artması ile azalmıştır. Ayrıca alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan numuneler, alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan numunelere göre daha fazla bozulmuştur. Gecikmiş ısı kürünün bozulma oranına etkisi belirgin değildir çünkü neredeyse ısı kürü uygulanmamış numunelerle benzer bozulma oranları göstermiştir.

- Ağırlık değişimi sonuçlarına göre, sülfürik asit emiliminden dolayı 28 günde numune ağırlıklarında artış meydana gelmiştir. En fazla ağırlık artışı S25FA75-400-0.55 numunelerinde 90C-28A ortamında olurken, en az ağırlık artışı ise S25FA75-600-0.55 numunelerinde 88C2O-28A ortamında olmuştur. Gecikmiş ısı kürünün, bağlayıcı miktarının ve alkali solüsyon/bağlayıcı miktarının geopolimer beton numunelerindeki ağırlık değişimine etkisi net olarak bulunamamıştır. Bunun nedeni numunelerden bazılarının asit emiliminden dolayı ağırlıkları artarken bazılarının ise matris ve agrega dökülmesinden dolayı ağırlıkları azalmıştır.

- 90C ortamındaki numuneler değerlendirildiğinde bağlayıcı miktarının değişmesiyle beton basınç mukavemeti değişmemiştir çünkü benzer mukavemet değerleri elde edilmiştir. Alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan numuneler, alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan numunelerden biraz daha düşük dayanım değeri göstermiştir. 90C ortamında bağlayıcı miktarının değişimi basınç mukavemetini etkilememiştir.

•88C2O ortamındaki numunelerde ise tüm numuneler neredeyse benzer basınç mukavemetine sahiptir. Burada bağlayıcı miktarının değişimi ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranlarının değişimiyle basınç dayanımları hiçbir şekilde etkilenmemiştir. Basınç mukavemetleri 90C ortamındaki değerlerden bir miktar daha yüksektir. Bu da gecikmiş ısı kürünün dayanım sonuçlarını etkilediğini göstermektedir.

•90C28A ortamındaki numunelerde ise, 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcı oranına sahip numuneler benzer dayanım değerleri gösterirken, 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip numunelerde ise basınç dayanımı bağlayıcı miktarının azalmasıyla beraber düşmüştür. Sülfürik asit etkisi altında 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip betonlarda ise bağlayıcı miktarının artmasıyla geopolimer betonun dayanım ve durabilitesi artmıştır.

•88C2O-28A ortamında ise 90C28A ortamına benzer şekilde 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcı oranına sahip numuneler benzer dayanım değerleri gösterirken, 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip numunelerde ise basınç dayanımı bağlayıcı miktarının azalmasıyla beraber düşmüştür.

•Sonuçlara göre kontrol ortamında zararlı iyonlara maruz kalmayacak bir geopolimer beton için bağlayıcı miktarının değişimi ve alkali aktivatör/bağlayıcının oranı basınç dayanımı sonuçlarını çok fazla etkilememektedir. Fakat durabilite söz konusu olduğunda özellikle 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranlarında bağlayıcının miktarı çok önemli olmaktadır. İyi bir durabilite performansı elde etmek için geopolimer betonların tasarımında 0.45 alkali aktivatör/bağlayıcı oranında 400 kg/m^3 kullanılabilirken, 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranında en az 500 kg/m^3 bağlayıcı kullanımı tavsiye edilmektedir.

KAYNAKÇA

- Aleem, M., & Arumairaj, P. (2012). Geopolymer concrete—a review. *International journal of engineering sciences & emerging technologies* , 1(2), 118-122.
- Alnkaa, A. (2019). *Farklı Kür Koşullarının Geopolimer Harç Özelliklerine Etkisi* . Kastamonu: Kastamonu Üniversitesi.
- Alp, S. (2004). *Kum, Kil Ve Taş Ocakları Sektör Raporu*. İstanbul Ticaret Odası.
- Altındal, İ. (2020). *Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi*. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Baradan, B., & Aydın, S. (2013). Betonun Durabilitesi(Dayanıklılık,Kalıcılık).Beton. *Hazır Beton Kongresi* , 265-288.
- Bing-hui, M., Zhu, H., Xue-min, C., Yan, H., & Si-yu, G. (2014). *Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers* (Cilt 99). Appl. Clay Sci.
- Bureau of Reclamation, U. S. (1963). *"Concrete Manual"*, U.S. Bureau of Reclamation. Denver, Colorado.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and applications*. Saint Quentin.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and applications*. Saint Quentin.
- Doğangün, A. (2018). *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J., Lukey, G., Palomo, A., & van Deventer, J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci* , 42(9), 2917-2933.
- E., L., & C.D, A. (2016). “Strength Properties of Slag/Fly Ash Blends Activated with Sodium Metasilicate and Sodium Hydroxide+ Silica Fume,”. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering* , vol. 60, no. 2, s. pp. 223.
- Ekinci, M. (2018). ÇİMENTO. *Ayrıntı Dergisi* , 6, 65.
- Ekmen, Ş., & Mermerdaş, K. (2018). “Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi”. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi* , 3(3), 93-101.
- Elibol, C. (2012). *Alkalilerle Aktive Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımlarının İncelenmesi*. İstanbul: I.T.Ü. FenBilimleri Enstitüsü.

- Engin, Y. (2015). *Yüksek Fırın Cürüflü Çimento Üretimi Özellikleri ve Etkisi*. www.betonvecimento.com adresinden alınmıştır
- Erdoğan, T. (2003). *Beton*. Ankara: ODTU Geliştirme Vakfı Yayın ve İletişim Şti. .
- Erdoğan, T. (2004). Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri. THBB Yayınları.
- Erdoğan, Ş., & Kurbetçi, Ş. (2003). Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri. 426 , 115-120. Türkiye Mühendislik Haberleri.
- Gomes, B., Souza, S., Ferraz, C., Teixeira, F., Zaia, A., Valdrighi, L., et al. (2003). Effectiveness of 2% chlorhexidine gel and calcium hydroxide against *Enterococcus faecalis* in bovine root dentine in vitro. *Int Endod J* , 36, 267-275.
- Haddad, R., & Alshbuol, O. (2016). *Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study* (Cilt 114(1)). Constr. Build. Mater.
- Hou, D., Ma, H., Zhu, Y., & Li, Z. (2014). Calcium silicate hydrate from dry to saturated state: Structure, dynamics and mechanical properties. *Acta materialia* , 67, 81-94.
- Kantarcı, F. (2013). *Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması*. Malatya: Fen Bilimleri Enstitüsü İnönü Üniversitesi.
- Kantarcı, F. (2013). *Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması*. Malatya: Fen bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi.
- Keklik, U. (2020). *Silis dumanı içeren geopolimer betonların% 5 sülfürik asit etkisinde durabilite performanslarının incelenmesi*. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Li, G. (2004). *Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂*. *Cem* (Cilt 34(6)). Concr. Res.
- Lloyd, N., & Rangan, V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. In Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies . (s. pp. 1493-1504). UWM Center for By-Products Utilization.
- Maraş, M. (2013). *Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması*. Malatya: Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi.
- McNulty, E. (2009). Geopolymers: An Environmental Alternative To Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement. *Department Of Chemistry* . The Catholic University Of America.

- Murashev, V., Sigalov, E., & Baikov, V. (1968). "Design of Reinforced Concrete Structures". Moscow: MIR Yayınları.
- Özgür, S. (1996). *Türkiye çimento sanayii ve üretilen çimento türleri*. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztekin, E., & Cimilli, T. (1987). "History and Use of Blended Cements in Turkey" (Cilt 9). Cement, Concrete and Aggregates.
- Pacheo-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). "Alkali-Activated Binders: A Review: Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products". Construction and Building Materials.
- Palomo, A., & dela Fuente, J. (2003). Cem Conc Res 33:281. 33(2).
- Palomo, A., Grutzeck, M., & Blanco, M. (1999). "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future" (Cilt 29). Cement And Concrete Research.
- Paşa, O. (2018). *Uçucu kül ve silis dumanı katkılı yüksek dayanımlı betonların kalıcılık özellikleri*. Bilecik: Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Patankar, S., Ghugal, Y., & Jamkar, S. (2014). Effect of Concentration of Sodium Hydroxide and Degree of Heat Curing on Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. *Indian Journal of Materials Science* .
- Privanka, M., & Ruben, N. (2019). Sustainable Construction and Building Materials—A Review on Performance of Geopolymer in Concrete. *Sustainable Construction and Building Materials* , 245-251.
- Rahier, H., Van Mele, B., Biesemans, M., Wastiels, J., & Wu, X. (1996). Low-Temperature Synthesized Aluminosilicate Glasses.1. Low-Temperature Reaction Stoichiometry And Structure Of A Model Compound. *Journal of Materials Science* , 31, 71–79.
- Revathi, V., Saravanakumar, R., & Tharrini, J. (2014). Effect of molar ratio of SiO₂/Na₂O, Na₂SiO₃/NaOH ratio and curing mode on the compressive strength of ground bottom ash geopolymer mortar. *International Journal of Earth Sciences and Engineering* , 7, 1511-1516.
- Smith, W. (2017). *Relating concrete cube, core and cylinder compressive strengths that are cast, cured, prepared and tested in laboratory conditions*. University of Cape Town.
- Subaşı, S., İşbilir, B., & Ercan, İ. (2011). Uçucu Kül İkameli Çimento Numunelerinin Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi. *Politeknik Dergisi* , 14, 141-148.

- Temuujin, J., Rickard, W., Lee, M., & Van Riessen, A. (2011). *Preparation and Thermal Properties of Fire Resistant Metakaolin-Based Geopolymer-Type Coatings* (Cilt 357(5)). *Journal of Non-Crystalline Solids*.
- Temuujin, J., Van Riessen, A., & Williams, R. (2009). “Influence of Calcium Compounds on the Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes”. *Journal of Hazardous Materials Journal of Hazardous Materials* , 167.
- Temuujin, J., Van Riessen, A., & Williams, R. (2009). Kalsiyum Bileşiklerinin Uçucu Kül Geopolimer Pastalarının Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Tehlikeli Malzemeler Dergisi Tehlikeli Malzemeler Dergisi* .
- Thang, X. N. (2016). Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* , ISSN: 2278-0181.
- 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.2015.04.072.
- Türker, P., Erdoğan, B., Kantaş, F., & Yeğınobalı, A. (2007). *Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı Ar – Ge.
- Uyan, M. (1996). Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkinliğı 4. Ulusal Beton Kongresi. 13-23. İstanbul.
- Yonar, Y. (2014). *Geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığı/The resistance of high temperature on concrete with polyvinyl alcohol fiber and geopolymer cement exposed to high temperature*. Elazığ: Fırat Üniversitesi.