

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**FARKLI MOLARİTELİ VE ATIKSERAMİK TOZLU
ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN
MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ**

Yüksek Lisans Tezi

Ferhat EROL

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood AL-MASHHADANI

Eş Danışman

Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ

İstanbul – 2023

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Ferhat EROL

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : Farklı Molariteli ve Atık Seramik Tozlu Alkali ile Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tezin Türü : Yüksek Lisans

Tezin Tarihi : 18.01.2023

Sayfa Sayısı : 69

Tez Danışmanları : 1. Dr.Öğr.Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood
AL-MASHHADANI
2. Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ

Dizin Terimleri : Seramik Tozu, Geopolimer, Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu

Türkçe Özet : Seramik atık tozu ikameli ve farklı sodyum hidroksit molariteli oda koşullarında kürlenmiş alkali ile aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi yapılarak çevreci bir ürün üretilecektir.

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

İmzası

Ferhat EROL

T.C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

FARKLI MOLARİTELİ VE ATIKSERAMİK TOZLU
ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN
MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

Yüksek Lisans Tezi

Ferhat EROL

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood AL-MASHHADANI

Eş Danışman

Doç. Dr.Yurdakul AYGÖRMEZ

İstanbul – 2023

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.

Ferhat EROL

.../.../2023



İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Ferhat EROL'un 'Farklı Molariteli ve Atık Seramik Tozlu Alkali ile Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri''adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza
Başkan *Dr. Öğr. Üyesi Furkan ŞAHİN*

İmza
Üye *Doç. Dr. Anıl NİŞ*

İmza
Üye *Dr. Öğr. Üyesi Mukhallad Mohammed Mawlood*
AL-MASHHADANI
(Danışman)

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 2023

İmzası
Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ
Enstitü Müdürü

ÖZET

Beton, yapılarda çoğunlukla kullanılan yapı malzemelerin başında gelmektedir. İlerleyen zamanlarda beton kullanımının artan nüfusa oranla daha da artış göstereceği öngörülmektedir. Ancak betonun üretiminde kullanılan Portland çimentosu çok fazla CO₂ emisyonu salınımı yaptığından dolayı çevreyi ve atmosferi kirletmektedir. Dünyadaki CO₂ salınımı yaklaşık %7 oranında çimento ve türevlerinin üretiminden kaynaklanmaktadır. Gelecek nesillere yaşanılabilir ve yeşil bir çevre bırakmak için geopolimer ve benzeri beton türlerine ihtiyaç vardır.

Geopolimerler, doğal veya yapay puzolanların, alkali aktivatörlerle aktivasyonu yoluyla elde edilir. Alternatif bağlayıcılardan olan geopolimer bağlayıcılar, çevresel etkilerinin düşük olması ve yıpratıcı dış etkenlere karşı daha dayanıklı olmasından ötürü son yıllarda yaygın bir biçimde araştırılmaktadır. Geopolimerlerin kimyasal reaksiyonlarda CO₂ açığa çıkartmadıklarından ve de üretim çeşitliliğinden ötürü geleneksel Portland çimentolara kıyasla, daha düşük enerji harcadığı bilinmektedir. Son dönemde yapılarda geopolimer beton kullanımına yönelik farklı çalışmalar yürütülmektedir.

Bu çalışmada endüstriyel atık malzeme olarak seramik tozu ikame edilerek geopolimer harçlar üretilmiş ve bu harçların mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, endüstriyel atık ikameli geopolimer harçlarda deneyler kapsamında basınç, eğilme, ultrases geçiş hızı, donma-çözülme, yüksek sıcaklık, birim ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir.

İlk adım olarak, kontrol numunelerinde ve seramik tozu ikameli numunelerde su emme, birim ağırlık ve boşluk oranı değerleri araştırılmış, daha sonra numunelerin basınç ve eğilme dayanımı, yüksek sıcaklık, donma çözülme ve ultrases geçiş hızı testleri sonucunda deneysel bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar genel itibariyle, seramik tozu ikameli malzemenin faydalı olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Seramik Tozu, Geopolimer, Sodyum Hidroksit, Sodyum Silikat, Eğilme ve Basınç Dayanımı, Ultrases Geçiş Hızı, Fiziksel özellikler, Donma-Çözülme, Yüksek Sıcaklık Testi

SUMMARY

Concrete is one of the building materials mostly used in buildings. In the future, it is predicted that the use of concrete will increase even more in proportion to the increasing population. However, Portland cement, which is used in the production of concrete, pollutes the environment and atmosphere because it emits a lot of CO₂ emissions. About 7% of the world's CO₂ emissions originate from the production of cement and its derivatives. Geopolymer and similar concrete types are needed to leave a livable and green environment for future generations.

Geopolymers are obtained by activating natural or artificial pozzolans with alkali activators. Geopolymer binders, one of the alternative binders, have been widely researched in recent years due to their low environmental impact and greater resistance to external abrasive factors. It is known that geopolymers consume less energy compared to traditional Portland cements because they do not release CO₂ in chemical reactions and due to the variety of production. Recently, different studies have been carried out on the use of geopolymer concrete in buildings.

In this study, geopolymer mortars were produced by replacing ceramic powder as industrial waste material and the mechanical and durability properties of these mortars were investigated. In this context, compressive, flexural, ultrasonic pulse velocity, freezing-thawing, high temperature, unit weight tests were carried out within the scope of tests on industrial waste substituted geopolymer mortars.

As a first step, water absorption, unit weight and void ratio values were investigated in control samples and ceramic powder substituted samples, then an experimental comparison was made as a result of the compressive and flexural strength, high temperature, freezing-thawing and ultrasonic pulse velocity tests of the samples. The results showed that, in general, the ceramic powder-substituted material was beneficial.

Keywords: Blast Furnace Slag, Fly Ash, Ceramic Powder, Geopolymer, Sodium Hydroxide, Sodium Silicate, Flexural and Compressive Strength, Ultrasonic Pulse Velocity, Physical Properties, Freeze-Thaw, High Temperature Test

İÇİNDEKİLER

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

BİRİNCİ BÖLÜM LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Literatür Özeti.....	2
---------------------------	---

İKİNCİ BÖLÜM GENEL KISIMLAR

2.1. Geopolimer Beton.....	6
2.1.1. Geopolimer	6
2.1.2. Geopolimerin Tarihçesi	10
2.1.3. Geopolimer Betonun Özellikleri	12
2.1.4. Geopolimerlerin Kullanım Alanları.....	17
2.1.5. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Öncü Malzemeler	21
2.1.5.1. Geopolimerlerde Kullanılan Toz Malzemeler.....	21
2.1.5.1.1. Yüksek Fırın Cürufu	21
2.1.5.1.2. Uçucu Kül.....	23
2.1.5.1.3. Seramik Tozu.....	26
2.1.5.2. Geopolimerde Kullanılan Alkali Aktivatörler.....	29
2.1.5.2.1. Sodyum Hidroksit	29
2.1.5.2.2. Sodyum Silikat.....	30
2.1.6. Geleneksel Betonun Yapısı ve Özellikleri	31
2.1.7. Geopolimer Beton ve Geleneksel Betonun Karşılaştırılması	32
2.1.8. Geopolimer Avantaj ve Dezavantajları	34

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM METERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Malzemeler	37
3.1.1. Seramik Tozu, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu	37
3.1.2. Kum	38
3.1.3. Kimyasal Katkılar.....	39
3.1.3.1. Sodyum Silikat	39
3.1.3.2. Sodyum Hidroksit.....	39
3.2. Deney Çalışmaları	40
3.2.1. BasınçDayanımı Testi	40
3.2.2. Eğilme Dayanımı Testi.....	41
3.2.3. Ultrases Geçiş Hızı Testi	41
3.2.4. Fiziksel Özellikler Testi (Boşluk Oranı, Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri).....	42
3.2.5. Yüksek Sıcaklık Testi.....	43
3.2.6. Donma Çözünme Testi	44

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM DENEY SONUÇLARI

4.1. Deney Çalışmaları	45
4.1.1. Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	45
4.1.2. Ultrases Geçiş Hızı Test Sonuçları.....	48
4.1.3. Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Sonuçları	49
4.1.4. Yüksek Sıcaklıkta Basınç, Eğilme, Ultrases Geçiş Hızı ve Ağırlık KaybıDeney Sonuçları	50
4.1.4.1. Basınç Dayanım Sonuçları	50
4.1.4.2. Eğilme Dayanım Sonuçları.....	51
4.1.4.3. Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları.....	52
4.1.4.4. Ağırlık Kaybı Sonuçları	53
4.1.5. Donma Çözülme Testinde Basınç, Eğilme, Ultrases Geçiş Hızı ve Ağırlık Kaybı Deney Sonuçları	54
SONUÇLAR	58
KAYNAKÇA.....	61

KISALTMALAR

SAT	:	Seramik Atık Tozu
SH	:	Sodyum Hidroksit
YFC	:	Yüksek Fırın Cürufu
UK	:	Uçucu Kül
UGH	:	Ultrases Geçiş Hızı



SİMGE LİSTESİ

CO₂ :Karbon dioksit

CaCO₃:Kireçtaşı

PÇ :Portland Çimento

NaOH :Sodyum hidroksit

Na₂SiO₃:Sodyum Slikat

CaO :Kalsiyum Oksit

MgO :Magnezyum Oksit

SiO₂:Silisyum Dioksit

Al₂O₃:Alüminyum Oksit

gr/cm³:Gram/santimetreküp

kg/m³:Kilogram/metreküp

kg :Kilogram

mm :Milimetre

°C :Santigrat

MPa :Megapaskal

gr :Gram

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Geopolimerin Kimyasal Bileşimi.....	9
Şekil 2.2. Uçucu kül tabanlı geopolimerde CaO miktarının bağlayıcının basınç dayanımına ve priz süresine etkisi (Diaz vd., 2010)	13
Şekil 2.3. Davidovits Zincir Yapı Modeli.....	14
Şekil 2.4. Mikrodalga (MD) ve ısı kürlenmenin farklı NaOH içeren bileşimlerin dayanımına etkisi (Somaratna vd., 2010).....	16
Şekil 2.5. Ukrayna’da geopolimer beton kullanılarak üretilmiş konut yapıları (Hardjito, 2005).....	19
Şekil 2.6. Geopolimerden üretilmiş bazı kompozit yapılar (Davidovits, 2008).....	21
Şekil 2.7. Puzolanik malzemelerin yapısı, GGBFS(Öğütülmüş yüksek-fırın cürufu), Type F, TYP C (Uçucu kül), OPC (Portland Çimento) (Reeves, 1985).....	23
Şekil 2.8. Uçucu külün mikro yapısı (Lecomte-Nana vd., 2012).....	25
Şekil 3.1. Seramik Tozu Numunesi.....	38
Şekil 3.2. Sodyum Silikat.....	39
Şekil 3.3. Sodyum Hidroksit.....	40
Şekil 3.4. Deney kapsamında kullanılan numuneler.....	43
Şekil 4.1. Numunelerin Basınç Dayanım Sonuçları.....	47
Şekil 4.2. Numunelerin Eğilme Dayanım Sonuçları.....	47
Şekil 4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları.....	49
Şekil 4.4. Yüksek Sıcaklıkta Basınç Dayanım Sonuçları.....	51
Şekil 4.5. Yüksek Sıcaklıkta Eğilme Dayanım Sonuçları.....	52
Şekil 4.6. Yüksek Sıcaklıkta Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları.....	53
Şekil 4.7. Yüksek Sıcaklıkta Ağırlık Kaybı Sonuçları.....	54
Şekil 4.8. Donma Çözülme Sonrası Basınç Dayanım Deney Sonuçları.....	55
Şekil 4.9. Donma Çözülme Sonrası Eğilme Dayanım Deney Sonuçları.....	56
Şekil 4.10. Donma Çözülme Sonrası Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları.....	57
Şekil 4.11. Donma Çözülme Sonrası Ağırlık Kaybı Deney Sonuçları.....	57

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Geopolimer malzemelerin uygulamaları (Hlavacek, 2014).....	18
Çizelge 2.2. Geopolimerin kullanım alanları.....	20
Çizelge 3.1. Bağlayıcı malzemelerinin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri.....	38
Çizelge 3.2. Alkali ile aktive edilmiş harçların karışım bileşenleri (g).....	45
Çizelge 4.1. Numunelerin Fiziksel Özellik Sonuçları.....	50



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının sonuçlandırılmasında, engin bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, büyük bir sabır ve ilgiyle yaşadığım problemlere çözümler sunan ve gelecekteki mesleki yaşamımda da bana sunduğu değerli katkılardan faydalanacağımdan emin olduğum değerli danışman hoca statüsünü gerektiğinden fazla bir şekilde yerine getiren Dr. Öğr. Üyesi MUKHALLAD MOHAMMED MAWLOOD AL-MASHHADANI hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın her bölümünde emeği bulunan değerli eş danışman hocam Doç. Dr. YURDAKUL AYGÖRMEZ'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans tez çalışmam ve çalışma hayatımda benim destekçim olan, herhangi konuda maddi ve manevi desteklerini eksik hissetmediğim babama, anneme ve tüm aileme teşekkür ederim.

GİRİŞ

Portland çimentosu beton yapılarda yoğun olarak kullanılan önemli bir üründür. Artan nüfusla beraber bu durumun daha da artması beklenmektedir. Bu durum ekonomik olarak bir sorun oluşturmaktadır. Aynı zamanda çimento üretiminde CO₂ emisyonunun oluşması da çevre açısından problemlere yol açmaktadır. Gelecek nesillere daha yeşil ve yaşanılabilir bir çevre bırakmak için geopolimer ve benzeri beton türlerine ihtiyaç vardır.

Bu tez çalışmasında, seramik tozu ile üretilen geopolimer kompozitlerin performansları araştırılmıştır. Bütün çalışmalarda karşılaştırma için yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve kumdan oluşan çimento harcı kullanılmıştır. Öncelikle, birim ağırlık ve boşluk oranı değerleri hesaplanmıştır. Daha sonrasında kontrol numunelerin ve seramik tozu ikameli numunelerin performansı eğilme ve basınç davranışı ve ultrases geçiş hızı testleri ile karşılaştırılmıştır.

Beton endüstrisinde geopolimer teknolojisinden daha fazla yarar alınmasını sağlamak için, durabilite deneyleri için araştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda 100 döngüden oluşan donma-çözülme testi uygulanmıştır. Aynı şekilde 300°C, 600°C, 900°C'lik yüksek sıcaklık testi gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık ve donma-çözülme testleri sonrası mekanik testler yapılmıştır. Gerçekleştirilen testlerde basınç dayanımı, ağırlık kaybı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçları incelenmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

1.1 Literatür Araştırması

Beton dünyada en çok kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. Standart bir beton üretiminde ihtiyaç duyulan çimentonun üretilmesi esnasında açığa çıkan CO₂ oranının tüm dünyada açığa çıkan CO₂ emisyonunun en az %5-8'ini oluşturduğu düşünülmektedir (Scrivener ve Kirkpatrick, 2008). Çimento üretiminin çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması adına, dünyanın her yerinden birçok kurum ve kuruluş tarafından, alternatif bağlayıcı sistemlerinin geliştirilmesine ve uygulanmasına yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Bugünün dünyasında, çimentonun yapı malzemelerinde bağlayıcı olarak kullanımı, alternatifi olmadığından dolayı vazgeçilmez olduğu düşünülenebilir. Fakat, çimento esaslı yapı malzemelerinin birtakım kimyasal etkiler karşısında yeterince dirençli olmaması teknik açıdan en büyük dezavantajlarından biridir.

Davidovits tarafından ilk kez 1978'de açıklanmış ve sınıflandırılmış olan geopolimer üzerine günümüze kadar pek çok araştırma yapılmıştır. Davidovits'in bu ismi uygun görmesindeki başlıca sebep, geopolimer oluşumunda gerçekleşen reaksiyonun termoset polimerlerin kondenzasyonu, bir diğer ifade ile polikondenzasyon reaksiyonu ile yüksek benzerlik taşımasıdır (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Davidovits tarafından boyutlu alümina-silikat temelli bir bağlayıcı olarak tarif edilen geopolimer, katı formda bulunan alümina-silikatla yüksek konsantrasyonda sıvı alkali hidroksit ya da silikat çözeltisinin reaksiyona girmesi ile oluşur. Aynı tür geopolimer malzeme için farklı isimler kullanıldığı da görülmektedir (Xuve Van Deventer, 2000). Düşük sıcaklıklı alüminosilikatlar (Rahier vd., 1996), alkali aktive edilmiş betonlar (Palomo, ve delaFuente, 2003), inorganik polimer beton (Davidovits, 2002), alkali bağlı seramikler (Mallicoat, 2009), ve hidroseramikler (Baovd., 2005) gibi birçok isim kullanılmaktadır (Bakharev, 2006).

Metakaolin tabanlı geopolimer harçlarının mekanik özelliklerini inceleyen Pelisser vd.; elastisite modülünü, sertliği, eğilme ve basınç dayanımını, eğilme modülünü ve mikroyapısal analizi tespit etmek adına çeşitli deneyler yapmıştır. Deneylerin sonuçları, mukavemet özellikleri ve elastisite modülü bakımından Portland çimento harçlarına kıyasla geopolimer harçların daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Bunun yanında, her iki çimentodan elde edilen harçların mikromekanik niteliklerinin benzer olduğu görülmüş, fakat deformasyon kapasitesi ile çekme mukavemeti bakımından geopolimer harçlardan daha iyi sonuç alındığı anlaşılmıştır (Pelisservd.,2013).

Rovnaník vd. metakaolin tabanlı geopolimer yapının sertleşme gelişiminde kür sıcaklığı etkisine ilişkin testleri gerçekleştirmiştir. Kür sıcaklığının (10°C, 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C) ve sürenin alkali aktive edilmiş metakaolin tabanlı numuneye ait basınç ve eğilme dayanımlarına, gözenek dağılımına ve mikro yapıya etkilerinin analiz edilmesi amacıyla yürütülen çalışmada; gözenek büyüklüğündeki artış ve kümülatif gözenek hacmi ile sıcaklık yükselişi arasında ilişki tespit edilmiş ve bunun mekanik özelliklere tki ettiği görülmüştür. Aynı zamanda, kızılötesi spektroskopi testi aracılığıyla, reaksiyon sürecinin takip edilmesinin olanaklı olduğu neticesine ulaşılmıştır (Rovnaník ve Al, 2010).

Mehta ve Siddique (2018) tarafından, sürdürülebilir geopolimer betonun daha ileri seviyeye getirilmesine yönelik olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve pirinç kabuğu külü (PKK) gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanımı üzerine bir araştırma yürütülmüştür. ÖYFC esaslı geopolimer beton karışımı hazırlanarak; 90 güne kadar ÖYFC'nin kısmi ikamesi olarak PKK eklenmesinin basınç dayanımına, çekme dayanımına, klorür geçirgenliğine ve kapillariteye etkisi incelenmiştir. Araştırmanın sonuçları, yaklaşık 60 MPave üstü 3 günlük basınç dayanımı ile ÖYFC ve PKK kullanarak geopolimer betonun geliştirilebileceğine işaret etmekte olup; PKK %15'lik bu optimum içeriğin ötesinde dahil edilmesi olumsuz sonuçları beraberinde getireceği ifade edilmiştir (Mehta ve Siddique, 2018).

Villaquirán-Caicedo ve de Gutiérrez (2018) tarafından yapılan çalışmada, metakaolin, KOH, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı gibi çevre dostu silika kaynaklarını kullanarak üretmiştir. Söz konusu deneylerde ortaya çıkan sonuçlar, geopolimerin geliştirilmesine yönelik silis kaynağı olarak PKK ve SD kullanılabilirliğini göstermiş olup; PKK ve SD'nin, karbon ayak izinin azaltılması adına teknolojik yönden dikkat çeken malzemelerde kullanılabilirliği belirtilmiştir (Villaquirán-Caicedo ve de Gutiérrez, 2018).

Ön kütleme ve toz haline getirme işlemleri uygulanarak geopolimer hazırlayan Liew vd. (2017); tek parçalı karıştırma işlemlerinin uygulandığı geopolimer ile birlikte eğilme dayanımı yüksek geopolimer seramik üretimi adına son derece önemli olabileceğini belirtmiştir. Söz konusu çalışma kapsamında, tek parçalı karıştırma uygulanan geopolimerlerde, 28 günlük sürenin sonunda zeolit fazlarıyla beraber geopolimer çökeltiler oluşmuş ve 10 MPa'lık bir basınç dayanımı ortaya çıkmıştır. Dayanımın düşük olmasına karşın, kararlılığını koruyan ve suya batırıldığında dağılım göstermeyen geopolimer seramiklerde yüksek eğilme mukavemetine (90 MPa) rastlanmıştır (Liew vd., 2017).

Geopolimerizasyon reaksiyonunda bağlayıcı olarak bulunan Al ve Si'yi aktive eden ve bağlanma özelliği oluşturan alkali aktivatör ise, geopolimer karışım için başlıca bileşenler arasındadır. Esasen, sodyum hidroksit (NaOH) ya da potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) ya da potasyum silikat (K_2SiO_3) kombinasyonu gibi yüksek pH aktifleştiricileri kullanılmaktadır (Vafaei ve Allahverdi, 2016).

Dünya genelinde seramik endüstrisinin ürettiği kiremit ve seramik atığı, malzeme kaynağı kaybına karşılık gelen atık depolama alanlarına gönderilmektedir. Benzer düşüncedeki inşaat sektörünün de beton üretebilmek adına agrega ve çimento tedarikinde büyük miktarlarda doğal kaynak tükettiği bilinmektedir (Penteado ve Vi 2016; Hwang vd., 2019). Söz konusu doğal kaynak tüketiminin azaltılması adına başvurulabilecek seramik tozuna, fabrikadan ya da inşaat sektöründen ulaşılabilmektedir (Huseien vd., 2018; Hwang vd., 2019; Hafez vd., 2017; Mistry, 2016). Neticede; PKK, YFC, ST gibi atık malzemeler, inşaat endüstrisinde ortaya çıkan atık ürünlerin

beton üretimi sürecinde yeniden kullanılması, çevre dostu bir materyal olarak ön plana çıkmasını sağlar, atık birikimini büyük ölçüde azaltırken içerdiği enerjiyi kullanır (El-Dieb ve Kanaan, 2018).

Bu çalışmalar neticesinde, atık malzemelerle çimento ve sürdürülebilir beton üretimi amaçlanarak ortaya çıkan “geopolimer çimento” kavramıyla beraber ve çevre üzerinde olumsuz etkilere ve sonuçlara sahip olan endüstriyel atıkların (seramik tozu (ST), silis dumanı (SD), uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) vb.) yeniden kullanımı sağlanmıştır. Portland ve Kireç çimentosundan sonra “üçüncü nesil çimento” olarak kabul gören geopolimer çimentolar, çevre dostu yapısı, üstün fiziksel ve mekanik özellikleri ve yüksek durabilite ile ön plana çıkmaktadır (Karaaslan, 2021).

İKİNCİ BÖLÜM

GENEL KISIMLAR

2.1. Gepolimer Beton

2.1.1. Geopolimer

Dünya çapında kullanımı en fazla olan yapı malzemesi çimento olmasına rağmen, üretimi sırasında çok fazla miktarda CO₂ açığa çıkarmaktadır. Buna karşın çimento üretilebilmesi için çok fazla enerji ihtiyacı gerekmektedir. Çimentonun üretilebilmesi için bu şartlar göz önünde bulundurulduğunda, çimentoya denk hatta çevreye daha az zarar veren başka bir bağlayıcı arayışı oluşmuştur. Puzolanların çimento içerisine kullanımı yaygın olmakla birlikte, ayrıca kullanımı da mümkün olmaktadır. Bu nedenle yapay puzolanlar olarak adlandırılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi puzolanlar çimentosuz sistemlerde bağlayıcı olarak başka araştırmacılar tarafından denenmiştir (Baradan vd., 2015; Görür, 2015 ;Al Bakri vd., 2011).

Geopolimer betonun yapısı, endüstriyel yan ürün olan alüminosilikat bağlayıcı maddeler ile alkali aktivatörler arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Alüminosilikatlar, ana oksitleri silisyum oksit (SiO₂) ve alüminyum oksit (Al₂O₃) olan, sonradan ısı işlem görmüş ya da doğal amorf yapıya sahip malzemelerdir. Doğada atık olarak bulunan birçok malzeme alüminosilikat malzeme sınıfındadır ve uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin, alüminyum çamuru, tuğla tozu, cam tozu gibi malzemeler geopolimer beton yapısında kullanılabilir. Bu bağlayıcı maddeler, değişik kimyasal kompozisyonlara sahip oldukları için kullanılan farklı maddeler sonucunda ortaya çıkan geopolimer bağlayıcının da özellikleri değişiklik göstermektedir (Tuyan vd., 2017).

İnşaat mühendisliğinde geopolimer beton, pratik olarak dolgu madde ve bağlayıcı maddesi olarak ince veya kaba agrega içeren beton karışımı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle geopolimer beton, puzolan malzemeler ve alkali aktivatör çözeltilerinin belirli bir kimyasal molarite oranı ile birleşimi ile elde edilir. Birleştirme kuru veya ıslak karıştırma yöntemi olarak iki farklı

yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Islak karıştırma yöntemi genellikle en sık kullanılan yöntemdir. Bu karıştırmada kullanılan alkali aktivatör yalnızca çözelti formunda bileşime katılır. Alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) istenen molar konsantrasyona göre çözülür ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) sıvı formda sunulur. Kuru karıştırma yönteminde ise alkali aktivatörün puzolan malzemeler ile birlikte öğütüldüğü yöntemdir. Bu öğütülme yapıldıktan sonra çimentoya benzer ince ve küçük tanecikli, geopolimer çimentosu elde edilir. Son olarak uygulama sırasında geopolimer çimentoya su ilave edilerek geopolimer beton oluşturulmaktadır (Bayuaji vd., 2017).

Geopolimer, yapay veya doğal puzolanların, alkali aktivatörlerle birleşiminden elde edilmektedir. Puzolan olarak genellikle reaktif Al ve Si içeren metakaolin, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve volkanik kül vb. toz bağlayıcılar kullanılmakta olup, alkali aktivatör olarak, NaOH (sodyum hidroksit, SH), KOH (potasyum hidroksit), Na_2SiO_3 (sodyum silikat, SS) ve K_2SiO_3 (potasyum silikat) kullanılmaktadır. Geopolimer betonlarda Portland çimento esaslı betonlardan farklı olarak Portland çimento yerine doğal ve yapay puzolanlar, su yerine ise alkali aktivatörler kullanılmaktadır. Bu farklılıklar dışında betonun diğer bir bileşeni olarak kullanılan agregada durum hemen hemen aynı şekildedir. Geopolimer betonlarda, Portland çimentolu betonlardakine benzer şekilde karışım ağırlığının %80'inini oluşturmakta olan agrega, diğer bileşenler arasında oldukça büyük hacmesahiptir (Mehta, 2002; Hardjito, 2005).

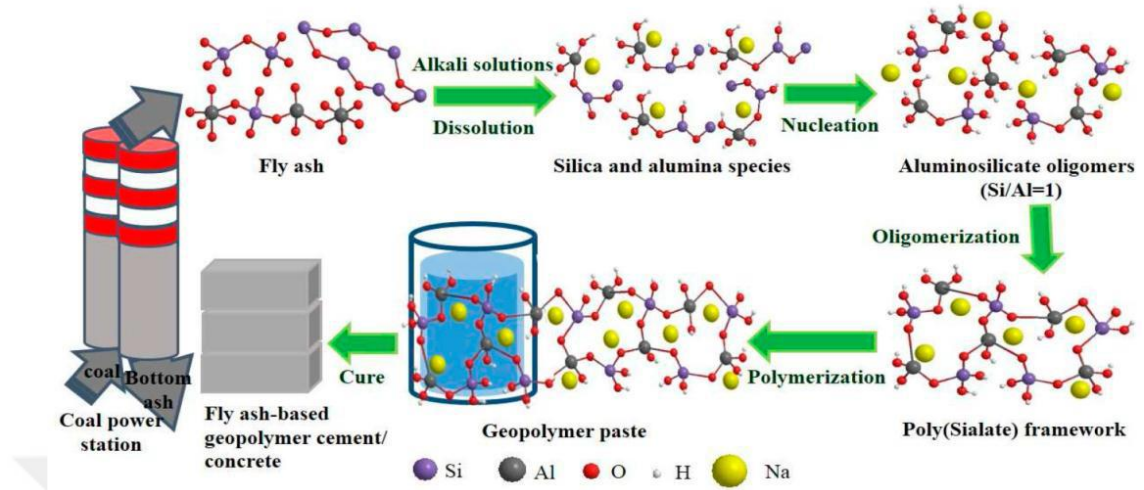
Birçoğu dünya literatüründe olmak üzere, geopolimer kullanımına ve özelliklerine ilişkin çok sayıda bilimsel araştırma yürütülmektedir. Bilimsel çalışmalara örnek olarak mühendislik, organik kimya, mineroloji, fizikokimya vb. alanlar gösterilebilir. Geopolimerler oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bunlara örnek verilirse, yangına karşı dayanıklı malzeme üretimi, seramik çeşitleri, dekoratif yapılar, altyapı ve tamir için kompozit yapılar, çimento ve beton üretimi, radyoaktif ve zehirli atık maddelerin değerlendirilmesi gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır (Davidovits, 2008).

Geopolimerler arasındaki mekanik fiziksel farklılıklar ve sonuç özellikleri, geopolimer oluşumundaki farklı değişkenlerin yanı sıra, silikon/alüminyumamorf molar oranı, alkali metalkatyon tipi, karışım oranı ve konsantrasyonu, su içeriği ve nasıl kürlenme yapıldığı ile açıklanabilir.

Portland çimento üretimi esnasında atmosfere karışan CO₂ miktarının mümkün olduğunca azaltılması adına geopolimer beton kullanımına başvurulabilir ve geopolimer beton üretimi, agrega ve çimento kaynaklı atmosferik CO₂ emisyonlarını %75-80 civarında azaltabilir. Aynı zamanda çekme dayanımı, basınç dayanımı, yüksek asit direnci, düşük büzülme, düşük CO₂ salınımı vb. yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahip oluşu gibi avantajları da bünyesinde bulundurmaktadır. İlk olarak 1940 yıllarından günümüze kadar alkali çözeltilerin hidrasyon ve priz sürecini hızlandırdığını ve böylelikle betona zarar vermelerine rağmen yeni hidrasyon işlemini daha az karmaşıktırdığı bulunmuştur. Böylece bir yapı malzemesi olarak geopolimer beton, insanlık tarihinde güncel ve benzeri olmayan bir beton teknolojisi olarak yaygın bir araştırma konusuna dönüşmüştür (Al Muhit vd., 2013). Fakat yakın dönemde büyük bir ivme kazanan bilimsel araştırmalar ve bulgular ile polimerizasyon süreciyle elde edilen (Şekil 2.1) bu malzeme silis tozları, seramik tozu, pirinç kabuğu külü veya silika alüminat, metakaolin, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu gibi malzemelerle konsantre alkalın çözeltileri arasındaki kimyasal birleşimler aracılığıyla üretilen bir yeni nesil bağlayıcı olarak bilinir (Fleuryvd, 2017).

Geopolimer çimento ve beton kimyasal yapı itibariyle bilimsel olarak tanınan bir malzeme olsa da, standart örneklerin çoğunlukla biçimsiz, organik ve şekilsiz polimer sistemlerine benzer boyutsal yapılarda olduğu gözlenmektedir. Yüksek fırın cürufu (YFC) gibi içeriğinde bol miktarda kalsiyum bulunduran sistemlerde, kalsiyum silikat hidrat(C-S-H) jeli, çimentonun hidrasyon sürecinde ortaya çıkan sistemler üzerinde etkili olmaktadır. Kullanılan silisyum oksit (SiO₂) zengin toz bağlayıcıyla aktivatör ve işleme koşulları doğrultusunda, asitlere ve diğer kimyasallara daha çok yüksek direncesahip geopolimerler, içyapıları çok fazla hasar görmeden 1000-1250°C aralığındaki sıcaklıklara dayanabilen düşük alkali değerler

gösterir ve genişmeye, sülfata ve korozyona direnci yüksek malzemeler olarak kabul edilirler (Erdoğan, 2014).



Şekil 2.1. Geopolimerin Kimyasal Bileşimi

Uçucu kül ile yapılan geopolimer denemelerinde genel olarak sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra geopolimer betonunun dayanım grafiğinde bir artış gösterdiği bulunmuştur. Yüksek sıcaklık etkisinde olan polimer betonun davranışına toplam hacim etki etmiştir. Daha küçük bir toplam hacim (10 mm'nin altında), geopolimerlerin yoğun çatlaması ile birlikte dağılımına sebebiyet verebilir, fakat daha büyük agregaların (10 mm'nin üzerinde) daha kararlı olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, geopolimer agrega ve matris bileşenleri arasındaki termal uyumsuzluk, geopolimer beton numunelerinde yüksek sıcaklıkta söz konusu olan dayanım düşüşünün başlıca sebebi olarak kabul edilmektedir (Živica vd., 2015).

Geopolimer betondaki yüksek silisyum oksit (SiO_2) oranına sahip sanayi atıklarının yada farklı türlerdeki atıkların bazılarının geopolimerlerde kullanılması, gösteren fiziksel mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini artırırken, düşürülen inşaat maliyetleri, azalan CO_2 emisyonları ve çevre kirleticilerinin büyük oranda elimine edilmesi gibi çevresel faydaları beraberinde getirmesi gibi pek çok avantaja sahiptir (Al Muhit vd., 2013; Thomas, 2018).

2.1.2. Geopolimerin Tarihçesi

V.D. Glukhovsky tarafından, alkali aktive edilmiş malzemeler, yani günümüzdeki adıyla geopolimerler hakkındaki yapısal araştırmalar 1940'lardan bu yana pek çok üniversitenin fen bilimleri enstitülerinde sürdürüle gelmiştir. Bu alandaki sayısız araştırma dünyanın çeşitli bölgelerinde ve bilimin çeşitli alanlarında gerçekleştirilmiş olup; Doğu Avrupa, Eski Sovyetler, Finlandiya, Ukrayna, Avusturalya, Fransa ve Yeni Zelanda bu çalışmaların yoğunluk kazandığı bölgeler olmuştur. Her ne kadar ufak çaplarda çalışmalar yapılmış olsa da geniş kapsamlı ilk çalışma 1970 yılında İngiliz Yapı Araştırma Kuruluşu bünyesinde başlatılmıştır.

1980 yıllarda, dolomit, kireçtaşı ve kaolin karışımlarının yakılmasıyla ortaya çıkan alüminosilikat malzemeyi alkaliler ile aktive eden Davidovits, yeni bir bağlayıcı ortaya çıkarmıştır. Polimer yapıdaki bu bağlayıcıya “geopolimer” adını veren Davidovits; bağlayıcılar için Geopolymite, Geopolycem ve Pyrament gibi ticari markalar oluşturmuş söz konusu ürünün patent haklarını almıştır (Davidovits, 1994).

Malek vd., bazı radyoaktif atıkların katılaşım ve soğuması ile oluşan matrisialkaliler ile aktive edilmiş bağlayıcı malzeme olarak tanımlamışlardır (Malekvd., 1986). Roy ve Langton (1989) tarafındansa, oldukça eski tarihlerde kullanılmakta olan betonların bu malzemeler ile birtakım benzerlikler taşıdığı belirtilmiştir.

1990 yıllarından itibaren İspanya'da Palomo grubu (Palomo vd., 1999), Rahier ve ekibinin Belçika'daki çalışmaları (Rahier vd., 1997) ve Melbourne Üniversitesi grubu (Xuve Van Deventer, 2000; Van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999) geopolimer betonun fiziksel ve kimyasal gizemini çözmeye çalışmıştır. Balaguru ve Kriven tarafından (Lyonvd.,1997;Kriven vd., 2008) ABD merkezli gruplarda yangına dayanıklı kompozit ve refrakter bölgelerde potansiyel geopolimer uygulamalarına ilişkin araştırmalar yapılmıştır. Monash Üniversitesi'nde Sanjayan (Kong vd., 2005) ve Curtin Üniversitesindeki vanRiessen (Van Riessen, 2010), geopolimer ve öncülleri

analizi ve termal özellik araştırmaları, yangın testini önemle vurgulayarak yürütmekte olan araştırma ekiplerine öncülük etmiştir.

1980'lerin sonlarından itibaren alkaliler ile aktive edilen ve edilmeye çalışılan bağlayıcılara ilişkin konferanslar düzenlendiği görölmektedir. Davidovits tarafından Fransa'da geopolimer üzerine 1988 ve 1999 tarihli iki uluslararası konferans verilmiştir. Yine 1994 ve 1999 tarihlerinde Kiev Ulusal Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık Bölümünde, alkaliler ile aktive edilmiş bağlayıcı ve betonlarla ilgili 2 uluslararası konferans düzenlenmiştir (Krivenko, 1994b; Krivenko, 1999). 2002 yılında Melbourne Üniversitesi'nden vanDeventer, geopolimer hakkında konferans düzenlemiş; 2005 senesinde sırasıyla Fransa ve Avustralya ölkelerinde yine geopolimer bağlayıcılar hakkında bir çalıştay yürütölmüştür. Bunların dışında, Fransız Geopolimer Enstitüsü tarafından "GeopolymerCamp" adlı bilimsel toplantı 2009 yılından bu yana her yıl gerçekleştirilmektedir.

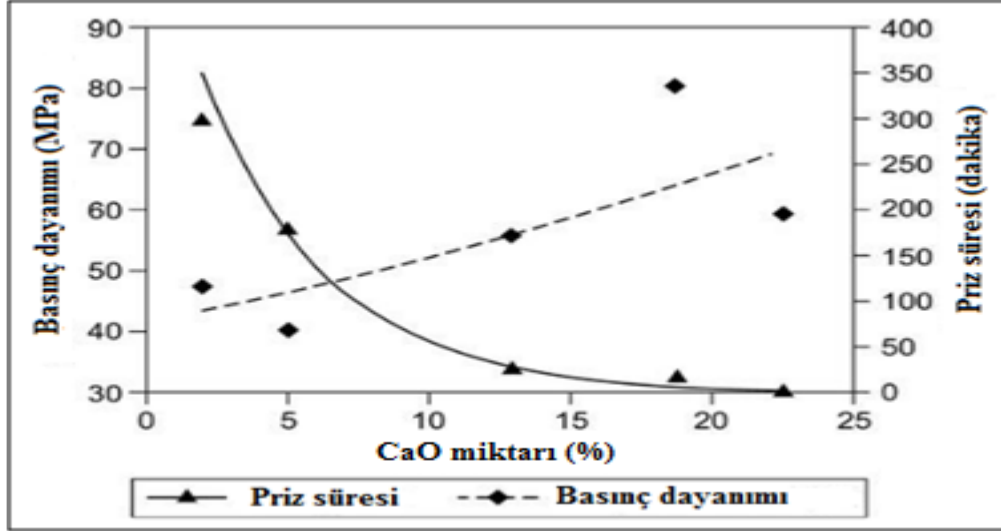
Alkali aktivasyonu ile bağlayıcı geliştirilmesine ilişkin ilk teknik komiteyi RILEM kurmuştur. RILEM Teknik Komitesi (TC224-AAM) tarafından alkaliler ile aktive edilmiş malzemelere ilişkin yürütölen çalışma 2012'de tamamlanmış ve 2013'de detaylı bir rapor yayınlanmıştır (Provis ve vanDeventer, 2014). Söz konusu raporda, bu malzemenin ticarileşebilmesi adına yeni uluslararası standartlar getirilmesinin önemine vurgu yapılmıştır.

Alkaliler ile aktive edilmiş malzemelerin durabilite özelliğine ilişkin literatürde söz konusu olan anlaşmazlıklar halen sürdüğünden, bir sonraki RILEM teknik komitesi (247 DTA) 2012'de çalışmalara başlayarak "Alkalilerle Aktive Edilmiş Malzemeler Üzerinde Durabilite Deneyleri" üzerine 5 yıllık bir araştırma ve çalışma planı ortaya koymuştur. Bu teknik komite; alkaliler ile aktive edilmiş malzemelerde durabilitenin belirlenmesine yönelik uygun deney yöntemlerine ilişkin önerilerin ortaya konmasını amaçlamıştır (Pacheco-Torgal vd., 2012).

2.1.3. Geopolimer Betonun Özellikleri

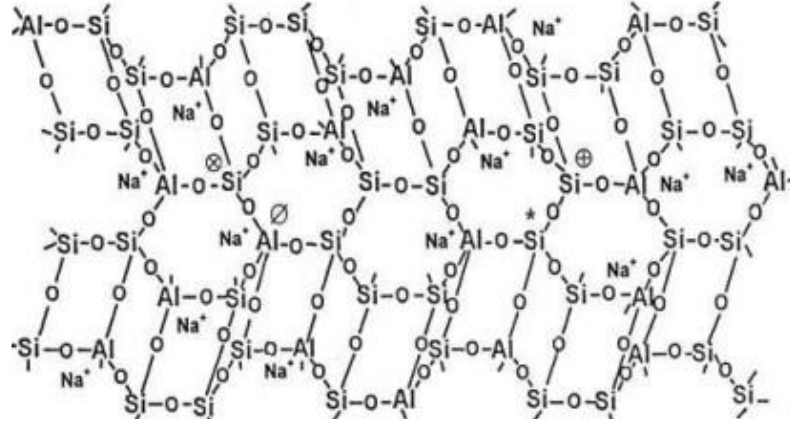
Geopolimer beton ve puzolan malzemeler yüksek mekanik ve fiziksel özelliklerine ek olarak, çok yüksek kimyasal dayanıklılığa sahiptirler. Günümüzde birçok ülkede geopolimer betonlarda kimyasal ve fiziksel etkilerle ilgili deneyler yürütülmektedir. Geopolimer beton ve harçlar asidik ortam, sülfat, deniz suyu ve alkali silika reaksiyonu etkileri karşısında yüksek dayanıklılık sergilemesine karşın bu konuya dair genel bir bilgi mevcut değildir. Üretilen geopolimer betonlardaki alkali aktivatör/bağlayıcı oranlarının farklılık gösterdiği, çeşitli molaritelerde sodyum hidroksit çözeltisi kullanılabildiği ve bu durumların geopolimer betonlarda basınç dayanımını etkilediği bilinmektedir. Geopolimer bağlayıcılarda geopolimerizasyon neticesinde C_3A ve $Ca(OH)_2$ gibi ürünlerin ortaya çıkmıyor olmasından ötürü, geopolimer bağlayıcılı betonlar durabilite yönünden geleneksel çimento kullanılan betonlara kıyasla daha iyi sonuç vermektedir. Aynı zamanda geopolimer betonların yüksek sıcaklıklarda da yüksek dayanıklılık gösterdiği bilinmektedir (Olivia ve Nikraz, 2012).

Geopolimer bağlayıcılarda puzolan malzemelerin morfolojik yapısı, tane boyutu dağılımı, amorflik derecesi vb. bazı özelliklerinin bağlayıcının gerek prizini almamış taze gerekse prizini almış yani sertleşmiş özelliklerine gözle görülür şekilde etki etmektedir (Diaz vd., 2010; Diaz-Loya vd., 2011). Uçucu kül tabanlı geopolimer bağlayıcıların içerdiği uçucu küldeki CaO miktarında yaşanan artış ile, Şekil 2.3'te görülmekte olduğu üzere, priz süresi kayda değer derecede düşmüş olup, bununla birlikte karışımın priz alma süresinin hızlandığı tespit edilmiştir (Temuujin vd., 2009; Diaz vd., 2010).



Şekil 2.2. Uçucu kül tabanlı geopolimerde CaO miktarının bağlayıcının basınç dayanımına ve priz süresine etkisi (Diaz vd., 2010)

Geopolimerler ‘geopolimerizasyon’ diye adlandırılan alkali silikat ve alkali tuzların endüstriyel üretimlerde yan ürün olarak çıkan malzemelerin (seramik tozu, mermer tozu vb.) fırınlanmış kil yapısındaki alüminat ve silikatlarda O₂ atomu elektronları ortak kullanılarak kovalent bağlı bileşikler oluşturmasıyla oluşan zincir yapılardır (Şekil 2.1). Alümina silikat hidratlarında ısı maruziyeti ile OH⁻iyonları H₂O oluşturur ve ayrışma ile Si-O-Alkovalent bağ oluşumu gerçekleşir (Boyacı, 2018). Bu reaksiyon alkali metal silikat çözeltileri ve katı alüminosilikat arasında orta derece ısı ortamında ve yüksek alkali bulunan koşullarda, Si-O-Si ve Si O-Al bağlarını içeren amorf yarı-kristal polimerik yapılar ortaya çıkarır (Bingöl, 2018).



Şekil 2.3. Davidovits Zincir Yapı Modeli

Geopolimerizasyon sürecini başlatan en önemli malzemelerden biri geopolimer bağlayıcı sistemlerde kullanılan alkali aktivatör çözeltileridir. Alkali aktivatör konsantrasyonu toz malzemedeki alüminosilikat partiküllerinin yüzey hidrolizinin artırılması adına kuvvetli bir alkali ortama gerek duyarken, karışımın mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir (De Vargas vd., 2011; Hu vd., 2009).

Geopolimerizasyon (geopolimerleşme), alüminosilikat hammaddesinin [Si-Al-O] kovalent bağlarından oluşan üç boyutlu polimerik bir bağ sistemi oluşturduğu kimyasal bir reaksiyondur. Geopolimerizasyon sonrasında çamur halindeki malzeme katılaşmasıyla beraber sert, güçlü, dayanıklı bir form alır (Arslan, 2022).

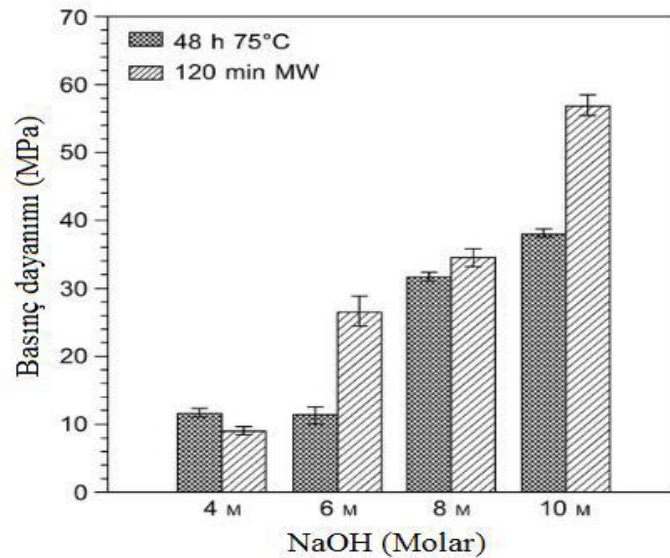
Sathonsaowaphak sıvı alkali/bağlayıcı ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları ile NaOH konsantrasyonu gibi parametrelerin öğütülmüş taban külü esaslı geopolimer harçlara ait basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır (Sathonsaowaphak, vd., 2009). Sıvı alkali/bağlayıcı oranı 0.42-0.71 aralığında, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 0.67-1.5 aralığında ve NaOH konsantrasyonu 7.5M-12.5M aralığında olan karışımlarda azami basınç dayanımı ölçümlenmiş ve istenen işlenebilirliğin mevcut olduğu belirlenmiştir.

Yapılan bir çalışmada kalsine edilmiş doğal puzolanlarla ve doğal puzolanların karıştırılması sonucu ortaya çıkan geopolimer harçlarda aktivatör tipi ve dozajlarının dayanım üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Potasyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı çözeltinin, kullanılmakta olan malzemeler için en elverişli aktivatörler olduğu belirlenmiştir. Potasyum hidroksit 5-7.5 M aralığında kullanıldığında dayanım seviyesinin en uygun değerlere ulaştığı saptanmıştır. Aynı zamanda en uygun SiO₂/Na₂O oranı 2.1 olarak tespit edilmiş ve bu oran 3.1'e yaklaştıkça dayanım seviyesinin düştüğü belirtilmiştir (Bondar vd., 2011a).

Zhang ve arkadaşları 2018 senesindeki çalışmasına göre taze harcın priz süresi, harcın taşınması, dökümü ve sıkıştırılması için gereken süreyi belirlemede önemli olduğunu keşfetmiştir(Zhang vd., 2018).

Yapılan çalışmalarda farklı kürleme yöntemlerinin de denendiği görülmüştür. Geopolimer bağlayıcıların konvansiyonel olmayan (mikrodalga vb.)kürleme koşullarına maruz bırakıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Somaratna vd. (2010) ile Chindapasirt vd. (2013) çalışmalarına göre, uçucu kül esaslı geopolimerin mikrodalgayla kürlenmesi geopolimerizasyon sürecinin ve aynı zamanda harçlarda mukavemet gelişiminin hızlanmasını sağlamıştır.Yine mikrodalgayla kürlenen geopolimerde konvansiyonel ısıl kürleme koşulları ile mukavemetin yüksek seviyelere ulaşması mümkün olmuştur(Somaratna vd.,2010;Chindapasirt, vd., 2013).



Şekil 2.4. Mikrodalga (MD) ve ısıl kürlemenin farklı NaOH içeren bileşimlerin dayanımına etkisi (Somaratna vd., 2010)

2017 yılında yapılan bir çalışmada uçucu kül katarak ortaya çıkardıkları geopolimer beton numunelerinin, kontrol numunesi olarak kullandıkları (M35) beton numuneleri ile karşılaştırdıklarında kontrol numunelerine göre dayanımlarında %13,27'lik bir artış olduğunu gözlemlemiştir(Kumar ve Partheeban, 2017).

Farklı boyuttaki boşluklardan, reaksiyona girmemiş taneciklerden, reaksiyon ürünlerinden oluşan gözenekli malzemeler çoğunlukla geopolimer bağlayıcılar olarak adlandırılır (Pacheco-Torgal vd., 2015). Boşluk yapısı geopolimer bağlayıcıların dayanıklılığını ve geçirgenliğini büyük ölçüde etkilediği için birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Kür koşulları,geopolimer bağlayıcılardaki boşluk yapısınaetki eden önemli faktörlerden bir diğeridir. Criado vd. (2012) yaptığı bir diğer çalışmada, kürlenme sırasında ortam neminin uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcılardaki boşluk yapısına etkisini araştırmıştır. Çalışmanın sonuçları, 80°C sıcaklıkta %90 bağıl neme sahip ortamda kürlenmiş numunelere ait porozitenin 80°C sıcaklıkta %40-50 bağıl neme sahip ortamda kürlenmiş numunelerinkinden düşük olduğunu göstermiştir(Criadovd.,2012).

Geopolimer bağlayıcıların uçucu kül tabanlı olması durumunda kimyasal reaksiyon işlemleri sırasında malzeme içindeki suyun önemli bir bölümünün kür işlemi sırasındaki tepkimeden kaynaklı buharlaşabildiği görülmektedir. Sertleşmiş betonun mikro gözeneklerindeki su miktarının ihtiyaç duyulandan düşük olması, betondaki kuruma büzülmesinin de çok düşük seviyelerde gerçekleşmesine yol açmaktadır (Davidovits, 1999; Hardjito ve Rangan, 2005).

Hermann vd.(1999) yaptığı bir çalışmasında, ASTM D4842-90 (1996) Standardı uyarınca (-20°C ile +20°C aralığında çevrim) geopolimer bağlayıcılarda donma-çözülme deneyi yapılmıştır. 13 donma-çözülme periyodunun ardından betonların yüzeyinde herhangi bir hasarla karşılaşılmasızın basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Eş zamanlı olarak, betonlardaki toplam kütle kaybının %0.06'nın üzerine çıkmadığı ifade edilmiştir (Hermannvd.,1999).

Betonun su emme özelliği betonun diğer özelliklerine göre dayanıklılığında çok daha önemli bir rol oynar. Betona dışarıdan ilave edilen su girişı betonun kimyasal yapısını bozar ve betonarme içersinde çubuklarda korozyon meydana gelmesine sebep olur. Betonun kimyasal yapısının bozulması, betonda çatlama ve kabarma olmamasına ve yapının ömrünün azalmasına neden olur (Yıldırım, 2022).

Luhar ve Khandelwal'in (2015) yaptığı bir araştırmada, Portland çimentolu beton ve geopolimer betonlarda su emme testi gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda ise sıradan betonun geopolimer betona oranla daha fazla su absorbe ettiği raporlara yansımıştır(Luhar ve Khandelwal, 2015).

2.1.4. Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Günümüzde geopolimer harçlarla ilgili dünya çapında birçok araştırma, çalışma ve deneyler yapılmıştır. Bu deneyler ve bulgular geopolimeri yıllar içinde belli bir konumuna taşıırken, geopolimer kompozit sistemlerde büyümeyi hızla sürdürmektedir.

Geopolimerler her ne kadar çok fazla dalda kullanılsada genel olarak; inşaat ve yapı, otomotiv ve havacılık sanayisinde, plastik endüstrisinde, kimyasal ve toksik etkilere maruz kalan elemanlarda, atık yönetiminde, yapıların güçlendirilmesinde, sanat ve dekorasyon alanında, refrakter ürünlerin üretiminde, yanmaz yüksek teknoloji uygulamalarında yararlanılmıştır.

Ayrıca Davidovits (1999) geopolimer malzemelerin Si/Al oranına bağlı olarak potansiyel uygulama alanlarını Çizelge 2.1'deki gibi sıralamıştır (Hlavacek, 2014).

Çizelge 2.1. Geopolimer malzemelerin uygulamaları (Hlavacek, 2014)

Si/Al oranı	Uygulama Alanı
1	Seramik, Tuğla, Yangın Barınakları
2	Toksik atık kapsülleme, Düşük CO ₂ çimentoları, beton, radyoaktif
3	Isıya dayanıklı kompozit malzemeler, döküm ekipmanları, cam elyafli kompozitler
>3	Endüstride kullanılmak üzere üretilen sızdırmaz malzemeler
20 < Si/Al < 35	Yangına ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

Geopolimer betonlar dünyanın hemen her bölgesinde uygulama alanı bulabilmektedir. Örneğin 2013 yılı itibariyle Avustralya kıtasındaki geopolimer beton kullanımının 40000 m³ olduğu tespit edilmiştir.

Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar 1960'lı yıllardan beri bilinmekte olup; Ukrayna'daki konut yapıları bu bağlayıcılarla oluşturulmuş büyük ölçekli yapılara önemli bir örnek teşkil etmektedir (Şekil 2.5). 1960 senesinde 7.5 MPa tasarım dayanımına göre inşa edilmiş olan bu yapılarda, demir-çelik atıklarını geopolimer bağlayıcı olarak kullanılmıştır. 2012'de söz konusu yapılardan alınmış olan numuneler üstünde basınç dayanımı testleri yapılmış; testlerin sonucunda 14 MPa basınç dayanımı tespit edilmiştir (Hardjito, 2005).



Şekil 2.5. Ukrayna'da geopolimer beton kullanılarak üretilmiş konut yapıları (Hardjito, 2005)

Geopolimerin çok geniş bir kullanım alanı vardır (Çizelge 2.2).Örneğin; Zhang,Guo, El-Korchi, Zhang ve Tao (2013) bir çalışmalarında, geopolimerin yeni nesil toprak stabilizatörü olarak da kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Üstyapı onarımında geopolimer kullanımı hali hazırda Kuzey Amerika’da mevcuttur. Kuzey Amerika’da uygulanan bir geopolimer uygulaması, hızlı üstyapı onarımı için başarıyla kullanılmaya devam eden, Pyrament® (1984 yılı patentli) olarak bilinen harmanlanmış bir Portland-Geopolimer çimentosudur (A.B.D. Ulaştırma Bakanlığı [USDOT], 2010). Son yıllarda geopolimerlerin prefabrik tuğla üretiminde kullanıldığı belirtilmiştir (Heath vd., 2014). Ayrıca, geopolimerlerin nükleer santrallerde de kullanımı mevcuttur (Cantarel vd., 2017).

Çizelge 2.2. Geopolimerin kullanım alanları

Üst yapı elemanlarının onarımında ve yol kaplamaları
Prefabrik yapı malzemeleri
Taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan malzemeler
Zemin iyileştirme
Nükleer ve zehirli atıkların yönetimi ve muhafaza edilmesi
Refrakter seramik malzemelerin ve tuğla üretimi
Sert iklim koşullarına ve yangına dayanıklı yapılar
Su alma yapıları ve borular
Tıp alanı
Uçak endüstrisi ve diğer ulaşım endüstrileri
Tarihi yapıların restorasyonu ve korunması
Kaldırımlar
Cam elyafı kompozitler

Ayrıca geopolimerlerin kullanım alanlarına, bu malzemeyi kullanan şirketlere ve kuruluşlara ilişkin birtakım bilgilere kronolojik olarak yer verilmektedir.

Geopolimer beton oluşturulmasında kullanılan bazı puzolan malzemelerin Eski Mısır’da M.Ö. 3600 yıllarında bağlayıcı olarak mezar taşlarında, mezar başlarında kullanılan heykelerde ve seramik yapılmasında

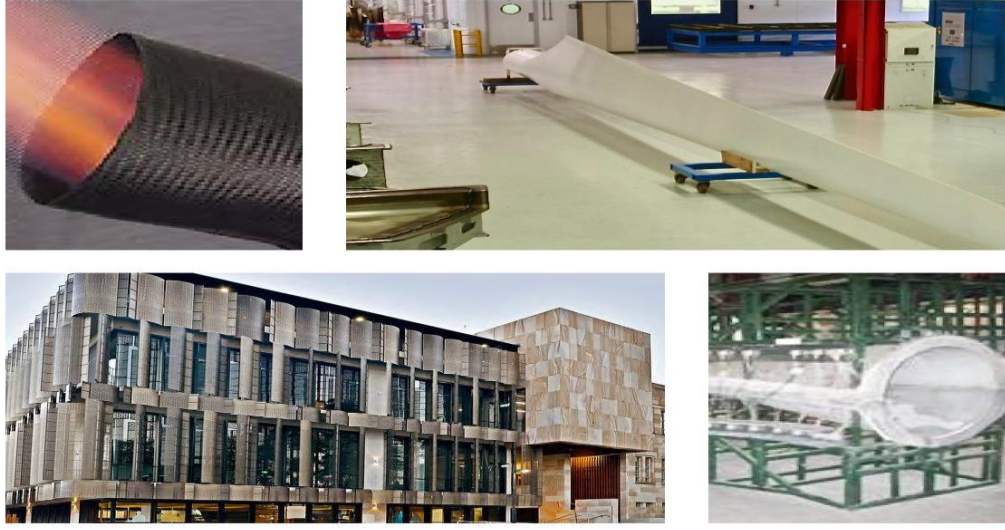
kullanıldığı görülmektedir. Mısır'daki ilk üretimin bol silis bulunduran kamış ve arpa buğday küllerinin kullanılması ile başladığı bilinmektedir. Bu tür örneklerde görülebildiği gibi kullanım sıklığı çok azdır. Ancak 1970'lerden sonra kullanımının çok daha fazla arttığı ve birçok ülke tarafından geliştirilmeye çalışıldığı görülmüştür (Davidovits, 2002).

1985 yılından bugüne dek, İngiliz ve Fransız nükleer santral tesislerinde, 500°C sıcaklığa kadar ısıl güvenlik korumasına ve tozsuz sızdırmazlık etkisine sahip geopolimer malzeme kullanılmıştır (*Sofitra-Camfil patent*).

Yanmaz kumaş laminatların ilki olan geopolimer kompozitin uçak kabinlerinin ve kargo uçaklarının iç tasarımlarında kullanılmak üzere tanıtımı, 18 Kasım 1998 tarihinde Atlantic City, NJ, ABD'de, Federal Havacılık İdaresi sponsorluğundaki Uluslararası Uçak Yangın ve Kabin Güvenliği Araştırma Konferansı'nda yapılmıştır (Davidovits, 2002).

Brisbane West Wellcamp Havalimanı (BWWA), Toowoomba, Queensland, Avustralya, Wagners şirketinin geliştirmiş olduğu ve Earth Friendly Concrete (EFC) adıyla tanınan geopolimer betonun, düşük büzülme, yüksek eğilme dayanımından ve işlenebilirlik özelliklerinden dolayı havalimanlarında kullanıma yönelik son derece elverişli olduğu görülmüş ve üretimi gerçekleştirilmiştir (Davidovits, 2002).

Geopolimer harç ve geopolimer beton, sızdıran su tüketimi, termal yorgunluğa direnç ve vakum kararlılığı gibi Ay ve Mars ortamlarındaki ihtiyaçlara doğal olarak yanıt veren eşi ve benzeri olmayan özellikler taşımaktadır. Buradan yola çıkılarak, geopolimer malzeme kullanımının daha geniş alanlara yayılabileceği söylenebilir (Naser, ve Chehab, 2020).



Şekil 2.6. Geopolimerden üretilmiş bazı kompozit yapılar (Davidovits, 2008)

Stratejik ve büyük ekonomik değerlere sahip ve gittikçe dahada değerlenen bu çalışmaları yürüten köklü şirketler olsa da (Şekil 2.6'da bunlardan bir bölümüne ait sonuçlar paylaşılmaktadır) içeriğe dair bilgi paylaşılmamaktadır.

2.1.5. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Öncü Malzemeler

2.1.5.1. Geopolimerde Kullanılan Toz Malzemeler

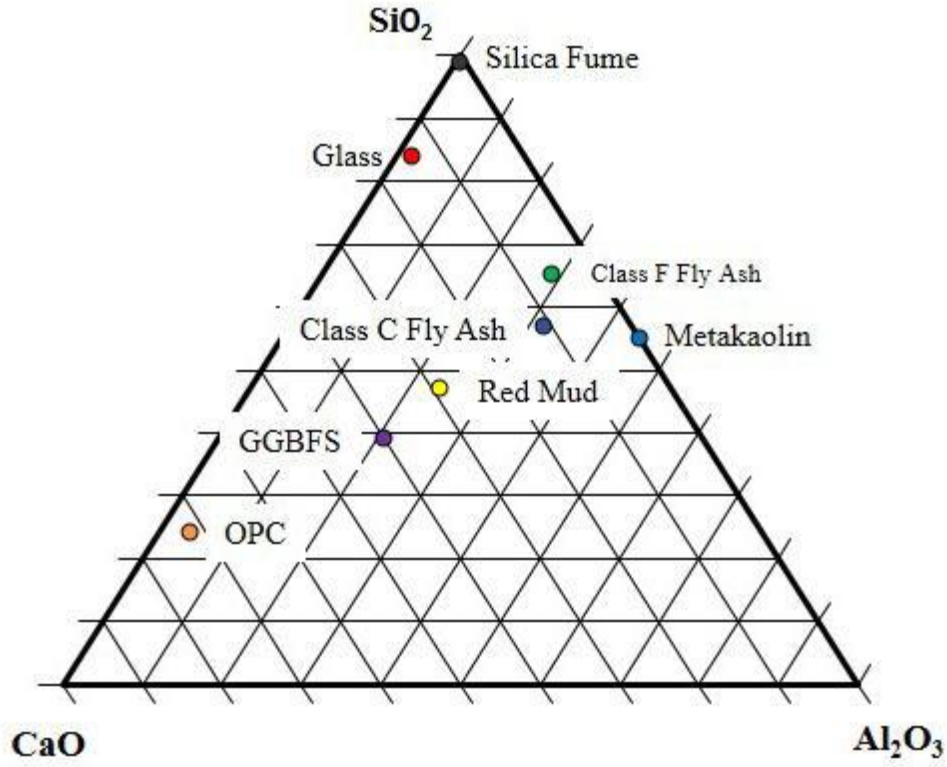
2.1.5.1.1. Yüksek Fırın Cürufu

Cüruf lar yüzyıllar boyunca insanlığın ve sanayinin faydalanmak istediği metallerin rafine edilmesi amacıyla ortaya çıkmıştır. Fakat bu işlemler sonucunda ortaya çıkan cüruf yüzyıllar boyunca çevreye zararlı bir atık olarak varlık göstermiştir. Demir-çelik sektöründe yüksek tonajlarda üretilen cürufun atılacağı alanları bulmak bile büyük bir probleme dönüşmesinden dolayı bundan faydalanılabilmesi üzerine bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Cüruf, metal cevherlerinin eritilmesi sonrası ortaya çıkan cam kristaline benzeyen bir yan üründür. Cüruf metal işleme tesislerinde bol miktarda üretilmekle birlikte demirin yan ürünü olarak üretilen cürufun dışında kalanları genellikle zararlı atık madde olarak nitelendirilmektedir.

Cüruflar, temelde kalsiyum-magnezyum alümino-silikat camdan meydana gelen pikdemir üretim işlemi sonucu ortaya çıkan atık üründür. Hammaddeler ve endüstriyel süreçler doğrultusunda yapı, özellik ve kimyasal bileşim değişebilmektedir. Yüksek fırın cürufu, en yaygın olarak kullanılan cüruf türüdür. Demir-çelik cüruflarının çoğu CaO, SiO₂, FeO ve MgO'dan oluşmaktadır (Bakharev, 2000). Ancak bunların oranları stabil değildir. Üretim esnasında miktarları değişkenlik gösterebilmektedir. Kullanılan metale, çeliğin türüne göre de farklı oranlardan meydana gelen cüruflar görülmektedir.

Cürufun fiziksel ve kimyasal etkileri sonucunda çok daha az geçirgen olan ve sülfatın olumsuz tepkimelerine karşı daha dayanıklılık kazanan betonlar özellikle kıyı şeritlerinde ve köprü ayaklarında yine bir diğer olumsuz kimyasal reaksiyon olan korozyona karşı alternatif bir önlem olarak ön plana çıkmış ve çeşitli kullanımları gözlemlenmiştir (Uysal ve Bahar, 2018).

Standart Portland çimentosunun yerine cüruftan aktif olarak faydalanılmasının avantajlarından bir diğeri ise, kimyasal etkiler karşısında yüksek performansa sahip olmaları ve daha yüksek basınç karşısında direnç göstermesidir (Provis ve Van Deventer, 2009). Şekil 2.7'de puzolanik malzemeler CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ içerikleri bakımından karşılaştırılabilmektedir.



Şekil 2.7. Puzolanik malzemelerin yapısı, GGBFS(Öğütülmüş yüksek-fırın cürufu), Type F, TYP C (Uçucu kül), OPC (Portland Çimento) (Reeves, 1985)

Yüksek fırın cürufu alkali aktive edilmiş sistemlerde kullanılırken karışımın yöneticisi pozisyonunda olan parçacıkları küçük çaplı parçacıklardır. 2 µm'den ufak parçacıklar 24 saat süreyle bütünüyle hidrasyona uğrarken, 20 µm'den büyük olanlar genellikle ağır ağır ve parçalar halinde hidrasyona uğrarlar. Neticede, cüruf malzemesi ihtiva eden geopolimerlerin yüksek bağlar arası dayanıma sahip olabilmesi için partikül büyüklüğü dikkate alınmalıdır (Aİtcin, 2007).

2.1.5.1.2. Uçucu Kül

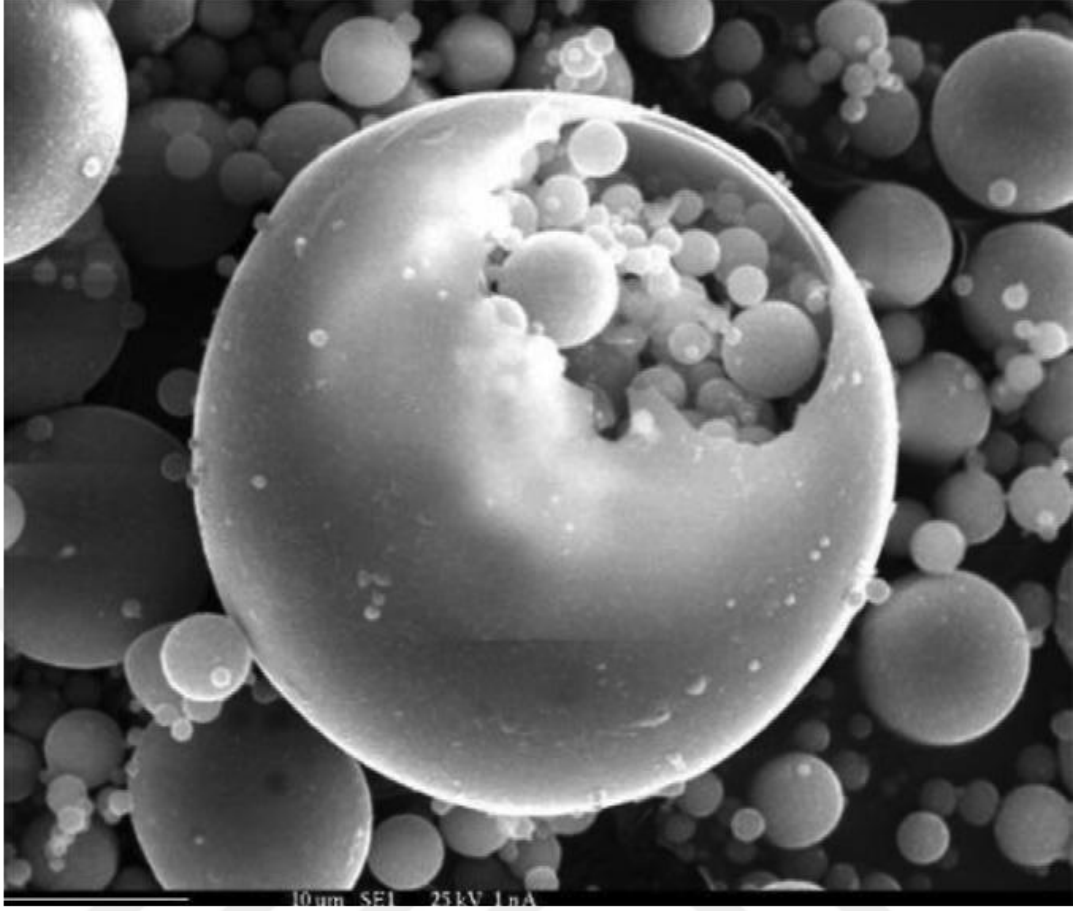
Linyit, antrasit ve taş kömürün birlikte yanmasıyla elde edilen endüstriyel bir yan ürün olan uçucu kül; kömürle çalışan termik santrallerde fırınların yaydığı yanma gazındaki parçacıkların mekanik olarak yakalanması

ya da elektrostatik çökertilmesi sonucunda toplanan ve toz şeklindeki katı bir endüstriyel bir yan üründür. Yakılmadan önce toz haline gelene kadar öğütülen kömür, bu öğütme işleminin ardından yüksek hızda sıcak hava akımıyla fırının içine doğru üflenir. Daha sonra bu süspansiyon olan minerallerin birçoğunun ergime noktasının üstünde, $1200^{\circ}\text{C}\pm 200^{\circ}\text{C}$ 'e yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu işlem esnasında inorganik parçalar tamamen yakılmadığından kül açığa çıkar (Pacheco-Torgal vd., 2015).

Uçucu kül malzemesinin esas özellikleri birçok parametreden etkilenecek değişiklik göstermektedir. Dünya üzerinde ve de özellikle Türkiye’de endüstriyel alanların hiçbirinde kullanılmayan ve atılan uçucu kül miktarının oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Atık malzeme olarak ortaya çıkan kül, ülkemizde boş arazilere dengesizce atılarak hem çevresel kirliliğe hem de hem de hava kirliliğine yol açmaktadır. Bu atık malzemeler belli oranlarda ya da kullanılabilirlikleri takdirde tamamen beton içerisinde kullanılması, çevre açısından olduğu kadar hem de çimentonun azaltılması adına oldukça önemlidir. Bununla birlikte, ilerleyen dönemlerde bilhassa büyük illerde karşılaşılabilecek agrega sorunlarının belli bir noktaya kadar uçucu kül kullanımıyla önlenmesi olanaklıdır (İlhan, 2020).

Termik santrallerde faydalanılan çeşitli kömür türlerinden farklı oranlarda ve renklerde uçucu kül elde edilebilmektedir. Taş kömüründen ortalama %10-15 oranında, linyit kömüründen %20-50 oranında cüruf ve kül ya da yanmadan çıkarılabilmektedir. Bu karışım %75-85 oranında baca gazlarının etkisi ile yanma kazanından çıkmaktadır. Termik santral bacalarında uçucu küllerin tutulması ve filtrelenmesi adına çökeltme hücreleri, bez filtreler, kül tutucular, silikonlu kül tutucular, yüksek verimli elektrofiltreler vb. donanımlardan yararlanılmaktadır. Günümüzde modern santrallerde uçucu külleri tutmak için elektrofiltreler kullanılmaktadır. Çünkü günümüz teknolojiyle elektrofiltreler neredeyse %100 oranında bir verimlilikle çalışabilmektedir (Provis, ve Van Deventer, 2009).

Uçucu küldeki mikroyapının SEM görüntüsüne Şekil 2.8'de yer verilmiştir.



Şekil 2.8. Uçucu külün mikro yapısı (Lecomte-Nana vd., 2012)

Kömür türüne bağlı olarak uçucu külün kimyasal kompozisyonu oldukça değişmektedir. Silis (SiO_2), demir oksit (Fe_2O_3), alümina (Al_2O_3), kireç (CaO) ve yanmamış kömür yüksek oranda bulunur. Bunlarla beraber, içerik kül çeşidine göre değişmekte olup, ağırlık bakımından %5'ten düşük magnezyum oksit (MgO), sülfür trioksit (SO_3) ve alkalilerden (Na_2O ve K_2O) meydana gelmektedir. Aynı zamanda, uçucu külde eser miktarda manganez, titanyum, fosfor, vanadyum, galyum ve germanyum oksitleri de bulunmaktadır (Pacheco-Torgal vd., 2015).

ASTM C618-08a (2008) standardınca, uçucu küller kömür türü bakımından ikiye ayrılır:

- F tipi uçucu küller: CaO içeriğinin %10'un altında olduğu uçucu kül tipidir. Antrasit ya da bitümlü kömür yakılmasıyla ortaya çıkar. Genel

itibariyle SiO₂, Al₂O₃ ve demir oksit içerir. Çoğu zaman geopolimer üretimi için hammadde olarak kullanılır.

- C tipi uçucu küller: İçeriğinde yüksek oranda CaO bulunan uçucu kül tipidir (%10'un üzerinde ve çoğu zaman %15-30 oranında). Düşük bitümlü kömür ve linyit kömürü yakılmasıyla açığa çıkan bu kül puzolanik özelliğindedir ve bir ölçüde kendiliğinden bağlayıcı özeliğe sahiptir.

Uçucu kül katkılı betonların hidrasyon ısısının diğer endüstriyel atıklara göre daha düşük olması sebebiyle betonda kullanımında rötne ve çatlamlar yüksek ölçülerde önlenir. Ayrıca, uçucu kül katkılı betonun basınç ve aşınma dayanımının beraberinde, kuvvetli geçirimsizlik özellikleri mevcuttur. Söz konusu özelliklerinden dolayı baraj ve köprü gibi yapıların inşasında yaygın kullanılmak için son derece elverişlidir (Özcan ve Güngör, 2019).

Dünyada yıllık yaklaşık 600 milyon ton uçucu kül açığa çıkmaktadır (Türkervd., 2009). Türkiye de ise yıllık yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül atık olarak açığa çıkar (Kömür ve Linyit Yakıtlı Termik Santraller, 2020). Açığa çıkan uçucu küllerin yüksek miktarda olması, çevresel problemlerin önüne geçilmesi ve ekonomiye kazandırılması amacıyla kullanım alanları sıklıkla çalışılmaktadır. Uçucu küller inşaat sektöründe genel olarak;

- Çimentolu sistemlere katkı veya ikame olarak,
- Beton imalatında minerel katkı olarak
- Tuğla imalatında katkı malzemesi
- Yapı malzemesi alanında blok, panel, duvar, beton boru
- Zemin iyileştirme çalışmalarında
- Geopolimer sistemlerde aktive edilecek bağlayıcı olarak kullanılabilir.

2.1.5.1.3. Seramik Tozu

Seramik malzemenin kalıplanarak kurutulması, karıştırılması ve yakılması yoluyla işlenen hammaddesi kuvarsdır. Seramik kilden oluşmuş bir üründür. Dünya genelinde günlük seramik üretiminin yaklaşık %30-%35'ini,

yapı ve inşaat sanayinde zemin ve duvar yapımında faydalanılan gözde bir malzeme olan inşaat seramiklerinin oluşturduğu bilinmektedir. Seramik malzemenin kullanılması sonucunda ortaya çıkan atıklar ise geçmişte ve günümüzde hala tam olarak geri dönüştürülmediği görülmektedir (Subaşı vd., 2017).

Seramik, tarih boyunca ve günümüzde kap ve tabaklarda, su taşımak için kullanılan sürahilerde, yüksek gerilim yalıtkanlarında ve sıhhi tesisat malzemeler gibi ürünlerin oluşturulmasında kullanılan ortak bir malzemedir. Seramik malzemelerin birçok şekilde kullanıldığı diğer alanlar ise fayans, seramik döşeme, farklı kil oluşturan tuğlalar olurken inşaat malzemeleri olarak da yaygın biçimde kullanılan bir malzemedir. Bu durum, dünya toplumunun yenilenebilir kaynak kullanmaya ve sürdürülebilir kalkınmaya daha çok dikkat ettiği bir dönemde, çevreyi korumak ve yeşil alanı arttırmak için atıkların azaltılması, kalkınmanın sürdürülebilirliğini arttırmanın bir parçası olarak önerilen ve bir çok araştırmacı tarafından da kabul gören ortak strateji, atık malzemelerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümüdür (Anderson vd. 2016; Medina vd., 2012).

Yıllık küresel sera gazı emisyonlarının büyük bir yüzdesi bu geri dönüştürülmeyen atıkların salınımıdır. Seramik malzemelerin üretimi esnasında seramik atık tozu (SAT) oluşmaktadır. Seramik tozu, geri dönüşüm yoluyla tekrar kullanılması gereken önemli bir atık üründür. Bu konu üzerine çalışan bazı araştırmacılar, seramik atıkların (tuğla, kiremit, blok vb.) kullanımının betona ve harçlara olan etkilerini incelemişlerdir. Aynı zamanda beton ve harç karışımlarında agrega olarak veya çimentoya ikame olarak seramik tozunun ne gibi etkileri olabileceği üzerine deneyler yapmışlardır (Amr vd.,2018).

Çalışmalar genel olarak şu sonuca varmıştır:

1) Seramik atık, betonun dayanım performansına olumlu yönde katkıda bulunduğu bilinen puzolanik aktiviteye sahiptir.

2) Seramik tozunun partikül yapısı fiziksel olarak çimentonunkilere benzer olmakla birlikte %85 SiO₂ ve Al₂O₃ ihtiva ettiği bilinmektedir.

Seramik tozunun yapısal özellikleri, malzemenin kısmen de olsa çimento yerine alternatif bir bileşen olarak kullanılabilceğini ve bu konuda bir potansiyel taşıdığını, sürdürülebilir ve ekonomik karışımlar üretilebileceğini ortaya koymaktadır.

3) 25 MPa ve 50 MPa dayanım veren ve seramik tozu barındıran beton karışımlarına seramik tozunun dahil edilmiş olması işlenebilirliğe olumlu yönde katkılar sağlamıştır.

4) Seramik tozu 7, 14 ve 28 günlük dayanım deneylerinde basınç dayanımı gelişimini yavaşlatmıştır. Ancak 90 günlük numunelere geçildiğinde basınç dayanımının seramik tozu ihtiva etmeyen normal karışımlara kıyasla daha yüksek olduğu ortaya konmuştur (Amr vd.,2018).

5) Seramik tozunun beton karışımlarına dahil edilmesi ciddi anlamda klorür iyonlarının zararlı şekilde betona nüfuz etmesine karşı direnç sağlamış ve gelişmiş toplu elektrik üstün dayanıklılık performansını gösteren dirençdeğerleri ortaya koymuştur (Ravalve Indrajit, 2018). Verim seviyesi ise kullanılan seramik tozuyla doğru orantılı olarak artış göstermiş ve bu durumun sorun meydana getireceği ortam koşulları için bir alternatif çözüm seçeneği sunmuştur.

Seramik atık malzemelerin tekrar kullanılabilmesi üstüne yapılan deneyler ve çalışmalar daha çok agrega yerine kullanımı için yapılmıştır. Çimento bünyesinde bağlayıcı olarak kullanılabilmesi ile ilgili çalışmalar oldukça azdır (Kalinçimen vd., 2015).

Seramik atık tozlarının (SAT), fayans karolarının son parlatma işlemi sonrası ortaya çıkan, çevreye majör zararları olduğundan geri dönüştürülmesi gereken bir malzemedir. Yapılan bazı çalışmalar sonucunda da beton üretiminde kullanılabilceği ortaya çıkmıştır (El-Dieb ve Kanaan, 2018).

Bunlar ve daha belirtilmeyen diğer nedenlerle seramik tozunun diğer tamamlayıcı çimento katkı malzemeleriyle birleştirilmesi ve beton karışımlarının oluşturulmasında üçlü veya dördü karışımlar üretmek için sürdürülebilir beton yapımı üzerine araştırmalar sıklaştırılmalıdır.

2.1.5.2. Geopolimerde Kullanılan Alkali Aktivatörler

Geopolimer beton üretiminde genelde kullanılan alkali aktivatörler;

-Sodyum Silikat

-Sodyum Hidroksit olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.1.5.2.1. Sodyum Hidroksit

Kostik soda adı ile de bilinmekte olan sodyum hidroksit, tek diyaframlı elektrolitik hücrenin sodyum klorür suyu elektroliziyle elde edilmektedir. Kâğıt üreticileri ve alkalın bazlı malzemeye ihtiyaç duyan üreticiler kostik soda kullanımını en fazla olan üreticilerdir. Sodyum hidroksit genellikle 3 form halinde bulunmaktadır; boncuk form, payet form ve sıvı form. Bu formlar kimyasal olarak aynı bileşimlere sahiptir (Occidental Chemical Corporation, 2000).

Sodyum hidroksit çözeltisindeki OH⁻iyonları yalnızca alkali aktivasyonun çeşitli evrelerinde işlev gören hidrolitik reaksiyonların katalize edilmesi görevini görmez. Sodyum hidroksit eş zamanlı olarak ortam pH'ının gerekli değere ulaşmasını sağlayarak toz malzemede mevcut Al ve Si minerallerinin çözünme reaksiyonlarından rol oynamaktadır (Duxson vd., 2005).

Sodyum hidroksit konsantrasyonunun uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcıların alkali aktivasyonu üzerindeki etkilerinin incelendiği araştırmalarda dayanım bakımından optimum sodyum hidroksit konsantrasyonu 8M olarak karşımıza çıkmıştır (Duxson vd., 2005, 2007a; Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005).

Palomo vd. (2004), F tipi uçucu külün çeşitli konsantrasyonlarda (8-18 M aralığında) NaOH ile aktivasyonu ile meydana gelen matrislerin analizini gerçekleştirmiştir. Ulaşılan bulgular göstermektedir ki; konsantrasyon mikroyapı üzerinde yoğun bir etkiye sahiptir. Alkali aktivatör konsantrasyonunun fazla olduğu hallerde, matris daha sıkışık bir hal alarak cama benzer bir malzemenin ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır.

Ülkemizde katı SH, çoğunlukla pula benzer bir şekilde payet kostik ve küresel şekle yakın boncuk kostik halinde satılmaktadır. SH, inşaat sanayinde çimento hidrasyonunun hızlandırılması için kullanılmasına karşın nihai dayanımın düşmesine yol açabilmektedir. GP üretiminde SH çözelti halinde kullanılmaktadır. Katı vaziyetteki SH tanelerinin suda çözünmesi ekzotermik bir süreç olup çözelti haline getirileceğinde dikkatli olunması gerekmektedir (Shi vd., 2003).

2.1.5.2.2. Sodyum Silikat

Sodyum silikat (SS), $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ formülündeki bileşiklerin genel ismidir. Bu bileşik, sıvı cam veya su camı olarak da bilinir. Sulu çözelti içerisinde de bir katı içerisinde kullanılması mümkündür. Sodyum silikat pasif yangın korumada, çimentolarda, tekstil sektöründe, kereste üretiminde, taşıma araçlarında ve başka birçok alanda kullanılır (Wikipedia, 2020).

Bisodyum silikat (Na_2SiO_3), mineral grupları arasında en geniş silikatlar grubuna dahildir. Silikatlar mevcut mineraller yönünden %30'luk bir bölümü içerirken, yeryüzündeki toplam mineral hacminin %90'ına yakınına oluşturmaktadır. Normalde yeryüzünde en çok bulunan silikat mineralleridir. Bundan dolayı O ve Si elementleri yeryüzünde en çok bulunan 2 elementtir. Bunlarla birlikte, silisyum-oksijen bileşikleri yeryüzünün %95'e yakınına meydana getirmektedir.

Puzolanik reaksiyonun başlatılması için tek başına yeterli aktivasyon potansiyeli taşımadığından, bağımsız bir aktive edici birim olarak su camına nadiren başvurulmaktadır. Daha çok, alkalitenin ve genel numune mukavemetinin artırılmasına yönelik takviye aracı olarak NaOH veya KOH ile karıştırılarak kullanılmaktadır (Mehtave Monteiro, 2006).

Sodyum silikat çözeltisiyle ortaya çıkan geopolimer bağlayıcılarda, monomerik ve dimerik (küçük miktarda polimerize edilmiş) silisin varlığı, jelin çökelmeye başlaması için gereken sürenin azaltılmasıdır. Aynı zamanda, dimerik silis miktarında artış çok fazlayüksek miktarda jelin çökmesini hızlandırır da bu koşullar sonucunda ortaya çıkan jelin kararlılığı daha düşük

olacaktır. Ve nihayetinde, çevrimsel trimerlerin mevcudiyeti, başlangıçta daha kararlı jellerin oluşmasına yol açıyor olsa da daha sonra bunların reaksiyonun ilerlemesinde gecikmelere yol açtığı görülmektedir. Yürütülen çalışmalar alüminosilikatların alkaliler ile aktivasyonunda sodyum hidroksit ve sodyum silikatın bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkan silikat modülü ($Ms:SiO_2/Na_2O$) için en elverişli değerin yaklaşık olarak 1-1.5 aralığında olduğunu göstermiştir (Duxson vd.,2005; Criadovd., 2012; Sofivd., 2007).

2.1.6. Geleneksel Betonun Yapısı ve Özellikleri

Beton, tüm yapılarda kullanılan önemli bir yapı malzemesidir. Yaygın olarak kullanılan düşük fiyatı, dayanıklılığı, bileşen malzemelerin içeriği ve herhangi bir şekil veya boyutta biçimlendirilebilmesinden dolayı en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Beton üretiminde kullanılan bağlama teknikleri ve malzemeleri de inşaat teknolojisinde önemli kabul edilir. Örneğin çimento, yalın beton ve betonarme uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan bağlayıcı malzemedir. Portland çimentosu (PÇ) üretimi dünya çapında artmaya devam etmektedir. Bu artış, çimento üretimi sırasında atmosfere büyük miktarda CO₂ salınması nedeniyle çevre için büyük bir tehlike oluşturmaktadır(Davidovits vd., 1994).

Dünya genelindeki beton tüketimi yılda 11,5 milyar ton yakındır. 2050 yılında bu miktarın yılda 18 milyar tona ulaşacağı öngörülmektedir. Portland çimentosu üretiminde, sera etkisine yüksek derecede sebep olan CO₂ salgılanır. Bunun beraberinde, geleneksel beton asitlere ve tuzlara düşük kimyasal direnç, bilhassa 500°C üzerindeki sıcaklıklarda düşük termal ve yangın direnci gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Geleneksel betondaki önemli bir bileşen Portland çimentosudur. Bir ton çimento üretimi esnasında atmosfere bir tona yakın CO₂ salınır. Dahası, çimento üretimi de önemli miktarda doğal kaynak tüketmektedir. GerekPortland çimentosu üretimi gerek atık malzeme miktarındaki artış ile ilişkili çevre kirliliğinin (karbondioksit) azaltılmasının yöntemlerinden biri de alternatif bağlayıcılara yönelmesidir. Bundan dolayı, daha sürdürülebilir bir yaklaşımların ve konvansiyonel beton

yerine kullanılmakta olan mevcut katkı malzemelerinin dikkatlice gözden geçirilmesi bir zorunluluktur(Davidovits, 1994).

2.1.7. Geopolimer Beton ve Geleneksel Betonun Karşılaştırılması

Günümüzde küresel ısınmanın kötü sonuçları sebebiyle ortaya çıkan çevresel sorunlar zamanla artarak devam etmektedir. Bu artışın temel sebeplerinden biri olan enerji tüketimi beraberinde karbondioksit (CO₂) emisyonunda da artış oluşturmaktadır. İnşaat sektörünün en önemli yapı malzemelerinden olan çimento, yüksek enerji tüketen bir üretim sistemi olması nedeniyle çevreye zararlı etkileri çok önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu zararlı etkilerin azaltılabilmesi, çimento üretimiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle son yıllarda yapılan araştırmalarla birlikte çimentoya alternatif malzemelere olan ilgi dünya çapında artmıştır. Çevre dostu bir alternatif olan geopolimer beton geleneksel betonun yerini büyük ölçüde alabilecek yeniliklerden biridir. Geleneksel betonda kullanılan çimento yerine geopolimer betonda kullanılan endüstriyel atıklar sayesinde hem sürdürülebilirlik hem de küresel ısınmaya olumlu katkılar sağlamıştır (ÜmitveEmiroğlu, 2020).

Sertleşmiş geopolimer betonda elastik özellikler ve güçlendirilmiş geopolimer beton yapı elemanlarının mukavemet ve davranışı, Portland çimento betonu ile benzer niteliktedir. Ancak bazı özellikler yönünden geopolimer beton geleneksel beton yerine alternatif olarak gösterilmektedir. Isı ile sertleşen, kalsiyumlu uçucu kül esaslı geopolimer beton, eş zamanlı olarak sülfat saldırısına karşı üst seviye bir direnç sergiler, iyi derecede asit direncine sahiptir, sünme oranı düşüktür ve oldukça düşük kuruma büzülmesi gösterir. Betonarme geopolimer beton kolonlarda ve kirişlerde davranış ve göçme modlarının, güçlendirilmiş Portland çimento beton kolonlardakine benzer olduğu ortaya çıkmıştır. Yapılan testin sonuçları, güçlendirilmiş Portland çimento beton kolonlar ve kirişler için kullanılan hesaplama yöntemlerinin, güçlendirilmiş geopolimer beton kolonlar için de geçerli olduğunu göstermektedir. Sağlamlaştırılmış geopolimer beton kirişlerin servis

yükündeki orta açıklık sehimini, elastik eğilme teorisi ve standartlarda verilen servis edilebilirlik tasarım hükümleri kullanılarak hesaplanmıştır. Servis yükünde test ve hesaplanan sapmalar arasında korelasyonun güçlü olduğu belirtilmiştir (Wallah veRangan, 2006).

Yapılan deneysel çalışmalar doğrultusunda geopolimer betonun geleneksel betona alternatif olarak kullanılmasındaki avantajlar aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

1) Çevre Dostu: Alkali çözeltilisinde tepkimeye giren silikat ya da alüminli silikat maddeleri yeryüzünde yüksek miktarlarda mevcuttur ve bu durum geopolimer betonda hammaddenin istenilen miktarda olduğunu gösterir. Geopolimer beton makineleşmenin etkisiyle atıklardan değerlendirilerek kullanılır. Geopolimer betonun üretiminde geleneksel betona kıyasla daha az enerji harcanır. Böylelikle daha az karbondioksit salınımı gerçekleşir. Bunun yanı sıra bağlayıcı madde olarak metakaolin, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, cam tozu gibi sanayi atıkları kullanılır. Bu sayede hem sürdürülebilirlik hem de atık yönetimi gerçekleştirir.

2) Yüksek Sıcaklıklara Dirençli: Doğal minerallerin kimyasal kompozisyonları ve kristal yapıları çeşitli metotlarla değiştirilerek elde edilir. Bekletilerek kür edilir. Çok kısa bir süre içerisinde hedeflenen dayanıma sahip betonların üretilmesi mümkün olur. Bu durum, Portland çimentolu betonların hazırlanması ile benzer bir süreçtir.

3) Kimyasallara Karşı Dirençli: Geopolimer malzemeler geleneksel betonlara göre üstün mekanik ve fiziksel özelliklerine ilave olarak çok önemli bir ölçüde kimyasal dayanıklılık gösterirler. Geopolimer harçlar deniz suyu, sülfat, alkali silika reaksiyonu ve asidik ortamların etkileri karşısında hedeflenen optimum dayanıklılığı gösterse de literatürde bu konuya ilişkin genel bir kanıya varılmış olduğu söylenemez. Hali hazırda dünya çapında geopolimer betonlar üzerinde kimyasal etkilere karşı deneyler yapılmaya devam etmektedir.

4) Performans özellikleri: Geopolimer betonun işlenebilirliği açısından avantajlar içermektedir. Olumsuz şartlar söz konusu olduğunda geleneksel

betona kıyasla dayanım kaybetmeksizin çok daha uzun yıllar yapı fonksiyonunu sürdürebilmeleri, bu betonların en önemli özelliklerindedir. Geopolimer betonlarda normal betonlara göre suyun buharlaşması daha az olduğu için, geopolimer betonlarda çatlaklara daha az rastlanmaktadır. Bu betonlara ısı kütür işlemleri uygulandığında, bir nevi ısı kütürü uygulanarak beklenen basınç dayanımının %70 seviyesine ulaşmaktadır. Geopolimer betondan üretilmiş yapıların üretim süreci göz önüne alındığında kısa sürede zarar gibi görülebilecek olsa da uzun vadede kârlı olduğu bir gerçektir (Li vd.,2004).

Gelişmiş mukavemete ve yangın dayanıklılığına sahip olduğundan mekanik özellikleri itibariyle yapısal uygulamalarda geopolimer beton kullanımının faydalı olduğu düşünülmektedir. Yüksek kütleme ısılarında yüksek mukavemet kazancı, geopolimer betonu prekast yapısal uygulamalara kazandırır (Sumajouw ve Rangan, 2006).

2.1.8. Geopolimer Avantaj ve Dezavantajları

Rajarajeswari ve Dhinakaran (2016) tarafından yapılan araştırmada, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanarak üretilen geopolimer beton numunelerine ilişkin maliyet analizi yapılmıştır. Basınç dayanımı 28MPa olan normal Portland çimentolu 1m³ betonun maliyeti 83.05\$ olarak ortaya çıkarken, basınç dayanımı 26.97 MPa olan 1m³ geopolimer betonun maliyeti 51.66\$, basınç dayanımı 32.98 MPa olan 1m³ geopolimer betonun maliyeti 57.05\$, basınç dayanımı 37.65 MPa olan 1m³ geopolimer betonun maliyeti 61.66\$ olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların neticesinde geopolimer betonun daha düşük maliyetli olduğu anlaşılmıştır. Normal Portland çimentolu betonla geopolimer beton arasında söz konusu olan maliyet farklılığının büyük ölçüde çimentodan kaynaklandığı ortaya konmuştur (Rajarajeswari ve Dhinakaran, 2016).

Li vd.(2004) yaptığı araştırmada ise geopolimerlerin avantajlarını şu şekilde sıralanmaktadır:

1. Çevrede hammadde kaynaklarının kolayulaşılabilir olması: Suda çözünebilen bazlarda (alkali çözeltilerde) çözünen silikatlar yeryüzünde fazlasıyla mevcuttur. Geopolimerler fabrika atıkları ve doğal puzolanlar ile üretilmektedir.

2. Verimli enerji kullanımı ve doğa dostu: Geopolimer üretimi için fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaz. Doğadaki alümino-silikatların düşük rölatif sıcaklıklarda (600-800°C) ısı zamanı, Portland çimentosunun harcadığı enerjinin 3 te 5'i ile yeterli geopolimerik hammaddelerin, daha düşük miktarlarda CO₂ açığa çıkarılarak elde edilmesi mümkündür.

3. Geopolimer beton hazırlama: Geopolimer betonları, alümino-silikat reaktif malzemelerin, güçlü alkali çözeltiler ile bir düzen içerisinde karıştırılması yoluyla oldukça kolay bir şekilde sentezlemek mümkündür. Kısa sürede kayda değer bir dayanıklılığa ulaşılabilir. Bu durum, Portland çimentolu beton hazırlama süreci ile benzer bir süreçtir.

4. Çatlak kontrolü: Normal betonlara nazaran çatlama oranları daha düşüktür.

5. Erken dayanıklılık: Geopolimer betonlarda, doğru içeriklerle erken dayanıma ulaşılır.

6. Mukavemet: Dayanımını uzun süre kaybetmeden varlığını koruyabilir.

7. Isı iletkenliği ve yangına dayanımının düşük olması: Geopolimerler yüksek sıcaklıklar karşısında dayanıklıdır. Geopolimer ile üretilen önemli binaların da yangına daha dayanıklı olduğu bilinmektedir (Görhan ve Kürklü, 2014).

Geopolimer bağlayıcı sistemlere ilişkin dezavantajlardan söz edecek olursak; kullanılan toz alüminosilikat malzemelere ait kimyasal ve fiziksel özelliklerin daima düzgün olmayışının kontrol ve kalite durumundan çok sorunlara yol açması başlıca dezavantajlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bilhassa, endüstriyel yan ürün olarak ortaya çıkan atık toz malzemelere ait kimyasal ve fiziksel özellikler, ana ürünün üretimindeki en ufak bir değişiklik ile zaman içerisinde değişebilmektedir. Toz malzeme

özeliklerinde karşılaşılan değişimler bağlayıcı sistem özelliklerine de kayda değer derecede etki etmektedir (Pacheco-Torgal vd.,2015). Bu bakımdan; örneğin, geopolimer bağlayıcı üretiminin gerçekleştirileceği bir tesiste, farklı zamanlarda ve farklı bölgelerden elde edilen atık toz malzemelerin her birinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ayrı ayrı belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bunun doğal bir sonucu olarak da kalite kontrol ve ARGE maliyetlerinin artacağı söylenebilir.

Geopolimer bağlayıcı sistemlere ilişkin dezavantajlardan bir diğeri de karışımlarda taze halde işlenebilirliğin çimentolu sistemlere göre oldukça düşük oluşudur. Alkali aktivasyon için kullanılan alkali aktivatör çözeltilerde viskozitenin yüksek oluşundan ötürü oldukça yoğun ve yapışkan karışımlar elde edilmekte olup; karışımın işlenebilirliği bu durumdan olumsuz yönde etkilenmektedir. İşlenebilirliğin artırılması adına karışıma su eklenmesi betonun su oranını bozacaktır. Bu durum dabileşimin sertleşmiş haldeki özelliklerine olumsuz etki edebilir.

Çiçeklenme sorunu, geopolimer bağlayıcıların dezavantajlarından bir diğeridir. Alkaliler ya da çözülmüş silikatlar geopolimerizasyon boyunca karışım bünyesinde tamamıyla tükenemediğinden, çiçeklenme ihtimali oldukça yüksektir. Fazla geçirgenlik ve su emmeye elverişli geopolimer bileşimlerde suyla birlikte alkalilerin beton yüzeyine hareketi söz konusudur. Bu durumun kontrolü altında tutmak adın alkali aktivatörün kimyasal formülünü değiştirmek, karışımların reaksiyon derecesini artırmakadına farklı kür koşullarına maruz bırakmak ve daha yoğun bir iç yapıya ulaşabilmek adına çeşitli katkı maddelerini değerlendirmek gibi yöntemlere başvurulmaktadır (Pacheco-Torgal vd., 2015).

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

METERYAL VE YÖNTEMLER

3.1.MALZEMELER

3.1.1 Seramik Tozu, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu ortaya çıkan numunelerin ana malzemesi seramik tozudur.Seramikler puzolan sınıfındaki diğer malzemelere göre yüksek sıcaklıkta üretildikleri için yüksek sıcaklığa kırmataşlardan daha dayanıklıdır. Dolayısıyla yüksek sıcaklıklara dayanıklı beton üretimi içinelverişli oldukları söylenebilir. Alkali ile aktive edilmiş harç numunelerinin üretimi için bağlayıcı malzeme olarak düşük kalsiyumlu uçucu kül (F-tipi) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) kullanılmıştır. Seramik atık tozu (SAT)(Şekil 3.1), %5, %10 ve %15'lik F-tipi uçucu kül kütlesi ile değiştirilirken, ÖGYFC içeriği tüm karışım tasarımları için %50'de sabit tutulmuştur. Bağlayıcı malzemelerin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Seramik Tozu Numunesi

Çizelge 3.1. Bağlayıcı malzemelerinin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

Bileşenler	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma	ÖzgülBlaine
Kayı (m ² /kg)	Ağırlık	İnceliği								
UK (%)	2.10	54.76	25.26	6.28	2.08	0.204	0.04	0.38	3.30	2.13387
ÖGYFC(%)	37.25	38.37	11.89	1.05	8.130	381.28	0.28		-2.93432	
SAT (%)	4.65	65.44	15.45	7.11	1.28	0.06	2.15	0.803	0.6	2.62 545

3.1.2 Kum

Seramik tozu ile yapılan harçların hazırlanabilmesinde ince agrega olarak dere kumu ve kireçtaşı (maksimum 4 mm tane boyutu) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kumun çok fazla ince ya da çok fazla iri olmamasına özen gösterilmiştir.

3.1.3 Kimyasal Katkılar

Tez çalışmasında sodyum silikat ve hidroksit alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Ayrıca işlenebilirliği arttırmak için karışımlarda polikarboksilat eter bazlı bir süper akışkanlaştırıcı (SA) da kullanılmıştır.

3.1.3.1 Sodyum Silikat

Çimento harçlarının hazırlanmasında kullanılan iki alkali aktivatörden bir tanesi sodyum silikattır (Şekil 3.2). Cam suyu adı ile de bilinen alkali silikat çözeltisi, sıcak suda bekletilerek çözündürülen alkali silikat peletlere da silis kumu gibi reaktif bir silis kaynağının ilgili alkali hidroksit çözeltisi için dehidrotermal olarak çözülmesi ile elde edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan sodyum silikat, kütlece %14,7 sodyum oksit, %29,7 silikon dioksit ve %55,5 su içerir.



Şekil 3.2. Sodyum Silikat

3.1.3.2 Sodyum Hidroksit

Çimento harçlarının hazırlanmasında kullanılan diğer bir alkali aktivatör ise sodyum hidroksittir. Kostik soda adı ile de bilinmekte olan sodyum hidroksit diyaframlı elektrolitik hücrede sodyum klorürün suyunun elektroliziyle oluşur. Sodyum hidroksit (SH) (Şekil 3.3) molaritesi 8M ve 16M olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Sodyum Hidroksit

3.2 DENEY ÇALIŞMALARI

Yapılan bu tez çalışmalarında 50x50x50 mmküp ve 40x40x160 mm prizma numuneler olmak üzere iki çeşit numune üretilmiştir. Mekanik deneylerle elde edilen numuneler basınç, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı gibi ölçümler için testlere tabi tutulmuştur. Aynı zamanda geopolimer harç serilerinde birim hacim ağırlık, boşluk oranları ve su emme oranlarının belirlenmesine ilişkin deneyler de gerçekleştirilmiştir. Durabiliteye ilişkin çalışma çerçevesinde yüksek sıcaklık ve donma çözülme, aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 Basınç Dayanımı Testi

Küp harç numunesine ait basınç dayanımı, betonun bütün özelliklerine dair fikir vermektedir. Basınç dayanımının ölçülmesine yönelik standart test yöntemi mevcuttur. Tez çalışmasında seramik tozu ilave edilmiş geopolimer numuneleri 50x50x50mm ölçülerinde küp ve 40x40x160mm prizma olacak şekilde iki çeşit olarak üretilmiştir. İmalat aşamasında pürüzsüz olmalarına özen gösterilmiştir. Küp numunelere doğrudan TS EN 196-1 (2012) doğrultusunda otomatik test cihazından metal kırılma ucuyla basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Prizma numunelerde ise eğilme dayanım testinin neticesinde ortadan ikiye bölünen iki parçaya uygulanmıştır. 7.,28., ve 56. günlerde uygulanmış olup; serilerin her biri için üçer numuneden yararlanılmıştır. Üç numunenin ortalama basınç dayanımı, çalışma kapsamında kullanılan harcın basınç dayanımını gösterecek biçimde ölçülmüştür.

3.2.2 Eğilme Dayanımı Testi

Geopolimer harç numunelerde eğilme dayanımına ilişkin sonuçların elde edilmesine yönelik olarak 40x40x160mm ölçülerinde prizma numunelerden yararlanılmıştır. Test makinasında numunelere tek noktadan, TS EN 1015-11, (2000) ile uyumlu olacak şekilde yükleme gerçekleştirilmiştir. Numunenin kalıba dökülmesi esnasında üst yüzeydenk

gelen taraf, yapılan eğilme testine paralel biçimde konumlandırılmıştır. Yüklemede cihazın yükleme başlığı numunenin tam ortasına denk getirilmiş ve mesnetler arası açıklık 10 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Eğilme dayanımı testleri 7., 28., ve 56. günlerde uygulanmıştır.

3.2.3 Ultrases Geçiş Hızı Testi

Geopolimer harç numunelerinde ultrases geçiş hızlarını tespit etmek amacı ile ultrases geçiş hızı testi yapılmıştır. Numunelerin pürüzlü olan yüzeylerine jel sürülerek, jel sürülen kısımlara transdüserler numune boyunca tutulmuş ve ölçülmüştür. Her numune için iki okuma gerçekleştirilmiştir ve ortalamaları alınmış olup; ultrases geçiş hızı birimi m/sn'dir. Ultrases geçiş hızı testi 7., 28., ve 56. günlerde uygulanmıştır.

3.2.4 Fiziksel Özellik Testleri (Boşluk Oranı, Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri)

Yapılan tez çalışmalarında 50x50x50 boyutlarındaki geopolimer küp numunelerin etüv içerisinde 48 saatlik bir süreyle tutulması sonucunda değişmez ağırlıktan etüv kurusu ağırlığı (D) tespit edilmiştir. Bunun beraberinde, söz konusu sürede oda sıcaklığında olan su içerisinde bekletilerek çıkarıldığında doygun kuru yüzey ağırlığı (E) bulunmuştur. Arşimet Prensibi, bir diğer ifade ile suyun kaldırma kuvveti prensibi uygulanarak, su içerisindeki ağırlığı (F) ölçülmüştür. Bu hesaplamalara ilişkin denklemlere aşağıda yer verilmektedir. Üretilen numuneler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

$$\text{Birim Ağırlığı (gr/cm}^3\text{)} = D / (D-F)$$

$$\text{Boşluk Oran (\%)} = [(E-D)/(E-F)] \times 100$$

$$\text{Su emme Oranı (\%)} = [(E-D)/(D)] \times 100$$

D= Kuru durumda tespit edilen ağırlık (gr)

E=Doygun kuru yüzey durumunda tespit edilen ağırlık (gr)

F= Su içerisinde tespit edilen ağırlık (gr)



Şekil 3.4. Deney kapsamında kullanılan numuneler

3.2.5 Yüksek Sıcaklık Testi

Bu tez çalışmasında seramik tozu katılarak üretilen geopolimer seriler ve karşılaştırma amacıyla kontrol numune harçlarına 56 günün ardından yüksek sıcaklık fırınında 300, 600 ve 900°C'lik sıcaklıklar uygulanmıştır. Deney öncesinde 24 saat süreyle etüvde kurutulan numuneler, yüksek sıcaklık testi sonrası, termal şoka uğramamaları için fırın içerisinde oda sıcaklığına ulaşana dek soğutulmuştur. Numuneler, ısıl işlem öncesi ve sonrası olmak üzere iki şekilde incelenmiş; incelemelerde fiziki ve mekanik değişiklikler

göz önünde bulundurulmuştur. Eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybına ilişkin incelemeler gerçekleştirilmiştir.

3.2.6 Donma Çözünme Testi

Bu tez çalışmasında seramik tozu katılarak üretilen geopolimer seriler ve karşılaştırma amacı ile kontrol numune harçları 56. günün sonunda donma-çözülme testine maruz bırakılmış, toplamda 100 adet donma-çözülme döngüsü uygulanmıştır. Her döngü için hem donma hem de çözülme aşamalarının süresi 12 saattir. Donma-çözülme döngülerinin sıcaklık seviyeleri -20°C ile $+20^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Çevrimlerin bitmesinin ardından, donma-çözülme öncesi ve sonrası olmak üzere iki bakımdan analiz edilen numunelerde, fiziki ve mekanik değişiklikler göz önünde bulundurulmuştur. Eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybına ilişkin incelemeler gerçekleştirilmiştir.

3.3 NUMUNE ÜRETİMİ

Çizelge 3.2, ön deneylerden sonra seçilen farklı karışımlarının karışım içeriklerini göstermektedir. Üretim sırasında, UK, ÖGYFC ve SAT (varsa) bağlayıcılar bir kapta matkapla karıştırılmıştır. Daha sonra SS/SH solüsyonu ve süperakışkanlaştırıcı kombinasyonu ilave edilmiş ve 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karışıma kum ilave edilerek 3 dakika daha karıştırılmıştır. Döküm ve vibrasyon prosedürleri tamamlandıktan sonra, alkali aktivatör solüsyonunun buharlaşmasını önlemek için numuneler plastik torbalara kapatılmıştır. Bu numuneler oda koşullarında bekletilmiş ve 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, ardından test günlerine kadar oda koşullarında tutulmuştur. ÖGYFC malzemesindeki yüksek kalsiyum oksit içeriği nedeniyle, cüruf içeren numuneler fırında kürlenme veya su kürlenme olmadan dayanım kazanabilir; bu nedenle numuneler, yapısal kullanımı temsil etmek için bir oda koşullarında kürlenmiştir. Çeşitli seramik atık tozu dozajlarının, doğal ortamda kürlenmiş numunelerinin mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri burada ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Çizelge 3.2. Alkali ile aktive edilmiş harçların karışım bileşenleri (g)

Malzemeler	Kontrol-	Kontrol-	SAT5-	SAT5-	SAT10-	SAT10-	SAT15-	SAT15-
	8M	16M	8M	16M	8M	16M	8M	16M
SS	145	145	145	145	145	145	145	145
SH	55	55	55	55	55	55	55	55
UK	200	200	180	180	160	160	140	140
ÖGYFC	200	200	200	200	200	200	200	200
SAT	0	0	20	20	40	40	60	60
KUM	900	900	900	900	900	900	900	900
SA	15	15	15	15	15	15	15	15

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

DENEY SONUÇLARI

4.1 Deneysel Çalışmaları

4.1.1 Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen deneyler sonucunda üretilmiş olangeopolimer numuneler içindeki seramik tozu ile beraber değişen oranlarda kullanılan kimyasal malzemelerin geopolimer harç oluşturulmasındaki etkisi incelenmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.1-4.2’de verilmiştir.

Basınç dayanımına ilişkin, öncelikle kontrol numuneleri yani seramik tozu katılmaksızın 8-16M’lik sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerde değişimler 7, 28 ve 56 günlük periyodlarla gözlemlenmiştir. Ardından seramik tozunun belirli oranlarda karışıma karıştırılması ile ölçümler yapılmıştır. Seramik tozu kullanılmadan hazırlanan 8M’lik harç numunelerinin basınç dayanımları 7. günde 32,35 MPa, 28. günde 42,11 MPa, 56. günde ise 54,48 MPa olarak ölçülürken; %5’lik seramik tozunun karışımın içine eklenmesi ile 7. günde elde edilen sonuç 36.82 MPa yani %13.8, 28. günde ortaya çıkan sonuç 46.22 MPa yani %9.7, 56. günde ortaya çıkan sonuç ise 58.62 MPa yani %7.6 oranında artış göstermiştir.

Seramik tozunun %10 oranında karışıma katılması ile 7. günde ortaya çıkan sonuç 39.76 MPa yani %23, 28. günde ortaya çıkan sonuç 48.75 MPa yani %15.8, 56. günde ortaya çıkan sonuç ise 61.89 MPa yani %13.6 oranında artış göstermiştir.

Seramik tozunun %15 oranında karışıma katılması ile 7. günde ortaya çıkan sonuç 41.91 MPa yani %30, 28. günde ortaya çıkan sonuç 54.27 MPa yani %28.9, 56. günde ortaya çıkan sonuç ise 67.15 MPa yani %23.3 oranında artış göstermiştir.

Aynı adımlar 16M sodyum hidroksit için detakip edilmiştir. Kontrol amacıyla hazırlanan karışıma kıyasla aynı oranda artırılarak eklenen seramik tozunun 7, 28ve 56 günlüksürelerin sonunda basınç dayanımını arttırdığı

görülmüştür. Gerçekleştirilen basınç dayanımına ilişkin analizlerin neticesinde, seramik tozunun kısmi ikame edilmesiyle karışımların kontrol numuneler ile kıyaslanması sonucunda daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

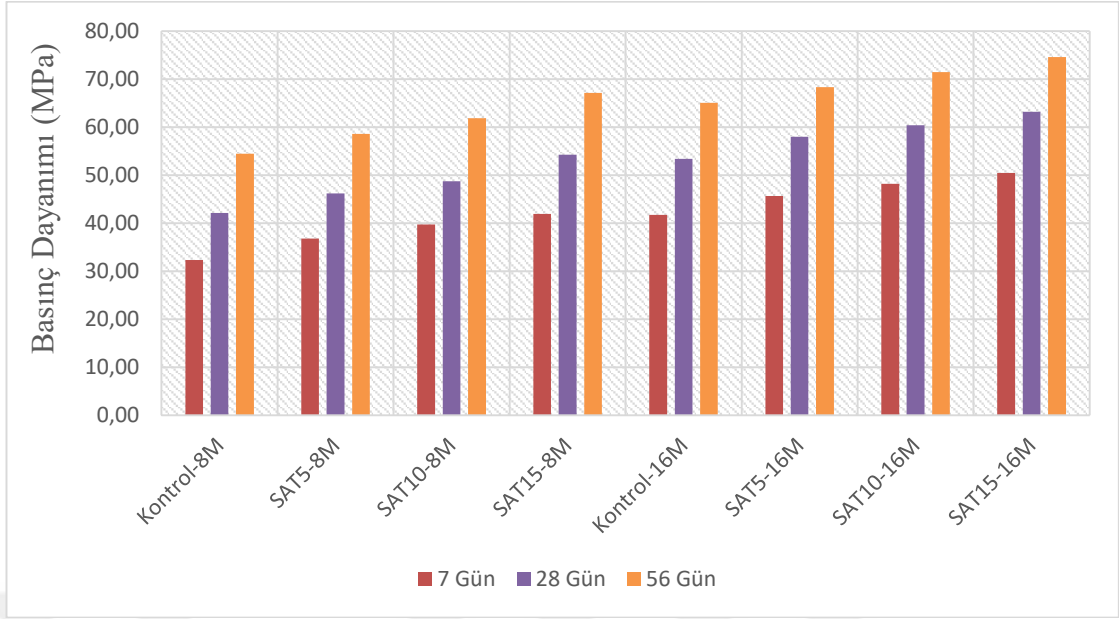
%5, %10 ve %15'lik seramik tozu içeren karışımlar zaman ilerledikçe kontrol numunelerine göre yüksek bir dayanım kazanmasa da, en yüksek artış yüzdesini %5 seramik tozu ikameli deneyin sonucu vermiştir.

Eğilme dayanımı açısından, %5 SAT, %10 SAT ve %15 SAT ikameli hazırlanan 8M'lık karışımların harç numunelerinde SAT karışımları, 7.günde sırasıyla kontrol karışımına göre %10.8, %16 ve %23.2 oranında artışla dayanım yönünden kayda değer bir artış sergilemiştir.

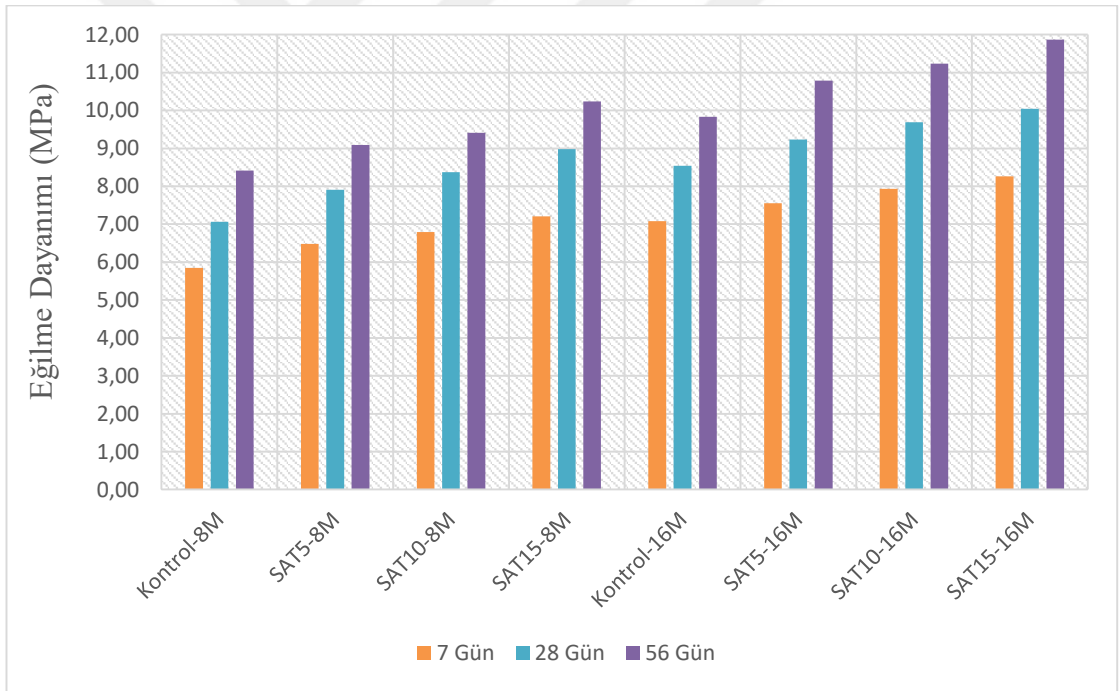
28.günde sırasıyla kontrol karışımına göre %12, %18.55 ve %27.2 oranında artışla dayanım yönünden kayda değer bir artış sergilemiştir.

56.günde sırasıyla kontrol karışımına göre %8, %11.9 ve %21.8 oranında artışla dayanım yönünden kayda değer bir artış sergilemiştir.

Eğilme dayanımı açısından aynı aşamalar 16M sodyum hidroksit ile takip edilmiştir. Kontrol amacıyla hazırlanan karışımla aynı oranda artırılarak eklenen seramik tozunun 7, 28 ve 56 günlük sürelerin tamamının sonunda artış sağladığı görülmüştür. Gerçekleştirilen eğilme dayanımına ilişkin analizlerin neticesinde, seramik tozunun kısmi ikame edilmesiyle karışımların kontrol numunelerle karşılaştırılması neticesinde daha iyi sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 4.1. Numunelerin Basınç Dayanım Sonuçları

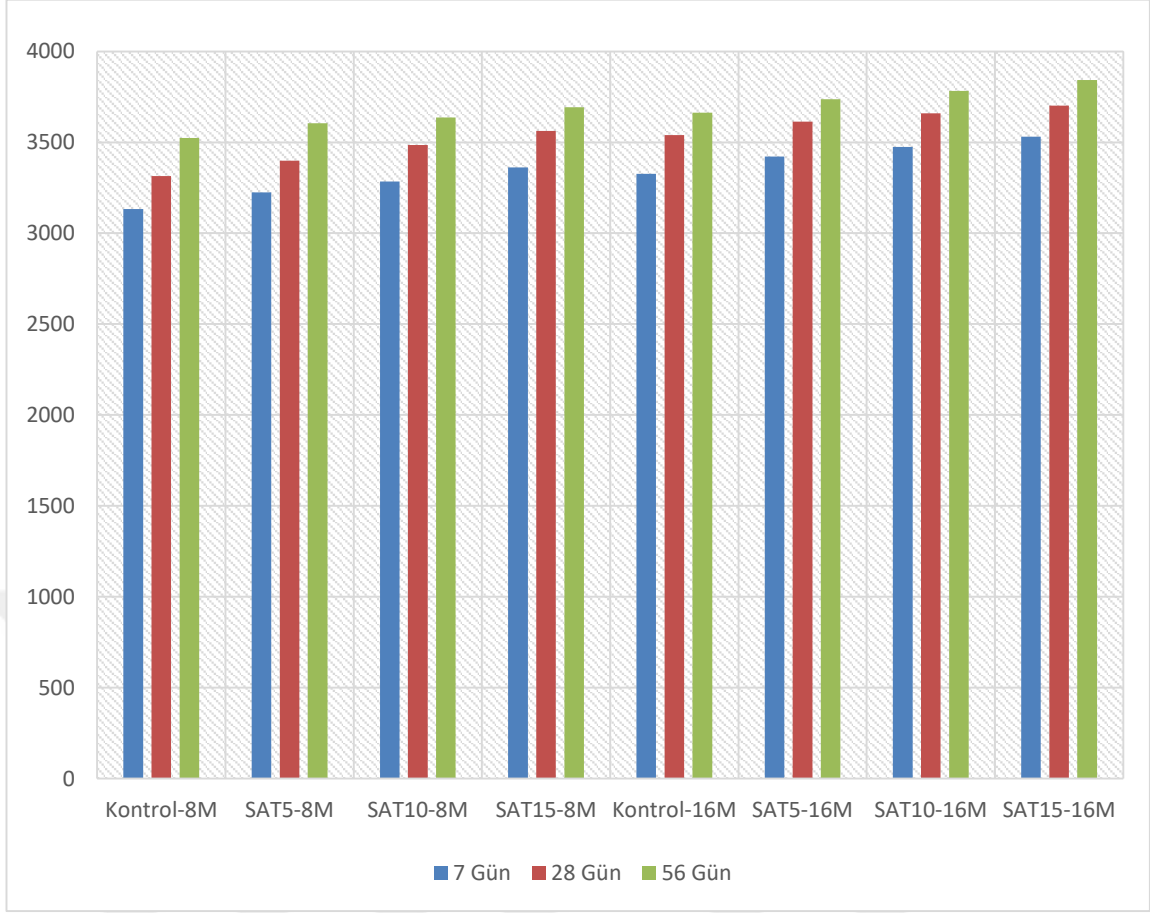


Şekil 4.2. Numunelerin Eğilme Dayanım Sonuçları

4.1.2 Ultrases Geçiş Hızı Test Sonuçları

Ultrases geçiş hızları (UGH), boyu bilinen numunlerden iletilen ses dalgasının numuneden geçiş hızının ölçüldüğü ve yol/zaman formülüyle ifade edilen bir deneydir. Matrisin homojenlik düzeyini ve kusurlarını tespit edebilmek adına ultrasonik tahribatsız iletim hızı testi uygulanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.3'te verilmiştir. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere, seramik tozu ikameli harç numunelerinin sonuçlarının kayda değer derecede arttığı ve diğer numunelerle kıyaslandığında daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Seramik tozu olmadan hazırlanılan 8M'lık harç numunelerinde yapılan ultrases geçiş hızı test sonuçları 7.gün 3132 m/s, 28.günde 3315 m/s ve 56.günde ise 3523 m/s olarak ölçülmüştür. 8M'lık kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında %5 SAT, %10 SAT ve %15 SAT ikamesi için sonuçlar 7.günde sırasıyla %3, %4.8 ve %7.3 oranında artış göstermiştir. 28.günde sırasıyla %2.5, %5.1 ve %7.4 oranında artış gözlemlenmiştir. 56.günde ise sırasıyla %2.3, %3.2 ve %4.8 oranında artış gözlemlenmiştir.

Diğer bir taraftan hazırlanan 16M'lık seramik tozu ikameli numunelerin sonuçlarına baktığımızda %5 SAT, %10 SAT ve %15 SAT ikamesi için sonuçlar 7.günde sırasıyla %2.8, %4.4 ve %6.1 oranında artış göstermiştir. 28.günde sırasıyla %2.1, %3.4 ve %4.6 oranında artış gözlemlenmiştir. 56.günde ise sırasıyla %2, %3.2 ve %5 oranında artış gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

4.1.3 Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Sonuçları

Çizelge 4.1’de seramik tozu ilaveli numunelerin taşınım özelliklerine yer verilmektedir. Seramik tozu ikameli malzemelerin mevcudiyeti incelenen bütün fiziksel özellikler bakımından (boşluk oranı, birim hacim ağırlık ve su emme) mühim bir gelişme sağlamıştır.

Bulgular, numunelerin boşluk oranının, artan SAT ikame oranı ve molarite ile azaldığını göstermiştir. %15 SAT içeren numuneler en düşük boşluk oranını göstermiş ve daha yüksek molarite ile daha da azalmıştır. Bu, SAT’ın inceliğine, dolgu yoğunluğunun ve matris ile agregalar arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin artırılmasına bağlanabilir. Ayrıca, SAT içeren numunelerinin su emmesi, artan SAT kullanım oranı ile azalmıştır. Ayrıca

16M SH içeren numuneler, 16M SH içeren numunelere göre daha düşük su emmesi göstermiştir. Fiziksel özellikler dikkate alındığında, hem 16M SH molarite hem de %15 SAT ikameleri, numunelerin fiziksel özelliklerini iyileştirmiştir.

Çizelge 4.1. Numunelerin Fiziksel Özellik Sonuçları

	Boşluk oranı -(%)	Birim hacim ağırlık - (g/cm ³)	Ağırlıkça su emme oranı-(%)
Kontrol-8M	21,87	2,31	9,48
SAT5-8M	21,02	2,35	8,76
SAT10-8M	20,23	2,38	8,47
SAT15-8M	19,44	2,44	8,02
Kontrol-16M	19,67	2,43	8,15
SAT5-16M	18,73	2,48	7,56
SAT10-16M	18,22	2,5	7,31
SAT15-16M	17,68	2,52	6,98

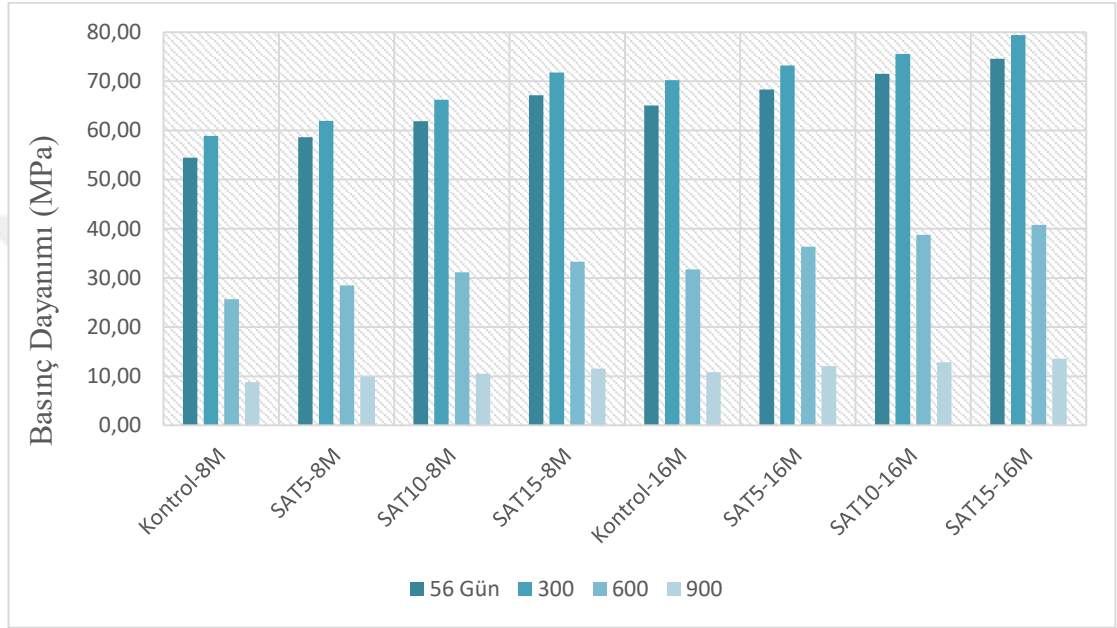
4.1.4 Yüksek Sıcaklık Testinde Basınç, Eğilme, Ultrases Geçiş Hızı ve Ağırlık Kaybı Deney Sonuçları

Hazırlanan kontrol numunelerinin ve seramik tozu ikameli geopolimer harç numunelerinin 56 günlük sürenin sonunda sırasıyla 300, 600 ve 900 °C'lik yüksek sıcaklığa maruz bırakılması ile elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra soğumaya bırakılan numunelerde ağırlık kaybı, eğilmeve basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı gibi sonuçlar için ölçümler yapılmıştır (Şekil 4.4-4.7).

4.1.4.1 Basınç Dayanım Sonuçları

Basınç dayanımına ilişkin, yüksek sıcaklık neticesinde ulaşılan sonuçlar, 56 günlük sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Basınç dayanımlarında 300°C sıcaklığa kadar artışlar görülmüştür. 600°C'in üzerinde basınç dayanımlarının ciddi ölçüde düştüğü gözlenmiştir. Seramik tozunun ikamesi kalan basınç dayanımının da yükselmesine yol açmıştır. %5 SAT'ta 300, 600ve 900°C sıcaklıklar için sırayla 61,97, 28,46 ve 9,92 MPa kalan basınç dayanımına ulaşılmıştır. %10-%15 seramik tozu ikame oranlı 8M ve 16 M için de basınç dayanımları incelendiğinde benzer artış ve azalmalar olduğu saptanmıştır. Test sonuçlarının, sıcaklık etkisi öncesinde basınç dayanımı

sonuçları ile benzer davranış sergilediği söylenebilir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında hazırlanmış olan numuneler seramik tozlu ve 2 değişik oranda sodyum hidroksit 16M ve 8M şeklinde olup kıyaslamalarda bu durum dikkate alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde seramik tozu ikameli numunelerinin kontrol amaçlı hazırlanan numunelere göre basınç dayanımı daha yüksektir.



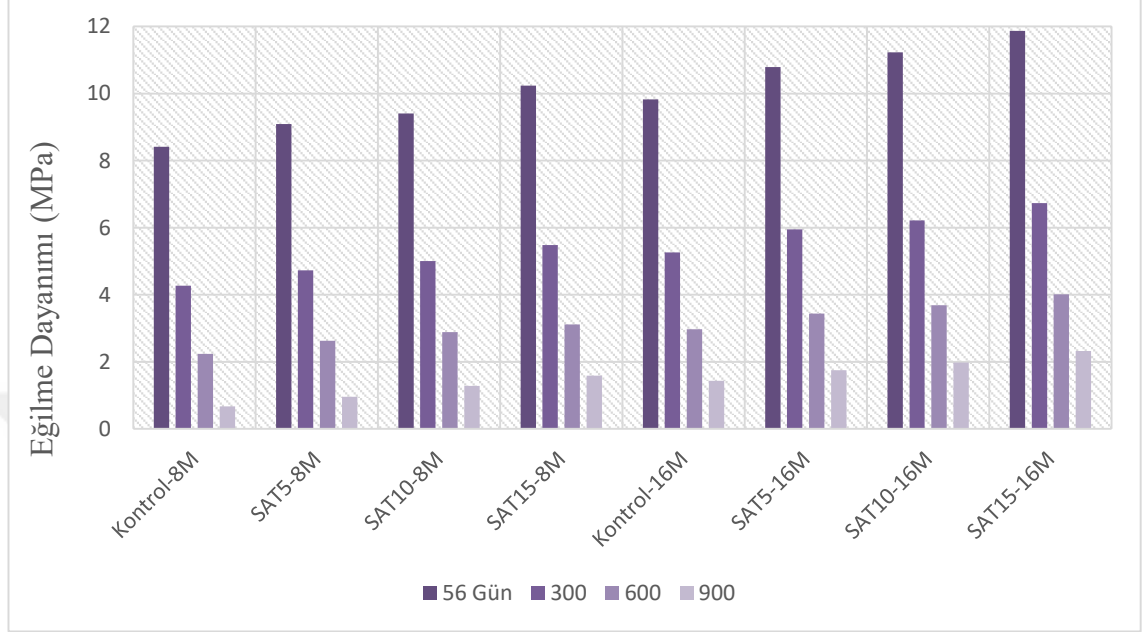
Şekil 4.4. Yüksek Sıcaklıkta Basınç Dayanım Sonuçları

4.1.4.2 Eğilme Dayanım Sonuçları

Tez çalışmasında numunelere aiteğilme dayanımı davranışlarıyla, basınç dayanımı davranışlarının oldukça benzer olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak ulaşılan eğilme dayanımı sonuçları 56 günlük sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. 600°C'nin üzerinde eğilme dayanımlarının ciddi ölçüde düştüğü gözlenmiştir. Buna rağmen elde edilen eğilme dayanım sonuçları, kontrol numunelerinden daha yüksek olmuştur.

SAT ikame edilmesi eğilme dayanımının yükselmesine yol açmıştır. %5 SAT'ta 300°C, 600°C ve 900°C için sırasıyla 4.73 MPa, 2.63 MPa ve 0,96 MPa kalan eğilme dayanımına ulaşılmıştır. %10 SAT'ta 300°C, 600°C ve 900°C için sırasıyla 5.01 MPa, 2.89 MPa ve 1.28 MPa; %15 SAT'ta ise

300°C, 600°C ve 900°C için sırasıyla 5.48 MPa, 3.12 MPa ve 1.59 MPa kalan eğilme dayanımına ulaşılmıştır.



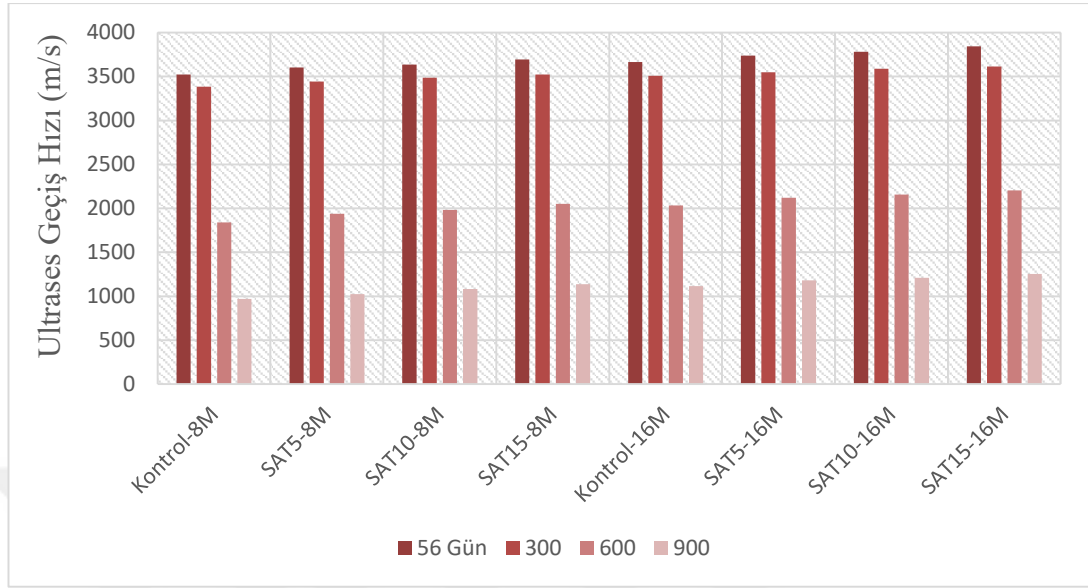
Şekil 4.5. Yüksek Sıcaklıkta Eğilme Dayanım Sonuçları

4.1.4.3 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Tez çalışmasında numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçlarına göre seramik tozu ikamesinin yüksek sıcaklıkta ultrases geçiş hızı sonuçlarına olumlu etki ettiği görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta ulaşılan sonuçlar 56 günlük sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. 600°C'nin üzerinde sonuçların kayda değer oranda azaldığı gözlenmiştir.

%5 SAT'ta 300°C, 600°C ve 900°C'de 8M için sırayla 3443 m/s, 1937 m/s ve 1024 m/s UGH ölçülmüştür. %10 SAT'ta 8M için 300°C, 600°C ve 900°C'de sırasıyla 3485 m/s, 1984 m/s ve 1082 m/s ve %15 SAT 8M için ise 300°C, 600°C ve 900°C'de sırasıyla 3521 m/s, 2051 m/s ve 1136 m/s UGH değerlerine ulaşılmıştır. 16M için ise sırasıyla %5 SAT'ta UGH değerleri 300°C, 600°C ve 900°C için sırasıyla 3548 m/s, 2122 m/s ve 1183 m/s olarak ölçülmüştür. %10 SAT'ta 300°C, 600°C ve 900°C'de sırayla 3587 m/s, 2158

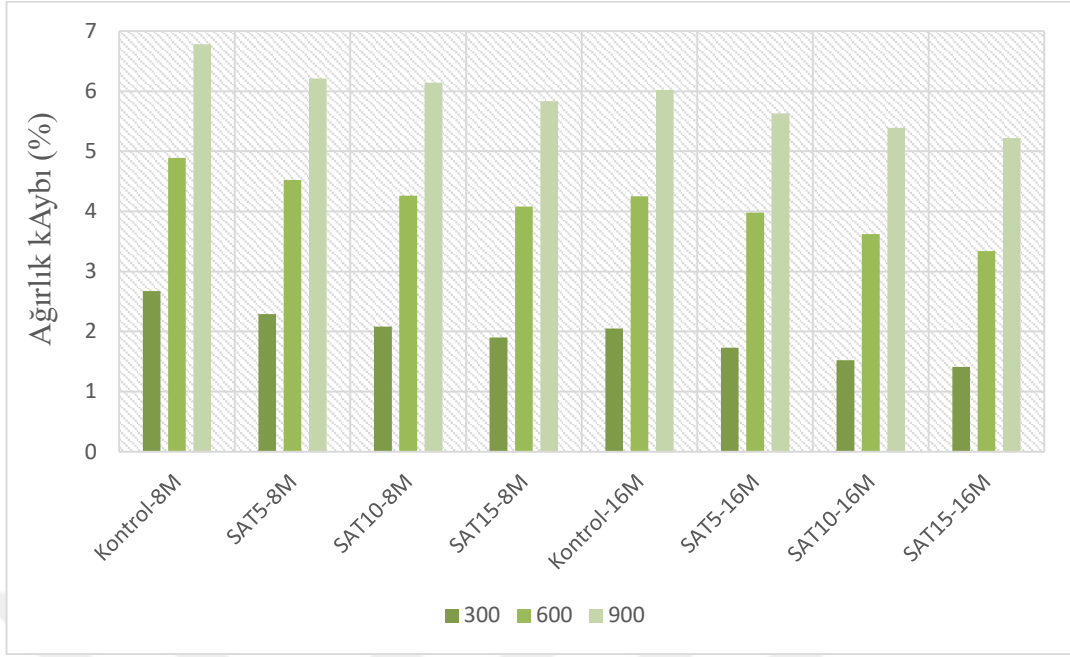
m/s ve 1211 m/s olan bu değerler %15 SAT'ta 300°C, 600°C ve 900°C için sırayla 3614 m/s, 2204 m/s ve 1256 m/s olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.6. Yüksek Sıcaklıkta Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

4.1.4.4 Ağırlık Kaybı Sonuçları

Yüksek sıcaklıktan kaynaklanan ağırlık kaybı sonuçlarına Şekil 4.7'de yer verilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisiyle seramik tozu ikameli geopolimer harçlarda 8M için ölçülen ağırlık kaybı oranları 300°C'de %2.29 ile %1.9 aralığında olup, 600°C sıcaklık için %4.52 ile %4.08 aralığındadır. 900°C'de ise ağırlık kaybı oranları %6.21 ile %5.83 aralığındadır. Yüksek sıcaklık etkisiyle seramik tozu ikameli geopolimer harçlarda 16M için 300°C sıcaklıkta ağırlık kaybı oranları %1.73 ile %41 aralığında iken; bu oranların 600°C için %3.98 ile %3.34 aralığında, 900°C için %5.63 ile %5.22 aralığında olduğu görülmüştür.

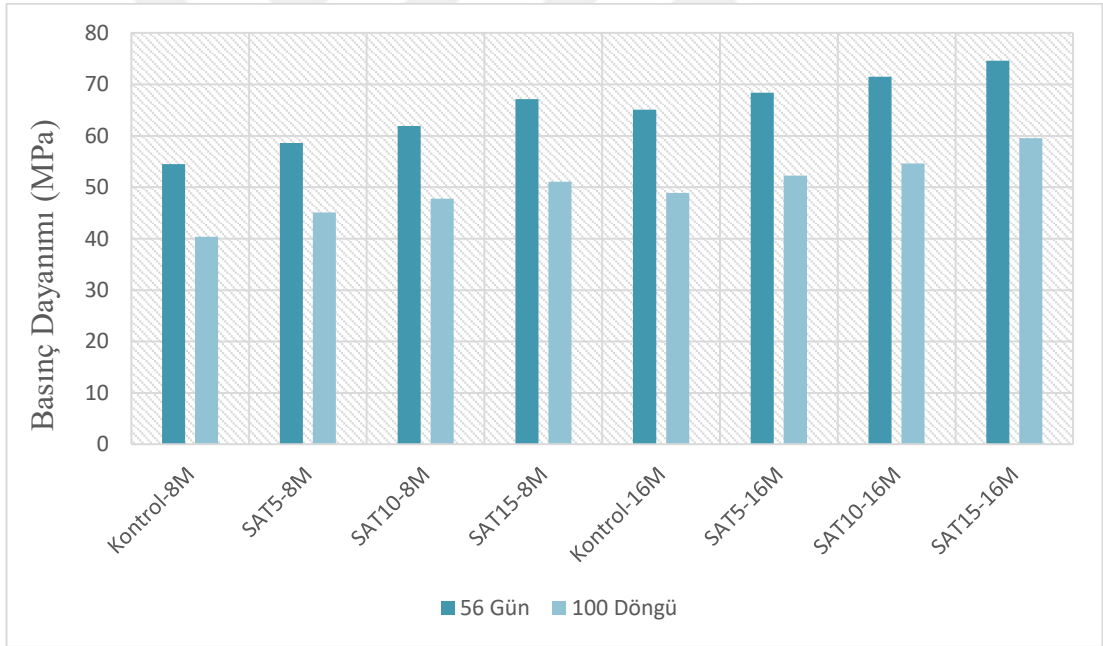


Şekil 4.7. Yüksek Sıcaklıkta Ağırlık Kaybı Sonuçları

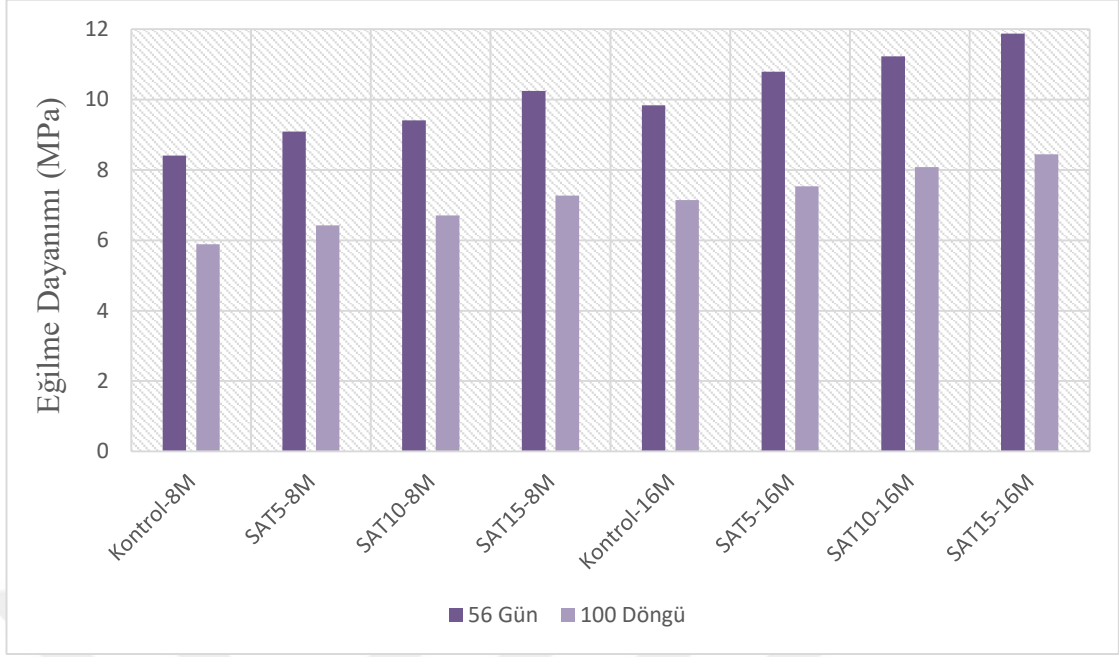
4.1.5 Donma-Çözülme Testinde Basınç, Eğilme, Ultrases Geçiş Hızı ve Ağırlık Kaybı Deney Sonuçları

Seramik tozu ikameli harç numuneleri ile kontrol amaçlı numuneler 56 günlük sürenin sonunda 100 döngü donma-çözülme etkisine tabi tutulmuştur. Deneylerin sonrasında numunelerde ağırlık kaybı, eğilme ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı sonuçları incelenmiştir. Teste maruz bırakıldıktan sonra sonuçlar Şekil 4.8-4.11’de verilmiştir. Sonuçlar, donma-çözülme döngülerinden sonra hem basınç hem de eğilme dayanımlarında bir azalmanın gözlemlendiğine işaret etmiştir. Donma-çözülme ataklarından kaynaklanan kalan basınç dayanımları, numunelerinin maruz kalmamış basınç dayanımına kıyasla ortalama %77 olmuştur. Ortalama kalan eğilme dayanımı, 56 gündeki maruz kalmamış eğilme dayanımına kıyasla %71 olmuştur. Dayanım sonuçları, donma-çözülme döngülerinden sonra SH molaritesine ve SAT ikame oranına bakılmaksızın numunelerde hemen hemen benzer dayanım kayıplarının gözlemlendiğine işaret etmiştir. Donma-çözülme döngülerinden

kaynaklanan dayanım azalma mekanizmaları kısaca açıklanabilir. Donma-çözülme çevrimleri sırasında numuneler suda bırakılarak gözeneklerin suyla dolması sağlanmıştır ki bu C-N-S-A-H tipi geopolimerizasyon reaksiyon ürünleri için yararlıdır. Birkaç donma-çözülme döngüsünden sonra, önce yüzeyde yumuşama meydana gelir, ardından harçların parçalanması yüzeyden başlar ve numunelerin iç kısımlarına (çekirdek bölgesi) doğru ilerler. Parçalanma sürecinin arkasındaki sebep, donma durumunda suyun genişlemesidir. Donma durumunda su hacmi yaklaşık %9 oranında artarak hidrolik basınç ortaya çıkar. Gerilme numunelerin çekme dayanımını aşarsa mikro çatlaklar oluşur ve çatlamış bölgelerden bozulma başlar. Daha sonra, donma-çözülme döngülerinin sayısına bağlı olarak, bozulma ilerler ve bu da dayanım kaybına neden olur.

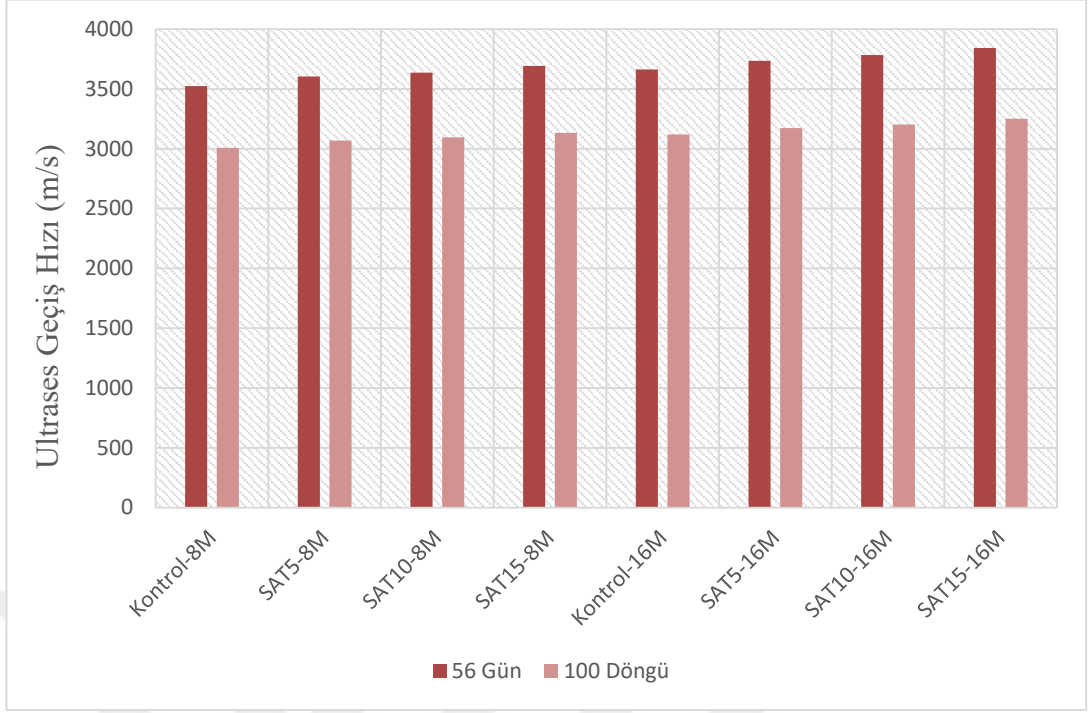


Şekil 4.8. Donma Çözülme Sonrası Basınç Dayanım Deney Sonuçları

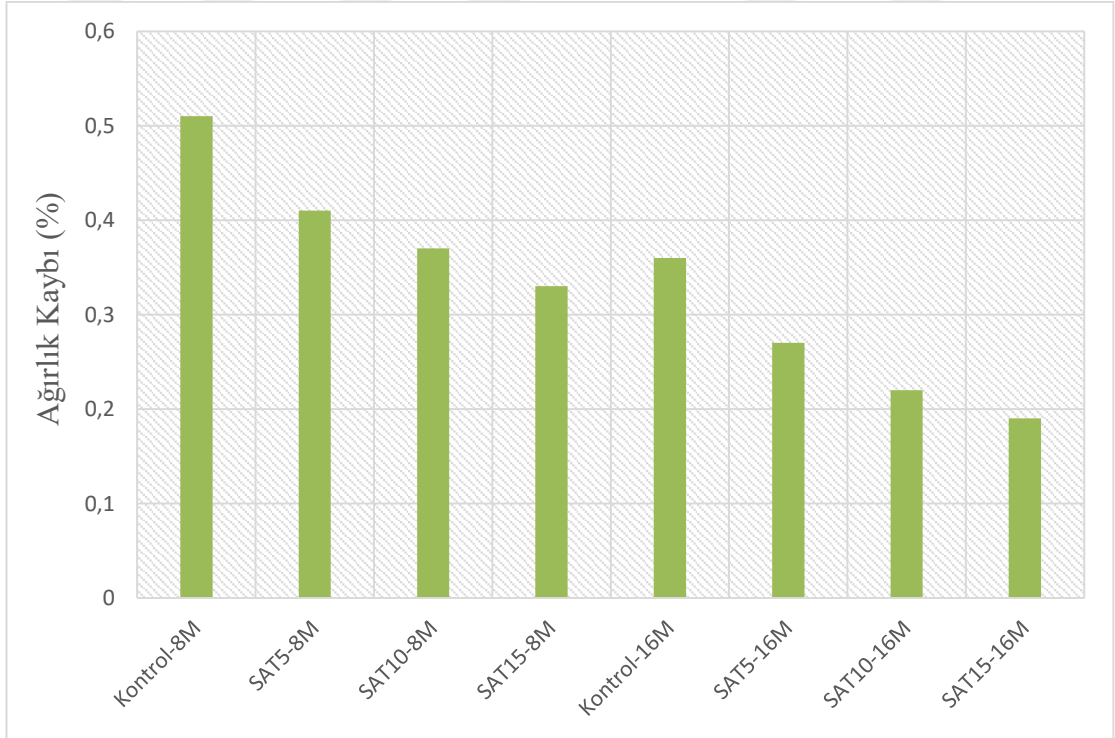


Şekil 4.9. Donma Çözülme Sonrası Eğilme Dayanım Deney Sonuçları

Şekil 4.10, donma-çözülme atağından sonra numunelerin UGH sonuçlarını göstermektedir. Benzer bir UGH düşüşü, SAT ikame edilmiş ve yüksek molariteye sahip olan ve olmayan numunelerde elde edilmiştir. Numunelerin UGH değerleri, tüm numuneler için 3500 m/s'den 3000 m/s'ye hafifçe düşmüştür; bu durum, donma-çözülme döngülerinden sonra tüm numuneler için benzer bir bozulmaya işaret etmektedir. Seramik tozu ikamesinin artması ve daha yüksek molarite değerleri UGH değerlerindeki kaybı azaltmıştır. Bu durum, matris ve agrega arasındaki daha büyük yapışma ile ilgilidir. Ayrıca seramik tozunun inceliği nedeniyle boşlukları doldurarak gözenekleri daha geçirimsiz hale getirmiştir. Gözeneklerin devamlılık derecesinin artması bu durumda etkili olmuştur. 100 döngüden sonra ağırlık kayıpları için benzer sonuçlar elde edilmiş (Şekil 4.11) ve genel ağırlık kayıpları, geopolimer matrisin kompakt yapısı nedeniyle düşük kalmıştır.



Şekil 4.10. Donma Çözülme Sonrası Ultras ses Geçiş Hızı Deney Sonuçları



Şekil 4.11. Donma Çözülme Sonrası Ağırlık Kaybı Deney Sonuçları

SONUÇLAR

Araştırmada, seramik atık tozu ikamesinin (%0, %5, %10 ve %15) ve sodyum hidroksit (SH) molaritesinin (8M ve 16M) uçucu kül/cüruf tabanlı alkali ile aktive edilmiş harcın mekanik ve dayanıklılık performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrasonik geçiş hızı ve ağırlık kayıpları çeşitli sıcaklıklar (300, 600 ve 900 °C) ve donma-çözülme atakları altında değerlendirilmiştir. Aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Sodyum hidroksit molaritesindeki artışla birlikte karışımlarının akışkanlığı azalır. 8M SAT içeren karışımlar, 16M karışımlara sahip olanlardan daha yüksek akışkanlık göstermiştir. Ayrıca SAT ikame oranlarındaki artışla daha yüksek akışkanlık elde edilmiştir. %15 SAT ve 8M SH molaritesine sahip numunelerde üstün akışkanlık bulunmuştur. Artan SAT ikame oranı ve SH molaritesi ile numunelerin boşluk oranı ve su emmesi azalmıştır. Yoğun ve kompakt mikro yapı nedeniyle en düşük boşluk oranı ve su emmesi %15 SAT ve 16M SH molaritesine sahip numunelerde elde edilmiştir.

- Daha yüksek SAT ikamesi ve SH molaritesi ile iyileştirilmiş basınç ve eğilme dayanımları ve ultrasonik geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. Devam eden geopolimerizasyon nedeniyle, basınç dayanımı artışının zamanla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ortalama basınç dayanımı artışları 7 günden 28 güne yaklaşık %27 ve 28 günden 56 güne %23 olarak bulunmuştur. %0'dan %15'e kadar SAT ikameleri basınç dayanımı değerlerini 10 MPa'ya kadar artırmıştır. Dayanım artışı, daha yüksek bir seramik tozu ikame oranı ve SH molaritesi ile daha fazla hale gelmiştir.

- 300°C'ye maruz bırakıldıktan sonra yüksek sıcaklıklarda daha fazla geopolimerizasyon sayesinde basınç dayanımı yaklaşık %7 oranında iyileşmiş, C-S-H ve C-A-S-H tipi jel oluşumu ile gözeneklere yakınlaşma sağlanarak daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca SH molaritesi 300°C'ye maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı performansı üzerinde

etkili bulunmamıştır. Öte yandan, eğilme dayanımı 300°C'de önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum, eğilme dayanımlarının iç mikroyapısal kusur gelişimine, çatlak oluşumuna ve yayılmasına ve gözenekli mikro yapının büyümesine daha duyarlı olmasına atfedilebilir. SH molaritesi, 300°C'de kalan eğilme dayanımını hafifçe arttırmış ve biraz daha düşük UGH değerleri, mikroyapısal çatlak oluşumlarını ve gözenekli mikroyapıyı kanıtlamıştır.

- Numunelerinin mekanik performansı, serbest su buharlaşması, matrisin dehidrasyonu, termal reaksiyonlar ve buhar basıncı nedeniyle 600 ve 900 °C'ye maruz kaldıktan sonra ciddi şekilde düşmüştür. Ortalama basınç dayanımı kayıpları 600°C'de yaklaşık %50 ve 900°C'de %85 iken, ortalama eğilme dayanımı kayıpları 600°C'de yaklaşık %70 ve 900°C'de %85 olmuştur.

- SH molaritesi ve SAT birleşiminden bağımsız olarak 600 °C ve 900 °C'de benzer kalan basınç dayanımları elde edilmiştir. Bununla birlikte, hem SAT kameleri hem de yüksek SH molaritesi, kalan eğilme dayanımı sonuçlarını kontrol numunesine göre hafifçe arttırmıştır. 16M SH molaritesine sahip %15 SAT içeren numuneler, SAT malzemesinin hem dolgu etkisi hem de puzolanik etkisi nedeniyle üstün yüksek sıcaklık direnci göstermiştir.

- Kalan eğilme dayanımı sonuçları, hem SAT ilavesinin hem de yüksek SH molaritesinin, daha yüksek bir sıcaklıkta daha belirgin olan kalan eğilme dayanımlarını biraz iyileştirdiğine işaret etmiştir. %15 SAT ve 16M SH molaritesine sahip numuneler, SAT malzemesinin hem puzolanik hem de dolgu etkisi nedeniyle üstün yüksek sıcaklık dayanımı sergilemiştir.

- SAT ve yüksek molarite etkisinin ortaya çıkan UGH değerleri üzerinde hiçbir etkisi olmadığını, 300, 600 ve 900 °C'de hemen hemen benzer UGH kayıplarının elde edildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, hem SAT değiştirme oranı hem de SH molaritesindeki artışla birlikte yüksek sıcaklıktan kaynaklanan ağırlık kayıpları biraz azalmıştır.

- 100 döngü donma-çözülme saldırısından sonra, numunelerde ortalama %23 basınç dayanımı ve %29 eğilme dayanımı kaybı elde edilmiştir. SH

molaritesi ve SAT değiştirme oranından bağımsız olarak numunelerde hemen hemen benzer mekanik kayıpları gözlenmiştir.



KAYNAKÇA

- A. J. Hamad, "Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete," *International journal of materials science and engineering*, vol. 2, pp. 152-157, 2014.
- Abdulkadir, B. (2021). *Endüstriyel Atıkların Geopolimerler Eldesinde Kullanılabilirliği ve Karakterizasyonu, (Yüksek Lisans Tezi), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya*
- Aİtcin, P. C. (2007). *Binders for durable and sustainable concrete*. CRC Press, New York.
- Al Muhit, B. A., Foong, K. Y., Alengaram, U. J., & Mohd, Z. J. (2013). Geopolymer concrete : A building material for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(1), 2013.
- Alomo, A., & de la Fuente, J. L. (2003). Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes: Part I. Stabilisation of boron. *Cement and Concrete Research*, 33(2), 281-288.
- Amr S., Dieb E., Kanaan D. M., *Ceramic waste powder an alternative cement replacement—Characterization and evaluation, Sustainable Materials and Technologies, Volume 17, e00063, September 2018*
- Anderson, D. J., Smith, S. T., & Au, F. T. K. (2016). Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 117, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153>
- ASTM C618-08, 2008, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, Annual Book of ASTM Standard, USA.
- Bakharev, T. (2000). Alkali Activated Slag Concrete: *Chemistry, Microstructure and Durability, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia*.
- Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1134- 1147.
- Bao, Y., Grutzeck, M. W., & Jantzen, C. M. (2005). Preparation and properties of hydroceramic waste forms made with simulated Hanford low-activity waste. *Journal of the American Ceramic Society*, 88(12), 3287-3302.
- Baradan, B., et al., Beton, 2nd ed., 2015. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Türkiye*.

- Bayuaji, R., Yasin, A. K., Susanto, T. E., & Darmawan, M. S. (2017, September). A review in geopolymer binder with dry mixing method (geopolymer cement). In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1887, No. 1, p. 02002
- Bingöl, Ş. (2018). *Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması (Doktora tezi)*. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri. Erişim adresi: <https://avesis.erciyes.edu.tr>
- Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N., Ramezaniyanpour, A.A., 2011a, *Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans, Cement and Concrete Composites*, 33(2):251-260pp.
- Boyacı, Ö. (2018). Farklı kaolenlerin metakaolen ve spinel yapılarında geopolimer davranışı (Yüksek Lisans Tezi). *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya*. Erişim adresi: <https://openaccess.dpu.edu.tr>
- Cantarel, V., Motooka, T. ve Yamagishi, I. (2017). *Geopolymers and their potential applications in the nuclear waste management field - a bibliographical study*. Japan Atomic Energy Agency. doi:10.11484/jaea-review-2017-014
- Chao- Lung H, Anh-Tuan B.L. ve Chun- Tsun C. (2011). *Effect of Rice Husk Ash on the Strength and Durability Characteristics of Concrete*. *Constr Build Mater* 2011; 25: 3768-72.
- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., Taebuanhuad, S., 2013, *Role of micro waver adiation in curing the fly ash geopolymer*, *Advanced Powder Technology*, 24:703-707pp.
- Chowdhury, S., Mohapatra, S., Gaur, A., Dwivedi, G., & Soni, A. (2020). Study of various properties of geopolymer concrete—A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Cook, D.J. (1986). *Rice Husk Ash Concrete Technology and Design, Cement Replacement Materials, Surrey University Press, vol. 3, 171-196*.
- Criado, M., Fernández Jiménez, A., Sobrados, I., Palomo, A., Sanz, J., 2012, *Effect of relative humidity on the reaction products of alkali activated fly ash*, *Journal of the European Ceramic Society*, 32:2799-2807pp.
- Davidovits, J. (2002, October). years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. In *Geopolymer 2002 Conference* (Vol. 28, p. 29). Saint-Quentin, France; Melbourne, Australia: Geopolymer Institute.
- Davidovits, J., 1994, *Properties of geopolymer cements, 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Krivenko, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 131-149pp.

- Davidovits, J.,1999, *Chemistry of geopolymeric systems, terminology, Géopolymère'99 International Conference, Saint-Quentin, France, 9-22pp.*
- De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., Silva, F.J.D., Pavao, B., Veit, H.,2011, *The effects of Na₂O/SiO₂ molarratio, curing emperature and age on compressive strength, morphology and micro structure of alkali activated fly ash-based geopolymers, Cementand Concrete Composites,33(6):653-660pp.*
- Demirel, S.,& Öz, H. Ö. (2017). Atık malzemelerin kendiliğinden yerleşen beton performansına etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(3), 40-48.*
- Diaz, EI., Allouche, E.N., Eklund, S.,2010, *Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers, Fuel, 89:992-996pp.*
- Duygu, Y. (2021). *Hibrit Çelik Lipler İle Üretilen Geopolimer Kompozitlerin Dayanım İncelenmesi, (Yüksek Lisans Dönem Projesi), İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.*
- El-Dieb, A.S., Kanaan, D.M. (2018). *Ceramic waste powder an alternative cement replacement–characterization and evaluation. Sustainable Materials and Technologies, 17, e00063.*
- Elif Semin, C. (2021). *Pirinç Kabuğu Külünün Sondaj Uygulamalarında Çimento Şerbeti Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi), İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hatay.*
- Erdoğan, S. T. (2014). Are geopolymers environmentally friendly Materials of Construction Laboratory, METU Department of Civil Engineering, Ankara. *Cement Concrete World, 107, 32–44.*
- Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T.Y. (2007). *Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, II. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 263-275.*
- Erdoğan, T.Y. (2003). *Beton. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş.*
- Fernandez-Jimenez, A. M., Palomo, A., & Lopez-Hombrados, C. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal, 103(2), 106.*
- Fleury, M., Sissmann, O., Brosse, E., &Chardin, M. (2017). *A Silicate Based Process for Plugging the Near Well Bore Formation. Energy Procedia, 114 (November 2016), 4172–4187. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1558>*
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Nora, F., Aziz, A., Amran, M., &Salleh, M. (2010). *Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: A Review, Journal of American Science, c. 6, sayı 3, ss. 157-165,.*
- Görür, E. B., 2015. *Alkali ile Aktifleştirilmiş Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 156 s.*

- Hafez, A. I., Khedr, M. M. A., Mohammed, M. S., Osman, R. M., & Sabry, R. M. (2017). Utilization of rice husk ash and ceramic wastes in manufacturing of developed cement bricks. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(9), 2854–2862.
- Hardjito D 2005. *'Studies of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete'*, Curtin University.
- Hardjito, D., Rangan, B.V., 2005, *Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete*, Research Report, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 103p.
- Haydar, K. (2021). *Silis Dumanı Katkılı Uçucu Kül ile Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Farklı Sülfatlar Etkisi Altında Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yozgat.
- Hermann, E., Kunze, C., Gatzweiler, R., Kiebig, G., Davidovits, J., 1999, *Solidification of various radio active residues by geopolymer with special emphasis on long-term stability*, *Géopolymre '99 Proceedings*, 211- 228pp.
- Hu M., Zhu X., Long F., 2009, *Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives*, *Cement and Concrete Composites*, 31(10):762-768pp.
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Mirza, J., Tahir, M. M., Asaad, M. A., Ismail, M., & Shah, K. W. (2018). *Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated temperatures: Performance evaluation*. *Construction and Building Materials*, 187, 307-317.
- Hwang, C. L., Dantie Yehualaw, M., Vo, D. H., & Huynh, T. P. (2019). *Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders*. *Construction and Building Materials*, 218, 519–529.
- İlhan, A. (2020). *Değişik Geopolimer Beton Numunlerinin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi*, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İşbilir, B. (2012). *Pirinç kabuğu külü ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Düzce Üniversitesi.
- Kalınçimen, G., Öztürk, A.U., Kaplan, G. ve Yıldızel, S.A. (2015). *Seramik atıklarının çimento ikame malzemesi olarak kullanılması ve asit dayanıklılığının incelenmesi*. *Kastomonu University Journal of Engineering and Science*, 1, 9-16.

- Karaaslan, C. (2021). *Su yapılarında kullanılabilir pomza esaslı geopolimer betonların geliştirilmesi* (Doktora tezi). Erişim adresi: <http://acikerisim.dicle.edu.tr/xmlui/handle/11468/7675>
- Koca, C. (1996). Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Curuf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı. 4. *Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul*, 381-394.
- Kong, D., Sanjayan, J.G. ve Sagoe Creteil, K., (2005). "Damage due to elevated temperatures in metakaolinite based geopolimer pastes", *Geopolymer Cements and Concrete conference, 2005, Perth*, 11.
- Kriven, W.M., Bell, J. ve Gordon, M., (2008). "Geopolymer Refractories for the Glass Manufacturing Industry", *64th Conference on Problems with glass*, 8.
- Krivenko, P.V.1994b. "Alkaline cements", *1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Krivenko, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 1, 11-130pp.*
- Krivenko, P.V.,1999, *Alkaline cements and concretes: Problems of durability, 2nd International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Krivenko, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 3-43pp.*
- Kumar, K.A ve Partheeban, P. (2017). *Experimental investigation on flexural strength of geopolimer concrete paver block. International Journal of Applied Engineering Research, 12, 5791-5794.*
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Li, L. yuan, Jaya, N. A., Abdullah, M. M. A. B., Tan, S. J., & Hussin, K. (2017). Formation of one-part-mixing geopolimers and geopolimer ceramics from geopolimer powder. *Construction and Building Materials*, 156, 9–18.
- Luhar, S., Khandelwal, U. (2015). *A study on water absorption and sorptivity of geopolimer concrete. SSRG International Journal of Civil Engineering, 2, 1-9.*
- Lyon, R.E., Balaguru, P.N., Foden, M., Sorathia, U., Davidovits, J. ve Davidovits, D., (1997). "Fire Resistant Aluminosilicate composites", *Fire and Materials, 21: 67-73.*
- M. Vafaei, A. Allahverdi, (2016). *Influence of calcium aluminate cement on geopolimerization of natural pozzolan Constr. Build. Mater., 114, pp. 290-296*
- M.S. Moayeri, H. R. Ashrafi, ve P. Beiranvand, "Investigating the Physical Characteristics of Non-Structural Lightweight Aggregate Blocks of Built with Region Materials," *Buildings, vol. 7, p. 2, 2017.*
- Malek, R.I.A., Licastro, P.M., Roy, D.M., Langton, C.A.,1986, *Slagcement low level radioactive waste forms at Savannah River Plant, Ceramic Bulletin, 65:1578-1583pp.*

- Mallicoat, S., Sarin, P., & Kriven, W. M. (2009, September). Novel, alkali-bonded, ceramic filtration membranes. In *Developments in Advanced Ceramics and Composites: A Collection of Papers Presented at the 29th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, January 23-28, 2005, Cocoa Beach, Florida, Ceramic Engineering and Science Proceedings* (Vol. 298, p. 37). Wiley- American Ceramic Society.
- Mazlum, F. (1989). *Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Medina, C., Frías, M., & Sánchez De Rojas, M. I. (2012). Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 31, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.075>
- Mehta PK, 2002. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. *Concrete International*, 24(7): 23-28.
- Mehta, A., & Siddique, R. (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: strength and permeability properties. *Journal of cleaner production*, 205, 49-57.
- Mistry, B. (2016). Properties and Industrial Applications of Rice husk. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 6(10), 2677–2679.
- Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Mohamed, H., et al. 2011. *Properties and microstructural characteristics of geopolymers using fly ash with different percentages of kaolin at room temperature curing*, *Journal of Australian Journal of Basic and Applied Sciences*.
- Naser, M. Z., & Chehab, A. I. (2020). Polymers in space exploration and commercialization. In *Polymer Science and Innovative Applications* (pp. 457-484). Elsevier.
- Nicholson, C., Fletcher, R., Miller, N., Stirling, C., Morris, J., Hodges, S., Mackenzie, K. ve Schumucker, M., (2005). “Building Innovation through Geopolymer Technology“, *Chemistry in New Zealand*.
- Özcan, U. ve Güngör, S. (2019). *Sürdürülebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı*. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, 176-182.
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A.F., Jamshidi, M., Ding, Y., 2012, *Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue*, *Construction and Building Materials*, 30:400-405pp.

- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314.
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasirt P.(Eds.), 2015, *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 852p.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. ve Blanco, M.T., (1999). "Alkali Activated Fly Ashes: A cement for the future", *Cement and Concrete Research*, 29: 1323-1329.
- Pelisser, F., Guerrino, E.L., Menger, M., Michel, M.D. ve Labrincha, J.A., (2013). "Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers", *Constr. Build. Mater.*, 49: 547-553.
- Penteado, C. S. G., Viviani De Carvalho, E., & Lintz, R. C. C. (2016). Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 112, 514-520.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009). *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier.
- Provis, J.L., van Deventer, J.S.J.(Eds.), 2014, *Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM. Springer/RILEM, 396p.
- Rahier, H., Simons, W., Van Mele, B. ve Biesemans, M., (1997). "Low Temperature synthesized Aluminosilicate Glasses Part 3 Influence of the composition of the silicate solution on production, structure and properties", *Journal of Material Science*, 32: 2237-2247.
- Rahier, H., Van Mele, B., Biesemans, M., Wastiels, J., & Wu, X. (1996). Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses. *Journal of Materials Science*, 31(1), 71-79.
- Ravall A. D., Dr.Indrajit N., Prof. Pitroda J. Ceramic Waste : *Effective Replacement Of Cement For Establishing Sustainable Concrete*, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* - Volume 4 Issue 6- June 2013
- Reeves, C., 1985, *The Use of Ground Granulated Blast-furnace Slag to Produce Durable Concrete, How to Make Today's Concrete Durable for Tomorrow*, Thomas Telford, London, May.
- Rovnaník, P., Al, S.O., (2010). "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer", *Constr. Build. Mater.*, 24(7): 1176-1183.
- Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K., 2009, *Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar*, *Journal of Hazardous Materials*, 168(1):44-50pp.

- Scrivener, K.L., Kirkpatrick, R.J., 2008, *Innovation in use and research on cementitious material*, *Cement and Concrete Research*, 38(2):128-136pp.
- Siddique, R. ve Khan, MI (2011) *Tamamlayıcı Çimento Malzemeleri*. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17866-5>
- Somarathna, J., Ravikumar, D., Neithalath, N., 2010, *Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing*, *Cement and Concrete Research*, 40(12):1688-1696pp.
- Subaşı, S., Öztürk, H., & Emiroğlu, M. (2017). *Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete*. *Construction and Building Materials*, 149, 567–574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.180>
- Şapaloğlu, A. (2015). *Pirinç üretim-tüketim zincirinde pazarlama kanallarının yapısı ve pirinç pazarlama marjları*, Yüksek lisans tezi, Tarım Ekonomisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye. <http://acikerisim.nku.edu.tr:8080/xmlui/handle/20.500.11776/772>
- Tansel, T. (2021). *Farklı Tür Atık Malzemeler Kullanılarak Üretilen Geopolimer Harçların Mekanik ve Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi*, (Doktora Tezi), İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Thomas, B. S. (2018). *Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(July 2016), 3913–3923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>
- Tuyan, M., Boyacı, O. C., Çakır, Ö. A., & Ramyar, K. *Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özellik Ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması*.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaç, F., Yeğinobalı, A., 2009. *Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*. (www.enerjiatlası.com/komur) (Erişim tarihi : Ağustos 2019)
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaç, F., & Yeğinobalı, A. (2009). *Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri*. *Ankara, TÇMB*.
- Uysal F.F.,BaharS.,*Cüruf çeşitleri ve kullanım alanları*, *Volume 19 , Issue 1, Pages 37 – 52, Year 2018*
- Van Jaarsveld, J.G.S. ve Van Deventer, J.S.J., (1999). *“Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers”*, *Ind. Eng. Chem. Res.*,38: 3932-3941.
- Van Riessen, A., (2010). *“Geopolymer Highlights”*, *CSRP 2010 Geopolymer Conference*, 22.
- Villaquirán-Cacedo, M. A.,& de Gutiérrez, R. M. (2018). *Synthesis of ceramic materials from ecofriendly geopolymer precursors*. *Materials Letters*, 230,300-304.

Xu, H. ve Van Deventer, J.S.J., (2000). "The geopolymerisation of aluminosilicate materials", *International Journal of Mineral Processing*, 59: 247-266.

Yıldız S., Balaydın İ. ve Ulucan Ç. (2007). "Pirinç Kabuğu Külünün Beton Dayanımına Etkisi". *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1): 85-91.

Yıldız, S., Balaydın, İ., & Ulucan, Z. Ç. (2007). *Pirinç kabuğu külünün beton dayanımına etkisi*, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 19, sayı 1, ss. 85-91. <https://openaccess.firat.edu.tr/xmlui/handle/11508/8321>

Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., Zhang, J. (2018). *A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar*. *Composites Part B*, 152, 79-95.

Živica, V., Palou, M. T., & Križma, M. (2015). Geopolymer cements and their properties: a review. *Building Research Journal*, 61(2), 85-100.

