

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



PIRİNÇ KABUĞU KÜLÜ VE ORMAN ENDÜSTRİ ATIK KÜLÜ
İLE ÜRETİLEN SÜRDÜRÜLEBİLİR GEOPOLİMER BETONUN
PERFORMANS ÖZELLİKLERİ

AHMET YEŞİLOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ. DR. SELÇUK MEMİŞ

TEMMUZ - 2023

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Ahmet YEŞİLOĞLU tarafından hazırlanan “PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ VE ORMAN ENDÜSTRİ ATIK KÜLÜ İLE ÜRETİLEN SÜRDÜRÜLEBİLİR GEOPOLİMER BETONUN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **06.07.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ KASTAMONU Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK KASTAMONU Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Osman GENÇEL BARTIN Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V.

Doç. Dr. Osman ÇİÇEK

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Ahmet YEŞİLOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ VE ORMAN ENDÜSTRİ ATIK KÜLÜ İLE ÜRETİLEN SÜRDÜRÜLEBİLİR GEOPOLİMER BETONUN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ

AHMET YEŞİLOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: DOÇ. DR. SELÇUK MEMİŞ

Geopolimer beton, çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak tanımlanabilen bir malzemedir. Bu tanımlama endüstriyel yan ürünlerin kullanılarak üretilmesini ve geleneksel çimentolara kıyasla daha düşük karbondioksit salınımına sahip olmasına bağlıdır. Bu çalışma kapsamında, uçucu kül (UK), orman endüstrisi atık külü (FIWA), pirinç kabuğu külü (PK), sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) gibi çeşitli malzemelerin değişik oranlarda kullanılmasıyla geopolimer beton numuneleri üretilmiştir. Geopolimer betonların kimyasal yapısı ve oluşum mekanizması detaylı bir şekilde incelenmiş, performans özellikleri ele alınmış ve çeşitli uygulama alanları üzerinde durulmuştur. Bu amaçla 6 grup hazırlanmış, UK yerine %0; %25 ve %50 oranlarında UK ile yer değiştirerek FIWA ve PK kullanılan gruplarda, 8 mol SS çözeltisi ile SS/SH %50 oranında karışımlarda aktivatör olarak kullanılmıştır. Üretilen geopolimer beton örnekleri öncelikle 30°C de buhar kürüne tabi tutulup 3, 7, 28, 56, 90 günlük dayanımları ölçülmüştür. Donma çözülme döngülerine tabi tutulan örnekler aynı zamanda su emme ve porozite gibi değerleri de saptanarak mikro yapıları hakkında fikir edinilmiştir.

Ekolojik atık yönetiminin sürdürülebilirlik çerçevesinde ele alınan geopolimer betonların farklı özelliklerinin incelendiği bu çalışma sonucunda, kullanılan pirinç kabuğu külü (PK) ve orman endüstrisi atık külünün betonun porozitesine olumlu etkileri, mekanik basınç değerlerini yükselttiği, donma çözülme direnci gibi olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, geopolimerlerin daha geniş çapta endüstriyel kullanımının teşvik edilmesi ve optimizasyon süreçlerinin geliştirilmesi gerektiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER:Geopolimer, Pirinç kabuğu külü, Orman endüstri atık külü, Uçucu kül, Sodyum Hidroksit, Sodyum Silikat, Sürdürülebilirlik

Temmuz 2023, 93 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SUSTAINABLE GEOPOLYMER CONCRETE PRODUCED WITH RICE HUSK ASH AND FOREST INDUSTRY WASTE ASH

AHMET YEŞİLOĞLU

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. SELÇUK MEMİŞ**

Geopolymer concrete is a material that can be defined as an environmentally friendly and sustainable alternative. This definition is based on its production using industrial by-products and its lower carbon dioxide emissions compared to traditional cements. In this study, geopolymer concrete samples were produced using various materials such as fly ash (FA), forest industry waste ash (FIWA), rice husk ash (RHA), sodium hydroxide (SH), and sodium silicate (SS) in different proportions. The chemical structure and formation mechanism of geopolymer concrete were thoroughly examined, performance characteristics were addressed, and various application areas were discussed. For this purpose, six groups were formed. In the groups where FIWA and RHA were used by replacing FA with 0%, 25%, and 50% FA, a 8 mol SS solution was used as an activator in SS/SH 50% ratio. The produced geopolymer concrete samples were initially subjected to steam curing at 30°C, and their strengths were measured for 3, 7, 28, 56, and 90 days. The samples subjected to freeze-thaw cycles were also evaluated for properties such as water absorption and porosity to gain insights into their microstructures.

In this study that examines various properties of geopolymer concrete within the framework of sustainable ecological waste management, it was observed that the use of rice husk ash (RHA) and forest industry waste ash had positive effects on the concrete's porosity, increased mechanical compression values, and enhanced freeze-thaw resistance. As a result, it is evident that there is a need to encourage broader industrial use of geopolymers and to improve optimization processes.

KEYWORDS: Geopolymer, Rice Husk Ash, Forest Industry Waste Ash, Fly Ash, Sodium Hydroxide, Sodium Silicate, Sustainability

July 2023, 93 Page

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın tamamlanması sürecinde her zaman yanımda olan başta AİLEM olmak üzere; bana verdiği teşvik, ilham ve destekler için tez danışmanım Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ'e, araştırmalarımdayaptığı rehberlik ve teknik destek için Sn. Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ve Prof. Dr. Osman GENÇEL'e, malzeme tedarik süreci ve manevi destekleri için Sn. Sait SANCI'ya, İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvar çalışanları ve Oktay TUNÇ'a, üniversite yıllarımızdan itibaren Mühendislik ve Malzeme branşlarını bizlere sevdiren Prof. Dr. Fuat KÖKSAL hocama gösterdikleri desteklerden dolayı;

“Desteklerinizi esirgemediğiniz ve inancınızı her zaman koruduğunuz için şükranlarımı sunarım. Sizlerin sevgi dolu ve güçlü desteği, beni motive etti ve bu tez çalışmasında başarılı olma yolunda büyük bir güç kaynağı oldu. Profesyonel bilgileriniz ve yönlendirmeleriniz ile sabırla benimle çalıştığınız için size minnettarım.”

Sizin varlığınız ve desteğinizle, tez çalışmamı başarıyla tamamlama imkânı buldum.

Saygılarımla,

AHMET YEŞİLOĞLU

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
2.1 Geopolimer	7
2.2 Geopolimer Beton	9
2.2.1 Geopolimer Betonların Genel Özellikleri	12
2.2.2 Geopolimer Betonların Avantaj ve Dezavantajları.....	18
2.2.3 Geopolimer Betonların Kullanım Ve Uygulama Alanları.....	20
2.2.4 Geopolimer Betonlar ile Geleneksel Betonlar Arasındaki Farklar	24
2.3 Konu İle İlgili Yapılan Araştırmalar	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM	34
3.1 Materyal.....	34
3.1.1 Uçucu Kül (UK).....	34
3.1.2 Pirinç Kabuğu Külü (PK)	35
3.1.3 Orman Endüstri Atığı Külü (FIWA).....	37
3.1.4 Alkali Aktivatörler	37
3.1.5 Agregalar	39
3.1.6 Geopolimer Beton Karışım Suyu.....	40
3.2 Deney Numunelerinin Üretim ve Kürü	40
3.2.1 Numune Dökümü ve Kürü.....	41
3.3 Üretilen Geopolimer Betonlara Uygulanan Deneyler	43
3.3.1 Yayılma Çapı Deneyi.....	43
3.3.2 Taze Birim Hacim Ağırlık Testi	45
3.3.3 Yoğunluk	46
3.3.4 Su Emme ve Porozite Oranı Belirlenmesi Testleri	46
3.3.5 Kılcal Su Emme Testi	48
3.3.6 Basınç Dayanımı Testi.....	50
3.3.7 Eğilme Dayanımı Testi	51
3.3.8 Donma Çözülme Deneyi.....	53
4. TARTIŞMA VE BULGULAR	57
4.1 Yayılma Çapı Deneyi Sonuçları.....	57
4.2 Taze Birim Hacim Ağırlık Hesabı.....	59
4.3 Yoğunluk Testi Sonuçları.....	61
4.4 Su Emme Oranı ve Porozite Deneyi Sonuçları	63
4.5 Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları.....	67
4.6 Basınç Dayanımı Test Sonuçları	68

4.7	Eğilme Dayanımı Sonuçları	71
4.8	Donma Çözülme Deney Sonuçları	74
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
5.1	Sonuçlar.....	81
5.2	Öneriler.....	82
KAYNAKLAR		84
ÖZGEÇMİŞ		93



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 N-A-S-H jelinin oluşumu.....	15
Şekil 2.2 N-A-S-H jelinin 3 boyutlu görünümü.....	15
Şekil 3.1 Pirinç kabuğunun yakılması.....	36
Şekil 3.2 Pirinç kabuğunun öğütülmesi	36
Şekil 3.3 Sodyum hidroksit tanecikleri	38
Şekil 3.4 Silis içerikli agrega	39
Şekil 3.5 Bazalt içerikli agrega	40
Şekil 3.6 Hobart karıştırıcı ve mikser	41
Şekil 3.7 40 x 40 x 160 mm ebatlı numuneler	42
Şekil 3.8 Yayılma tablası testine tabi tutulan geopolimer numune.....	42
Şekil 3.9 5x5 cm küp numune.....	42
Şekil 3.10 Kür odasına alınan geopolimer numune örnekleri.....	43
Şekil 3.11 Hazırlanan farklı geopolimer numune örnekleri.....	44
Şekil 3.12 U-Test Arşimet deney düzeneği.....	47
Şekil 3.13 Hazırlanan numunelere uygulanan su emme testi	50
Şekil 3.14 Hazırlanan geopolimer beton numunelerinin basınç testi.....	51
Şekil 3.15 Eğilme test cihazı ve hazırlanan numunenin teste tabi tutulması	52
Şekil 4.1 Farklı karışım oranlarına göre hazırlanan geopolimer beton örneklerinin yayılma çapı değerleri.....	58
Şekil 4.2 PK ve FIWA karışım oranlarına göre yayılma çapı değişimleri.....	58
Şekil 4.3 Farklı bağlayıcı malzemelerle oluşturulan karışımların taze birim hacim ağırlıkları	60
Şekil 4.4 PK ve FIWA kullanımına göre taze BHA değerleri	60
Şekil 4.5 Geopolimer beton karışımlarının farklı yoğunluk değerleri	61
Şekil 4.6 PK ve FIWA kullanımının kuru yoğunluk üzerindeki değişimleri.....	62
Şekil 4.7 PK ve FIWA kullanımının görünür yoğunluk değişimleri	63
Şekil 4.8 Karışım gruplarına göre su emme oranları	64
Şekil 4.9 PK ve FIWA kullanımına göre karışımlardaki su emme değerleri.....	64
Şekil 4.10 Grupların porozite değerleri.....	66
Şekil 4.11 PK ve FIWA kullanılan geopolimer beton karışımlarında porozite değerleri.....	66
Şekil 4.12 Karışımların zamansal su emme grafiği	67
Şekil 4.13 PK ve FIWA kullanılan geopolimer beton karışımlarında gözlenen kapilarite değerleri.....	68
Şekil 4.14 Geopolimer beton basınç dayanımı değişimleri	70
Şekil 4.15 Geopolimer beton zamansal basınç dayanımı değişimi.....	70
Şekil 4.16 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda basınç dayanımına etkisi.....	71
Şekil 4.17 Geopolimer betonların eğilme dayanım değerleri	72
Şekil 4.18 Geopolimer betonların zamana bağlı eğilme dayanımı değişimleri	73
Şekil 4.19 PK ve FIWA kullanım oranının eğilme dayanımına olan etkileri	74
Şekil 4.20 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda 25 çevrim sonrası olası dayanım kaybı analizi	75

Şekil 4.21 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda 25 çevrim sonrası olası ağırlık kaybı analizi	76
Şekil 4.22 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda 50 çevrim sonrası olası ağırlık kaybı analizi	77
Şekil 4.23 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda 50 çevrim sonrası olası dayanım kaybı analizi	78
Şekil 4.24 25 ve 50 çevrim donma çözülme sonrası yaşanan ağırlık kaybı yüzdeleri	78
Şekil 4.25 Döngüler sonrası dayanım kayıpları	79
Şekil 4.26 Donma çözülme deney öncesi ve sonrası basınç dayanımları	79



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Çatalağzı uçucu külünün kimyasal özellikleri	34
Tablo 3.2 Pirinç kabuğu külünün kimyasal özellikleri	35
Tablo 3.3 Karışımlarda kullanılan alkali aktivatörler (1 dm ³ için)	39
Tablo 3.4 Karışım oranları	40
Tablo 3.5 Karışım da kullanılan tüm veriler	41
Tablo 4.1 Yayılma çapları.....	57
Tablo 4.2 Karışımların hesaplanan taze birim hacim ağırlıkları.....	59
Tablo 4.3 Geopolimer betonların yoğunlukları (kg/m ³)	61
Tablo 4.4 Geopolimer numunelere ait su emme oranları.....	63
Tablo 4.5 Geopolimer numunelere ait porozite değerleri	65
Tablo 4.6 Kılcal su emme değerleri (Sorptivite)(Kg/m ² s ^{1/2})	67
Tablo 4.7 Geopolimer betonların basınç dayanımları.....	69
Tablo 4.8 Üretilen geopolimer betonların farklı günlerdeki eğilme dayanımları	72
Tablo 4.9 25 döngü donma çözülme deneyi sonrası veriler.....	75
Tablo 4.10 50 döngü donma çözülme deneyi sonrası veriler.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
Fe_2O_3	: Demir Oksit
K_2O	: Potasyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
Na_2SO_3	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
CO_2	: Karbon dioksit
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
K_2CO_3	: Potasyum Karbonat
SiO_2	: Silika

Kısaltmalar

PK	: Pirinç Kabuğu Külü
FIWA	: Orman Endüstrisi Atık Külü
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
GYFC	: GranüllüYüksek Fırın Cürufu
Al	: Alüminyum
Si	: Silisyum
SD	: Silis Dumanı

1. GİRİŞ

Günümüzde inşaat sektöründe normal Portland çimentosu en yaygın kullanılan bağlayıcı malzemedir. Ancak, çimento üretimi yüksek oranda enerji tüketimi gerektirmekte ve atmosfere zararlı gazlar salınmasına neden olmaktadır. Çimento üretiminin dünya genelinde toplam CO₂ yayılımının yaklaşık %7'sinden sorumlu olduğu bilinmektedir (Memiş ve Bilal, 2022). Bu nedenle, çevresel ve ekonomik sorunları azaltmak amacıyla alternatif çimentoların araştırılması ve üretilmesi önemli bir konudur. Alternatif çimentolar, normal Portland çimentosunun yerine geçebilecek ve daha düşük enerji tüketimiyle üretilebilecek çözümler olabilir. Örneğin, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kalker, volkanik kül gibi çeşitli yan ürünlerin çimentolarda kullanımı alternatif çimento üretimine yönelik araştırmaların bir parçasıdır. Ayrıca, geleneksel çimento üretimi için yüksek sıcaklıklara (1400-1500°C) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da enerji tüketimini ve üretim maliyetlerini artırmaktadır. Alternatif çimento üretimi süreçlerinde daha düşük sıcaklıklarda üretim yapabilen teknolojilerin geliştirilmesi de enerji verimliliği açısından önemli bir adımdır. Bu sayede enerji maliyetleri düşebilir ve çevresel etkiler azaltılabilir.

Terimsel olarak geopolimer bağlayıcılar, henüz bilinen bir malzeme değilken 1978 yılında Joseph Davidovits tarafından ortaya atılmış ve inorganik polimerik malzemeleri tanımlamak için kullanılmaya başlanmış ve mühendislik alanında da büyük ilgi görmüş malzemelerdir. Bu malzemeler, çevreye zararsız oluşları, erken ve yüksek dayanım, asit ve sülfat direnci gibi özelliklere sahip oldukları için normal Portland çimentolarına alternatif olarak değerlendirilmektedir. Geopolimer bağlayıcılar, yüksek silika ve alümin içerikli hammaddelerden üretilbildiği gibi doğal volkanik kökenli kayalar ve killeri gibi silika ve alümin içeren malzemelerden de elde edilebilir. Özellikle termik santral atık külleri, silis dumanı ve granüle haldeki öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi yan ürünler, geopolimer bağlayıcıların üretiminde sıkça kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler genellikle alüminosilikat bileşikleri ve aktivasyon maddeleri kullanılarak üretilen ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilen malzemelerdir.

Davidovits'in bu terimi ortaya atmasından bu yana, geopolimerlerle ilgili kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Ayrıca, aynı tür malzemeler için farklı isimlendirmeler de kullanılmıştır. Örneğın, düşük sıcaklıklı alüminosilikatlar (Rahier vd. 1996), alkali aktive edilmiş ğimentolar (Palomo ve Fuente, 2003), alkali bağılı seramikler (Mallicoat vd. 2005), inorganik polimer beton (Sofi vd. 2007) ve hidroseramik (Bao vd. 2005) gibi farklı tanımlamalar sürekli kullanılan isimler arasındadır.

Geopolimerlerin ana bileşenleri bağlayıcı malzemeler ve alkali aktivatörlerdir. Bağlayıcı malzemeler, içerdikleri alümina silikat temelli bileşikler ve alüminyum (Al) ile silisyum (Si) gibi zengin elementlerden oluşurlar. Uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC), kırmızı çamur, cam atıkları (GP), tuğla atıkları gibi çeşitli malzemeler, bu bağlayıcı malzemeler arasında yer almaktadır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-NaOH}$ ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-KOH}$ kombinasyonları ise en sık kullanılan alkali aktivatörlerdir. Bu kombinasyonlar, geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmak ve polimerik yapıların oluşmasını sağılamak için kullanılır. Geopolimerizasyon, alümina silikat jelinde zeolit sentezinden daha yüksek bir reaktiviteye sahiptir (Darsanasiri vd., 2018; Grela vd., 2016; Rajamane vd., 2016). Bu özellikleri nedeniyle geopolimerler, çevresel etkileri minimuma indirmek amacıyla sürdürülebilir inşaat sektöründe alternatif potansiyel bir yapı malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca geopolimerler, polimerik bağlarla stabilize edilen inorganik bileşiklerden oluşan bir malzeme sınıfını temsil eder. Bu malzemelerin geniş bir uygulama yelpazesi vardır ve çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır (Davidovits, 2008).

Geopolimerler, çimento gibi geleneksel bağlayıcı maddelerin yerine kullanım potansiyeli olan, dayanıklı ve çevre dostu alternatif bağlayıcısı geopolimer esaslı malzemelerdir (Alnkaa vd, 2019). Bu malzemeler, çeşitli bilimsel ve endüstriyel alanlarda araştırılmaktadır. Mühendislik teknolojisi organik kimya, mineroloji, fizikokimya ve jeoloji gibi alanlarda yapılan çalışmalar, geopolimerlerin kullanımı ve özelliklerini anlamayı amaçlamaktadır. Geopolimerlerin araştırıldığı birçok çalışma, sürdürülebilir, yeşil ve çevre dostu beton üretimine odaklanmaktadır. Bu çalışmalarda, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi sanayi ürünlerinin yanı sıra çimento veya agrega yerine tarımsal ürünlerin kullanımı incelenmektedir. Örnek olarak, pirinç kabuğı külü (PK) gibi tarımsal yan ürünler, geopolimer malzemelerin üretiminde

alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu tür çalışmaların amacı, çevresel etkileri azaltmak ve doğal kaynakları korumak için geleneksel çimento kullanımını azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmaktır. Geopolimer esaslı bağlayıcılar diğer bir ifade ile geopolimer bağlayıcılar, alkali aktivasyonu ile uyarılmış materyaller, alkali bazlı inorganik polimerler, alkali bağlı seramikler ve çimentolar gibi farklı bileşenlerden oluşur. Bu bağlayıcılar, alkali aktivasyonu sonucunda reaktif alümino-silikat malzemeler arasında oluşan alüminosilikat bağlarıyla karakterize edilir. Termal işleminden geçmiş kil mineralleri, küller veya doğal puzolanlar gibi reaktif özelliklere sahip materyaller, bu bağlayıcıların oluşumunda önemli bir rol oynar (Thakur ve Ghosh, 2009). Kil mineralleri, termal aktivasyon süreciyle reaktif özellik gösteren malzemelere dönüştürülebilir. Bu süreçte kil mineralleri su kaybeder ve enerjisi yüksek, istikrarsız ve amorf katı malzemeler oluşur. İşlenmemiş kil mineralleri bile reaktif özellik gösterebilirler (Elert vd. 2008). Geopolimer bağlayıcılar, bu reaktif malzemelerin alkali aktivasyonu ile alüminosilikat bağları oluşturarak sertleşirler. Alkali aktivasyonu, alkali çözeltilerle reaktif malzemelerin karıştırılmasıyla gerçekleşir. Bu reaksiyonlar sonucunda polimerik zincirler ve ağ yapısı oluşur, bu da malzemelerin bağlayıcı özelliklerini kazanmasını sağlar. Geopolimerik bağlayıcılar çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır, özellikle yapı malzemeleri ve çimentoların alternatifleri olarak dikkat çekerler. Geopolimerler, geleneksel çimentolara kıyasla daha düşük enerji tüketimi, daha düşük karbon ayak izi ve daha iyi mekanik özellikler sunabilirler. Bu nedenle, sürdürülebilir inşaat ve malzeme endüstrilerinde ilgi görmektedirler. Yüksek mukavemetleri, kimyasal dirençleri, düşük su emme ve iyi yangın direnci gibi özelliklere sahip olmalarıyla da yapı malzemelerinden yol yapımına, endüstriyel zeminlerden diğer birçok uygulamaya kadar değişik yapı alanında da kullanılmaktadırlar (Aldred vd. 2015).

Geopolimerler, özellikle yapı malzemesi olarak kullanılması durumunda, izolasyon malzemeleri ve atık yönetimi gibi alanlarda çeşitli avantajlara sahiptir. Yüksek dayanıklılık, kimyasal direnç, düşük enerji tüketimi, düşük karbon ayak izi ve atık malzemelerin geri dönüşümü gibi özellikleri nedeniyle çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilirler. Geopolimer bağlayıcılı beton ise; çimento üretimine bağlı CO₂ emisyonunu azaltma potansiyeli olan, çimentoya bir alternatif olarak düşünülebilecek olan geopolimer esaslı bir yapı malzemesidir. Geopolimer bağlayıcılı betonun

(geopolimer beton) üretiminde genellikle endüstriyel atık malzemeleri olan alümina silikat esaslı maddelerin alkalın aktivasyonu kullanılır (Darsanasiri vd. 2018). Bu, inorganik polimerik bir bileşik olarak tanımlanır ve alkali aktivasyon özellikleri olan malzemelerin birleştirilmesiyle moleküler düzeyde bağlanabilme yeteneğine sahiptir.

Geoplimer beton, Portland çimentosundan farklı olarak kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşturarak matrisi ve dayanımı sağlamazlar. Bunun yerine, öncül yoğunlaşma ve alümina jellerini kullanarak yapısal dayanım elde edilir. Yapı bütünlüğünü sağlamak için kalsiyum silikat hidrat bağlayıcılarından ziyade alümino silikat esaslı olması sayesinde asit etkisine karşı dayanıklı olabilmektedir. Asit saldırısına maruz kalan yapılarda, normal çimento bazlı malzemelerden daha iyi performans gösterebilir ve geopolimer beton daha uzun ömürlü olabilirler (Thokchom vd. 2009).

Pirinç işleme sürecinden kaynaklanan bir yan ürün olan pirinç kabuğu ise, tarımsal atıklardan biridir. Pirinç kabuğu, pirinç tanelerini çevreleyen dış katmandır. Pirinç üretimi sırasında, kabuklar genellikle enerji üretimi veya atık olarak bertaraf edilir. Pirinç kabuğu külü, pirinç kabuklarının yanması sonucunda ortaya çıkan bir yan üründür. Bu yan ürünün miktarı, yakılan pirinç kabuğunun yaklaşık %22-25'ini oluşturur. Pirinç kabuğu külü, genellikle tarım arazilerinde toprak iyileştirmesi için kullanılır. Toprağa organik madde ekler ve su tutma kapasitesini artırır. Aynı zamanda toprak pH'ını düzenleyebilir ve bazı bitkiler için uygun bir ortam sağlayabilir. Pirinç kabuğu külü, bazı endüstrilerde de kullanım bulabilir. Örneğin, yapı malzemelerinde katkı maddesi olarak veya enerji üretimi için biyokütle yakıtı olarak kullanılabilir. Ayrıca, bazı kimyasal bileşiklerin üretiminde veya su arıtma işlemlerinde kullanılabilir. Pirinç kabuğu külü, tarımsal atıkların geri dönüştürülmesi ve sürdürülebilir atık yönetimi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bu yan ürün, atık miktarını azaltmaya ve çeşitli uygulama alanlarında değerlendirilmeye yardımcı olabilir. Ancak, kullanımı ve bertarafıyla ilgili yerel düzenlemeler ve yönergeler dikkate alınmalıdır. Kısacası, pirinç kabuğu külü, pirinç işleme süreciyle ortaya çıkan bir tarımsal atığın yan ürünüdür. Doğru şekilde yönetildiğinde, toprak iyileştirmesinden endüstriyel kullanımlara kadar çeşitli alanlarda değerlendirilebilir. Araştırmalar, pirinç kabuğu külünün potansiyel antimikrobiyal ve adsorpsiyon

özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, tarımsal ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliği incelenmektedir (Arnold, de Vargas vd. 2017).

Orman ürünleri endüstrisinde fabrika içi ve fabrika dışı olmak üzere kirliliğin azaltılmasında uygulanabilecek önlemler Engür ve Kartal (2001)'de iki grup altında toplandığı belirtilmiştir. İlk grupta genel amaç kaynakta kirlilik azaltılması dolayısıyla fabrika içinde bu atıkları betratraf etmektir. İkinci grupta ise fabrika dışında bu atıkların bertarafıdır. Bu yüzden fabrika içi önlemler son derece önemlidir. Fabrika içi önlemlere örnek olarak, kirletici maddeleri ayırmak için gazların kullanımı, atık suyun geri dönüşümü, katı maddelerin toplanması ve bunların prosese geri döndürülmesi verilebilir. Esas prensip, mümkün olduğunca proses artıgını, suyunu ve kimyasallarını geri dönüştürmek veya özellikle yongalevha ve kereste fabrikalarında kabuğu da içeren katı atıkların toplanması, ısı ve güç üretmek için buhar kazanlarında en az maliyetle yakıt olarak kullanılmasıdır (Engür ve Kartal, 2001). Kastamonu ormancılık endüstrisinde birden fazla tesisin olduğu bir olarak düşünüldüğünde kaynağında azaltılması gereken atıkların olduğu görülmektedir. Buhar üretiminden kullanılan yakıt olarak kullanılan bu atıkların külü (FIWA(Forest Indusrty Waste Ash)) değerlendirilebilecek atık olarak çıkmaktadır.

Nugteren vd. (2009) tarafından yapılan çalışmalar, geopolimerlerin sentezlenmesi, özellikleri ve uygulamaları üzerine derinlemesine araştırmaları içermektedir. Bu çalışmalar, geopolimer teknolojisinin gelişimine ve çeşitli endüstriyel sektörlerde kullanılmasına katkıda bulunmuştur. Bu gelişmelere paralel olarak geopolimerler mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde inşaat sektöründe ve sürdürülebilir kalkınmada elverişli ve işlevsel kullanım potansiyeline sahip oldukları için son zamanlarda yoğun bir şekilde araştırılmaktadır (Živica vd. 2015).

Bu çalışmanın amacı geopolimerlerin alternatif bir bağlayıcı olarak incelenmesi ve beton içinde çimentonun yerine kullanılmasıyla elde edilecek verilerle çimento talebini azaltabilecek ve enerji tasarrufu sağlayacak atıl durumda olan kullanılabilir malzemelerin geri dönüşümünde alternatif bağlayıcıların araştırılması hedeflenmektedir. Bu hedef kapsamında pirinç kabuğu külü (PK), orman endüstrisi

atık külü (FIWA) ve uçucu kül (UK) içeren geopolimer betonların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Geopolimer

Geopolimerler, inorganik polimerik malzemelerdir ve çimento gibi geleneksel bağlayıcı maddelerin alternatifi olarak kullanılmaktadır. Geopolimerin sertleşme süreci, bir alkali aktivatör (genellikle sodyum veya potasyum hidroksit) ile bir alüminosilikat hamurunun karıştırılmasıyla gerçekleşir. Sertleşme süreci sırasında, hidroksit iyonları (OH-) alüminosilikat yapısının parçalanmasına ve alkalik çözeltide çözünmesine neden olur. Bu çözünme reaksiyonu sonucunda, yeni bir polimerik yapı olan geopolimer oluşur. pH düzeyi, hidroksit iyonlarının konsantrasyonunu gösteren bir ölçüdür. Geopolimerin sertleşme sürecinde pH düzeyinin azalması önemlidir, çünkü düşük pH değerleri, geopolimerin stabilitesini artırabilir ve mekanik özelliklerini iyileştirebilir. pH düzeyinin düşmesi, sertleşme sırasında hamurun daha fazla asidik hale gelmesi anlamına gelir. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça, hamurun pH düzeyi düşmektedir. Bu pH düşüşünü dengelemek için K_2O/SiO_2 molar oranı artırılmaktadır. Yüksek ısı işlem sıcaklıklarında pH düzeyini dengelemek önemlidir çünkü yüksek sıcaklık, geopolimerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini etkileyebilir. Geopolimerler farklı bileşimlere sahip olabilir ve farklı molar oranlarda SiO_2 ve Al_2O_3 içerebilirler. Bazı geopolimer çeşitleri farklı mineral bileşimlerine ve Si:Al oranlarına sahiptir. Bu farklılıklar, geopolimerlerin özelliklerini ve uygulama alanlarını etkileyebilir. Bu daha düşük pH düzeyine sahip geopolimerlerin daha yaygın kullanımını artırdığı söylenebilir. Ancak, hangi geopolimer türünün hangi uygulama alanları için en uygun olduğunu belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Geopolimerler, çimento endüstrisi, inşaat malzemeleri, atık yönetimi ve diğer birçok alanda çevresel olarak sürdürülebilir bir alternatif olarak potansiyel sunar.

Geopolimerlerin farklı türleri ve bileşimleri çeşitli uygulama alanları için potansiyel sunar. Bunlar (Davidovits, 2017);

- **Polisiloksonat, polisilikat, çözünen silikatlar (Si:Al=1:0):** Bu tür geopolimerler, düşük pH düzeyine sahip olabilir ve yüksek sıcaklık dayanımı ile karakterize

edilebilir. Bu nedenle, ısı yalıtım malzemeleri, refrakter kaplamalar veya termal bariyerler gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur.

- ***Kaolinit/hidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat ($Si:Al=1:1$):*** Bu tür geopolimerler, düşük pH düzeyine sahip olabilir ve mekanik dayanımı iyidir. Yüksek mukavemetli yapı malzemeleri, çimento benzeri ürünler veya su geçirmez kaplamalar gibi çeşitli inşaat malzemeleri için kullanılabilir.
- ***Metakaolin (MK-750) esaslı geopolimer, poli (sialate-silokso) ($Si:Al=2:1$):*** Bu tür geopolimerler, termal dayanıklılık, yüksek sıcaklık performansı ve mekanik özelliklerin kombinasyonunu sağlar. Bu nedenle, refrakter malzemeler, endüstriyel fırınlar veya yüksek sıcaklık gerektiren proseslerde kullanılabilir.
- ***Kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na) -sialate, ($Si:Al=1, 2, 3$):*** Bu tür geopolimerler, kalsiyum silikat ve alüminat fazları içerebilir. Bu nedenle, çimento benzeri yapı malzemeleri, yol yapımı veya çöp depolama alanları gibi çeşitli inşaat uygulamaları için kullanılabilir.
- ***Kayaç esaslı geopolimer, poli (sialate-multisilokso) ($1 < Si:Al < 5$):*** Bu tür geopolimerler, doğal kayaçların mineral bileşenlerinin kullanıldığı bir yapıya sahip olabilir. Yüksek mukavemetli yapı malzemeleri, kayaç stabilizasyonu veya geoteknik uygulamalar gibi alanlarda kullanılabilir.
- ***Silis esaslı geopolimer, sialate ve siloxo bağlı poli (siloksonat) ($Si:Al > 5$):*** Bu tür geopolimerler, yüksek silis içeriğine sahip olabilir ve yüksek sıcaklık dayanımıyla karakterize edilebilir. Bu nedenle, yüksek sıcaklık uygulamaları, termal yalıtım veya refrakter malzemeler gibi alanlarda kullanılabilir.

Ayrıca, uçucu kül esaslı geopolimerler, fosfat esaslı geopolimerler ve organik maden esaslı geopolimerler gibi diğer türler de bulunabilir. Uçucu kül esaslı geopolimerler, termal enerji santralleri veya atık bertaraf tesislerinden elde edilen uçucu külün bir bileşeni olarak kullanılabilir. Fosfat esaslı geopolimerler, fosfat cevherleri veya fosforik asit gibi fosfat kaynaklarından elde edilen malzemelerle oluşturulabilir. Organik maden esaslı geopolimerler ise organik maden atıklarının geri dönüşümü için

bir seçenek olabilir. Bu farklı türlerdeki geopolimerler, çevre dostu özellikleri, yüksek dayanım ve dayanıklılık, kimyasal direnç, termal stabilite gibi avantajlar sunar. Bu nedenle, inşaat malzemeleri, yangın dayanımı, su geçirmez kaplamalar, yol yapımı, endüstriyel fırınlar, enerji üretimi ve çevresel rehabilitasyon gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Ancak, her bir geopolimer türünün özellikleri, kullanım alanları ve performansı üzerine daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmaları gerekmektedir. Geopolimer teknolojisi hala gelişmekte olan bir alandır ve daha fazla çalışma yapılarak yeni bileşimler ve uygulamalar keşfedilmektedir (Yonar, 2014).

2.2 Geopolimer Beton

Geopolimer beton, çevreci olarak kabul edilen ve çimento kullanılmadan üretilen ve genellikle amorf alüminosilikatlardan oluşan mühendislik ve sanayi alanlarında olmak üzere yapı inşaatlarında da kullanılmaya başlanan bir malzemedir. Geopolimer beton, farklı malzemelerin kullanılabilirdiği geniş bir çalışma ve araştırma sahasına sahiptir. Bu özelliği sayesinde, farklı endüstriyel atıkların geri dönüşümüne katkıda bulunabilir ve çevresel etkileri azaltabilir. Ayrıca, geopolimer betonun daha dayanıklı ve çevre dostu bir alternatif olduğu düşünülmektedir. Ancak, bu beton türü hala geliştirme aşamasındadır ve geniş çapta kullanımı sınırlıdır. Üretiminde, sınırlı depolama alanlarına sahip endüstriyel ve puzolanik özelliklere sahip atıkların tercihi, geopolimer betonu çevreci bir beton olarak tanınmasına neden olmaktadır. Bu tanınırlık endüstriyel atıkların, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olumlu katkıda bulunması sayesinde çimento tüketimini azaltma potansiyeli bulundurmasından kaynaklıdır. Çimento tüketimini azaltan atıklar ise genelde pişirilmiş killer ve şeyller, doğal puzolanlar (örneğin volkanik küller, traslar, diatomit topraklar), ısıtılmış işlem görmüş malzemeler (örneğin metakaolin) ve endüstriyel atıklar (örneğin uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu, silis dumanı) gibi çeşitli yelpaze aralığındaki malzemelerdir. Bu malzemeler, betonun yapısını oluşturan bileşenler olarak işlev görmektedir (Thakur ve Ghosh, 2009).

Geopolimer beton, geopolimerizasyon süreci adı verilen kimyasal reaksiyon sonucu dayanım kazanan bir tür betondur. Bu süreç için gerekli husus, alüminosilikat mineralleri ve alkali aktivatör kullanılmasıdır.

Geopolimer betonların oluşumu ve yapısı incelendiğinde altı husus dikkate alınmalıdır. Bu hususlar (Ken vd., 2015; Kolezynski vd., 2018; Usha vd., 2014);

- **Geopolimerizasyon Süreci:** Alüminosilikat minerallerinin alkali aktivatörlerle reaksiyona girmesiyle başlayan süreçtir. Alüminosilikat olarak kullanılan mineraller ise genellikle volkanik küller, uçucu kül veya metalurjik artıklar gibi endüstriyel yan ürünler olabilmektedir. Alkali aktivatörler ise genellikle alkali metal hidroksitleri (sodyum hidroksit, potasyum hidroksit) ve alkali metal silikatları içermektedir (Duxson vd., 2007).
- **Polimerizasyon ve Ağ Oluşum Süreci:** Alüminosilikat mineralleri ve alkali aktivatörlerin tepkimesi sonucunda gerçekleşen polimerizasyon sayesinde Si-O-Al veya Si-O-Si bağlarıyla birbirine bağlı üç boyutlu bir polimerik ağ yapısı meydana gelen süreçtir (Reddy, 2016).
- **Aktif İyon ve Su İçeriği Etkisi:** Alkali aktivatörlerin asıl işlevi alüminosilikat mineralleriyle girdikleri reaksiyon sürecinde aktif iyonların serbest kalmasını sağlar. Bu aktif iyonlar, polimerizasyon sürecini hızlandıran ve polimerik ağ yapısının oluşumunu sağlar. Bu süreçteki en önemli unsur ise suyun reaksiyonların gerçekleşmesi için gerekli olması ve aktivasyon sürecinde rol oynamasıdır (Reddy, 2016).
- **Agregalar ve Dolgu Malzemeleri:** Geopolimer betonlar, geleneksel betonlarda olduğu gibi agregalar (çakıl, kum) ve dolgu malzemeleri (katkı maddeleri, lifler vb.) içerir. Bu malzemeler, geopolimer matrisine dahil edilerek beton karışımının oluşmasını sağlar.
- **Katılaşma ve Sertleşme:** Geopolimer beton karışımı yerleştirildikten sonra, polimerizasyon reaksiyonları hızlanır ve katılaşma süreci başlar. Bu süreçte, polimerik ağ yapısı giderek güçlenir ve beton sertleşir. Katılaşma süreci, geleneksel çimento bazlı betonlardaki hidratasyon sürecine benzer. Bu süreçte gerekli kür şartları sağlanması durumunda dayanım artışı sağlamaktadır.

- **Mikroyapı:** Geopolimer betonun mikroyapısı, polimerik ağ yapısı ve agregaların dağılımından oluşur. Polimerik ağ yapısı, betonun bağlayıcı matrisini oluştururken, agregalar mekanik dayanımı sağlar. Mikroskop altında incelendiğinde, geopolimer betonun homojen bir yapıya sahip olduğu görülür (Kolezynski vd. 2018).

Geopolimer betonların özellikle mikroyapısı, geleneksel çimento bazlı betonlardan farklılık gösterir. Geopolimer betonların mikroyapısıyla ilgili bazı önemli noktalar incelendiğinde (Duxson vd., 2005; Kaur vd., 2018; Usha vd., 2014);

- **Geopolimer Matrisi:** Geopolimer betonun mikroyapısında en önemli bileşen, polimerik ağ yapısı olan geopolimer matrisidir. Bu matris, alüminosilikat minerallerinin polimerizasyon reaksiyonu sonucunda oluşur. Geopolimer matrisi, geleneksel çimento matrisine kıyasla daha düşük su içeriğine sahiptir.
- **Agregaların Dağılımı:** Geopolimer betonda kullanılan agregalar (çakıl, kum vb.), polimerik matrise entegre edilir. Agregaların düzgün bir şekilde dağılımı, betonun mekanik dayanımını etkiler. Geopolimer matrisi, agregaları çevreleyen ve birleştiren bir yapıcı olarak işlev görür.
- **Porozite ve Gözeneklilik:** Geopolimer betonun mikroyapısında, porozite ve gözeneklerin miktarı ve dağılımı önemli bir rol oynar. İyi bir mikroyapı, düşük porozite ve sıkı bir gözenek yapısına sahip olmalıdır. Geopolimer matrisi, gözeneklerin oluşumunu engelleyerek betonun dayanıklılığını artırır.
- **Lif:** Bazı durumlarda, geopolimer beton karışımına lifler (cam lifi, polipropilen lifi vb.) eklenir. Bu lifler, betonun çekme dayanımını, çatlak direncini ve enerji emilimini artırabilir. Geopolimer matrisi, bu lifleri içeren homojen bir yapı sağlar.
- **İnterfaz Bölgeleri:** Geopolimer betonun mikroyapısında, agregaların ve geopolimer matrisinin arasındaki geçiş bölgeleri önemlidir. İyi bir interaktif etkileşim ve bağlantı, mekanik dayanımın ve yüzey tutunmanın artmasını sağlar. Geopolimer matrisi, agregaları çevreleyen bu bölgelerde etkin bir şekilde yer alır.

Mikroyapıdaki bu özellikler, geopolimer betonun mekanik dayanımı, dayanıklılığı ve diğer performans özellikleri üzerinde etkili olur. Bu nedenle, geopolimer betonun mikroyapısının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi önemlidir.

2.2.1 Geopolimer Betonların Genel Özellikleri

Geopolimer beton, alkali metal silikat çözeltileriyle alümina-silikat oksitlerin kimyasal reaksiyonu sonucu meydana gelen inorganik polimer esaslı malzemelerdir. Bu reaksiyon, alkali aktivasyon olarak adlandırılır. Bir başka ifadeyle geopolimer beton, doğal alümino-silikat minerallerinin alkali aktivasyon etkisiyle değiştirilmesi sonucu oluşan inorganik polimerik malzemelerdir (Davidovits, 1999). Bu polimer malzemeler, çeşitli isimler altında da bilinirler ve düşük sıcaklık alümina silikat camları, alkali aktivasyonlu çimentolar, geoçimentolar, alkali bağlı seramikler, inorganik polimerler ve hidroseramikler gibi farklı isimlerle de tanımlanmaktadır.

Geopolimer betonların mukavemeti, kullanılan doğal enerji kaynaklarına bağlıdır. Uçucu kül, metakaolin ve cüruf gibi malzemeler genellikle doğal enerji kaynakları olarak kullanılır. Bu malzemeler, çoğunlukla endüstriyel yan ürünler veya atıklardır. Doğal enerji kaynakları olarak kullanılan malzemelerin özellikleri, geopolimer betonların mekanik özelliklerini etkiler. Örneğin doğal enerji kaynakları, kalsine olmayan malzemelerden daha fazla yüksek basınç dayanımı gösterme eğilimindedir, bunlara kaolin kil örnek verilebilir. Bu malzemeler, geopolimer betonların daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olmasını sağlar (Bakri vd. 2011b). Bu malzeme, yüksek mekanik mukavemet, yüksek yanma direnci ve düşük enerji tüketimi gibi özelliklere sahip olma gibi olumlu özelliklere sahiptir. Ayrıca, düşük maliyetli, düşük CO₂ içeriği ve çevre dostu malzemeler arasında sayılır (Kouamo vd., 2012; Van Deventer vd., 2012).

Çevre dostu olan geopolimer betonlar, su bazlı alkali çözeltiler içinde kolayca eriyen ve yeterli miktarda tepkimeye girme özelliği olan alümina ve silika içeren çeşitli başlangıç malzemeleriyle üretilebilir. Bunların yanı sıra, puzolanik özellik gösteren maddeler, geopolimerizasyon süreçlerinde reaktif dolgu malzemeleri veya sertleşme katkıları olarak ta kullanılır ve mekanik özelliklerin gelişimine katkı sağlar (Zhang vd.

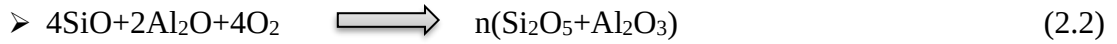
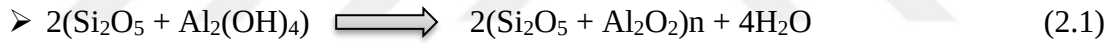
2018). Bu nedenle, geopolimer beton malzemelerin üretimi için birçok alternatif hammadde seçeneği vardır. Bu hammadde çeşitleri;

- **Uçucu kül:** Yanma sonucunda oluşan katı atıklardır ve genellikle kömür veya biyokütle yakıtlarının yanmasıyla elde edilir.
- **Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu:** Çelik üretimi sırasında yüksek fırınlarda oluşan cürufun öğütülerek elde edilen ince taneli bir malzemedir.
- **Taban külü:** Kömür yakma tesislerinde ortaya çıkan bir yan üründür ve genellikle kül oluşumunu önlemek için kullanılan kireçtaşı veya dolomitin yakılmasıyla elde edilir.
- **Pirinç kabuğu:** Pirinç işleme endüstrisinde oluşan atık malzemedir.
- **Kaolen:** Bir kil mineralidir ve genellikle seramik üretiminde kullanılır.
- **Bentonit ve montmorillonit gibi kil mineralleri:** Kil mineralleri, doğal kaynaklardan elde edilen reaktif malzemelerdir.
- **Maden atıkları:** Bazı madencilik süreçlerinden kaynaklanan atık malzemeler, geopolimer malzemelerin üretiminde kullanılabilir.
- **Doğal puzzolanlar:** Yanardağ tabanlı kül ve bazalt gibi doğal kaynaklardan elde edilen mineral katkı maddeleridir.
- **Perlit:** Volkanik camın şişmesiyle oluşan hafif bir mineraldir ve izolasyon malzemesi olarak kullanılır.
- **Zeolit içeren tüfler:** Zeolit, nanoporöz yapıya sahip bir mineraldir ve bazaltik kayalarda bulunur.

Geopolimer betonların genellikle alüminosilikat içeren ham maddelerle karıştırılarak farklı sıcaklıklarda üretim süreçleri ile gerçekleştirilebilir. Alkali aktivasyon işlemi ise

bu süreçte alüminosilikat minerallerinin kimyasal kompozisyonlarını ve kristal yapılarını değiştirir, böylece inorganik polimer zincirleri ile üç boyutlu sağlam bir yapı oluşturulur (Reddy vd. 2016)

Geopolimer malzemelerde en önemli unsur olan kristal yapı, malzemelerin sentezlenmesi ile gerçekleşen ve "geopolimerleşme" olarak adlandırılan bir süreçtir. Kimyasal moleküller arasında polikondenzasyon reaksiyonları sonucu oluşan kovalent zincir bağlarıyla karakterize edilen geopolimerizasyon süreci olarakta ifade edilebilmektedir. Özellikle P-K-Na-Ca-Mg-Al-Si gibi elementleri bulunduran minerallerin, bu reaksiyonlarla birleşerek polimerik yapılar oluşturması süreciyle meydana gelen geopolimerizasyon, yüksek miktarda reaktif alümina içeren bir hammadde olan alümina kaynağının alkali silikat çözeltisi silika kaynağında (aktivatör sıvı çözelti) çözünmesiyle başlatılan süreçtir (Memiş ve Yaprak, 2022). Alümina, çözelti içindeki alkali aktivatörlerle reaksiyona girer ve silika kaynağından gelen silikat iyonlarıyla etkileşime girerek bir polimerizasyon reaksiyonunu (2.1 ve 2.2) başlatır.



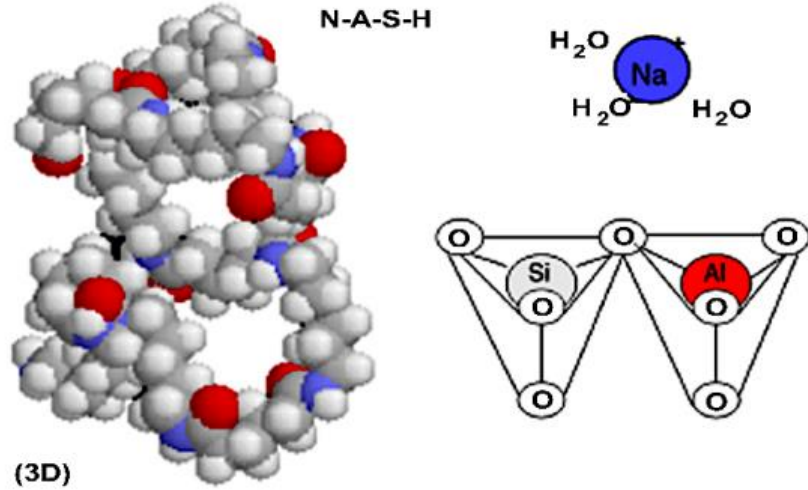
Bu reaksiyon sonucunda, alümina ve silikat iyonları arasında kimyasal bağlar oluşur ve üç boyutlu polimer ağı meydana gelir. Geopolimerlerin kimyasal bağları, zeolitlere benzemesine rağmen amorf mikroyapıya sahiptir.

Geopolimerler, Si-O-Al-O yapısına sahip (Şekil 2.1) polimerik ağlardan oluşurlar. Bu ağ, SiO_4 ve AlO_4 bileşiklerinin birleşerek oluşturduğu polimerik zincirlerden meydana gelir ve geopolimer malzemenin (betonların) yapısını oluşturan polimer zincirleri ve halkalarını içerir (Reddy vd., 2016; Sisol vd., 2014; Swanepoel ve Strydom, 2002). Diğer bir ifadeyle geopolimerizasyon süreci olarak adlandırılan bu süreç, katı alüminosilikat oksitleri ile alkali metal silikat çözeltileri (sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, vb.) arasında meydana gelen bir süreç olup, SiO-Si ve Si-O-Al sistemlerini içeren amorf veya yarı kristal yapıların meydana gelmesiyle gerçekleşir. Bu reaksiyon, orta dereceli sıcaklıklarda (20-150 °C) ve yüksek alkali ortamlarda en üst düzeydedir.

Bu reaksiyon incelendiğinde, alüminasilikat oksitler alkali silikat çözeltileriyle reaksiyona girer ve polimerik zincirler oluşur. Bu zincirler, kovalent bağlarla birbirlerine bağlanır ve geopolimerin 3D ağ yapısını oluşturur (Şekil 2.1, Şekil 2.2) (Palomo vd., 2014; Yun-ming vd., 2016).



Şekil 2.1 N-A-S-H jelinin oluşumu (Palomo vd. 2014)



Şekil 2.2 N-A-S-H jelinin 3 boyutlu görünümü (Palomo vd. 2014)

Silika ve alümina içeren malzemeler geopolimerik reaksiyonunu başlatmak için alkali aktivatörlere gereksinim duymaktadır. (Davidovits, 2008; Provis vd. 2008). Geopolimerleşme aşamasında, kullanılacak olan puzolan maddenin nitelikleri ve alkali aktivatörlerin çeşitleri ile konsantrasyonları önemli bir rol oynamaktadır (De Vargas vd. 2011; Ken vd. 2015; Komnitsas vd. 2007; Somna vd., 2011). En sıklıkla kullanılan alkali aktifleştiriciler şunlardır:

- **Sodyum hidroksit (NaOH):** Sodyum hidroksit, geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmak için kullanılan etkili bir alkali aktivatördür.

- **Potasyum hidroksit (KOH):** Potasyum hidroksit de sodyum hidroksit gibi geopolimerleşme sürecinde yaygın olarak kullanılan bir alkali aktivatördür.
- **Sodyum silikat (Na_2SiO_3):** Sodyum silikat, geopolimerleşme reaksiyonunu başlatmak ve ilerletmek için kullanılan bir alkali aktivatördür.
- **Potasyum silikat (K_2SiO_3):** Potasyum silikat da sodyum silikat gibi geopolimerleşme sürecinde etkili bir alkali aktivatördür.

Bu alkali aktivatörlerin yanı sıra, sodyum sülfat (Na_2SO_4), sodyum karbonat (Na_2CO_3), potasyum karbonat (K_2CO_3) ve potasyum sülfat (K_2SO_4) gibi maddeler de aktivatör olarak kullanılabilir. Çözünme sürecinde alkali konsantrasyonu önemli bir faktördür. Geopolimerleşme sürecinin başlatılması ve ilerletilmesi için uygun alkali konsantrasyonu kullanılmalıdır (Komnitsas vd. 2007).

Geopolimerizasyon sürecinin farklı evrelerinde sıvı aktivatörler, yüksek alkali konsantrasyonu, alkali silika solüsyon modülü ve reaksiyon sıcaklığının çeşitli etkileri olduğu gözlemlenmiştir (Yoa, 2009). Alkali konsantrasyonu, geopolimerizasyon süresi üzerinde etkilidir (De Vargas vd. 2011). Daha yüksek alkali konsantrasyonu, reaksiyon hızını artırabilir ve geopolimerizasyon periyodunu kısaltabilir. Bu durumda, alkali silika solüsyonunun modülü düşürülerek reaksiyon hızının optimize edilebileceği görülmüştür. Alkali silika solüsyonunun modülü, sıvı aktivatörün silika (SiO_2) ile alkali (NaOH, KOH, vb.) oranını ifade eder. Modülün düşürülmesi, silika içeriğinin artması anlamına gelir. Daha düşük modüller, geopolimerizasyon reaksiyonunun hızını artırabilir ve polimerizasyon sürecini hızlandırabilir. Ayrıca geopolimerleşme süreci genellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilir ve belirli bir zamanda tamamlanır. Sentez işlemi tamamlandığında, elde edilen malzeme yüksek mukavemet, kimyasal direnç ve diğer istenen özelliklere sahip bir geopolimer matris haline gelir (Duxson vd. 2007). Bu nedenle reaksiyon sıcaklığı da geopolimerizasyon sürecini etkiler. Optimum reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon hızını ve hammadde reaksiyon derecesini artırabilir. Yüksek sıcaklıklar, daha hızlı polimerizasyon sağlayabilir ve geopolimerin istenen özelliklere daha çabuk ulaşmasını sağlayabilir (Aredes vd. 2015; Bing-hui vd. 2014; Gasparini vd. 2015). Orta derecedeki sıcaklıklar

ve yüksek bazik kondisyonlar ise, reaksiyonun hızını artırır ve daha hızlı bir polimerizasyon sürecine yol açar. Bu faktörlerin farklı aşamalarda farklı etkileri olduğu göz önünde bulundurularak, geopolimerizasyon süreci optimize edilebilir. Alkali yoğunluğu, alkali silika çözeltisinin modülasyonu ve tepkime sıcaklığı, geopolimerizasyonun hızını, reaksiyon oranını ve ürün özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir (Hounsli vd., 2014; Temuujin vd., 2009). Geopolimerler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan dayanıklı, yüksek mukavemetli ve termal olarak stabil malzemelerdir.

Geopolimer betonlar ise uçucu kül, cüruf gibi hammaddelerle birlikte polimerizasyonda gerekli olan alkali aktivatörlere gereksinim duymakta ve bu aktivatörler ise genelde sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) gibi alkali çözeltilerin birleşmesiyle oluşturulabilmektedir. Bu malzemeler ve alkalilerden oluşan karışımına da "geopolimer hamuru" denir. Geopolimer hamuru, tek bir materyalden veya çeşitli materyallerin birleşiminden elde edilebilir. Bu, farklı özelliklere sahip malzemelerin kullanılarak geopolimer hamurunun dolayısıyla geopolimerlerin istenen özelliklere sahip olması sağlanabilmektedir. Bu işlem reaktif bir çözelti oluşturulmasını sağlar. Elde edilen çözelti daha sonra düşük bir sıcaklıkta ($40-100^\circ\text{C}$ ki bu sıcaklık aralığı, diğer geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha düşüktür ve enerji tasarrufu sağlar) fırınlanarak polimerizasyonu tamamlanır ve monolitik bir seramik yapı elde edilir (Davidovits, 2008). Bu yapının yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlaması, yapıların uzun ömürlü olmasını sağlar. Aynı zamanda, geleneksel portland çimentosuna göre daha düşük enerji tüketimine sahip olması nedeniyle çevresel etkisi daha azdır. Geopolimerlerin bu özellikleri, yapı sektöründe sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler arayanların dikkatini çekmektedir. Geopolimerler, çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak dikkat çekerler. Yüksek mukavemet, termal stabilite ve kimyasal direnç gibi özelliklerinden dolayı yapı malzemeleri, yalıtım malzemeleri ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

Geopolimerler, portland çimentolu betonların yerine kullanılabilme potansiyeline sahip gelecek vaat eden maddelerdir (Cheng vd. 2018). Bu konuda yapılan araştırmalar ve çalışmalar, geopolimerlerin çeşitli avantajlara sahip olduğunu göstermektedir.

Birincil avantajı, portland çimentonun en önemli dezavantajlarından biri olan yüksek karbon ayak izinin azaltılmasıdır. Portland çimentonun üretiminde, hem klinker üretimi sırasında kalsinasyon işlemiyle hem de kalsinasyon ısını sağlamak için kullanılan fosil yakıtlardan kaynaklanan CO₂ salınımı gerçekleşir. Bu nedenle, portland çimento üretimi CO₂ emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunur (Maddalena vd., 2018; McNulty 2009). Geopolimerler ise bu emisyonları önemli ölçüde azaltabilir veya tamamen ortadan kaldırabilir. Bu da çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek sunar. Geopolimerler ayrıca yangın geçirmezlik özelliği gösterir. Bu malzemenin yapısal özellikleri, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasını sağlar ve böylece yangın durumlarında daha iyi performans gösterir. Diğer bir avantajı, düşük maliyetli olmasıdır. Geopolimerler, portland çimentolu betonlara kıyasla daha düşük maliyetle üretilir (Heitzmann ve Sawyer, 1984). Bu, inşaat sektöründe maliyetleri düşürmek ve daha ekonomik projeler gerçekleştirmek için önemli bir avantaj sağlar. Geopolimerler aynı zamanda çevresel duyarlılık gösterir. Bu malzeme, atık materyallerin geri dönüştürülmesiyle üretilir. Bu da atık yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından olumlu bir etki yaratır. Son olarak, geopolimerler ses absorplama özelliğine sahiptir. Bu, sesin emilmesini sağlayarak gürültüyü azaltabilir ve akustik performansı iyileştirebilir. Tüm bu avantajlar, geopolimerlerin portland çimentolu betonlarla karşılaştırıldığında üstün bir seçenek olduğunu göstermektedir. Ancak, uygulamadaki yaygınlığı ve kabulü artırmak için daha fazla araştırma, teknolojik gelişme ve endüstriyel benimseme gerekmektedir. (Askarian vd., 2018; Pan vd., 2018).

2.2.2 Geopolimer Betonların Avantaj ve Dezavantajları

Geopolimer betonlar, geleneksel betonlara kıyasla bir dizi avantaja sahipken, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Geopolimer betonların avantajları ve dezavantajları şunlardır (Li vd. 2004);

Avantajlar:

- **Çevresel Sürdürülebilirlik:** Geopolimer betonlar, endüstriyel yan ürünlerin geri dönüşümüyle üretildiği için çevresel olarak daha sürdürülebilir bir seçenektir.

Geleneksel beton üretimi, portland çimentosunun üretimi sırasında büyük miktarda karbondioksit salınımına neden olurken, geopolimer betonlar daha düşük karbon ayak izine sahip olabilir.

- **Mekanik Dayanım:** Geopolimerik betonlar, tipik olarak geleneksel betonlardan daha yüksek basınç dayanımı, çekme mukavemeti ve bükülme direnci gibi mekanik özelliklere sahip olabilir. Bu, daha hafif yapılar için yüksek mukavemet sağlama potansiyeline sahip olmalarını sağlar.
- **Kimyasal Dayanıklılık:** Geopolimer betonlar, asitler, bazlar ve kimyasal çözeltiler gibi agresif ortamlara daha dayanıklı olabilir. Bu özellikleri sayesinde, kimyasal endüstri, atık depolama alanları ve benzeri uygulamalarda tercih edilebilirler.
- **Yüksek Sıcaklık:** Geopolimer betonlar, yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliği gösterir. Bu nedenle, yangına dayanıklı yapılar için tercih edilebilirler. Termal şoklara karşı daha iyi direnç gösterebilirler.
- **Hafiflik:** Geopolimer betonlar, geleneksel betonlara kıyasla daha düşük bir yoğunluğa sahip olabilirler. Bu, yapıların toplam ağırlığını azaltır ve taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar (Li vd. 2004).

Dezavantajlar (Zerfu ve Ekaputri, 2016):

- **Hammadde ve Malzeme Uyumluluğu:** Geopolimer betonlar için uygun hammadde ve malzemelerin seçimi önemlidir. Alüminosilikat minerallerinin uygun kaynaklarına erişim sınırlı olabilir ve bazı bölgelerde bulunmayabilir. Ayrıca, alkali aktivatörlerin uygun bileşimi ve dozajı da önemlidir.
- **Üretim ve Uygulama Zorlukları:** Geopolimer betonların üretimi ve uygulanması, geleneksel betonlara kıyasla daha karmaşık olabilir. Uygun karışım oranlarının ve polimerizasyon sürecinin kontrol edilmesi gereklidir. Bu, üretim sürecini karmaşıktırabilir ve uzmanlık gerektirebilir.

- **Standartlaşma:** Geopolimer betonlar, geleneksel betonlara kıyasla daha yeni bir teknolojidir ve standartlaşma süreci henüz tamamlanmamış olabilir. Bu durum, bazı projelerde belgelendirme ve kalite kontrol açısından zorluklar yaratabilir (Zhao vd. 2021).
- **Maliyet:** Geopolimer betonların bazı durumlarda geleneksel betonlara kıyasla daha yüksek maliyetli olabileceği görülebilir. Hammadde seçimi, özel üretim süreçleri ve üretim ekipmanları gibi faktörler maliyetleri etkileyebilir. Ancak, uzun vadede çevresel avantajları ve performans özellikleri göz önüne alındığında, maliyetlerin rekabetçi hale gelebileceği düşünülmektedir.
- **Bilgi ve Uygulama Yetkinliği:** Geopolimer betonların üretimi ve uygulanması, özel bilgi ve beceri gerektirebilir. Bu, işgücü yetkinliği ve eğitim ihtiyacı açısından bir zorluk oluşturabilir. Uygun eğitim ve bilgi paylaşımı, bu dezavantajın üstesinden gelmeye yardımcı olabilir.

Genel olarak, geopolimer betonlar çevresel sürdürülebilirlik, yüksek mukavemet, kimyasal dayanıklılık gibi avantajlara sahip olsalar da, bazı zorlukları ve dezavantajları da içermektedir. Bu nedenle, her proje için dikkatli bir değerlendirme yapılması ve uygun tekniklerin ve malzemelerin seçilmesi önemlidir.

2.2.3 Geopolimer Betonların Kullanım Ve Uygulama Alanları

Geopolimerler, yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı, yüksek dayanımlı ve hızlı sertleşme özellikleri olan malzemelerdir. Bu özellikler nedeniyle çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar (Yaoa, 2009).

- **Atık arıtma:** Geopolimerler, atık arıtma tesislerinde kullanılan yapı malzemeleri için ideal bir seçenektir. Yüksek kimyasal dayanıklılığa sahiptirler ve atık suların işlenmesinde kullanılan kimyasalların etkilerine karşı dirençli olabilirler.
- **Yangın dayanıklılığı:** Geopolimerler, yüksek sıcaklık dayanımına sahip oldukları için yangın dayanıklı malzemelerin üretiminde kullanılabilirler. Bu özellikleri sayesinde yapıların yangına karşı daha dayanıklı hale gelmesine yardımcı olurlar.

- **Yapı ve askeri mühendislik:** Geopolimerler, inşaat sektöründe çeşitli yapı malzemelerinin üretiminde kullanılır. Beton yerine kullanıldığında daha hafif ve daha dayanıklı bir yapı elde edilebilir. Ayrıca askeri mühendislik uygulamalarında da kullanılabilir.
- **Biyomalzemeler:** Geopolimerler, biyomalzemelerin üretiminde kullanılan bir seçenek olabilir. Biyoyumluluk özelliklerine sahip olmaları, vücut dokularıyla uyumlu olmalarını sağlayabilir ve tıbbi implantlar gibi uygulamalarda kullanılmalarına olanak tanır.

Yaoa vd. (2009) tarafından yapılan çalışma, geopolimerlerin çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilirliğini vurgulamaktadır. Ancak, teknolojik gelişmeler ve yeni araştırmaların ortaya çıkmasıyla birlikte, geopolimerlerin daha geniş bir kullanım potansiyeline sahip olabileceği de düşünülmektedir.

Geopolimer betonlar, geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan çok yönlü bir yapı malzemesidir. Geopolimer betonların yaygın olarak kullanıldığı bazı uygulama alanları (Davidovits, 2008; Srividya vd., 2022; Vickers vd., 2015; Yaoa vd., 2009);

- **Prekast yapı endüstrisi:** Geopolimerler, prekast yapı elemanlarının üretiminde kullanılabilir. Bu malzemeler, yüksek mukavemetleri ve hızlı katılma özellikleri sayesinde prekast beton ürünlerin üretim sürecini iyileştirebilir.
- **Taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri:** Geopolimerler, yapı malzemeleri olarak kullanılabilir ve betonun yerini alabilir. Yüksek dayanıklılıkları ve hafiflikleri nedeniyle yapıların taşıyıcı elemanlarında veya taşıyıcı olmayan malzemelerde kullanılabilirler.
- **Heykelticilik ve süsleme sanatları:** Geopolimerler, heykelticilik ve süsleme sanatlarında kullanılan bir malzeme olarak tercih edilebilir. Şekillendirilebilirlikleri ve dayanıklılıkları, bu alanlarda kullanımlarını destekler.

- **Beton esaslı yol kaplamaları:** Geopolimerler, beton esaslı yol kaplamalarının üretiminde kullanılabilir. Yüksek dayanıklılıkları ve kimyasal dirençleri, yoğun trafik yollarında kullanılan kaplamaların ömrünü uzatabilir.
- **Zemin iyileştirme:** Geopolimerler, zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılabilir. Zayıf zeminlerin stabilizasyonu için kullanılarak temel sağlamlığını artırabilirler.
- **Nükleer atıkların depolanması:** Geopolimerler, nükleer atıkların güvenli depolanmasında kullanılan bir seçenektir. Kimyasal dirençleri ve radyoaktif maddelerle etkileşime girme kabiliyetleri sayesinde nükleer atıkların stabilizasyonunda önemli bir rol oynayabilirler.
- **Refrakter seramik malzeme üretimi:** Geopolimerler, yüksek sıcaklık dayanımına sahip oldukları için refrakter seramik malzemelerin üretiminde kullanılabilirler. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan endüstriyel fırınlarda ve yüksek fırınlar gibi uygulamalarda kullanılabilirler.
- **Ağır hava koşullarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi:** Geopolimerler, ağır iklim koşullarına ve yangına dayanıklı duvar kaplamalarının üretiminde kullanılabilir. Dayanıklılıkları ve yangın dirençleri, yapıların dış cephelerini korumada etkili olabilir.
- **Güçlendirme:** Geopolimerler, beton yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilir. Mevcut beton yapıların taşıma kapasitesini artırmak veya hasarlı bölgeleri onarmak için geopolimer bazlı kompozit malzemeler kullanılabilir. Bu, beton yapıların dayanıklılığını ve ömrünü uzatabilir.
- **Tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu:** Geopolimerler, tarihi yapıların restorasyonunda kullanılabilir. Tarihi binaların orijinal taşıyıcı sistemlerini güçlendirmek veya onarmak için bu malzemelerin kullanılması, yapıların korunmasına ve uzun vadeli sağlamlığının sağlanmasına yardımcı olabilir.

- **Uçak endüstrisi:** Geopolimerler, hafif ve dayanıklı yapısı nedeniyle uçak endüstrisinde kullanılan malzemeler arasında yer alabilir. Uçak bileşenlerinin üretiminde, yüksek mukavemet, termal dayanıklılık ve hafiflik gibi özellikleri nedeniyle tercih edilebilirler.
- **Nükleer santraller:** Geopolimerler, nükleer santrallerde çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Radyasyona dayanıklı ve kimyasal olarak inert özellikleri, nükleer santral yapılarının ve kaplamalarının yapımında ve bakımında önemli bir rol oynayabilir.

Davidovits (2008) tarafından yapılan çalışma, geopolimerlerin çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu malzemelerin farklı alanlarda uygulanması, çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemeleri arayışındaki endüstriler için önemli bir çözüm olabilir.

Davidovits tarafından yapılan çalışmada, sürekli kullanıma açık olan yerlerin (örneğin, havaalanları gibi) onarımında geopolimer betonlarının sıklıkla kullanıldığı belirtilmektedir. Geopolimer betonlar, yüksek mukavemet, dayanıklılık ve kimyasal direnç özelliklerine sahip oldukları için bu tür uygulamalarda tercih edilmektedir. Havaalanları gibi yoğun trafiğe maruz kalan alanlarda, beton zeminlerin sürekli aşınma, yüksek yükler ve kimyasal etkiler nedeniyle hasar görmesi yaygın bir sorundur. Geopolimer betonlar, geleneksel betonlara göre daha yüksek dayanıklılığa sahiptirler ve aşınma, darbe ve kimyasal saldırılara karşı daha dirençlidirler. Bu özellikleri nedeniyle geopolimer betonlar, havaalanı pistleri, apronlar, taksi yolları ve diğer sürekli kullanılan yerlerin onarımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu betonlar, daha uzun bir ömrü olan ve bakım maliyetlerini azaltan dayanıklı yüzeyler oluşturabilir. Ayrıca, hızlı katılaşma özelliklerine sahip olmaları, onarım sürelerini kısaltabilir ve işletme sürekliliğini sağlamak için önemli bir avantaj sağlayabilir. Geopolimer betonlarının sürekli kullanıma açık yerlerin onarımında yaygın olarak kullanılması, bu malzemenin endüstrideki önemini ve kullanım potansiyelini vurgulamaktadır. Araştırmalar ve teknolojik gelişmelerle birlikte, gelecekte daha geniş kapsamlı kullanım alanlarına sahip olabileceği düşünülmektedir.

Heitzmann ve Sawyer (1984) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, geopolimerlerin Portland çimentosuyla benzer özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda, geopolimerlerin düşük üretim maliyetine sahip, daha iyi özelliklere sahip çimento malzemeleri üretmek için Portland çimentolarla birlikte kullanılabildiği tespit edilmiştir. Bu karışım genellikle %80 oranında Portland çimentosu ve %20 oranında geopolimer malzemeden oluşmaktadır. Elde edilen çimento malzemesi, hızlı bir şekilde yüksek dayanım kazanabilme özelliğine sahip olmuş ve inşaat sektöründe bilinir hale gelmiştir. Bu malzemenin endüstriyel kaplamalarda, otoyollarda ve pist onarımlarında kullanım için son derece uygun olduğu görülmüştür. Geopolimer çimentolar, pist onarımlarında kullanıldığında sertleşme süreci 4-6 saat arasında gerçekleşmektedir. Bu, hızlı bir onarım süreci sağlamak için avantajlıdır. Öte yandan, düz betonun sertleşmesi birkaç gün sürebilmektedir. Geopolimer çimentolar ise birkaç saat içerisinde yaklaşık 25 MPa basınç dayanımına ulaşabilmektedir.

2.2.4 Geopolimer Betonlar ile Geleneksel Betonlar Arasındaki Farklar

Geopolimer betonlar ile geleneksel betonlar arasında bazı önemli farklar bulunmaktadır. Bunlar;

- **Bağlayıcı Malzeme:** Geleneksel betonlarda bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu kullanılırken, geopolimer betonlarda geopolimer matrisi olarak adlandırılan polimerik bağlayıcı malzeme kullanılır. Geopolimer matrisi, alüminosilikat mineralleri ve alkali aktivatörlerin reaksiyonu ile oluşur.
- **Hammaddeler:** Geleneksel betonlarda genellikle portland çimentosu, kum, çakıl ve su gibi hammaddeler kullanılırken, geopolimer betonlarda alüminosilikat mineralleri (volkanik küller, uçucu kül, metalurjik artıklar) ve alkali aktivatörler kullanılır. Bu, geopolimer betonların sürdürülebilir bir seçenek olduğunu gösterir, çünkü endüstriyel yan ürünlerin geri dönüşümüne katkıda bulunabilirler.
- **Kimyasal Reaksiyon:** Geleneksel betonlarda hidrasyon süreci ile sertleşme gerçekleşirken, geopolimer betonlarda geopolimerizasyon süreci ile sertleşme meydana gelir. Geopolimerizasyon süreci, alüminosilikat mineralleri ve alkali aktivatörlerin reaksiyonu sonucunda polimerik bir ağ yapısının oluşmasını içerir.

- **Sertleşme Hızı:** Geopolimer betonlar genellikle daha hızlı bir sertleşme hızına sahiptir. Bu, üretim süresini kısaltabilir ve hızlı inşaat projeleri için avantaj sağlayabilir.
- **Mekanik Özellikler:** Geopolimer betonların mekanik özellikleri, geleneksel betonlardan farklılık gösterebilir. Genellikle geopolimer betonlar, daha yüksek basınç, çekme ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklere sahip olabilir. Bu, daha hafif yapılarda daha yüksek mukavemet sağlama potansiyeline sahip olmalarını sağlar.
- **Kimyasal Dayanıklılık:** Geopolimer betonlar, asitler, bazlar ve kimyasal çözeltiler gibi agresif ortamlara daha dirençli olabilir. Bu özellikleri sayesinde, kimyasal endüstri, atık depolama alanları ve benzeri uygulamalarda tercih edilebilirler.
- **Çevresel Etkiler:** Geopolimer betonlar, üretim sırasında daha az sera gazı salınımı ve enerji tüketimi gerektirir. Ayrıca, endüstriyel yan ürünlerin geri dönüşümüne katkıda bulunarak çevresel etkileri azaltırlar. Geleneksel beton üretimi, büyük miktarda karbondioksit salınımına neden olurken, geopolimer betonlar daha düşük karbon ayak izine sahip olabilir.
- **Hacim Kararlılığı:** Geopolimer betonlar genellikle daha iyi hacim kararlılığı gösterir. Bu, daha az çekme ve büzülme eğilimine sahip oldukları anlamına gelir. Bu özellik, betonun çatlak oluşumunu azaltır ve yapıya daha iyi dayanıklılık sağlar.
- **Isı Dayanımı:** Geopolimer betonlar, yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliği gösterir. Bu nedenle, yangına dayanıklı yapılar için tercih edilebilirler. Geleneksel betonlara kıyasla daha iyi termal şok direncine sahip olabilirler.
- **Uygulama Alanları:** Geopolimer betonlar, geleneksel betonların kullanıldığı birçok alanda kullanılabilir. İnşaat sektöründe yapıların temellerinden duvar ve döşemelere kadar çeşitli uygulamalarda kullanılabilirler. Ayrıca, su arıtma tesisleri, kimyasal endüstri tesisleri, nükleer santraller, havaalanları gibi özel uygulama gerektiren alanlarda da tercih edilebilirler.

Geopolimer betonlar ile geleneksel betonlar arasındaki bu farklar, geopolimer betonların çevresel sürdürülebilirlik, mukavemet ve kimyasal dayanıklılık gibi önemli avantajları olduğunu göstermektedir. Ancak, her projenin özelliklerine ve gereksinimlerine göre en uygun beton tipinin seçilmesi önemlidir.

2.3 Konu İle İlgili Yapılan Araştırmalar

Rao vd. (2020) tarafından yapılan bir araştırmada, geopolimer betonun üretimi için Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) ve Sodyum Hidroksit (NaOH) kullanılarak granüllü yüksek fırın cürufu (GYFC) puzolan maddesi olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, en uygun su/bağlayıcı oranının 0.4 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 14 mol alkali çözeltisi ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarının, 12 mol alkali çözeltisi ile hazırlanan numunelere göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular, geopolimer betonun üretimi için en uygun su/bağlayıcı oranının 0,4 olduğunu ve daha yüksek miktarda alkali çözeltisinin daha iyi basınç dayanımı sağladığını göstermektedir.

Geopolimer Beton ve Portland Çimentolu Beton arasında yapılan karşılaştırmada, aynı dayanım ve fiziksel özelliklere sahip oldukları belirtilmektedir. Ancak, durabilite özellikleri açısından yapılan değerlendirme sonucunda, geopolimer betonun portland çimentolu betona göre çok daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgulara dayanarak, geopolimer betonun portland çimentolu betona alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır (Chen vd., 2021; Fan vd., 2021).

Geopolimer betonun yapısında kovalent bağ oluşumu sayesinde elastik özelliklerinin yüksek olması, çekme dayanımı zayıf olan Portland çimentolu betonun yerine kullanılması açısından önemli bir parametredir. Geopolimer betonun elastik özelliklerinin yüksek olması, yapısal dayanıklılığını artırabilir ve çatlakların oluşumunu engelleyebilir. Bu durum, literatürdeki araştırmaların odak noktasını donatılarla olan kompozit davranışının incelenmesine yönlendirmiştir. Birçok araştırmacı, geopolimer beton ve portland çimentolu beton ile yapılan deneyler arasında karşılaştırmalar yaparak, özellikle kirişler gibi yapı elemanları üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalarda, geopolimer içeren numunelerin davranışının (çatlak tipi, göçme modu vb.) portland çimento içeren

numunelerle benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, geopolimer betonun bağlayıcı açısından yeni bir seçenek olabileceği görüşlerini güçlendirmiştir. Geopolimer betonun donatılı yapı elemanlarıyla birlikte davranışının incelenmesi, daha geniş ölçekte kullanılabilirliği ve uygulanabilirliği hakkında bilgi sağlamaktadır (Ardhira vd., 2022; Cui vd., 2022; Hassan vd., 2020; Sudha vd., 2022).

El-Feky vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı 2,85 olan ve %39,8 SiO₂; %11,2 Al₂O₃; %1,2 Fe₂O₃ ve %34,4 CaO içerdiği belirtilmektedir. Bu cüruf, sodyum silikat-sodyum hidroksit karışımı aktivatör ile aktive edilmiştir. Harçların kum/bağlayıcı oranı 1,2, su/bağlayıcı oranı ise 0,4 olarak seçilmiştir. Çalışmada, mikrodalga kürü ve etüv kürü olmak üzere iki farklı kürleme yöntemi kullanılmıştır. Mikrodalga kürü 720 watt güç seviyesinde 2; 4 ve 6 dakika süresince uygulanırken, etüv kürü ise 80°C'de 4 saat boyunca uygulanmıştır. Her iki kür tipinde de numuneler, 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiş ve ardından basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, her iki kür tipinde de bekletme süresinin 7 günden 28 güne çıktığı zaman basınç dayanımlarında artışlar olduğunu göstermiştir. Etüvde kürlenmiş numunenin 28 günlük basınç dayanımı yaklaşık olarak 49 MPa olarak raporlanırken, mikrodalga küründe 2; 4 ve 6 dakika kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları sırasıyla yaklaşık olarak 60; 33 ve 29 MPa olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar, mikrodalga küründe kür süresinin artmasıyla numunelerin sıcaklıklarının arttığını ve polikondenzasyon işleminin hızlandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, mikrodalga kürünün erken aşamada reaksiyona girmeyen silis ve alümina türlerinin çözünmesini engellediği ve basınç dayanımının azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Kür süresindeki artışın numune sıcaklığını artırdığı ve boşluk çözeltisinin hızla buharlaştığı, bu durumun da geopolimerizasyon süreci için gerekli su miktarını azalttığı, matrisin dehidrasyona uğradığı ve dayanımın azaldığı ifade edilmiştir.

Tan vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, mikrodalga kürü ile üretilen geopolimerler üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, ağırlıkça %50 atık beton, %42 kırmızı tuğla, %5 seramik çatı kiremiti ve %2 camsı malzeme içeren karışık geri dönüşüm agrega tozu ve metakaolin kullanılmıştır. Karışık geri dönüşüm agrega tozunun bileşimi %37,8 SiO₂; %15,2 Al₂O₃; %12,5 CaO; %13,7 Fe₂O₃ ve %9,7

MgO iken, metakaolinin içeriği %61,4 SiO₂ ve %32,5 Al₂O₃ olarak belirtilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat çözeltisi (%29,4 SiO₂; %14,7 Na₂O; %55,9 su) ve %98 saflıktaki sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1.5 olarak sabit tutulmuştur. Çalışmada, karışık geri dönüşüm agrega tozu ile hazırlanan hamurların bir kısmına %10; 25; 40 ve 55 oranlarında metakaolin ilavesi yapılarak farklı hamurlar hazırlanmıştır. Hazırlanan hamurlar prizma kalıplara yerleştirilmiş ve nem geçirmeyen bir membran ile kaplanarak 24 saat boyunca ortam koşullarında bekletilmiştir. Ardından, numuneler ikiye bölünmüş ve bir parça ortam şartlarında kürlenirken diğer parça mikrodalga kürüne tabi tutulmuştur. Mikrodalga kürü, 1000 W güç seviyesinde 20; 40; 60 ve 80 saniye süreleriyle uygulanmıştır. Araştırmacılar, mikrodalga kürünün 20; 40; 60 ve 80 saniye sürelerinin 3 gün ortam kürlenmesine tabi tutulan numunelere göre basınç dayanımında sırasıyla %25; %122; %109 ve %90 oranında artışa neden olduğunu raporlamışlardır. Ayrıca, 1; 3; 5; 7 ve 9 gün ortam kürlenmesini takiben 40 saniye süreyle uygulanan mikrodalga kürünün basınç dayanımında %304; %122; %103; %82 ve %76 oranlarında artışa neden olduğu bildirilmiştir.

Akbulut vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, Erzurum Pasinler yöresinde bulunan perlitin kullanıldığı perlit esaslı geopolimer betonlar üretilmiş ve bu betonların bazı özellikleri incelenmiştir. Perlit, alüminosilikat olarak özgül ağırlığı 2.40 ve ortalama parçacık boyutu 30 µm olan bir malzemedir. Perlit örneğinin bileşimi %69,1 SiO₂; %12,1 Al₂O₃; %1,6 Fe₂O₃ ve %2,5 CaO olarak belirtilmiştir. Çalışmada, 10 M derişimli sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak aktivasyon gerçekleştirilmiştir. Aktivatör çözeltisi/bağlayıcı oranı 0,55 olarak seçilmiştir. Betonlar, en büyük tane boyutu 8 mm olan dere agregası kullanılarak 50 mm ayrıtlı küp kalıplara sarsma tablası ve şişleme yöntemi ile üç tabakada yerleştirilmiştir. Ardından, 72 saat boyunca 90°C sıcaklıkta etüvde kürlenmiştir. Kür süresi tamamlandıktan sonra, numuneler laboratuvar şartlarında belirli bir süre bekletilmiştir. 3; 7; 28 ve 150 günlük bekletme sürelerinin ardından basınç dayanımları ölçülmüş ve sırasıyla 19,7; 16,1; 18,1 ve 21,1 MPa değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, perlit esaslı geopolimer betonların basınç dayanımlarının zamanla arttığını göstermektedir.

Payakaniti vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, C sınıfı uçucu külü kullanarak yüksek kalsiyum içerikli geopolimerlerin yüksek sıcaklık direnci üzerine bir araştırma yürütülmüştür. Uçucu kül, %34,1 SiO₂; %16,5 Al₂O₃; %14 Fe₂O₃ ve %24,3 CaO içeren bir bileşime sahiptir. Aktivatör olarak %98 oranında saf sodyum hidroksit peletleri kullanılarak 10 M derişimli sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat çözeltisi birlikte kullanılmıştır. Çalışmada, sıvı/uçucu kül oranı 0.4 ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1 olan hamurlar üretilmiştir. Bu hamurlar 50 mm ayrıtlı küp kalıplara yerleştirilmiş ve 24 saat boyunca 60°C'de kürlenmiştir. Ardından numuneler plastik örtülerle kaplanarak 7 gün boyunca 25°C sıcaklık ve %50 bağıl nemde bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık deneyleri, 200; 400; 600; 800; 1000 ve 1200°C hedef sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Fırının ısınma rejimi 5°C/dakika olarak ayarlanmış ve hedef sıcaklıkta 1 saat boyunca yakma işlemi yapılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan referans numunenin basınç dayanımı 57.4 MPa olarak belirlenmiştir. 200°C sıcaklık etkisi sonrasında dayanımın 71 MPa'a yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu artışın yüksek sıcaklık etkisiyle geopolimerizasyonun ilerlemesiyle ilişkili olduğu düşünülmüştür. Yüksek sıcaklık direnci deneylerinde, 400; 600; 800; 1000 ve 1200°C etkileri sonrasında dayanımların kademeli olarak azaldığı raporlanmıştır. Bu sıcaklıklara maruziyet sonrasında sırasıyla 65; 40; 30; 31,5 ve 7,0 MPa dayanımları elde edilmiştir. 400°C ve üzerindeki sıcaklıklara maruziyet sonucu dayanım kaybının termal gerilmelerden kaynaklandığı, 1200°C etkisi sonrasındaki keskin düşüşün ise matrisin kristalinite artışından kaynaklanmış olabileceği belirtilmiştir. Araştırmacılar, farklı sıcaklıklara maruz kalmış hamurların XRD spektrumlarını incelemiş ve 60-600°C arasında matrisin kristal yapısında önemli bir değişiklik olmadığını tespit etmişlerdir. Spektrumdaki kamburların 38 N-A-S-H ve C-A-S-H fazlarıyla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Ancak 800°C ve sonrasında XRD spektrumunda ciddi değişikliklerin olduğu gözlemlenmiştir. Piklerin sayısı ve şiddetinin arttığı, önceki kuvars, hematit ve mullit piklerine zeolit, feldspat ve nefelin gibi yeni piklerin eklendiği belirtilmiştir. Bu çalışma, yüksek kalsiyum içerikli geopolimerlerin yüksek sıcaklık direncini değerlendirmekte ve farklı sıcaklıklarda matrisin yapısal değişikliklerini incelemektedir. Sonuçlar, 200°C'ye kadar dayanımın arttığını ve 400°C'den sonra ise kademeli olarak azaldığını göstermektedir. Ayrıca, 800°C ve üzerinde matrisin yapısal değişikliklere uğradığı ve yeni minerallerin oluştuğu belirtilmektedir. Bu bilgiler, yüksek sıcaklık koşullarında kullanılan

geopolimerik malzemelerin performansını değerlendirmede önemli bir katkı sağlamaktadır.

Şahin vd. (2015) endüstriyel tesis atıklarından olan yüksek fırın cürufu ve termik santral uçucu küllerini kullanıp, herhangi bir bazik kimyasal kullanmadan su ile beton üretmişlerdir. Afşin Elbistan uçucu küllerinin içerisinde kireç ve alçıtaşı bulunduğu ifade edilen çalışmada, puzolanların karıştırıldığı kısmi olarak cürufun aktive edilmesinin hedeflendiği ifade edilmektedir. Uçucu küllerin öğütölerek iki farklı formda (orijinal ve öğütölmiş) kullanıldığı ifade edilmektedir. Yüksek fırın cürufunun ise granüle formda İskenderun Demir Çelik tesisinden alındığı belirtilmektedir. Üretilen betonlar kalıplara dökölmiş ve 24 saat sonra çıkarılmıştır. Numuneler kürlenmek üzere oda sıcaklığında ve 80°C de işleme alınmıştır. Beton blokların su emme değerlerinin %9-20 aralığında olduğu bildirilmiştir. Ayrıca tamamı yüksek fırın cürufu ile hazırlanan numunenin 80°C de 28 gün bekledikten sonra ki dayanımının 20,4 MPa olarak ölçölüğü bildirilmiştir.

Karakoç vd. (2016) yaptıkları çalışmada Elazığ ferrokrom tesislerinden elde ettikleri cürufu bağlayıcı olarak kullanıp, NaOH ve Na₂SiO₃ karışımıyla aktive edip geoolimer beton üretimi gerçekleştirmişlerdir. Geopolimer çimento ile yaygın olarak kullanılan portland çimentosunu karşılaştırmak amacıyla dayanım testleri gerçekleştirdikleri çalışmalarında ifade edilmektedir. Elde edilen numuneler 3 gün boyunca 75°C'de kür işlemine tabi tutulmuştur. Sonrasında örnekler oda sıcaklığına çıkarılmış ve belirli sürelerde MgSO₄ çözeltisine maruz bırakılarak dayanımlarındaki değişim gözlenmiştir. MgSO₄ çözeltisine bırakılan tüm numunelerde dayanımlardaki düşüşler tespit edilmiştir. Ancak, söz konusu çalışmada portland çimentolu beton numuneleri ile geopolimer beton numuneleri arasında önemli bir dayanım farkının olmadığı ifade edilmektedir. Dayanımların 25 MPa ile 40 MPa aralığında ölçölüğü ifade edilmektedir.

Koçkal vd. (2017) yaptıkları çalışmada silis dumanı ve Ca(OH)₂-asidik pomza karışımı kullanarak geopolimer beton üretimi gerçekleştirmişlerdir. Geopolimer içerisinde oluşacak gözenekleri gidermek için geopolimer karışım hazırlandıktan sonra %0,01 ağırlıkça alüminyum parçacıklarının, karışıma eklendiği çalışmalarında

ifade edilmektedir. Örneklerin sertleşmesi ve kürlenmesi için sıcak su banyosunda işlem gördüğü belirtilmektedir. Karışımda yer alan silis dumanı ve NaOH miktarının artmasıyla dayanımın arttığı gözlemlenen bu çalışmada geopolimer numunelerin basınç dayanımlarının 4,49 MPa ve 22,8 MPa aralığında değiştiği ifade edilmektedir.

Topçu ve Toprak (2009) yaptıkları çalışmada, termik santral uçucu külü kullanıp geopolimer betonlar üretmişlerdir. Geopolimerin oluşumunda sodyum hidroksit ve sodyum silikat belirli oranlarda karıştırılarak kullanılmıştır. Beton numuneleri, 20 saat boyunca 75°C'de ve 20°C'de olmak üzere iki farklı kür işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada, taban uçucu külü kullanılarak 20 MPa'ya kadar dayanımlara ulaşılabildiği belirlenmiştir. Bu, taban külüyle üretilen geopolimer betonun iyi bir mekanik dayanıma sahip olduğunu göstermektedir. Geopolimerizasyon sürecinde kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi kimyasallar, taban külünün bağlayıcı özelliklerini aktive etmekte etkili olmuştur.

Nazari vd. (2011) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kullanarak geopolimer betonlar üretmişlerdir. Bu çalışmada, 80°C'lik kür sıcaklığına sahip olarak, betonların yaklaşık 60 MPa tek eksenli basınç dayanımlarına ulaşıldığı belirtilmektedir. Geopolimer betonlar, uçucu kül ve organik malzeme küllerinin kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan bağlayıcıların kullanıldığı bir yapı malzemesidir. Bu çalışmada, kullanılan uçucu kül ve organik malzeme külleri, geopolimerizasyon sürecinde aktif hale getirilerek betonun dayanımını artırmıştır.

Olivia ve Nikraz (2012) yaptıkları çalışmada, uçucu kül kullanılarak farklı kür sıcaklıkları, karışım oranları ve alkali yüzdesi değerleriyle geopolimer beton örnekleri üretilmiştir. Çalışmada en yüksek basınç dayanımı 55 MPa ölçülmüştür. Geopolimer betonlar, uçucu kül gibi atık malzemelerin kullanıldığı ve alkali aktivatörlerle aktive edilen bir bağlayıcı sistemle üretilen yapı malzemeleridir. Bu çalışmada, farklı bileşimlerin ve koşulların mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen verilere göre geopolimer betonların portland çimentolu beton numunelerine göre deniz suyuna karışı daha direnç gösterdiği bildirilmiştir. Bu durum, geopolimer betonların deniz suyu gibi agresif ortamlarda daha iyi performans gösterebileceğini göstermektedir.

Chindaprasirt ve Rattanasak (2017) yaptıkları çalışmada, %30 kalsiyum oksit içeren uçucu kül kullanılarak geopolimer beton üretmişlerdir. Beton karışımının %15'ini 8 M sodyum hidroksit, %30'unu sodyum silikat oluşturmaktadır. Beton örnekleri farklı sıcaklık ve sürelerde kür işlemine tabi tutulmuştur. Kür işlemi için kullanılan sıcaklıklar sırasıyla 25; 35 ve 65 °C olarak belirlenmiştir ve kür süreleri ise 7; 3 ve 1 gün olarak uygulanmıştır. Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları 20 MPa ile 40 MPa arasında bildirilmiştir.

Hassan (2018) yaptığı çalışmada, geopolimer beton üretimi için NaOH ve Na₂SiO₃ karışımını tercih etmiş, bağlayıcı olarak uçucu kül kullanmıştır. Beton örnekleri kalıplardan çıkarıldıktan sonra farklı sıcaklıklarda kür işlemine tabi tutulmuştur. Kür işlemi için kullanılan sıcaklıklar sırasıyla 60; 80 ve 100 °C olarak belirlenmiş ve süreleri 1 gün olarak uygulanmıştır. 28 gün sonra yapılan testlerde, en yüksek basınç dayanımı sonucunu 80°C'de kürlenen numune 44,84 MPa olarak vermiştir. Çalışmada ayrıca uçucu küllerle yüksek fırın cürufunun belirli oranda yer değiştirilmesiyle dayanımın 63 MPa'a kadar yükseldiği belirtilmiştir.

Songpiriyakij vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, pirinç kabuğu ve ağaç kabuğu külü gibi yüksek miktarda silis kaynağı olan malzemeler (RHBA), uçucu külle (UK) birlikte kullanılmıştır. UK/RHBA oranı ağırlıkça 100:0; 80:20; 60:40; 40:60; 20:80 ve 0:100 ölçülerinde yer değiştirilmiştir. Çalışmada iki farklı karışım oluşturulmuştur. İlk çalışmada alkali oranları sabit tutulmuş, puzolan oranları değiştirilmiştir. İkinci çalışmada ise puzolan oranları sabit tutulmuş alkali aktifleştiricilerin oranı değiştirilmiştir. Çalışmada, geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde SiO₂/Al₂O₃ oranının etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, en yüksek basınç dayanımının SiO₂/Al₂O₃ oranının optimum değeri olan 15,9 olduğu karışımda 73 MPa değerine ulaşıldığını göstermektedir.

Hanjitsuwan vd. (2014) yaptıkları çalışmada, NaOH konsantrasyonunun geopolimerin fiziksel ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada 8M, 10M, 12M, 15M ve 18M olmak üzere 5 farklı NaOH molar oranı kullanılmıştır. Alkali sıvı/uçucu kül oranı 0,4 ve sodyum silikat/NaOH oranı 0,67 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler, suyunu kaybetmemesi için 1 gün boyunca sarılarak ortam

koşullarında bekletilmiştir. Ardından 40°C'de 24 saat boyunca kürlenene numuneler, 7 gün boyunca ortam koşullarında bekletildikten sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuşlardır. Geopolimerin fiziksel ve elektriksel özellikleri üzerinde NaOH yoğunluğunun etkili olduğu gözlenmiştir. NaOH yoğunluğunun artmasıyla, reaksiyona girmemiş uçucu küllerin tepkimeye girmesi ve dolayısıyla dayanımın artması gözlenmiştir. En yüksek dayanım değeri, 18M NaOH konsantrasyonuna sahip örneklerde 56,0 MPa olarak belirlenmiştir.

Khalifeh vd. (2014) yaptıkları çalışmada, C sınıfı uçucu kül ile elde edilen geopolimerlerin erken dönemde dayanım kazandığını görmeleri üzerine alternatif bir bağlayıcı olarak kullanım potansiyeli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada (6M, 8M ve 10M) olmak üzere farklı molar oranlarda NaOH kullanmışlardır. Numuneler 87°C ile 125°C lerde ve farklı sürelerde (1; 3; 5 ve 7 gün) kürlenmişlerdir. Çalışmada kür sıcaklığının numuneler üzerine etkisi değerlendirilmiş ve sıcaklığın erken dönem dayanımı üzerinde etkili olduğu bildirilmiştir. 87°C'de 1 günlük kür sonrasında en yüksek dayanım değeri 34,47 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç, uçucu kül esaslı geopolimerin erken yaşta yeterli dayanıma ulaşabileceğini ve alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu çalışmada, uçucu kül (UK), orman endüstrisi atık külü (FIWA), pirinç kabuğu külü (PK), sodyum hidroksit (SH), sodyum silikat (SS), su ve agrega gibi kullanılan malzemelerin sahip oldukları fiziksel ve kimyasal kompozisyonları ile üretim ve termin süreci anlatılmıştır.

3.1.1 Uçucu Kül (UK)

Çalışmada kullanılan uçucu kül (UK) Zonguldak ili sınırları içerisinde faaliyet gösteren Çatalağzı Termik Santrali'ne aittir. Çatalağzı uçucu külü, Türkiye'de üretilen kömürlerin yakılması sonucu elde edilen bir kül türüdür. Bu kül, özellikle Türkiye'deki taşkömürlerinin yanmasıyla ortaya çıkar ve diğer kömürlerin yakılmasıyla elde edilen kül türlerinden farklılık gösterir. Bu nedenle, Çatalağzı uçucu külü, Türkiye'deki taşkömürü endüstrisinde özgün bir yan üründür.

Tablo 3.1 Çatalağzı uçucu külünün kimyasal özellikleri

Oksit(%)	UÇUCU KÜL	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	58,73						
Al ₂ O ₃	25,25						
Fe ₂ O ₃	5,77						
S+F+A	89,75				>70,00	>70,00	>50,00
CaO	1,47						
MgO	2,21				<5,00		
SO ₃	0,08	<3,00			<5,00	<5,00	<5,00
K ₂ O	4,05						
N _{a2} O	0,60						
KK	1,12	<5,00	<5,00	<5,00	<10,00	<5,00	<6,00
Cl	0,015	<0,10					
Serb. CaO	0,13	<1,00					
Reak.SiO ₂	34,18	>25,00	>25,00	>25,00			
Reak.CaO	0,65		<10,00	>10,00			

Çatalağzı uçucu külüne ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir. Çatalağzı uçucu külü EN 450-1, 2005 standardında ve ASTM C618-94a, 1998 standardında yer alan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ kimyasalların toplam değerinin %70'in üzerinde olması ve CaO miktarının %10'dan az olması koşullarına uyduğundan sınıfı F olarak belirlenmiştir.

3.1.2 Pirinç Kabuğu Külü (PK)

Doğal liflerin endüstriyel uygulamalarda kullanımı son yıllarda hızla artmıştır. Son gelişmeler arasında pirinç kabuğunun kullanımı da dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalarda, pirinç kabuğunun bileşenlerde yanmadan sonra çok miktarda silika içerdiğini bildirilmiştir (Soltani vd. 2015). Dünyada pirinç üretimi yapılan ülkelerde pirinç kabuğu (PK) atık madde olarak bol miktarda bulunmaktadır ve içeriğindeki bol miktardaki silika onu fazlaca dikkat çeker hale getirmektedir. Ucuz maliyetli oluşu ve aynı grupta yer alan muadil atık doğal liflerden daha yüksek oranda silika içermesi sebebiyle talep görebileceği bildirilmiştir (Matori vd., 2009; Soltani vd., 2015).

Tablo 3.2 Pirinç kabuğu külünün kimyasal özellikleri

Oksit(%)	%
SiO_2	96,52
Al_2O_3	0,58
Fe_2O_3	0,32
CaO	0,59
MgO	0,88
SO_3	0,21
K_2O	2,27
Na_2O	1,08

Tez çalışmasında kullanılacak olan pirinç kabukları Kastamonu ili Tosya ilçesinde bol miktarda üretilmekte olan çeltik fabrikalarından temin edilmiştir.

- **Pirinç kabuğu külünün hazırlanma aşaması**

Pirinç kabuğu külü, daha önce bu işlem için hazırlanmış olan kaplar yardımıyla laboratuvar koşullarında hazırlanmıştır. Pirinç kabukları ortasında ateş yakılacak şekilde düzenlenen kaplara yerleştirilmiş ve karbonizasyon gerçekleşmemesi için tütsüleme metodu ile yavaş yavaş yakılmaya bırakılmıştır. Ardından yanmış olan pirinç kabuğu külü dikkatlice alınmış ve mümkün olduğunca karbon tabakasından arındırılmıştır. Elde edilen pirinç kabuğu külü, istenilen inceliği elde etmek için bilyeli değirmene yerleştirilmiş 1 saat aralıklarla 2 defa öğütülmüştür.



Şekil 3.1 Pirinç kabuğunun yakılması



Şekil 3.2 Pirinç kabuğunun öğütülmesi

3.1.3 Orman Endüstri Atığı Külü (FIWA)

Orman endüstrisi atık külü (FIWA), ahşap ürünleri endüstriyel tesislerinde ortaya çıkan bir yan üründür. Orman endüstri atığının betonlarda kullanılabilme fikri, sürdürülebilir inşaat malzemelerinin araştırılmaya başlandığı ve çevresel etkilerin daha fazla önem kazandığı 2000'li yılların başlarında ortaya çıkmıştır. Bu dönemde, orman endüstri atıklarının yeniden değerlendirilmesi ve atık yönetimi konularında artan ilgi, yapı sektöründe sürdürülebilir ve çevre dostu malzemelerin kullanımına yönelik araştırmaları teşvik etmiştir. Yapılan çalışmalar, orman endüstri atığının yanmadan sonra yüksek miktarda silika içerdiğini ortaya koymuştur. Bu kül, ahşap hammaddesinin yakılması sonucu kazan diplerinde veya baca filtrelerinde birikir. FIWA yüksek silika içeriği ile dikkat çekmektedir. Ayrıca, düşük maliyeti ve diğer doğal elyaflardan daha yüksek oranda silika içermesi nedeniyle tercih edilebileceği bildirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılacak orman endüstrisi atık külü hazır halde Kastamonu ili sınırları içerisinde yer alan SFC Entegre orman ürünleri fabrikasından temin edilmiştir. Kullanılan orman endüstri atığı külü bacada biriken ince tanecik boyutlu olan malzemeden alınmıştır. Kazan altı tabir edilen ve tanecik boyutu iri olan malzeme kullanılmamıştır.

3.1.4 Alkali Aktivatörler

Sodyum hidroksit kimyasal gösterimiyle NaOH genellikle pelet veya katı toz halde bulunan beyaz renkli bir bileşiktir. NaOH, yüksek çözünürlük seviyelerine sahip olduğu için su ve alkalilerle hızlı bir şekilde çözünür ve geopolimer üretiminde sıklıkla tercih edilir. Sodyum silikat kimyasal gösterimiyle (Na_2SiO_3) sıklıkla geopolimer karışımlarda tercih edilmektedir ve karışımlara sertlik sağlar. Aynı zamanda diğer bilinen ismi cam suyu olan sodyum silikat sodyum karbonat ve kuartzın yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmesiyle sonradan oluşan bir yan üründür. Bu işlem sırasında büyük miktarlarda karbondioksit açığa çıkarır (Kamseu vd. 2017).

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 karışım halinde ağırlıkça eşit oranda karıştırılarak birlikte kullanılmıştır. Alkali aktivatör karışımı diğer

malzemelerle karıştırılmadan en az 24 saat önce hazırlanmıştır. Çalışmada NaOH çözeltisi 8 mol olarak planlanmış olup, 320 gram katı halde ki NaOH 1 litre suda çözündürülerek kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ise likit halde %99 saflıkta Koray kimya şirketinden tedarik edilmiştir.



Şekil 3.3 Sodyum hidroksit tanecikleri

Molalite (m) (3.1) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M = n / v \quad (3.1)$$

- Hacim = 1 litre

- $M = n / V$ (1 lt çözücü) = $8 / 1 = 8 \text{ mol / litre} = 8 \text{ molalite (M)}$

Denkleme (3.1)'e göre, çözeltinin molalitesi (M) ile çözünen maddenin mol sayısı (n) arasında ilişkiye bağlı olarak hesaplanmakta ve toplam çözeltinin hacmi (V) 1 litre olarak hesaplarda kullanılmaktadır.

Denklemden yer alan molarite (M), bir çözeltide çözülmüş olan maddenin mol sayısının çözeltinin hacmine oranı olarak tanımlanır. Molarite, çözeltinin molalitesi ve yoğunluğu (ρ) arasındaki ilişkiyle hesaplanabilir (3.2).

$$M = m / \rho \quad (3.2)$$

Verilen denklemde (3.2) m, hesaplanacak olan çözeltinin molalitesini temsil ederken, n çözünen maddenin mol sayısını ifade etmektedir. Çözeltinin molalitesi:

- Mol sayısı = gram cinsinden kütle / molekül ağırlığı

Formülünden yola çıkacak olursak ve NaOH'in molekül ağırlığı ise 40 gram olduğundan

- $8 \text{ mol} \times 40 = 320 \text{ g}$ malzeme 1 litre suda çözündürülmesi gereklidir.

Tablo 3.3 Karışımlarda kullanılan alkali aktivatörler (1 dm³ için)

Karışım	Sodyum Silikat(g)	Sodyum Hidroksit(g)	Molalite
K1-K6	150	150	8

3.1.5 Agregalar

Bu çalışma kapsamında 2 çeşit agrega kullanılmıştır. Bunlardan biri bazalt agregası diğeri silis içerikli agregadır. Karışımda kullanım oranları ağırlıkça eşit olacak şekilde kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Silis içerikli agrega



Şekil 3.5 Bazalt içerikli agrega

3.1.6 Geopolimer Beton Karışım Suyu

TS-EN 1008, (2003) nolu standartlarda yer alan ve gerekli koşulları sağlayan Kastamonu Üniversitesi yapı laboratuvarından temin edilen şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Deney Numunelerinin Üretim ve Kürü

Bu çalışma kapsamında değişen oranlarda uçucu kül, orman endüstri atığı külü, pirinç kabuğu külü kullanılarak toplam 6 grup olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Agrega olarak 2 çeşit agrega tercih edilmiş ve tüm karışımlarda eşit oranlarda olmak üzere eşit olarak karışımlarda kullanılmıştır. Sodyum hidroksit/Sodyum silikat oranı ise 1 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Çalışmaya ait karışım oranları Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4 Karışım oranları

Karışım No	UK (Kg/m)	PK (Kg/m ³)	FIWA (Kg/m ³)
K1	800	-	-
K2	600	200	-
K3	400	400	-
K4	600	-	200
K5	400	-	400
K6	600	100	100

3.2.1 Numune Dökümü ve Kürü

Gerekli standartlara uygun agrega, uçucu kül, orman endüstri atığı külü, pirinç kabuğu külü, Na_2SiO_3 ve NaOH kullanılmıştır. Tasarıma ait tüm kullanılan malzeme miktarları Tablo 3.5 de belirtilmiştir.

Tablo 3.5 Karışımda kullanılan tüm veriler

Karışım No	UK (kg/m^3)	PK (kg/m^3)	FIWA (kg/m^3)	Agrega (kg)	SS/SH (l/m^3)	Hiper Akışkanlaştırıcı (%)	Su (gr/dm^3)
K1	800	-	-	1200	150/150	1	180
K2	600	200	-	1200	150/150	3,5	210
K3	400	400	-	1200	150/150	3,5	210
K4	600	-	200	1200	150/150	3,5	250
K5	400	-	400	1200	150/150	3,5	210
K6	600	100	100	1200	150/150	3,5	210

Karışımlarda yer alan malzemeler hazırlanırken hassas terazi kullanılmıştır. Her bir grupta yer alan malzemeler kendi içerisinde hazırlanıp gruplara ayrılmıştır. Hazırlanan malzemeler mikser ve hobart karıştırıcı (Şekil 3.6) kullanılarak karıştırılmıştır.



Şekil 3.6 Hobart karıştırıcı ve mikser

Geopolimer malzemeler malzeme kalınlığı itibariyle ince malzemelerden oluşması sebebiyle döküm esnasında öncelikle kuru malzemelerin agrega ile karıştırılmasına dikkat edilmiş, yeteri kadar homojen olduktan sonra alkali ilavesi yapılmıştır. Karışım

suyu ise en son ilave edildikten sonra bir müddet daha karıştırılarak Geopolimer beton üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üretimi gerçekleştirilen her bir grup numunenin yayılma çapları (Şekil 3.8) ölçüldükten sonra hazırlanan 40 x 40 x 160 mm ve 50 x 50 x 50 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.7). Betonun ani sıcaklık değişimini engellemek adına üzeri örtülmüş, 24 saat geçtikten sonra numuneler kalıplardan çıkarılmış ve 30°C'de buhar kürü odasına kürlenmeye bırakılmıştır.



Şekil 3.7 40 x 40 x 160 mm ebatlı numuneler



Şekil 3.8 Yayılma tablası testine tabi tutulan geopolimer numune



Şekil 3.9 5x5 cm küp numune



Şekil 3.10 Kür odasına alınan geopolimer numune örnekleri

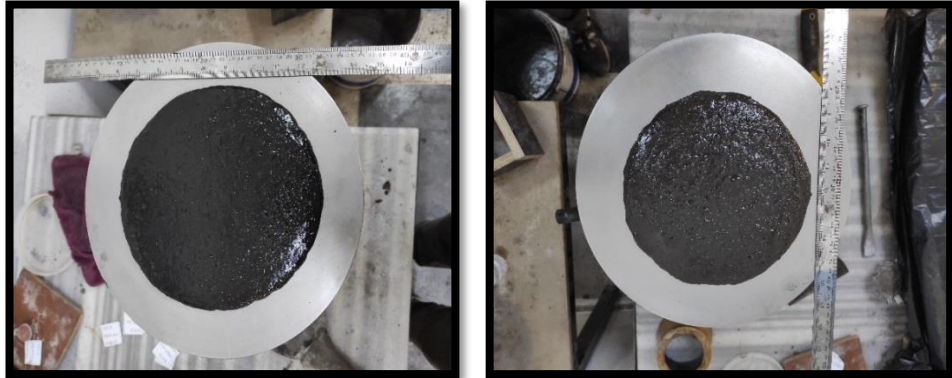
3.3 Üretilen Geopolimer Betonlara Uygulanan Deneyler

3.3.1 Yayılma Çapı Deneyi

Geopolimer betonda yayılma tablası deneyi, taze geopolimer beton karışımının işlenebilirliğini değerlendirmek için kullanılan bir deneydir. Bu deney, TS EN 12350-5 veya ASTM C143 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyin temel adımları şu şekilde sıralanabilir:

- Geopolimer beton karışımı hazırlanır: Geopolimer betonun bileşenlerini (uçucu kül, alüminyum oksit, alkaliler vb.) ve agregaları uygun oranlarda karıştırarak taze geopolimer beton karışımı elde edilir.
- Yayılma tablası hazırlanır: Genellikle konik veya silindirik şekilli yayılma tablasını düz bir yüzeye yerleştirilir ve tablanın alt kısmı nemlendirilir.

- Kalıplar hazırlanır: Silindirik kalıplar temizlenir ve hafifçe yağlanır. Daha sonra kalıplar düz bir yüzeye yerleştirilir.
- Karışım kalıplara doldurulur: Geopolimer beton karışımı yayılma tablasının ortasına dökülür. Karışımı kalıplara doldururken, doldurma işlemi üç aşamada gerçekleştirilir ve her aşamada karışım kontrollü bir şekilde sıkıştırılır.
- Yayılma tablası kaldırılır: Kalıpları doldurduktan sonra, yayılma tablası yavaşça yukarı doğru kaldırılır. Bu, karışımın yayılma özelliğini değerlendirmemize olanak sağlayacaktır.
- Yayılma tablasının çapı ölçülür: Yayılma tablasının üzerindeki betonun çapı ölçülür (Şekil 3.11). Bunun için ölçüm cetveli veya ölçüm aletleri kullanılabilir. Genellikle, yayılma tablasının çapı milimetre cinsinden ölçülür.
- Sonuçlar kaydedilir: Elde edilen yayılma çapı değeri kaydedilir ve analiz için saklanır. Bu, işlenebilirlik özelliğini değerlendirmek ve karışımın özelliklerini anlamak için önemlidir.



Şekil 3.11 Hazırlanan farklı geopolimer numune örnekleri

Yayılma tablası deneyi, taze geopolimer betonun işlenebilirliğini ve yayılma özelliğini belirlemek için kullanılan bir deneydir. Deney sonuçları, karışımın kullanılabilirliği hakkında bilgi sağlar ve betonun uygulanabilirliğini değerlendirmemize yardımcı olur. Yüksek yayılma çapı, karışımın daha akışkan olduğunu ve işlenmesinin daha kolay olduğunu gösterirken, düşük yayılma çapı daha katı bir karışımı ifade eder. Yayılma

tablası deneyi, karışımın optimum işlenebilirlik aralığını belirlemek için önemlidir. Bu deney, karışımın tasarım özelliklerine göre ayarlamalar yapmamıza yardımcı olabilir. Örneğin, karışımın daha akışkan hale getirilmesi gerekiyorsa, su miktarını artırabilir veya kimyasal katkıları kullanabilirsiniz.

Deney sonuçlarını analiz ederken, belirli bir yayılma çapı aralığı veya hedef değer belirlememiz gerekebilir. Bu hedef değer, projenin gerekliliklerine ve kullanım amacına bağlı olarak değişebilir. Örneğin, bir altyapı projesi için daha düşük yayılma çapı gerekebilirken, bir dökme zemin için daha yüksek yayılma çapı tercih edilebilir.

Yayılma tablası deneyi, taze geopolimer betonun işlenebilirliğini değerlendirmenize ve karışımın tasarımını optimize etmemize yardımcı olur.

3.3.2 Taze Birim Hacim Ağırlık Testi

Taze birim hacim ağırlığı beton karışımının işlenebilirliğini, hava içeriğini ve yoğunluğunu değerlendirmek amacıyla ölçülür. Taze birim hacim ağırlık testi kısaca anlatmak gerekirse Hazırlanan beton karışımından temsili bir numune alınır. Numune, genellikle silindirik veya küp şeklinde olabilir. Numune alma işlemi, taze betonun işlenebilirliğini koruyacak şekilde yapılmalıdır. Alınan numune, uygun boyutlardaki bir kalıp içine dökülür. Kalıp, betonun şeklini alabileceği ve belirli bir hacmi temsil edecek şekilde tasarlanmış olmalıdır. Numunenin ağırlığı ve hacmi kullanılarak taze birim hacim ağırlığı değeri hesaplanır. Bu değer, birim hacimdeki betonun ağırlığını temsil eder. Genellikle kg/m^3 veya g/cm^3 olarak ifade edilir. Hesaplama (3.3) bağıntısıyla yapılmıştır.

$$X=y/z \quad (3.3)$$

X= Taze Birim Hacim Ağırlığı

y= Numune Net Ağırlığı (Toplam numune ağırlığı-Kalıp ağırlığı)

z= Numune Hacmi

3.3.3 Yoğunluk

Geopolimer betonun yoğunluğu ASTM C642-97 standardında belirlenen koşullar dikkate alınarak numunelerin başlangıç ve son ağırlıklarının ölçülmesi yoluyla (3.4), (3.5) ve (3.6) bağıntıları kullanılarak belirlenmiştir, bunlar en az 24 saat boyunca 105±5 °C'de etüvde sabit bir ağırlığa ulaştıkları tespit edilen numunelerdir.

$$\text{Görünür yoğunluk (g / cm}^3\text{)} = (x / (x-t)) d \quad (3.4)$$

$$\text{Batırma işleminden sonra kütle yoğunluğu} = (y/(z-t))d \quad (3.5)$$

$$\text{Kütle yoğunluğu, kuru (g / cm}^3\text{)} = (x / (z-t)) d \quad (3.6)$$

Eşitlikte;

x = Etüv kurusu ağırlığı, g

y = Doygun yüzey numune ağırlığı, g

z = Kaynatılan numune ağırlığı, g

t = Su içindeki numune ağırlığı, g

d = su yoğunluğu = 1 mg / m³ = 1 g / cm³.

3.3.4 Su Emme ve Porozite Oranı Belirlenmesi Testleri

Betonun porozitesi, su, hava, asit ve baz gibi maddelerin küçük deliklerden geçebileceği, gözeneklerle dolu bir yapı anlamına gelir. Porozite, bir malzemenin tüm gözeneklerinin hacminin dökme malzemenin hacmine oranı olarak tanımlanabilir. Beton, karışımların kalıba yerleştirilmesi sırasında yetersiz sıkıştırma veya karışımın bileşimine bağlı olarak gözeneklerin oluşmasına neden olabilir. Bu gözenekler, betonun porozitesini oluşturur ve su, hava ve diğer maddelerin beton içine nüfuz etmesine izin verir. Porozite, betonun dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gözeneklerin varlığı, betonun içyapısında zayıf bölgeler oluşturabilir ve dayanımını azaltabilir. Ayrıca, suyun içeri girebilmesi betonun donma-çözülme hasarına daha duyarlı hale gelmesine ve kimyasal etkilere karşı daha hassas olmasına neden olabilir.

Geopolimer betonda porozite ve su emme deneyi, betonun su geçirgenliği ve su tutma özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir deneydir. Bu deney, genellikle TS EN 480-5, TS EN 12390-7 veya ASTM C642 gibi standartlara uygun olarak gerçekleştirilir. Bu çalışmada ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler, etüvde 100 ± 5 °C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutma işlemi, numunelerin içindeki suyun tamamen buharlaşmasını ve numunenin kuru ağırlığının belirlenmesini sağlar. Bu süre sonunda numunelerin kuru ağırlığı belirlenmiştir. Kurutulmuş numuneler daha sonra su dolu bir kap içine yerleştirilerek 24 saat bekletilir. Bu süre boyunca, numunelerin su ile doygun hale gelmesi sağlanır. Böylece porozite ölçümü sırasında numunenin tüm gözeneklerinin su ile doldurulması sağlanmış olur. Daha sonra numuneler su içerisinde kaynatılarak soğutulur. Bu işlem, numunelerin içindeki hava boşluklarının su ile yer değiştirmesini sağlar. Daha sonra numunelerin su içindeki ağırlığı Arşimet prensibi kullanılarak belirlenir. Numunelerin su içindeki ağırlığı, numunenin toplam poroz hacmini ve suyun yerini belirlemek için önemlidir.

Bu yöntemler, numunenin porozitesini ve su tutma kapasitesini belirlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Kuru ağırlık, doygun ağırlık ve su içerisindeki ağırlık ölçümleri, numunenin porozitesini ve su emme yeteneklerini değerlendirmede kullanılır.



Şekil 3.12 U-Test Arşimet deney düzeneği

Numunelerin su emme oranı ve porozitesi (3.7) ve (3.8) bağıntılarıyla bulunmuştur.

$$\text{Ağırlıkça su emme oranı (\%)} = ((y-x) / x) * 100 \quad (3.7)$$

$$\text{Porozite (\%)} = ((z-x) / (z- t)) * 100 \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

x = Etüv kurusu ağırlığı, g

y = Doygun yüzey numune ağırlığı, g

z = Kaynatılan numune ağırlığı, g

t = Su içindeki numune ağırlığı, g

3.3.5 Kılcal Su Emme Testi

Geçirgenlik veya su emme, betonun gözenekli yapısından kaynaklanan bir özelliktir. Beton, içerisindeki gözenekler aracılığıyla suyun geçmesine izin verebilir. Kılcal basınç, betonun gözenekli yapısında suyun hareket etmesini sağlayan bir etkidir. Beton, su emme özelliği sayesinde çevredeki nem veya su kaynaklarından su alabilir. Bu özellik, betonun dayanıklılığını ve performansını etkileyebilir. Betonun su emme oranı, geçirgenlik ve gözenek yapısı gibi faktörlere bağlıdır. Daha yüksek geçirgenliğe sahip betonlar, daha hızlı su emme eğilimindedir. Su emme oranı, betonun içerisindeki suyun gözenek sistemi tarafından emilme hızını belirler. Betonun su emme oranı, yapısal özelliklerine, bileşimine ve uygulama yöntemine bağlı olarak değişebilir. Su emme oranı, betonun dayanıklılığı, donma-çözünme direnci ve kimyasal etkilere karşı direnci gibi faktörlerle ilişkilidir. Bu nedenle, betonun su emme özelliği yapısal tasarımlarda ve beton karışımlarının optimize edilmesinde önemli bir faktördür.

Geopolimer betonda kılcal su emme deneyi, betonun su geçirgenliği ve porozite özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir deneydir. Bu deney, TS EN 13264 veya ASTM C1585 gibi standartlara uygun olarak gerçekleştirilir.

Kılcal su emme, bir numunenin suya maruz kalan yüzeyi boyunca suyun emilmesi sonucunda kütle artışının bir fonksiyonudur. Bu süreç, beton veya diğer poröz

malzemelerin su emme yeteneklerini değerlendirmek için kullanılır ve genellikle standart bir yöntemle gerçekleştirilir. Numune, suya batırılan bir yüzeyi ile suya maruz bırakılır. Belirli bir süre boyunca numunenin kütle değişimi ölçülür. Kılcal su emme hızı, numunenin emme kapasitesini ve suyun içine nüfuz etme yeteneğini yansıtan bir değerdir. Numunenin suya maruz kalacak yüzeyi hazırlandıktan ve başlangıç kütlesi ölçüldükten sonra diğer tüm yüzlere bir parafin uygulanır. Bu önlem, numunenin yalnızca bir yöne doğru su emme işlemi yapmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Parafin uygulaması, numunenin diğer yüzeylerinin su emmesini engeller. Bu şekilde, kılcal su emme testi sırasında suyun yalnızca suya maruz kalan yüzeyden emilmesi ve diğer yüzeylere doğru yayılmaması sağlanır. Böylece, numunenin su emme hızı ve özellikleri, yalnızca belirli bir yüzeyden emme sürecine bağlı olarak değerlendirilebilir. Parafin, hidrofobik (su itici) bir madde olduğu için suyun geçişini engeller. Numunenin diğer yüzeylerine parafin uygulanarak su emme süreci sadece hedeflenen yüzeyde gerçekleşir ve sonuçlar daha doğru bir şekilde elde edilir.

Bu çalışma da geçirgenlik testi için numunelerin alt yüzeyleri suya temas edecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.13). Numuneler suya maruz bırakıldıktan sonra, sudan çıkarıldıklarında 110°C sıcaklıkta bir etüvde kurutulmuşlardır. Ayrıca, numunenin çevre yüzeylerinde akış emici olmayan bir malzeme kullanılarak kapatılmıştır. Bu prosedür, numunenin su emme özelliklerini ve geçirgenliğini değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Numunelerin alt yüzeylerinin suya temas etmesi, suyun numunenin içine nüfuz etmesine ve geçirgenlik özelliklerini test etmeye olanak tanır. Daha sonra, numuneler sudan çıkarıldığında etüvde kurutulur. Kurutma işlemi, numunenin suyu dışarı atmasına ve geçirgenlik özelliklerini daha iyi değerlendirmeye yardımcı olur. 110°C sıcaklık, kurutma işleminin etkili bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak için kullanılan bir sıcaklıktır. Son olarak, numunenin çevre yüzeyleri akış emici olmayan bir malzeme ile kapatılmıştır. Bu önlem, numunenin diğer yüzeylerinden su emmesini engeller ve geçirgenlik testinin yalnızca alt yüzeyden yapılan su emme üzerinde odaklanmasını sağlar. 24 saat sonunda numunelerin emdiği su miktarı 0,1 gram hassasiyetindeki bir teraziyle ölçülerek kaydedilmiştir. Geçirgenlik, gözenekli bir malzemenin su emme ve iletim eğilimini gösteren bir özelliktir. Numunelerin su kabında bekletilmesiyle, bu numunelerin su emme oranları

belirli bir zaman aralığında ölçülmüştür. Gözenek boşluklarından numunelere suyun girmesi, geçirgenliğin varlığını gösterir.



Şekil 3.13 Hazırlanan numunelere uygulanan su emme testi

3.3.6 Basınç Dayanımı Testi

Geopolimer betonda basınç dayanımı deneyi, betonun dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılan bir deneydir. Bu deney, TS EN 12390-3, TS EN 1015-11 veya ASTM C39 gibi standartlara uygun olarak gerçekleştirilir. Geopolimer beton numuneleri uygun boyutlarda kübik veya silindirik hazırlanır. Silindirik numuneler genellikle çapı 100 mm, yüksekliği 200 mm olan numunelerdir. Küp şeklinde numuneler ise genellikle 150 mm x 150 mm x 150 mm boyutlarında olabilir. Numuneler dökme ve sıkıştırma yöntemiyle hazırlanır. Bu çalışmada 40 x 40 x 160 mm numuneler ve 50 x 50 mm numuneler kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 3, 7, 28, 56, 90 günlük kür süresi sonrası şekil (3.14) de gösterildiği gibi basınç dayanımları test cihazı yardımıyla incelenmiştir.



Şekil 3.14 Hazırlanan geopolimer beton numunelerinin basınç testi

Basınç Dayanımları (3.9) bağıntısıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma = P/A \quad (3.9)$$

P: Uygulanan kuvvet (N)

A: Kesit alanı (mm²)

σ : Basınç dayanımı (MPa)

3.3.7 Eğilme Dayanımı Testi

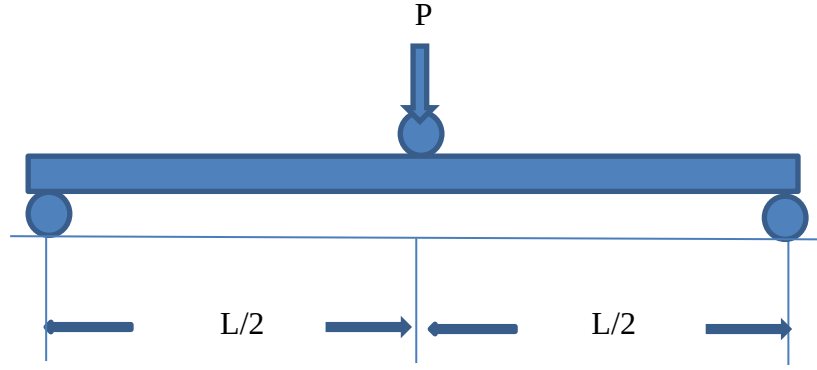
Eğilme dayanımı deneyi, bir malzemenin bükülme stresine karşı direncini ölçmek için kullanılan bir deneydir. Geopolimer betonun eğilme dayanımı deneyi, betonun mekanik dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılan bir deney yöntemidir. Bu

deney, genellikle TS EN 12390-3, TS EN 1015-11 veya ASTM C39 gibi uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilir. Bu standartlar, deneyin nasıl yapılması gerektiği, numune hazırlığı, yük uygulaması ve sonuçların değerlendirilmesi gibi detayları belirler. Deneyin genel adı "üç nokta eğilme deneyi" veya "bend testi" olarak da bilinir. Bu deneyde, standartlara uygun olarak hazırlanan ve belirli bir geometriye sahip numuneler kullanılır. Numuneler genellikle dikdörtgen prizma şeklindedir ve belirli bir boyut ve oranlara sahiptir.

Deney sırasında, numune bir eğilme cihazına yerleştirilir ve üst yüzeyine bir yük uygulanır. Bu yük, numunenin orta noktasına veya belirli bir mesafeye uygulanır. Numunenin alt yüzeyi ise desteklenir. Deneyin sonucunda, numunenin eğilme dayanımı, elastisite modülü ve diğer mekanik özellikleri belirlenebilir. Bu veriler, betonun yapısal performansını değerlendirmek ve tasarım için kullanılan dayanıklılık değerlerini belirlemek için önemlidir. Bu çalışmada 40 x 40 x 160 mm numuneler ve 50 x 50 mm numuneler kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 3; 7; 28; 56; 90 günlük kür süresi sonrası şekil (3.15) de gösterildiği gibi basınç dayanımları test cihazı yardımıyla incelenmiştir.



Şekil 3.15 Eğilme test cihazı ve hazırlanan numunenin teste tabi tutulması



Bir malzemenin eğilme gerilmesi (σ)(3.10) bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma = 1.5 PL/bd^2 \quad (3.10)$$

Eşitlikte yer alan değerler ise şunlardır;

σ : Malzemenin eğilme gerilmesi (MPa)

P: Uygulanan yük (kN)

L: Numunenin mesnet arasındaki uzunluğu (100 mm)

b: Numunenin genişliği (40 mm)

d: Numunenin kalınlığı (40 mm)

3.3.8 Donma Çözülme Deneyi

Çimento esaslı yapı malzemeleri, servis ömrü boyunca çeşitli fiziksel, kimyasal veya biyolojik etkilere maruz kalabilir ve bu etkiler malzemenin performansının zamanla azalmasına ve ömründen önce işlevini ve dayanımını yitirmesine neden olabilir. Bu etkilerden biri de tekrarlı donma-çözülme etkisidir. Donma-çözülme çevrimleri, betonun bulunduğu ortama, oluşan sıcaklık farklarına, betonun nem durumuna, suyun donma hızı gibi faktörlere bağlı olarak değişen bir şiddetle gerçekleşir. Sürekli tekrarlanan donma-çözülme süreci, betonda hasara neden olmaya başlar. Betondaki hasar, çatlamlar, yüzeyde soyulma ve dökülmeler şeklinde kendini gösterebilir.

Donma-Çözülme deneyi, beton veya diğer yapı malzemelerinin donma ve çözülme çevrimi altında maruz kaldıklarında dayanıklılıklarını değerlendirmek için yapılan bir deneydir. Donma-çözülme döngüleri, malzemelerin suya doyurulduğu, ardından

düşük sıcaklıklarda dondurulduğu ve tekrar çözöldüğü bir süreçtir. Bu çalışma da donma çözölme testi 25 döngü olacak şekilde uygulanmıştır. Bu test, yapı malzemelerinin donma ve çözölme koşullarında nasıl davrandığını ve bu süreçte meydana gelen hasarları belirlemek için önemlidir. Donma-çözölme döngüleri, suyun genişmesi nedeniyle malzemelerin içerisindeki gözeneklerin ve çatlakların oluşmasına, büyümesine ve genişlemesine neden olabilir. Bu da malzemenin dayanıklılığını etkileyebilir. 25 döngü, malzemenin bu stres altında nasıl davrandığını ve potansiyel hasarlara karşı ne kadar dayanıklı olduğunu değerlendirmek için genellikle kullanılan çeşitlerden biridir. Ancak, testin tam sayısı ve parametreleri, öncelikli standartlara, projelere veya laboratuvar protokollerine bağılı olarak değişebilir.

Betonun kesit boyunca çatlaması, yoğun ve uzun süreli donma-çözölme etkisine maruz kalırken, yüzeydeki hasarlar ise çevremizde daha sık karşılaşılan bir durumdur. Bu durumlar, betonun yapısal bütönlüğünü ve görünümünü etkileyebilir (Erdem ve Öztürk 2012).

Donma-çözölme etkisine karşı betonun dayanıklılığını artırmak için bazı önlemler alınabilir. Örneğin, beton karışımında uygun oranda hava sürükleyici katkı maddesi kullanılabilir, betonun donma ve çözölme sürecinde genişmesine yer açacak boşluklar oluşturulabilir. Ayrıca, betonun su geçirgenliğini azaltmak için su itici katkıları kullanılabilir. Bu önlemler, betonun donma-çözölme hasarını azaltmaya yardımcı olabilir ve betonun servis ömrünü uzatabilir. Ancak, beton yapının tasarımı, uygulama süreci ve bakımı da önemlidir ve donma-çözölme etkilerine karşı dayanıklı bir yapı elde etmek için bu faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir.

Donma-çözölme etkisi, beton yapılar için ciddi bir sorun olabilir ve bu etkiye maruz kalmanın önlenmesi veya azaltılması önemlidir. Donma-çözölme etkisine karşı alınabilecek bazı önlemler ve beton yapıların dayanıklılığını artırmak için yapılabilecekler şunlar olabilir;

- **İyi bir beton karışımı:** Betonun donma-çözülme hasarına karşı dayanıklılığını artırmak için doğru karışım oranları kullanılmalıdır. Doğru oranlarda çimento, agrega ve su kullanmak, betonun dayanıklılığını artırabilir.
- **Hava sürükleyici katkı maddesi kullanımı:** Beton karışımına hava sürükleyici katkı maddesi eklemek, betonda donma-çözülme etkisine karşı direnci artırır. Hava sürükleyici katkı maddesi, betonda mikroskobik hava boşlukları oluşturarak, donma sırasında suyun genişmesine ve betonun çatlamasına engel olur.
- **Su itici katkıları:** Beton karışımına su itici katkıları eklemek, betonun su geçirgenliğini azaltır ve donma-çözülme etkisine karşı koruma sağlar. Bu katkıları, betonun içerisindeki gözeneklerin su emmesini engelleyerek, donma sırasında suyun genişmesine karşı direnci artırır.
- **İyi sızdırmazlık:** Beton yapının sızdırmazlığının sağlanması, suyun yapının içine sızmasını engeller ve donma-çözülme etkisini azaltır. Bu nedenle, beton yapının düzgün bir şekilde tasarlanması ve uygulanması önemlidir. Su sızıntıları ve nemin kontrol altına alınması için etkin su yalıtımı sağlanmalıdır.
- **Bakım ve onarım:** Beton yapılarda düzenli bakım ve onarım yapılması, donma-çözülme hasarının önlenmesine yardımcı olur. Beton yapılarda oluşan çatlaklar, soyulma veya dökülmelerin hızlı bir şekilde onarılması, yapıya dayanıklılık kazandırır.
- **İyi drenaj:** Beton yapının etrafında iyi bir drenaj sistemi bulunması, suyun birikmesini ve donma-çözülme etkisini azaltır. Su birikintileri, beton yapının altında veya etrafında donma-çözülme döngüsünü tetikleyebilir, bu nedenle etkili bir drenaj sistemi önemlidir.

Donma-çözülme etkisi, beton yapılar için ciddi bir tehdit oluşturduğundan, beton yapıların tasarım ve uygulama aşamalarında donma-çözülme etkisine karşı dikkatli önlemler alınmalıdır. Bunlar arasında;

- **Uygun beton sınıfı seçimi:** Donma-çözölme dayanımı yüksek olan beton sınıflarının kullanılması tercih edilmelidir. Özellikle soğuk iklim bölgelerinde, donma-çözölme dayanımı yüksek betonlar kullanmak önemlidir.
- **Agrega seçimi:** Agregaların donma-çözölme direnci önemlidir. Dayanıklı ve donma-çözölme etkisine karşı dirençli agregalar kullanılmalıdır. Ayrıca, agreganın boyutu ve gradasyonu da betonun donma-çözölme dayanımını etkiler.
- **Su/çimento oranı:** Beton karışımında su/çimento oranı düşük tutulmalıdır. Düşük su/çimento oranı, betonun sıkıştırılabilirliğini ve yoğunluğunu artırarak, donma-çözölme etkisine karşı dayanıklılığı artırır.
- **Geçirimsizlik:** Beton yapının geçirimsizliği sağlanmalıdır. Su geçirgenliğini azaltmak için su itici katkıları kullanılabilir. Ayrıca, beton yüzeylerin düzgün bir şekilde kaplanması veya koruyucu kaplamaların uygulanması, donma-çözölme etkisine karşı koruma sağlar.
- **Bakım:** Beton yapının düzenli bakımı önemlidir. Çatlaklar, delaminasyon veya yüzey bozulmaları tespit edildiğinde hızlı bir şekilde onarılmalıdır. Ayrıca, yapıya zarar verebilecek su birikintileri, kar, buz veya tuz birikintileri gibi unsurların düzenli olarak temizlenmesi gerekmektedir.
- **Tuz kullanımı:** Karla mücadele amacıyla kullanılan tuzlar, donma-çözölme etkisini artırabilir. Bu nedenle, tuz kullanımının kontrol altında tutulması veya alternatif yöntemlerin tercih edilmesi önemlidir.

4. TARTIŞMA VE BULGULAR

4.1 Yayılma Çapı Deneyi Sonuçları

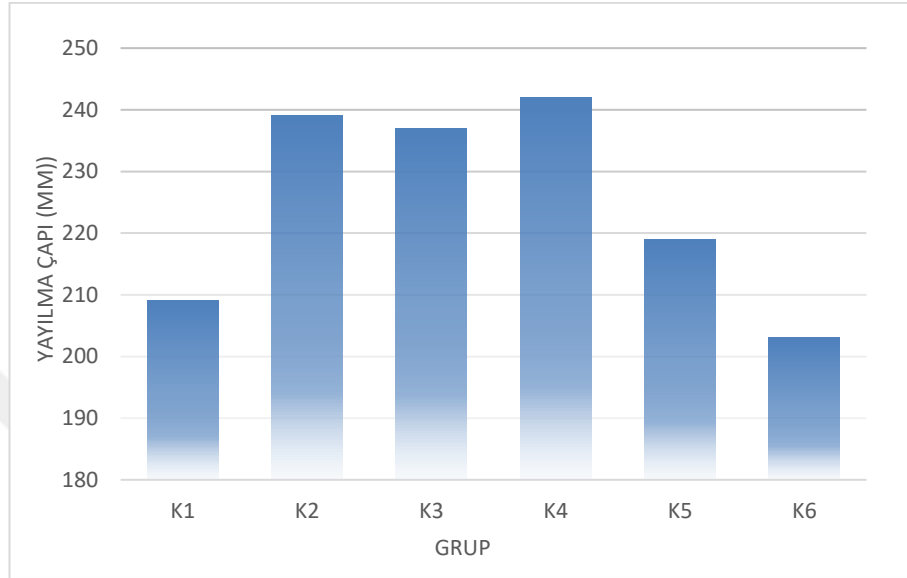
Yayılma çapı deneyi genellikle betonun işlevselliği ve işlenebilirliğiyle alakalı fikir edinebilmek amaçlı en çok tercih edilen araştırmalardan birisidir. Üretilen geopolimer beton numunelerinin standart ölçüdeki koninin içerisine konarak yayılma tablasına yerleştirilmesi, ardından 25 düşüş yapılarak tabla üzerindeki yayılan betonun çapı ölçülerek bulunur. Uygulanan deney sonucunda numunelerdeki yayılma çapları 20-24 cm arasında değiştiği görülmüştür. Değişik oranlarda karıştırılan PK, FIWA, UK karışımli örneklerin yayılma çapları tablo 4.1 de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Yayılma çapları

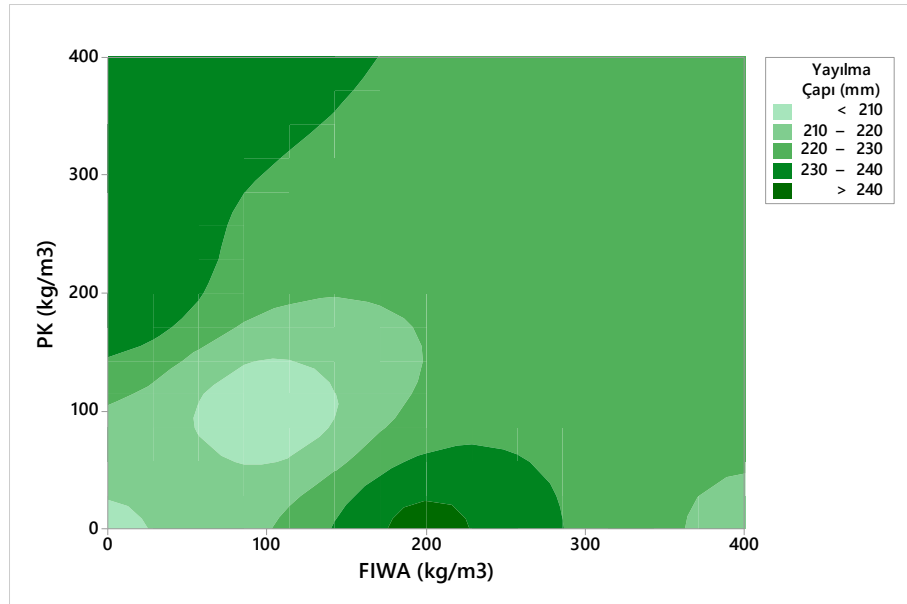
Karışım No	Yayılma Çapı(mm)
K1	209
K2	239
K3	237
K4	242
K5	219
K6	203

Bu çalışma kapsamında bağlayıcı olarak değişen oranlarda (PK), (FIWA) ve (UK) kullanılmıştır. Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 de görüleceği üzere hazırlanan geopolimer numuneler incelendiğinde en düşük yayılma çapının %100 UK içeren K1 ve %75 UK, %12,5 PK ve %12,5 FIWA içeren K6 nolu karışıma ait olduğu görülmüştür. En düşük yayılma çapına sahip 2 numune ortak olarak incelendiğinde en yüksek UK içeren karışımlar olduğu görülmüştür. Sırasıyla K1 nolu karışımda bağlayıcı olarak tamamen UK kullanılmıştır. K6 Nolu karışımda ise 600 kg/m^3 UK, 100 kg/m^3 PK ve 100 kg/m^3 FIWA kullanılmıştır. En yüksek yayılma çapına sahip olan karışım ise 600 kg/m^3 UK ve 200 kg/m^3 FIWA içeren K4 nolu karışımdır. %75 UK %25 FIWA içeren K4 ve %50 UK %50 FIWA içeren K5 nolu karışımlarda yer alan FIWA değişiminde yayılma çapı ciddi oranda düşüş yaşamıştır. Bununla beraber benzer oranda olmasına rağmen

%75 UK %25 PK içeren K2 ve %50 UK %50 PK içeren K3 nolu PK'nın kullanıldığı karışımlarda hemen hemen aynı yayılma çapları gözlenmiştir. FIWA'nın fazla kullanılması yayılma çapını düşürmüştür. Buda bu malzemenin yapışma özelliği olduğunu gösterebilir.



Şekil 4.1 Farklı karışım oranlarına göre hazırlanan geopolimer beton örneklerinin yayılma çapı değerleri



Şekil 4.2 PK ve FIWA karışım oranlarına göre yayılma çapı değişimleri

Şekil 4.1 tek başına incelendiğinde %75 UK %25 PK içeren K2, %50 UK % 50 PK içeren K3 ve %75 UK %25 FIWA içeren K4 nolu karışımlar birbirine yakın yayılma çapı değerlerine sahip olduğu, PK ve FIWA'nın hemen hemen benzer özellikler

gösterdiği, ortalama yayılma çapı dikkate alındığında optimum kullanım oranının %50 UK, %25 PK ve %25 FIWA olacağı görülmüştür. Ancak Şekil 4.2 incelendiğinde PK ve FIWA'nın yüksek kullanım oranlarında birbirinden farklı özellikler gösterdiği PK'nın tek başına yüksek oranlarda kullanımında yayılma çapı artarken FIWA'nın yüksek oranda kullanımında yayılma çapı değerlerinde azalış olacağı görülmektedir. Bu durumda FIWA ve PK kendi içerisinde değerlendirildiğinde FIWA'nın tanecik boyutunun PK'dan daha küçük olduğu ve daha az poroz bir yapı teşkil ettiği, bu nedenle akışkanlığı daha düşük geopolimer üretimine neden olmuştur. Tüm karışım gruplarında kullanılan malzemelerin tanecik yüzey alanlarının yüksek olması ve malzemelerin inceliği dikkate alındığında elde edilen beton örneklerinde betonda herhangi bir ayrışma olmamıştır. Bu puzolanların işlenebilirliği ve malzeme yapısı sebebiyle taze betondaki kıvamı etkilemesi ile açıklanmıştır (Habeeb ve Mahmud, 2010; Nair vd., 2013; Van Tuan vd., 2011).

4.2 Taze Birim Hacim Ağırlık Hesabı

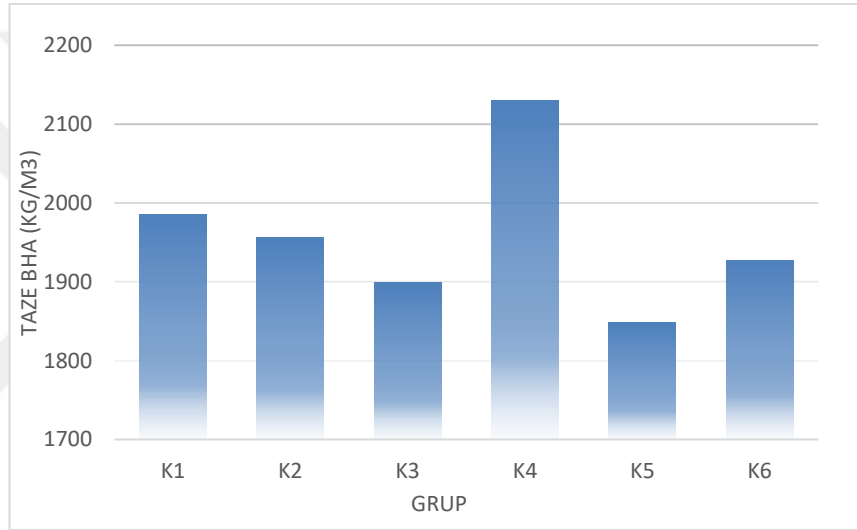
Taze birim hacim ağırlık hesabı genellikle oluşturulan karışımlar hakkında genel bilgi edinmek amacıyla yapılan, kullanılan malzemenin uygunluğu, fiziksel ve kimyasal deneylere taban hazırlayan testlerden birisidir. Hazırlanan geopolimer numuneler belirli ölçüdeki kalıba alınıp ağırlıkları saptanmış ve tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Karışımların hesaplanan taze birim hacim ağırlıkları

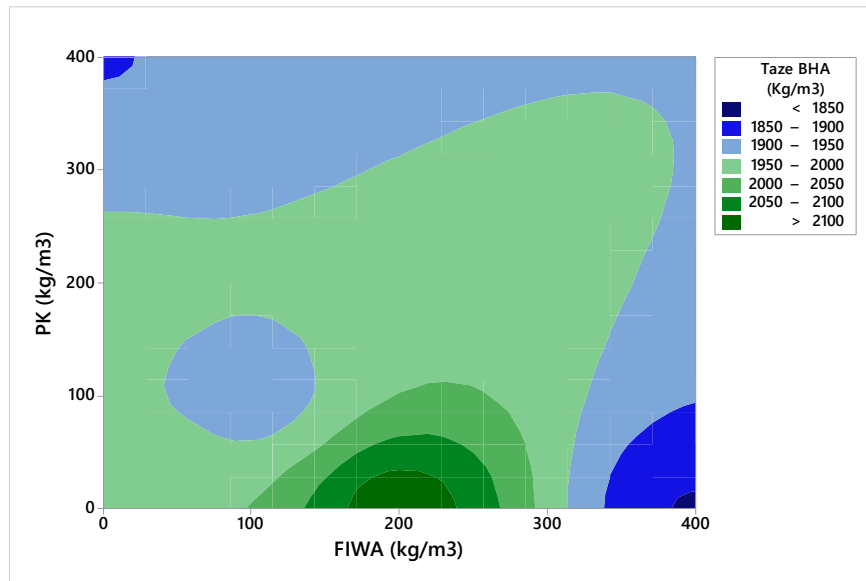
Karışım No	Taze Birim Hacim Ağırlıkları (kg/m ³)
K1	1985,51
K2	1956,52
K3	1898,55
K4	2130,43
K5	1847,82
K6	1927,54

Tablo 4.2 ve Şekil 4.3 incelendiğinde en düşük birim hacim ağırlığa sahip 2 numunenin %50 UK %50 PK içeren K3 ve %50 UK %50 FIWA içeren K5 numaralı karışımlar olduğu görülmüştür. Bu 2 karışıma bakıldığında, ağırlıkça %50 PK ile %50

FIWA kullanılan karışımlar olduğu görülecektir. Geopolimer betonda bağlayıcı olarak kullanılan bu 2 puzolan geleneksel bağlayıcılardan yoğunluk olarak düşük olması sebebiyle bu sonuçlar elde edilebileceği bazı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Habeeb ve Mahmud, 2010). Aynı zamanda Nair vd. (2013)' de çalışmalarında PK 'nın yoğunluğunun geleneksel bağlayıcılardan çok daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Bu iki malzeme kullanılarak hafif beton üretilebileceği veya düşük yoğunluğun istendiği betonlar üretilebileceği öngörülebilir. Ayrıca taze BHA olarak en yüksek değere sahip %75 UK %25 FIWA içeren K4 nolu karışımın belirleyici bir farklılığı görülmemiştir.



Şekil 4.3 Farklı bağlayıcı malzemelerle oluşturulan karışımların taze birim hacim ağırlıkları



Şekil 4.4 PK ve FIWA kullanımına göre taze BHA değerleri

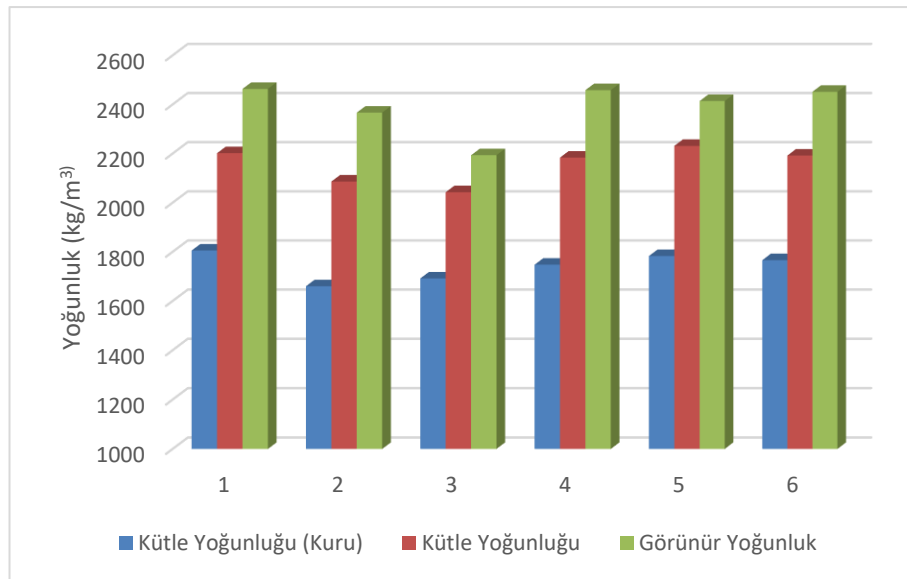
PK ve FIWA kullanımı incelendiğinde (Şekil 4.4) PK kullanımının artmasına bağlı olarak taze birim hacim ağırlıkta düşüşe neden olmasına rağmen, FIWA kullanımında ideal orana kadar kullanımında artış sağlarken artan FIWA kullanımında yeniden düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. FIWA ve PK'nün benzer özellikler gösterdiği, FIWA'nın PK'ne göre yoğunluk değerinin fazla iken PK tanecik boyutunun daha küçük olmasından kaynaklanmıştır.

4.3 Yoğunluk Testi Sonuçları

Geopolimerlerin yoğunluk değerleri ASTM C642-97 standartlarında yer alan koşullara göre belirlenmiş, Tablo 4.3 de gösterilmiştir. Yoğunluk değişimleri ise Şekil 4.5 de gösterilmiştir.

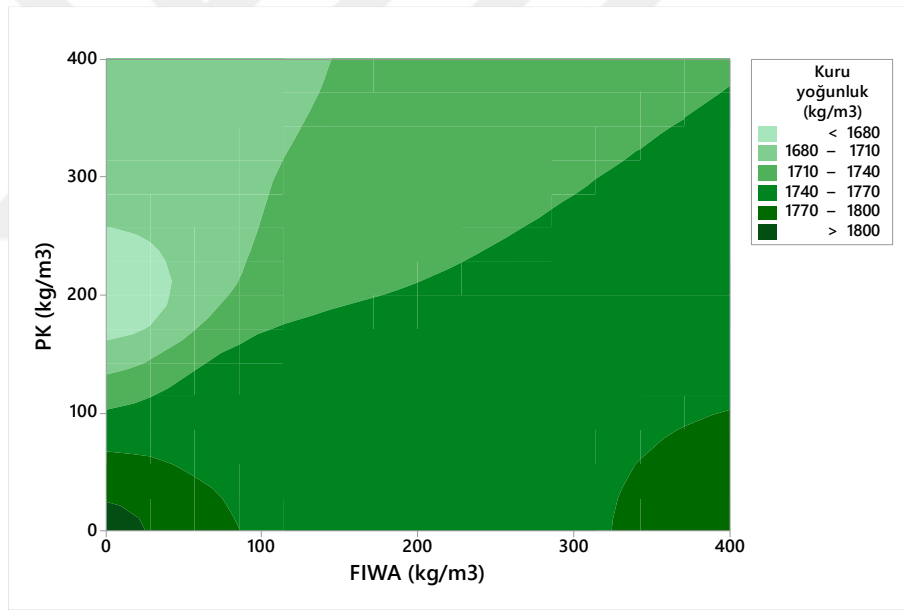
Tablo 4.3 Geopolimer betonların yoğunlukları (kg/m³)

Karışım No	Kütle Yoğunluğu (Kuru)	Kütle Yoğunluğu	Görünür Yoğunluk
K1	1805,37	2201,75	2463,24
K2	1659,96	2086,36	2366,76
K3	1691,74	2042,90	2193,51
K4	1747,87	2183,78	2458,38
K5	1782,93	2231,44	2414,02
K6	1766,13	2192,01	2451,40



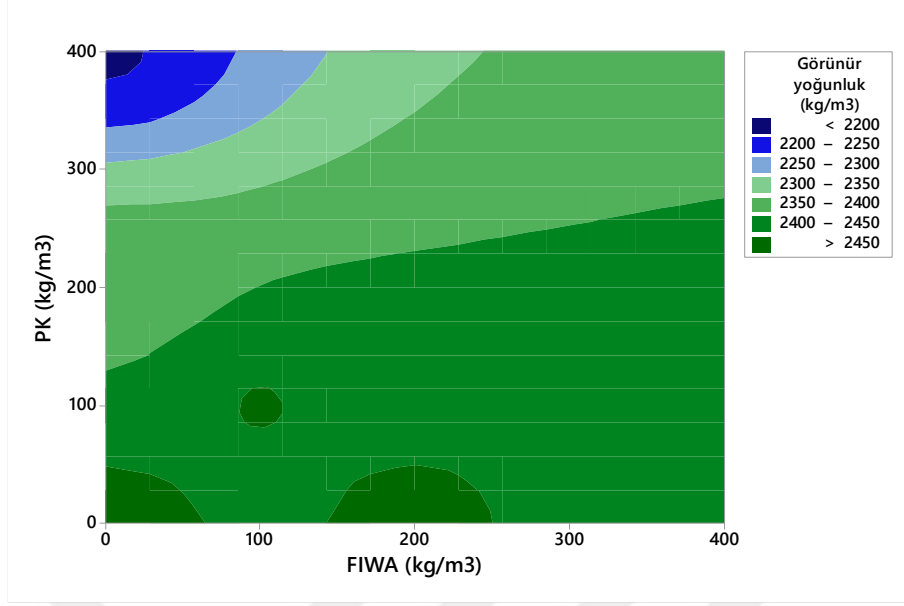
Şekil 4.5 Geopolimer beton karışımlarının farklı yoğunluk değerleri

Tablo 4.3 incelendiğinde %100 UK içeren K1, %75 UK %25 FIWA içeren K4, %50 UK %50 FIWA içeren K5 ve %75 UK, %12,5 PK, %12,5 FIWA içeren K6 numaralı karışımların yüksek kütle yoğunluğuna ve görünür yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Bu, malzemenin sıkı bir yapıya sahip olduğunu ve daha yoğun olduğunu gösterir. Bu özellikler genellikle malzemenin dayanıklılığını ve mukavemetini artırabilir. %25 PK %75 UK kullanılan K2 ve %50 PK %50 UK kullanılan K3 numaralı karışımlar daha düşük kütle yoğunluğu ve görünür yoğunluğa sahiptir. Bu malzemenin daha hafif ve daha az yoğun olduğunu gösterir. Daha düşük yoğunluğa sahip malzemeler genellikle daha hafif ve daha kolay işlenebilir olabilir. K1, K4, K5 ve K6 numaralı karışımlar sahip oldukları yüksek yoğunluk değerleriyle daha sıkı bir yapıya sahip olabilir. Bu, malzemenin dayanıklılığı ve yapısal performansı açısından avantajlı olabilir.



Şekil 4.6 PK ve FIWA kullanımının kuru yoğunluk üzerindeki değişimleri

Şekil 4.6 da farklı oranda PK ve FIWA kullanımının kuru yoğunluk üzerindeki olası etkileri incelendiğinde PK kullanımında kuru yoğunluğun FIWA'ya göre daha az olması PK'nın yoğunluk değerinin daha düşük olabileceği görüşünü desteklemektedir. Buna rağmen PK ve FIWA yoğunluk değerleri itibarıyla geleneksel beton çeşitlerinden daha hafif olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.7 PK ve FIWA kullanımının görünür yoğunluk değişimleri

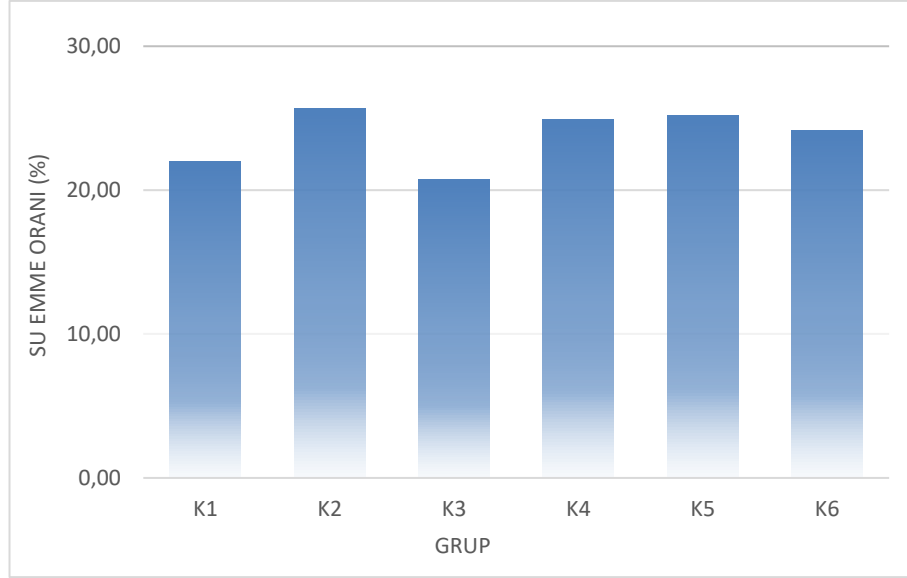
Şekil 4.7 de PK ve FIWA kullanımlarının üretilcek geopolimer betonlarda olası etkileri görülmektedir. PK' nün yoğun kullanımlarında görünür yoğunluk değerleri FIWA'nın yoğun ve yalnız kullanıldığındakinden daha düşük olduğu görülmektedir.

4.4 Su Emme Oranı ve Porozite Deneyi Sonuçları

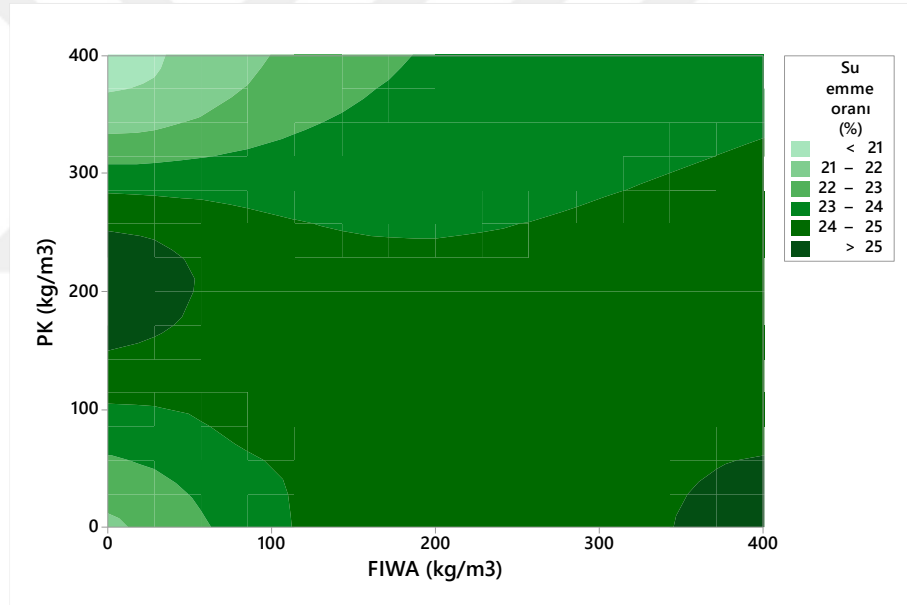
Geopolimerlerde su emme testi, malzemenin su emme kapasitesini belirlemek için yapılan bir deneydir. Bu test, malzemenin porozite özelliklerini değerlendirmek ve su geçirgenliği üzerinde bilgi sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Su emme geopolimer betonların geçirgenlik ve reaksiyon seviyelerini gösteren son derece önemli bir faktördür. Ken vd. (2015)'ne göre genellikle yüksek bir geopolimerizasyon derecesi daha az gözenekli ve geçirgen bir geopolimer matrisinin oluşmasına olanak sağlar. Bu çalışmada farklı karışımlara uygulanan su emme oranı deneyine ait sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Geopolimer numunelere ait su emme oranları

Karışım No	Su Emme Oranları (%)
K1	21,96
K2	25,69
K3	20,76
K4	24,94
K5	25,16
K6	24,11



Şekil 4.8 Karışım gruplarına göre su emme oranları



Şekil 4.9 PK ve FIWA kullanımına göre karışımlardaki su emme değerleri

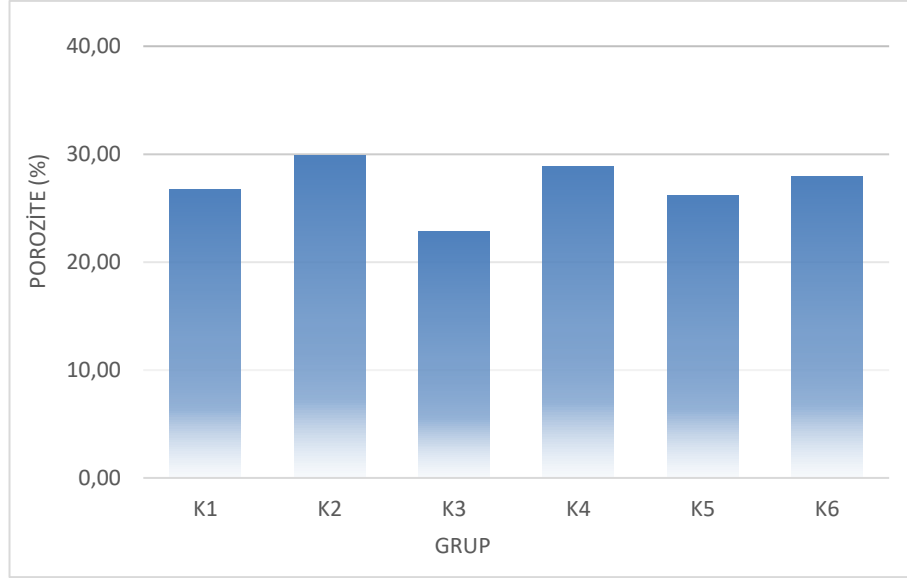
Daha yüksek porozite değerleri, malzemenin su emme kabiliyetini artırabilir. Gözenekler ve boşluklar suyun malzeme içine daha fazla nüfuz etmesine ve birikmesine izin verebilir (Chi vd., 2018; Givi vd., 2010). Bu durum, malzemenin suya karşı daha hassas olabileceğini ve çeşitli suya bağlı hasarlara daha yatkın olabileceğini gösterebilir. Djobo vd. (2016)'ne göre genel olarak yoğunluk değerleri gözeneklilik yani porozite arttıkça azalmaktadır. Diğer bir durum ise daha düşük porozite değerleri olup, malzemenin su geçirgenliğini azaltabilir ve su emme kabiliyetini sınırlayabilir. Bu, malzemenin suya karşı daha dirençli olabileceğini ve daha uzun ömürlü

olabileceğini gösterebilir. Fapohunda vd. (2017) çalışmalarında PK kullanımıyla daha düşük porozite değerleri elde ettiklerini bildirmişlerdir.

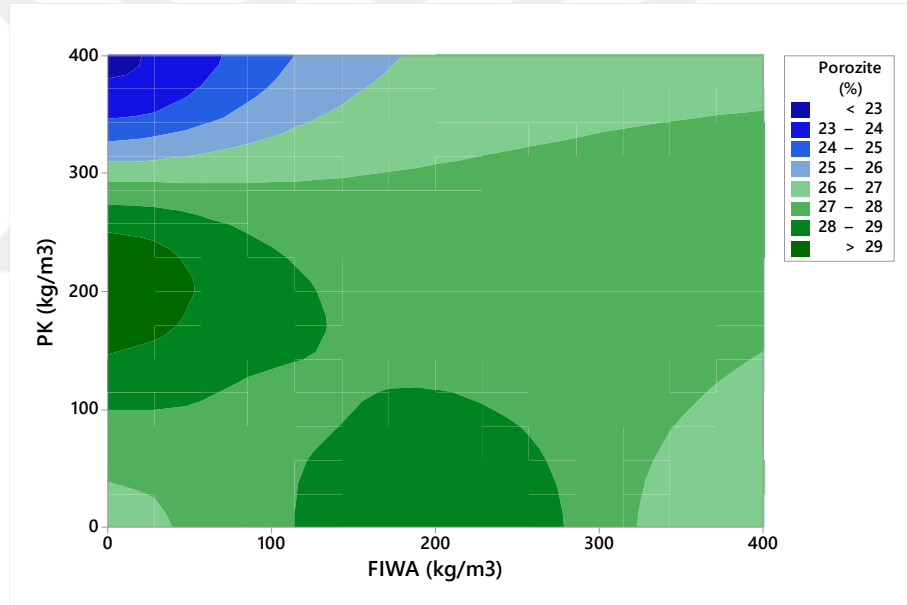
Tablo 4.5 Geopolimer numunelere ait porozite değerleri

Karışım No	Porozite Değerleri (%)
K1	26,71
K2	29,86
K3	22,88
K4	28,90
K5	26,14
K6	27,95

Tablo 4.5 deki verilere göre, ağırlıkça %50 UK ile % 50 PK'nın kullanıldığı K3 nolu karışım daha düşük porozite değerine sahiptir. Bu nedenle daha yoğun ve suya daha dayanıklı olabilir. %100 UK içeriğine sahip K1 ve %50 UK %50 FIWA içeriğine sahip K5 nolu numunelerin porozite değerlerine bakıldığında hemen hemen aynı değerleri verdiği görülmektedir. Bu sonuca bakılarak UK ve FIWA'nın benzer yoğunluk değerlerine sahip olabileceği düşünülebilir. %75 UK ve %25 PK içeren K2 ve %75 UK ve %25 FIWA içeren K4 en yüksek porozite değerine sahip 2 numunedir. Bu 2 numune benzer porozite değerlerine sahiptir. %50 UK ve %50 PK içeren K3 numaralı karışımın diğer numunelerle karşılaştırıldığında görülüyor ki karışımlara yapılan UK ilavesi karışımlarda porozite ve su emme oranlarının artışına sebep olmaktadır. Bu da yapılan çalışmalarda bazı yazarlar tarafından benzer sonuçlar elde edilerek bildirilmiştir (Benli vd., 2017; Benli, 2019). Safiuddin vd. (2011) çalışmalarında daha yüksek oranda PK kullanımında betondaki su emme değerinin düşeceğini bildirmişlerdir. Bu da bu çalışma da yer alan %50 PK kullanımlı K3 nolu karışımın daha az su emme değerlerine sahip olmasını desteklemektedir.



Şekil 4.10 Grupların porozite değerleri



Şekil 4.11 PK ve FIWA kullanılan geopolimer beton karışımlarında porozite değerleri

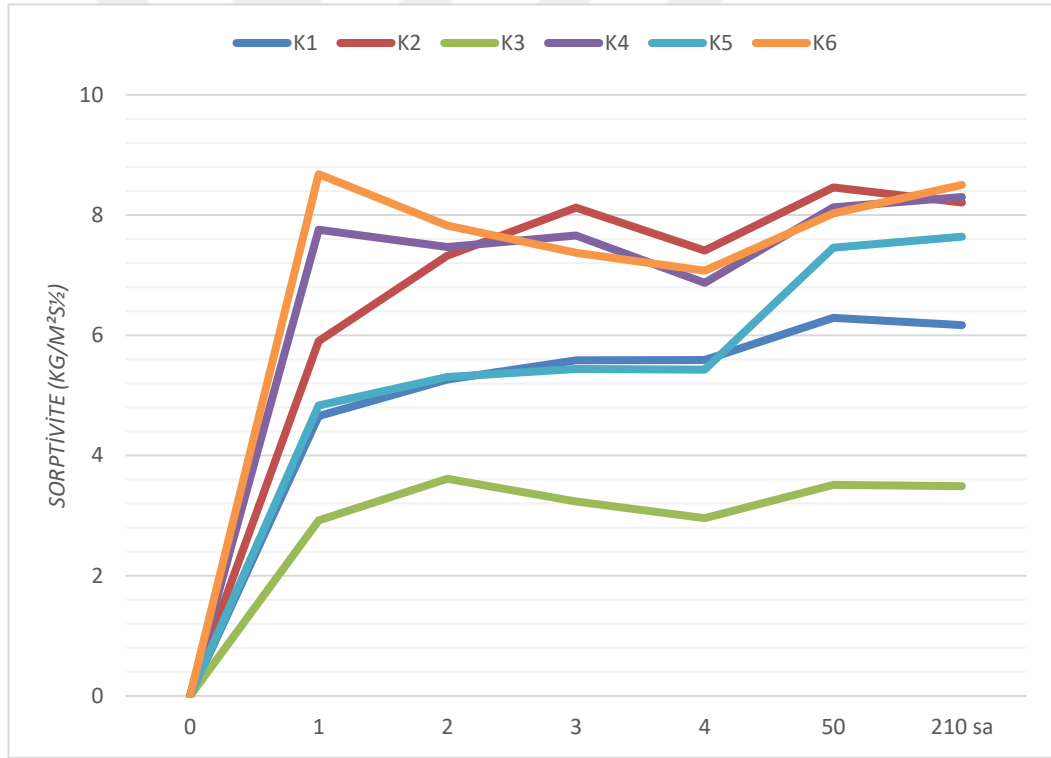
Şekil 4.10 yalnız başına değerlendirildiğinde UK oranının ağırlıkça toplam karışımın %50 veya daha fazlasını oluşturduğu karışımlarda karışımın porozite oranlarının en yüksek durumuna ulaştığı görülmüştür.

4.5 Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

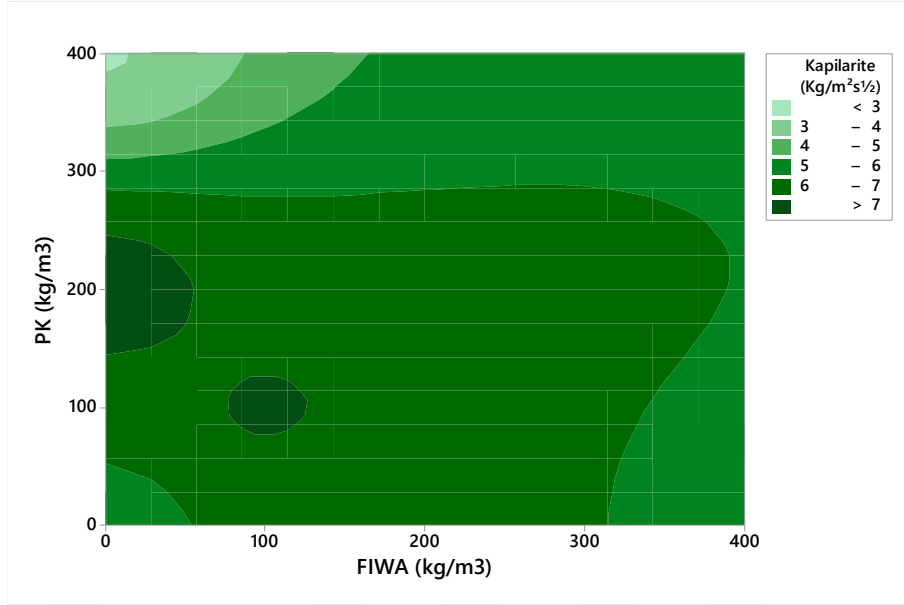
Hazırlanan farklı geopolimer karışımlar gerekli etüv şartları uygulandıktan sonra su emme kabiliyetlerinin araştırılması için deneye tabi tutulmuş ve bulunan değerler Tablo 4.6 da gösterilmiştir.

Tablo 4.6 Kılcal su emme değerleri (Sorptivite)(Kg/m²s^{1/2})

Karışım No	0. saat	1. saat	2. saat	3. saat	4. saat	50. saat	210. saat
K1	0	4,658	5,261	5,582	5,586	6,290	6,170
K2	0	5,904	7,327	8,121	7,409	8,460	8,210
K3	0	2,922	3,613	3,234	2,957	3,510	3,490
K4	0	7,758	7,466	7,658	6,872	8,130	8,300
K5	0	4,834	5,306	5,439	5,429	7,460	7,640
K6	0	8,68	7,823	7,370	7,074	8,030	8,500



Şekil 4.12 Karışımların zamansal su emme grafiği



Şekil 4.13 PK ve FIWA kullanılan geopolimer beton karışımlarında gözlenen kapilarite değerleri

Tablo 4.6 ve Şekil 4. 12 de yer alan veriler birlikte incelendiğinde tüm gruplarda 1. saatte ciddi kapilarite değerleri olduğu gözlemlenmiştir. %50 UK ve %50 PK içeren K3 nolu karışım 1. Saat itibariyle diğer karışım gruplarının neredeyse $\frac{1}{2}$ oranında kapiler su emme değerine ulaşmıştır. 1. Saat sonunda en yüksek su emme değerine sahip karışım grubu %75 UK, %12,5 PK ve %12,5 FIWA içeren K6 nolu karışımdır. Karışımlarda yer alan UK oranının artması su emme miktarında artışa sebep olduğu düşünülmektedir. Bu da yapılan çalışmalarda bazı yazarlar tarafından benzer sonuçlar bildirilmiştir (Benli, 2019; Karahan ve Atış, 2011; Shaikh ve Supit, 2015).

K3 nolu karışımın diğer karışımlara oranla su emme değerinin az olmasının içerisinde kullanılan PK'den kaynaklandığı düşünülmektedir. Yine FIWA kullanımı ile oluşturulan K5 nolu grupta da diğer karışımlara oranla nispeten daha düşük su emme oranı değerleri gözlemlenmiştir.

4.6 Basınç Dayanımı Test Sonuçları

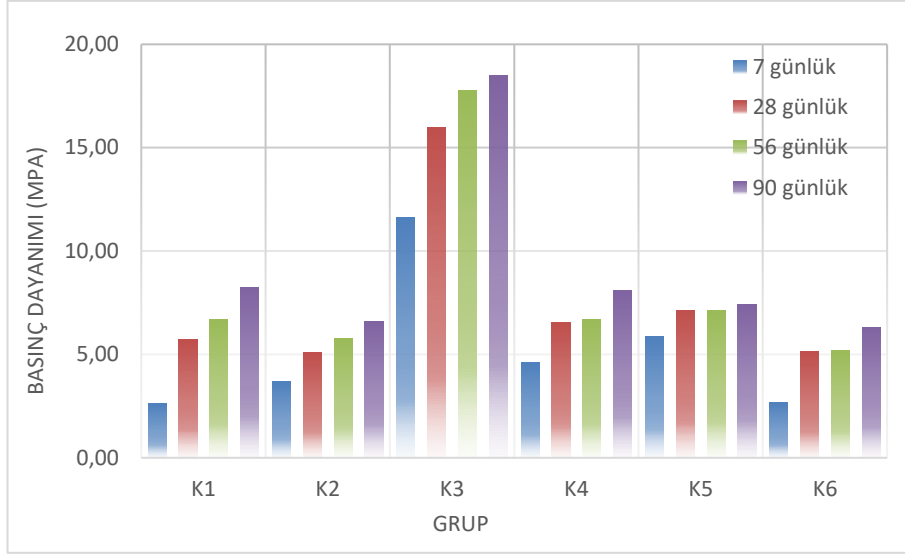
Farklı oranlarda uçucu kül (UK), Pirinç kabuğu külü (PK) ve Orman endüstrisi atık külü (FIWA)'nın kullanıldığı bu çalışmada elde edilen geopolimerler 28 gün boyunca 30 °C sıcaklıkta kürlendikten sonra oda sıcaklığına alınmıştır. Tablo 4.9 da karışımlara

ait 3; 7; 28; 56 ve 90 günlük basınç dayanımları yer almaktadır. Şekil 4.10 da karışımların zamansal basınç dayanımı değişimi gösterilmiştir.

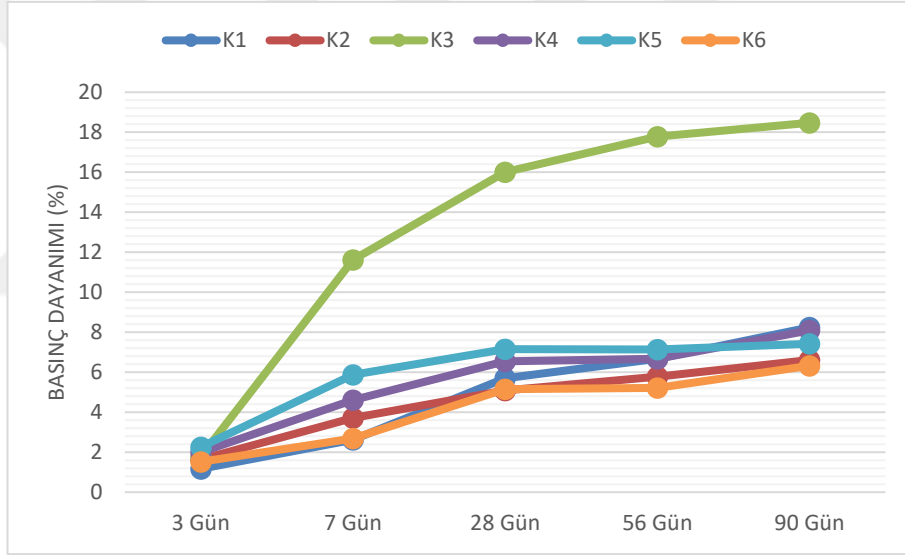
Tablo 4.7 Geopolimer betonların basınç dayanımları

Karışım No	Basınç Dayanımı (MPa)				
	3 Gün	7 Gün	28 Gün	56 Gün	90 Gün
K1	1,17	2,63	5,7	6,67	8,24
K2	1,64	3,71	5,09	5,78	6,61
K3	1,78	11,62	16	17,78	18,47
K4	2,00	4,61	6,54	6,67	8,09
K5	2,26	5,87	7,15	7,13	7,42
K6	1,52	2,69	5,15	5,21	6,32

Tablo 4.7 incelendiğinde 3. Günde 2,26 MPa dayanım gösteren ağırlıkça %50 UK ve %50 FIWA kullanılan K5 nolu karışımın en iyi erken dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Ardından en yüksek basınç dayanımına sahip grup %75 UK %25 FIWA içeren K4 nolu karışım grubudur. Buda göstermektedir ki erken dönemde en erken dayanıma ulaşan karışımlar FIWA katkılı karışımlar olmuştur. Yine değişen oranlarda sırasıyla %25 ve %50 PK içeren K2 ve K3 numaralı karışımlar FIWA içeren karışımlardan sonra en erken dayanıma ulaşan karışım grubu olmuştur. Erken dönemde en düşük dayanıma sahip K1 nolu karışım %100 UK içeren gruptur. Ancak sonrasında 7 günlük sonuçlara bakıldığında ağırlıkça %50 UK ile %50 PK kullanılan K3 nolu karışımın yüzdesel anlamda çok daha fazla basınç dayanımı artışı gösterdiği görülmektedir. 3- 7 gün arasındaki artış yüzdesel olarak değerlendirilecek olursa 2. en iyi dayanım artışının yine %50 UK ve %50 FIWA kullanılan K5 nolu karışımında olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin PK ve FIWA kullanılan numunelerin geopolimerizasyon işleminin devam ettiği ve daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymasıyla ilişkili olabileceği tahmin edilmektedir. Yüksek kür sıcaklığının geopolimerde kullanılan puzolan veya bağlayıcıların çözünmesini ve polikondenzasyonunu artırdığını bazı araştırmacılar bildirmişlerdir (Bakharev, 2005; Cho vd. 2017). %100 UK içeren K1 ve %75 UK, %12,5 PK ve %12,5 FIWA içeren K6 nolu karışımlar ise nispeten diğerlerine oranla 7-28 gün aralığında yüzdesel olarak daha fazla basınç dayanımı artışı göstermiştir.



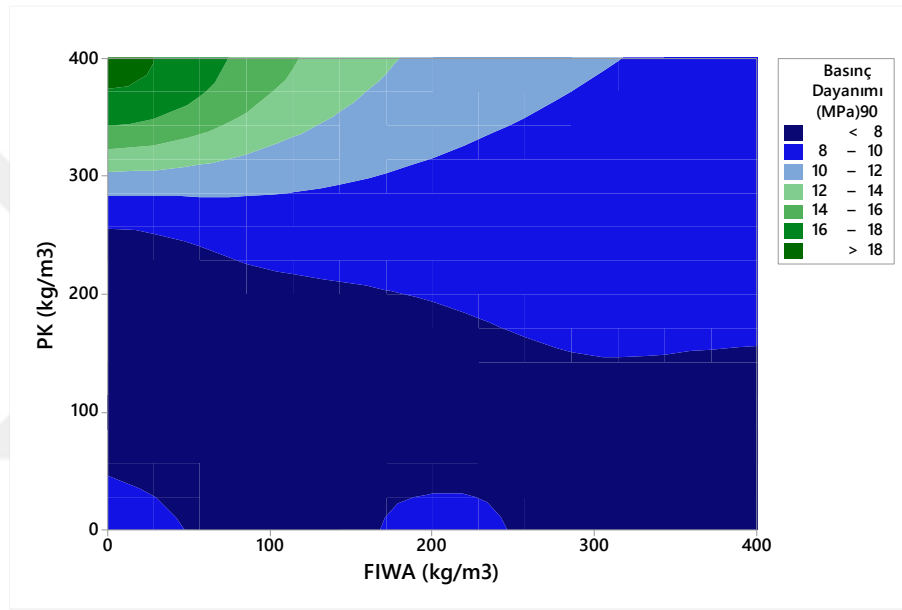
Şekil 4.14 Geopolimer beton basınç dayanımı değişimleri



Şekil 4.15 Geopolimer beton zamansal basınç dayanımı değişimi

Şekil 4.15 de tüm karışımlarda 28 gün den sonra dayanım artışlarında ciddi azalmalar görülmüş olmasına rağmen PK kullanılan K3 nolu karışımda 56 güne kadar ciddi artışlar gözlemlenmiştir. Buradan da PK'nın ağırlıkça %50 oranda kullanıldığı K3 nolu karışımda geopolimerizasyon işleminin devam ettiği, bu yönüyle PK'nın diğer puzolanik malzemelerden ayrıştığı söylenebilir. Tablo 4.7 de ve Şekil 4.15 de görüldüğü gibi K3 nolu karışım diğer karışımlara kıyasla daha yüksek dayanıma sahiptir. PK kullanımının bu etkide önemli bir rol oynayabileceği düşünülebilir. K3 numaralı karışımındaki yüksek dayanım sonuçlarına göre PK potansiyel olarak beton karışımlarında kullanılabilir katkılardan biri olabilir ve betonun dayanımını artırabilir.

Bu düşünce literatürde yer alan çalışmalarla da desteklenmektedir (Arıöz vd., 2009; Davidovits, 2008; Nazari vd., 2011; Songpiriyakij vd., 2010). K3 karışım grubu dışındaki tüm gruplar nihai dayanımının yaklaşık %99'unu 28 günde alırken %50 PK içeren K3 karışım grubu 90 güne kadar dayanım kazanmaya devam etmiştir. PK kullanılan geopolimer beton karışımlarında devam eden geopolimerizasyon sürecini hızlandırmak, mekanik kabiliyetlerini kazandırmak için aktivatör tipi ve yoğunluğunu artırabilir veya elde edilen beton numunelerine farklı kür seçenekleri uygulanabilir (Aredes vd. 2015; Bing-hui vd. 2014; Gasparini vd. 2015; Lemougna vd. 2016;).



Şekil 4.16 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda basınç dayanımına etkisi

Şekil 4. 16 da PK ve FIWA 'nın geopolimer betonun dayanımı üzerine olası etkilerinin analiz edildiği grafik verilmiştir. Görüldüğü üzere PK kullanımı arttıkça beton dayanımında bariz farklılıklar olduğu gözlemlenmektedir. Bu yönüyle PK'nın, FIWA'ya göre hazırlanacak olan geopolimer beton örneklerine dayanım kazanımında daha fazla katkı sunacağı görülmektedir.

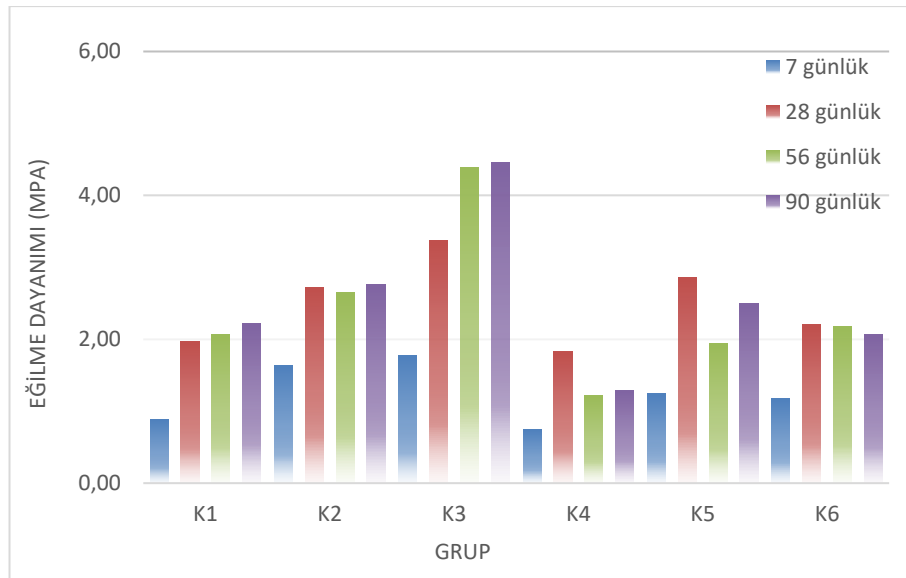
4.7 Eğilme Dayanımı Sonuçları

Elde edilen geopolimer numunelere ait eğilme dayanım değerleri Tablo 4.8 de gösterilmiştir. Eğilme dayanımlarının zamana bağlı değişimi ise şekil 4.17 de gösterilmiştir.

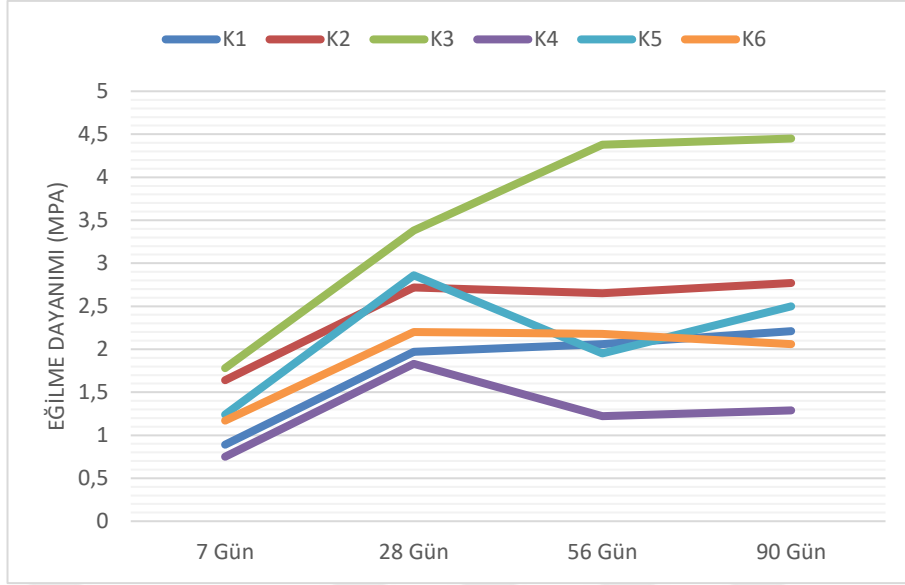
Tablo 4.8 Üretilen geopolimer betonların farklı günlerdeki eğilme dayanımları

Karışım No	Eğilme Dayanımı (MPa)			
	7 Gün	28 Gün	56 Gün	90 Gün
1	0,89	1,97	2,06	2,21
2	1,64	2,72	2,65	2,77
3	1,78	3,38	4,38	4,45
4	0,75	1,83	1,22	1,29
5	1,24	2,86	1,95	2,50
6	1,17	2,20	2,18	2,06

Tablo 4.8 incelendiğinde eğilme dayanımının 7. Günde en yüksek değerinin %50 UK %50 PK içeren K3 nolu karışım ve %75 UK %25PK içeren K2 nolu karışım olduğu görülmüştür. En düşük eğilme dayanımına sahip grubun ise %75 UK %25 FIWA içeren K4 nolu grup olduğu gözlenmiştir. 7-28 gün aralığında yüzdesel olarak artışta yine PK'nın UK ile %50 /%50 oranlarda kullanıldığı K3 nolu karışım belirgin şekilde öne çıkmıştır. FIWA kullanılan gruplarda 28-56 gün aralığında düşüşler gözlemlenmiş, sonrasında tekrar dayanım artışı gözlemlenmiştir. Bu durumun devam eden geopolimerizasyon sürecinden kaynaklanmıştır. Ağırlıkça yarı yarıya UK ve PK kullanılan K3 numaralı karışım diğer karışımların ortalama eğilme dayanımlarının 2 katı eğilme dayanımı göstermiştir.

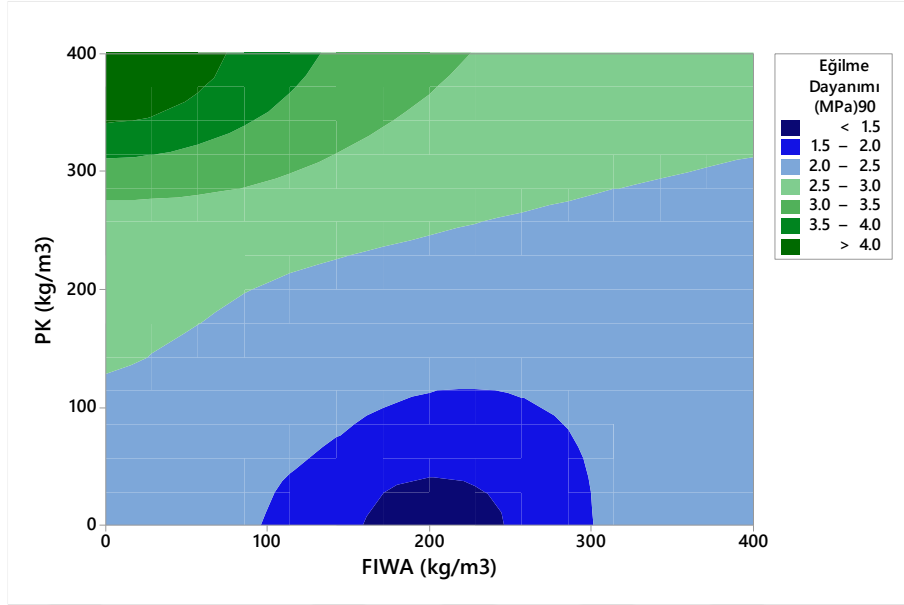


Şekil 4.17 Geopolimer betonların eğilme dayanım değerleri



Şekil 4.18 Geopolimer betonların zamana bağlı eğilme dayanımı değişimleri

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 incelendiğinde hazırlanan geopolimer beton karışımlarının K5 nolu karışım haricinde nihai eğilme dayanımlarının hemen hemen 56. Günde yaklaşık olarak %99 tamamlandığı gözlemlenmektedir. Karışım gruplarında 7-28 gün aralığında görülen lineer artış 28 günde durmuş, 28 günden sonra ise %50 UK %50 PK içeren K3 nolu karışımda hemen hemen aynı lineer artış hızı devam etmiştir. Hem basınç dayanımındaki hem de eğilme dayanımındaki bu artış süresi gözönüne alındığında PK kullanılacak geopolimer betonda geopolimerizasyon sürecinin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi, dayanım süreçlerinin öne çekilmesi için kür sıcaklığının, aktivatör türü ve oranının veya geopolimerizasyonu hızlandıran diğer seçeneklerin uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu düşünce literatürde yer alan çalışmaların incelenmesiyle edinilmiştir (Alonso ve Palomo, 2001; Aredes vd., 2015; Bing-hui vd., 2014; Fernandez-Jimenez vd., 2003; Gasparini vd., 2015; Rovnaník, 2010). Nitekim yine Khater, (2012)'de yaptığı çalışmada ısıtılma kürün geopolimerizasyonda faydalı olduğunu ve priz süresini kısalttığını bildirmiştir.



Şekil 4.19 PK ve FIWA kullanım oranının eğilme dayanımına olan etkileri

Şekil 4.19 da PK ve FIWA kullanımının oluşturulacak geopolimer beton örnekleri üzerindeki olası etkileri gösterilmiştir. PK kullanımında eğilme dayanımlarında gözle görülür derece farklar oluşmaktadır. En düşük eğilme dayanımı bölgesi 200 kg/m³ FIWA kullanımında olduğu görülmektedir. Şekil 4.19 tek başına incelendiğinde FIWA'nın ağırlıkça %12,5 - %37,5 olarak yer aldığı gruplarda diğer karışım gruplarına oranla en düşük eğilme dayanımı sonuçlarını verdiği görülmektedir.

4.8 Donma Çözülme Deney Sonuçları

Geopolimer donma-çözülme deneyleri, geopolimer betonların donma ve çözülme çevrimleri altında nasıl davrandığını incelemek ve bu malzemelerin dayanıklılığını değerlendirmek için yapılan laboratuvar testleridir. Bu deneylerin amacı, geopolimer malzemelerin donma-çözülme koşullarında nasıl performans gösterdiğini anlamak ve bu malzemelerin yapısal uygulamalarda kullanıma uygun olup olmadığını belirlemektir. Geopolimer betonlarla ilgili donma-çözülme çevrimleri ile ilgili bildirilen bazı çalışmalar mevcuttur (Fu vd., 2011; Slavik vd., 2008; Sun vd., 2013; Temuujin vd., 2014;).

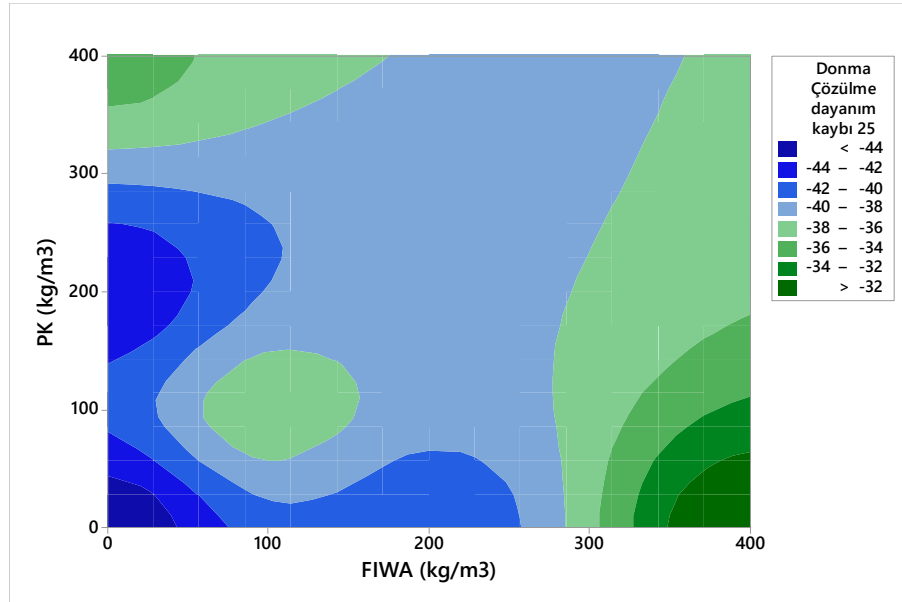
Fu vd. (2011) cüruf esaslı geopolimer betonun donma direncini incelemiş, 300 den fazla donma-çözülme çevrimine dayanabileceğini bulmuşlardır. Yine Temuujin vd. (2014) uçucu külden ürettiği geopolimer betonun 40 çevrimden sonra hasar aldığını

bildirmiştir. Slavik (2008) yaptığı çalışmada hazırladığı düşük kalsiyum içeriğine sahip akışkan taban külünden elde ettiği geopolimer beton örneklerinin 50 donma-çözülme çevriminden sonra %20 dayanım kaybı yaşadığını bildirmiştir. Zhao vd. (2019) yaptığı çalışmada uçucu kül ilavesinin ve kür sıcaklığını yükseltmenin donma-çözülme direncine olan faydasını bildirmişlerdir.

Bu çalışma da hazırlanan geopolimer numunelere 25 ve 50 çevrim donma çözülme uygulanmış, donma çözülme öncesindeki ve sonrasında ki tüm veriler tablo 4.9 da ve Tablo 4.10 da gösterilmiştir.

Tablo 4.9 25 döngü donma çözülme deneyi sonrası veriler

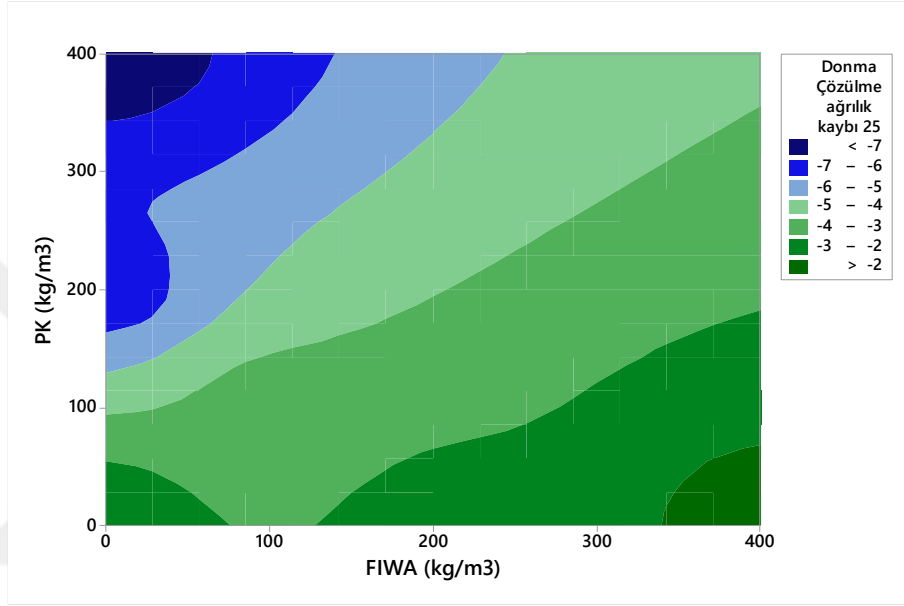
Karışım No	Deney öncesi ağırlık (gr)	Deney sonrası ağırlık (gr)	Deney sonrası ağırlık kaybı (%)	Deney öncesi Basınç dayanımı (MPa)	Deney sonrası Basınç dayanımı (MPa)	Deney sonrası oluşan basınç dayanımı kaybı yüzdesi (%)
K1	195,36	190,85	-2,24	8,28	4,50	-45,68
K2	196,38	183,62	-6,48	6,30	3,55	-43,69
K3	189,45	175,19	-7,53	18,96	12,28	-35,24
K4	199,28	194,155	-2,54	8,11	4,74	-41,64
K5	195,30	192,13	-1,62	7,79	5,44	-30,24
K6	198,99	191,52	-3,75	6,32	4,02	-36,37



Şekil 4.20 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda 25 çevrim sonrası olası dayanım kaybı analizi

Tablo 4.7, Şekil 4.14 ve Şekil 4. 15 incelendiğinde numunelerin verilerine dayanarak %50 UK %50 FIWA içeren K5 nolu karışım 25 çevrim donma-çözülme çevrimi

altında en iyi sonuçları göstermektedir. Bu karışımın ağırlık kaybı ve basınç dayanımı kaybı (Tablo 4.9) diğer karışımlara göre daha düşüktür. Bu durum, K5 nolu karışımın donma-çözülme döngülerine daha dayanıklı olduğunu ve daha az zarar gördüğünü göstermektedir. Yine görüldüğü üzere %100 UK içeren K1 nolu karışımın en çok basınç dayanımı kaybına uğradığı görülmüştür. Ağırlık kaybı yüzdesi diğer karışımlara göre daha yüksek olan karışım ise K3 nolu karışımdır.



Şekil 4.21 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda 25 çevrim sonrası olası ağırlık kaybı analizi

K5 nolu karışımın diğer karışımlara göre daha iyi sonuçlar verdiği için potansiyel olarak ideal bir karışım olarak değerlendirilebilir. Bu karışımın daha az ağırlık kaybı ve basınç dayanımı kaybı sergilemesi, donma-çözülme döngülerine karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir.

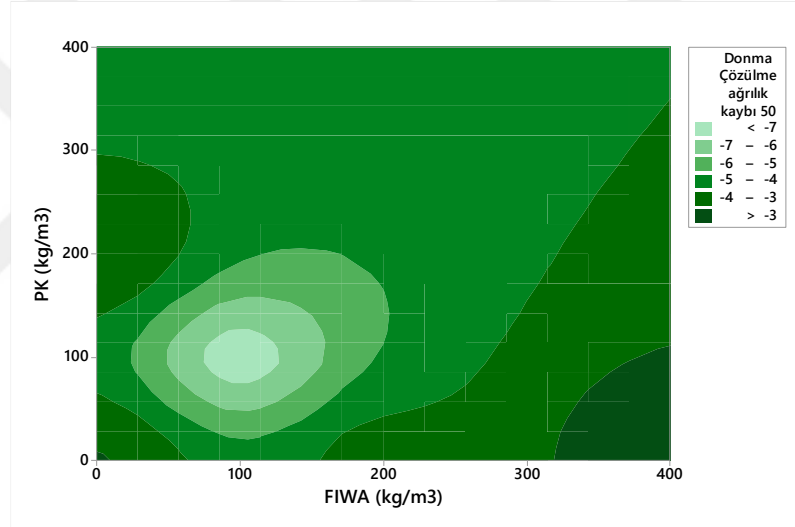
K1 nolu karışımın daha fazla kayba uğraması, donma çözülme çevrimlerine karşı bağlayıcı olarak yalnızca uçucu külün kullanılamayacağını düşündürülebilir. K5 nolu karışımın daha iyi sonuçlar vermesi, içeriğinde yer alan FIWA'nın donma-çözülme çevrimlerine karşı daha dayanıklı olabileceğini gösterebilir.

K5 nolu karışımdan sonra en iyi sonuçları gösteren K3 nolu karışımın basınç dayanımı kaybı iyi bir performans gösterirken ağırlık kaybı yüzdesinin fazla olduğu

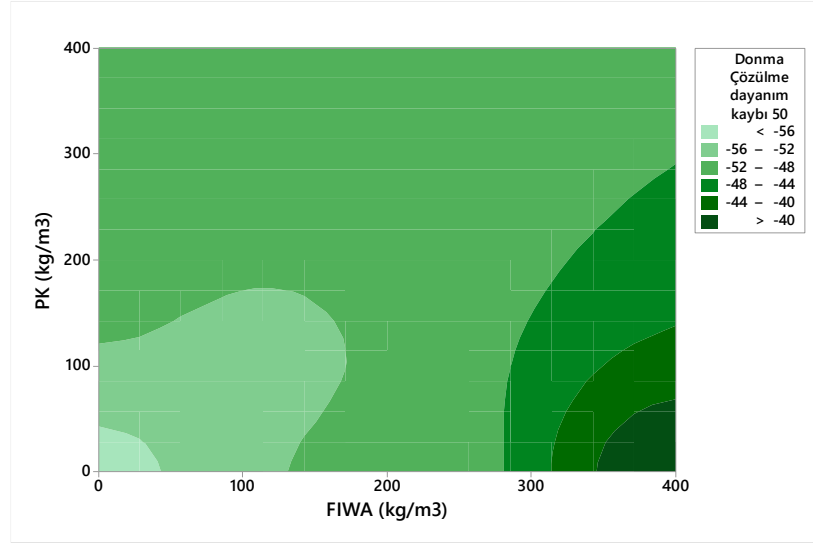
görülmüştür. Bu durum içeriğinde yer alan PK'nın diğer malzemelere kıyasla donma çözülme döngülerine karşı daha dayanıklı olabileceğini göstermiştir.

Tablo 4.10 50 döngü donma çözülme deneyi sonrası veriler

Karışım No	Deney öncesi ağırlık (gr)	Deney sonrası ağırlık (gr)	Deney sonrası ağırlık kaybı (%)	Deney öncesi Basınç dayanımı (MPa)	Deney sonrası Basınç dayanımı (MPa)	Deney sonrası oluşan basınç dayanımı kaybı yüzdesi (%)
K1	195,625	189,78	-2,97	8,28	3,52	-57,49
K2	189,815	183,88	-3,11	6,30	3,17	-49,66
K3	195,85	186,96	-4,51	18,96	9,46	-50,12
K4	191,46	184,50	-3,64	8,11	3,96	-51,19
K5	187,27	183,29	-2,15	7,79	4,90	-37,16
K6	191,135	176,53	-7,46	6,32	2,95	-53,26

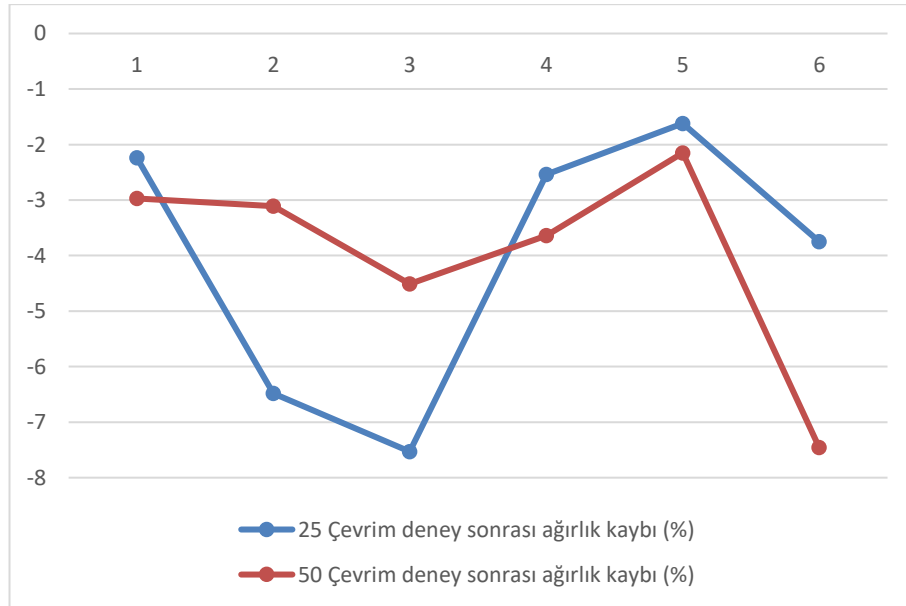


Şekil 4.22 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda 50 çevrim sonrası olası ağırlık kaybı analizi

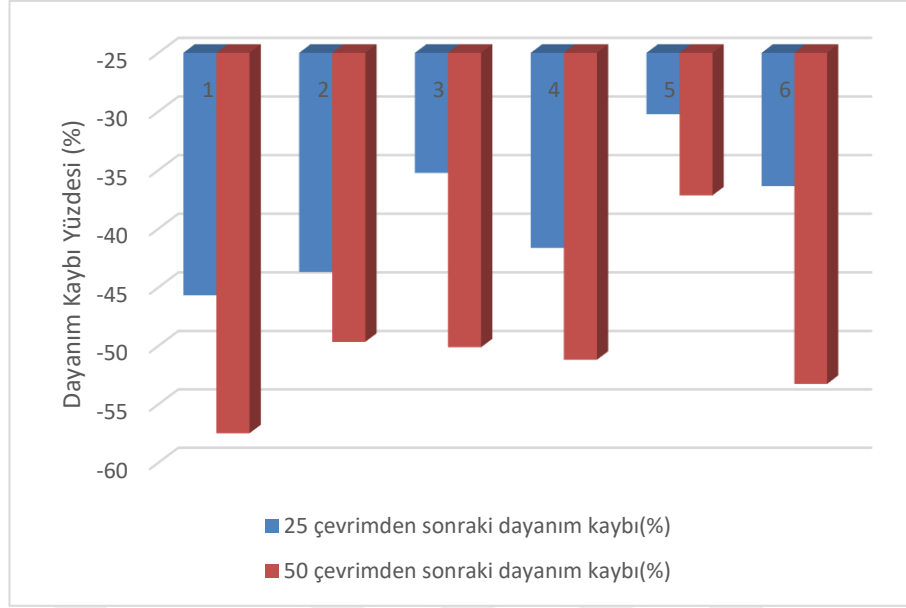


Şekil 4.23 PK ve FIWA kullanımının geopolimer betonlarda 50 çevrim sonrası olası dayanım kaybı analizi

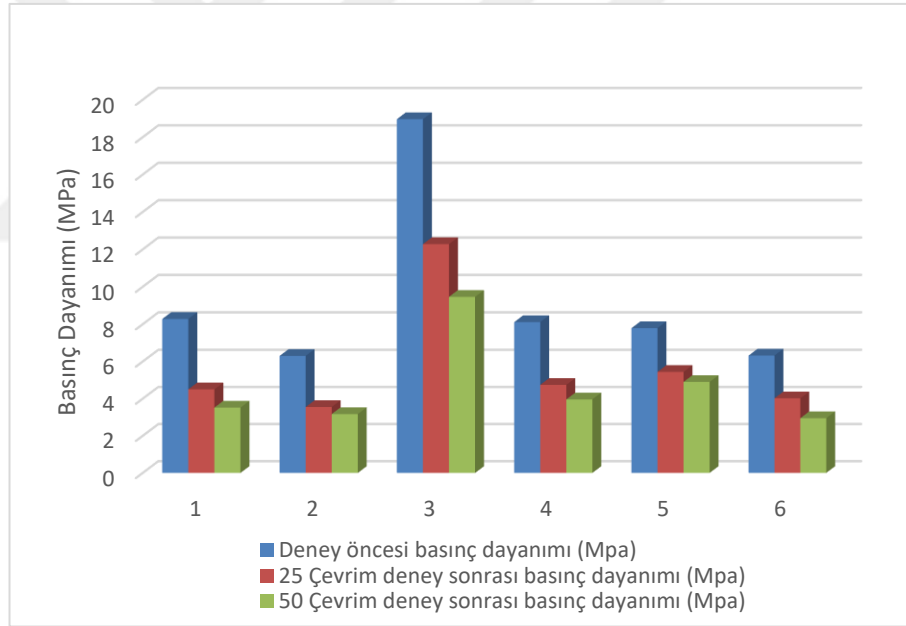
Tablo 4.10'da hazırlanan geopolimer numunelere uygulanan 50 çevrim donma çözülme deneyi verileri yer almaktadır. Tablo 4.10, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 incelendiğinde yine 25 çevrim de olduğu gibi K5 nolu karışımın iyi sonuçları gösterdiği görülmüştür. Deney sonrası ağırlık kaybı yüzdesi diğer karışımlara kıyasla daha düşük ve deney sonrası basınç dayanımı kaybı da diğerlerine göre daha azdır. Bu durum, K5 nolu karışımın donma-çözülme döngülerine karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.24 25 ve 50 çevrim donma çözülme sonrası yaşanan ağırlık kaybı yüzdeleri



Şekil 4.25 Döngüler sonrası dayanım kayıpları



Şekil 4.26 Donma çözülme deney öncesi ve sonrası basınç dayanımları

Yüzdesel olarak bakıldığında yine en çok kayba uğrayan karışımın %100 UK içeren K1 nolu numune olduğu görülmüştür. Deney sonrası ağırlık kaybı diğer karışımlara kıyasla daha düşük olmasına rağmen basınç dayanımı kaybı diğerlerine göre daha fazladır. Bu durumda K1 nolu karışımın donma-çözünme döngülerine karşı daha hassas olduğu söylenebilir.

%50 UK %50 FIWA içeren K5 nolu karışımın en iyi sonuçları gösteren karışım olduğu görülmüştür. Diğer karışımlara kıyasla daha az ağırlık kaybı ve daha düşük basınç dayanımı kaybı sergilemektedir. 25 çevrimde PK kullanılan karışımlar ile FIWA kullanılan karışımların hemen hemen benzer sonuçlar verdiği görülmüş olmasına karşın 50 çevrimde FIWA kullanılan karışımın ciddi olumlu farklar gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle K5 nolu karışım, donma-çözülme döngülerine karşı daha iyi dayanabileceği ve daha istikrarlı bir yapıya sahip olabileceği düşünülmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Pirinç kabuğu külü (PK) ve orman endüstri atık külü (FIWA) ile üretilen sürdürülebilir geopolimer betonun performans özelliklerinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında aşağıda ki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Geopolimer betonlarda PK kullanımının yayılma çapını artırdığı ancak bunun sebebinin hiper akışkanlaştırıcı katkıdan kaynaklanmış olabileceği, FIWA kullanımının ise herhangi bir değişikliğe sebep olmadığı ve uçucu küle kıyasla daha yapışkan bir yapıya sahip olduğu,
- Geopolimer betonlardaki değişik karışım oranlarında hazırlanan numunelerde UK ile ağırlıkça yarı yarıya PK ve FIWA kullanılan karışımlarda en düşük taze birim hacim ağırlık değerlerine ulaşıldığı ve hafif betonarme ürün yapımında bu malzemelerin tercih edilmesinin doğru olabileceği,
- Donma çözülme çevrimlerinde 25 çevrim sonuçlarında PK kullanılan karışımlarla FIWA kullanılan karışımların dayanım kayıplarının benzer ve diğer karışımlara oranla en az olduğu, 50 çevrimde ağırlıkça UK ile yarı yarıya FIWA kullanılan karışımlarda en iyi sonuçların elde edilebileceği,
- Su emme ve porozite değerleri birlikte incelendiğinde ağırlıkça UK ile yarı yarıya PK kullanılan karışımın en az su emme değeri gösterdiği ve böylece PK kullanımının yoğun olduğu karışımlarda porozite değerlerinin minimum olduğu, PK kullanımının porozite dikkate alındığında karışımlarda FIWA dan daha etkili olabileceği,
- Erken dönem basınç dayanımında FIWA 3. Gün 2,26 MPa ile en yüksek basınç dayanımı sonucunu verirken 7. Gün de PK yoğunluğu fazla olan karışımlarda ani basınç dayanımı değişikliği olduğu, %550 gibi bir değişimle 11,62 MPa basınç

dayanımı değişikliğine ulaştığı ve diğer malzemelere oranla çok daha fazla dayanım artışı gösterdiği,

- Daha düşük yoğunluk değerlerinin istendiği özel kullanımlarda PK ve FIWA kullanımının uygun olabileceği görölmüştür.

Ayrıca bu çalışma kapsamında kullanılan PK ve FIWA puzolanlarının geopolimer betonlarda kullanıldığında istenilen mukavemet ve durabilite özelliklerini sağlayacağı, ancak üretilen geopolimerlerin uygun kür koşulları ve uygun oranlarda karışımının dikkatli olması koşuluyla kullanılabilecek bir malzeme olduğu görölmüştür.

5.2 Öneriler

Pirinç kabuğu külü (PK) ve orman endüstri atık külü (FIWA) ile üretilen sürdürülebilir geopolimer betonun performans özelliklerinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında belirtilen şu hususlar dikkate alındığında fayda sağlayacaktır.

- Kullanılan malzeme oranlarının en uygun seviyede kullanımı için oranların birbirine yakınlılaştırarak yeniden araştırılması,
- Çalışmada kullanılan Uçucu kül, Pirinç kabuğu külü ve orman endüstrisi atığı külü malzemeleri haricinde metakaolin, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi farklı malzemeler ilave edilerek özelliklerinin araştırılması,
- Çalışmada kullanılan aktivatör çeşitlerinin değiştirilerek POH ve P_2SiO_3 kullanımının araştırılması,
- Çalışmada kullanılan aktivatör çeşidi aynı kalmakla birlikte farklı molar oranlarda çalışmaların dayanıma olan etkilerinin araştırılması,
- Bu çalışma haricinde kalan diğer deneylerle geopolimer betonların farklı durabilite özelliklerinin araştırılması,

- Farklı agrega çeşitliliklerinden yararlanıp geopolimer betonlar üzerindeki dayanım etkisinin incelenmelidir.



KAYNAKLAR

- Abdel-Ghani, N. T., Elsayed, H. A. & Abdelmoied, S., (2018). Geopolymer Synthesis By The Alkali-Activation Of Blastfurnace Steel Slag And İts Fire-Resistance. HBRC Journal, 14(2):159-164.
- Akbulut, F., Polat, R. & Karagöl, F., (2021), Erzurum Pasinler bölgesi perlitinin geopolimer üretiminde kullanımının araştırılması, Türk Doğa ve Fen Dergisi, 10(1):37-45s.
- Aldred, J., Day, J. & Glasby, T., (2015), Geopolymer concrete – no longer labcrete!, 40th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, 1-10pp
- Alnkaa, A., Yaprak, H., MEMİŞ, S., & Kaplan, G. (2018). Effect of different cure conditions on the shrinkage of geopolymer mortar. Int. J. Eng. Res. Develop, 14, 51-55.
- Alonso, S. & Palomo, A. (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. Mater. Lett. 47(1-2), 55–62.
- Angulo-Ramirez, D.E., de Gutierrez, R.M. & Puertas, F. (2017). Alkali-activated Portland blast-furnace slag cement: Mechanical properties and hydration. Constr. Build. Mater. 140, 119-128.
- Ardhira, P. J., Ardra R., Santhosh P.P. & Sathyan D., (2022) “A review on structural performance of geopolymer beam and geopolymer for strengthening the beam” Materials Today: Proceedings, vol. 64, pp. 74-78, 2022.
- Aredes, F.G.M., Campos, T.M.B., Machado, J.P.B., Sakane, K.K., Thim, G.P. & Brunelli, D.D. (2015). Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer. Ceram. Int. 41(6), 7302–7311.
- Askarian, M., Tao, Z., Adam, G. & Samali, B., (2018). Mechanical Properties Of Ambient Cured One-Part Hybrid OPC-Geopolymer Concrete. Construction And Building Materials, 186:330-337.
- ASTM C618-94a 1997. Standard Specification for Coal and Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, V. 04.02, Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1997.
- Aygörmez, Y., Uysal, M., Al-mashhadani M. M., & Canpolat O. (2018). “Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars”, Construction and Building Materials, 176, 271–282.
- Bakharev , T. (2002). Sanjayan , J.G., Cheng , Y.-B., Sulfate attack on alkali-activated slag concrete , Cement and Concrete Research Vol:32, Iss: 2, Pp: 211-216.

- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cem. Concr. Res.* 35(6), 1224–1232.
- Bakri, A.M.M.A., Kamarudin H., Mohamed H., Ruzaidi C.M., Rafiza A.R., Faheem M.T.M. & Izzat A.M., (2011b), Properties and Microstructural Characteristics of Geopolymers Using Fly Ash With Different Percentages of Kaolin At Room Temperature Curing, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, ISSN 1991-8178, 824-828.
- Belmokhtar, N., Ammari, M., Brigui, J. & Ben allal, L. (2017) "Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from Metakaolin and an industrial sludge", *Construction and Building Materials*, 146, 621–629.
- Benli, A. (2019). Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume. *Structural Concrete*, 20(3), 1096-1108. <https://doi.org/10.1002/suco.201800302>
- Benli, A., Karataş, M., & Gurses, E. (2017). Effect of sea water and MgSO₄ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume. *Construction and Building Materials*, 146, 464-474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.108>.
- Bing-hui, M., Zhu, H., Xue-min, C., Yan, H. & Si-yu, G. (2014). Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Appl. Clay Sci.* 99, 144–148.
- Chen, K., Wu, D., Xia, L., Cai, Q. & Zhang, Z., (2021) "Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments—A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement," *Construction and Building Materials*, vol. 279, pp.122496.
- Cheng, Y., Hongkiang, M., Hongyu, C., Jiaxin, W., Jing, S., Zonghui, L. & Mingkai, Y., (2018). Preparation And Characterization Of Coal Gangue Geopolymers. *Construction And Building Materials*, 187:318-326.
- Chi, M. C., Chi, J. H. & Wu, C. H. (2018) 'Effect of GGBFS on Compressive Strength and Durability of Concrete', *Advanced Materials Research*, 1145, pp. 22–26. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1145.22.
- Chindaprasirt, P. & Rhattanasak, U., 2017. Characterization Of The High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar With Hot-Weather Curing Systems For Sustainable Application. *Advanced Powder Technology*, 28:2317–2324.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. & Sirivivatnanon, V. (2004): "Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, s. 1087-1092.
- Cui, Y., Hao, H., Li, J., Chen, W. & Zhang, X., (2022) "Structural behavior and vibration characteristics of geopolymer composite lightweight sandwich panels

- for prefabricated buildings” *Journal of Building Engineering*, vol. 57, pp.104872, 2022.
- Davidovits, J., (1991). Geopolymers Inorganic Polymeric New Materials. *Journal Of Thermal Analysis*, 37:1633-1656.
- Davidovits, J., (1994), Properties of Geopolymer Cements, Published in Proceedings, First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 131-149.
- Davidovits, J., (2008), Geopolymer Chemistry and applications, Saint Quentin, France.
- De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., Da Silva, F.J., Pavao, B. & Veit, H. (2011). The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cem. Concr. Compos.* 33(6), 653–660.
- Djobo, J.N.Y., Elimbi, A., Tchakoute, H.K. & Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Constr. Build. Mater.* 124, 606–614.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. & van Deventer, J.S.J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* 42(9), 2917–2933.
- Elert, vd., 2008 K. Elert, E. Sebastián, I. Valverde & C. Rodríguez-Navarro (2008). Alkaline treatment of clay minerals from the Alhambra Formation: implications for the conservation of earthen architecture *Appl. Clay Sci.*, 39, pp. 122-132.
- El-Feky, M.S., Kohail, M., El-Tair, A.M. & Serag, M.I., (2020), Effect of microwave curing as compared with conventional regimes on the performance of alkali activated slag pastes, *Construction and Building Materials*, 233:117268.
- EN 450-1 2005. Fly ash for concrete – Part 1: Definition, specifications and conformity criteria, European Committee for Standardization, Brussels 2005.
- Engür, E.M., Kartal & S.N., (2001). Orman Ürünleri Endüstrisinde Çevre Kirliliği ve Kontrolü, İstanbul Üniversitesi orman Fakültesi Dergisi, Seri B, Cilt 51, sayı 2, pp:43-52.
- Erdem, R. T., & Öztürk, A. U. (2012). Mermer Tozu Katkısının Çimento Harcı Donma - Çözünme Özellikleri Üzerine Etkisi. *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1: 85-91.
- Fan, C., Wang, B., Ai, H., Qi, Y. & Liu, Z. (2021). “A comparative study on solidification/stabilization characteristics of coal fly ash-based geopolymer and Portland cement on heavy metals in MSWI fly ash,” *Journal of Cleaner Production*, 319, pp.128790.

- Fapohunda, C., Akinbile, B. & Shittu, A. (2017) ‘Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review’, *International Journal of Sustainable Built Environment*. The Gulf Organisation for Research and Development, 6(2), pp. 675–692. doi: 10.1016/j.ijsbe.2017.07.004.
- Fernandez-Jimenez, A., Garcia-Lodeiro, I. & Palomo, A. (2007). Durability of alkaliactivated fly ash cementitious materials. *J. Mater. Sci.* 42(9), 3055–3065.
- Gasparini, E., Tarantino, S.C., Conti, M., Biesuz, R., Ghigna, P., Auricchio, F., Riccardi, M.P. & Zema, M. (2015). Geopolymers from low-T activated kaolin: Implications for the use of alunite-bearing raw materials. *Appl. Clay Sci.* 114, 530–539.
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2145-2150. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.045.
- Görhan, G. & Kürklü, G. (2014) The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B.* 58, 371–377.
- Grela, A., Hebda, M., Lach, M. & Mikula, J., (2016). Thermal Behavior And Physical Characteristics Of Synthetic Zeolite From CFB-Coal Fly Ash. *Microporous And Mesoporous Materials*, 220:155-162.
- Habeeb, G. A. & Mahmud, H. Bin (2010) ‘Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material’, *Materials Research*, 13(2), pp. 185–190. doi: 10.1590/S1516-14392010000200011.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V. & Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cem. Concr. Compos.* 45, 9–14.
- Hassan, A., (2018). Experimental Study Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *International Journal Of Advanced Earth Science And Engineering*, 7(1):635-648.
- Hassan, A., Arif, M. & Shariq, M., (2020). “A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements-A clean technology option for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, vol.245, pp.118762.
- Hounsi, A.D., Lecomte-Nana, G., Djeteli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P., Napo, K., Tchangbedji, G. & Praisler M., (2014), How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers, *Ceramics International*, 40:8953–8962pp.
- Karahan, O., & Atiş, C. D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32(2), 1044-1049. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>

- Kaur, K., Singh, J. & Kaur, M., (2018), Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator, *Construction and Building Materials*, 169:188-192pp
- Ken, P.W., Ramli, M. & Ban, C.C. (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial byproducts. *Constr. Build. Mater.* 77, 370–395.
- Khalifeh, M., Saasen, A., Vralstad, T. & Hodne, H., (2014). Potential utilization of class c fly ash-based geopolymer in oil well cementing operations. *Cement and Concrete Composites*, 53:10-17.
- Khater, H.M. (2012). Effect of calcium on geopolymerization of aluminosilicate wastes. *J. Mater. Civ. Eng.* 24(1), 92–101.
- Koçkal, N. U., Beycan, O. & Gülmez, N., (2017). Physical And Mechanical Properties Of Silica Fume And Calcium Hydroxide Based Geopolymers. *Acta Physica Polonica A*, 131(3):530-533.
- Kolezynski, A., Krol, M. & Zychowicz, M., (2018), The structure of geopolymers - theoretical studies, *Journal of Molecular Structure*, 1163:465-471pp.
- Kouamo, H. T., Elimbi, A., Mbey, J. A., Sabouang, C. N., & Njopwouo, D. (2012). The effect of adding alumina-oxide to metakaolin and volcanic ash on 89 geopolymer products: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 35, 960-969.
- Lemougna, P.N., MacKenzie, K.J.D. & Melo, U.F.C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceram. Int.* 37(8), 3011–3018.
- Li, Z., Ding, Z. & Zhang, Y., (2004), Development of Sustainable Cementitious Materials, *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, 55-76.
- Maddalena, R., Roberts, J. J. & Hamilton, A., (2018). Can Portland Cement Be Replaced By Low-Carbon Alternative Materials? A Study On The Thermal Properties And Carbon Emissions Of Innovative Cements. *Journal Of Cleaner Production*, 186:933-942.
- Mcnulty, E., (2009). Geopolymers: An Environmental Alternative To Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement. Department Of Chemistry. The Catholic University Of America, Senior Comprehensive Paper, 22 S.
- Medina, C., del Bosque, I. S., Frías, M., & de Rojas, M. S. (2018). Design and characterisation of ternary cements containing rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 187, 65-76.
- Memiş, S. & Yaprak, H., (2022). Sürdürülebilir Yapı Malzemesi Olarak Geopolimer Beton: Özellikleri ve Geçmişten Günümüze Dönüşümü, *Yazıcı Ş. (Eds).*

Mühendislik Bilimlerinde Güncel Araştırma Örnekleri. 1. Baskı, Livre de Lyon, Lyon, Fransa.

- Memiş, S., & Bılal, M. A. M. (2022). Taguchi optimization of geopolymer concrete produced with rice husk ash and ceramic dust. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.
- Nair, D. G., Sivaraman, K. & Thomas, J. (2013) ‘Mechanical Properties of Rice Husk Ash (RHA) - High strength Concrete’, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, (Xx), pp. 2–8.
- Nazari, A., Bagheri, A. & Riahi, S., (2011). Properties Of Geopolymer With Seeded Fly Ash And Rice Husk Bark Ash. *Material Science And Engineering A*, 528(24):7395- 7401.
- Nugteren, H.W., Butselaar, O.V.C.L., Izquierdo, M., (2009), High strength geopolymers produced from coal combustion fly ash, *Global NEST Journal*, 2, 155-161.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. & Blanco, M.T., (1999), Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future, *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y.F., Wuhner, R. & Murphy, T., (2018). Compressive Strength And Microstructure Of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Binders At High Temperature. *Cement And Concrete Composites*, 86:9-18.
- Payakaniti, P., Chuewangkam, N, Yensano, R., Pinitsoontorn, S. & Chindaprasirt, P., (2020), Changes in compressive strength, microstructure and magnetic properties of a high-calcium fly ash geopolymer subjected to high temperatures, *Construction and Building Materials*, 265:120650.
- Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S. & Chindaprasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 91, 1–8.
- Rao, A. K. & Kumar, D. R. (2020). “Effect of various alkaline binder ratio on geopolymer concrete under ambient curing condition,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, pp.1768-1773, 2020.
- Reddy, M.S., Dinakar, P. & Rao, B.H., (2016), A review of the influence of source material’s oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete, *Microporous and Mesoporous Materials*, 234:12-23pp.
- Rostami, M. & Behfarnia, K., (2017). The Effect Of Silica Fume On Durability Of Alkali Activated Slag Concrete. *Construction And Building Materials*, 134:262–268.
- Rovnanik, P., (2010), Effect of Curing Temperature on The Development of Hard Structure of Metakaolin-Based Geopolymer, *Construction and Building Materials*, 24, 1176–1183.

- Safiuddin, M., West, J. S. & Soudki, K. A. (2011) 'Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 25(2), pp. 973–978. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.084.
- Sağlık, A.Ü., (2009), *Alkali-Silica Reactivity And Activation of Ground Perlite Containing Cementitious Mixtures*, PhD thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- Shaikh, F. U. A., & Supit, S. W. M. (2015). Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and Building Materials*, 82, 192-205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.068>.
- Sisol, M., Drabova, M. & Mosej, J., (2014). Alkali Activation Of Fresh And Deposited Black Coal Fly Ash With High Loss On Ignition. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 30(2):103-115.
- Slavik, R., Bednarik, V., Vondruska, M. & Nemec, A, (2008), Preparation of geopolymer from fluidized bed combustion bottom ash *J. Mater. Process. Technol.*, vol: 200, pp. 265-270
- Smith, J. D. (2022). Geopolymers: Applications and Challenges. *Journal of Materials Science*, 45(3), 567-578. DOI: 10.1007/s10853-021-05789-4
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. & Chindaprasirt, P. (2011). NaOH activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*. 90(6), 2118–2124.
- Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C. & Chindaprasirt, P., 2010. Compressive Strength and Degree of Reaction of Biomass- and Fly Ash-Based Geopolymer. *Construction and Building Materials*, 236-240.
- Srividya, T., Kannan Rajkumar, P.R., Sivasakthi, M., Sujitha, A. & Jeyalakshmi, R., (2022), A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications, *Case Studies in Construction Materials*, 16:e00812.
- Sudha, C., Sambasivan, A. K., Rajkumar, P. R. K. & Jegan M. (2022), "Investigation on the performance of reinforced concrete columns jacketed by conventional concrete and geopolymer concrete," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 36, pp.101275.
- Sun, P.J. & Wu, H.C. Chemical and freeze–thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars. *Fuel*, 111 (2013), pp. 740-745.
- Swanepoel J.C. & Strydom C.A., (2002), Utilisation of Fly Ash in A Geopolymeric Material, *Applied Geochemistry*, 17(8), 1143-48.
- Tan, J., Cai, J., Huang, L., Yang, Q., Mao, M. & Li, J., (2020), Feasibility of using microwave curing to enhance the compressive strength of mixed recycled

aggregate powder based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 262:120897.

Temuujin, J., Minjigmaa, A., Davaabal, B., Bayarzul, U., Ankhtuya, A., Jadambaa, Ts & MacKenzie, K.J.D. (2014), Utilization of Radioactive High-Calcium Mongolian Fly Ash For the Preparation of Alkali-Activated Geopolymers For Safe Use As Construction Materials *Ceram. Int.*, 40 (10), pp. 16475-16483

Temuujin, J., Williams, R.P. & Riessen, A.V., (2009), Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature, *Journal of Materials Processing Technology*, 209:5276– 5280pp

Thakur, R.N. & Ghosh, S., (2009), Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol:4, ISSN 1819-6608, 68-74.

Thokchom, S., Ghosh P. & Ghosh S., (2009), Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid, *International Journal of Natural Sciences and Engineering*, 77-82.

Topçu, I. B. & Toprak, M. U., (2009). Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi. *Journal Of Engineering And Architecture Faculty Of Eskişehir Osmangazi University*, XXII(2):153-164.

Usha, S., Nair, D.G. & Vishnudas, S., (2014), Geopolymer binder from industrial wastes: a review, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 5(12):219-225pp.

Van Tuan, N., Ye, G., Van Breugel, K. & Copuroglu, O. (2011) ‘Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash’, *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 41(11), pp. 1104–1111. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.06.009.

Vargas, A. S.D., Molin D.C.C.D., Vilela A. C.F., Silva F. J., Pavão B. & Veit H., (2011), The Effects Of Na₂O/SiO₂ Molar Ratio, Curing Temperature and Age on Compressive Strength, Morphology and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash-Based Geopolymers, *Cement Concrete Composites*, 33, 653-660.

Vickers, L., Van Riessen, A., & Rickard, W. D. (2015). Fire-resistant geopolymers: Role of fibres and fillers to enhance thermal properties. Springer.

Xu, H. & Van Deventer J.S.J., (2002), Geopolymerisation of Multiple Minerals, *Minerals Engineering*, 15(12), 1131-39.

Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 49-54.

Yonar, Y. (2014). Geopolimer Çimentolu ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bakri, M. M. A. & Hussin K., (2016). Structure And Properties Of Clay-Based Geopolymer Cements: A Review. Progress In Materials Science, 83:595-629.
- Zerfu, K., & Ekaputri, J. J. (2016). Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete. Materials Science Forum, 841, 162-169.
- Zeybek, O., (2009). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. Anadolu Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, 99 S.
- Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K. & Zhang, J., (2018). A Review On Properties Of Fresh And Hardened Geopolymer Mortar. Composites Part B: Engineering, 152:79-95.
- Zhao, J., Tong, L., Li, B., Chen, T., Wang, C., Yang, G. & Zheng, Y., (2021), Eco-friendly geopolymer materials: a review of performance improvement, potential application and sustainability assessment, Journal of Cleaner Production, 307:127085.
- Zhao, R., Yuan, Y., Cheng, Z., Wen, T., Li, J., Li, F. & John, M. Z. (2019). Freeze-Thaw Resistance of Class F fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Construction and Building Materials . 222, 474-483.