

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



HAFİF AGREGALARIN GEOPOLİMER HARÇ
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MERT KIVANÇ KILIÇOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROF. DR. HASBİ YAPRAK

NİSAN - 2025

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Mert Kıvanç KILIÇOĞLU tarafından hazırlanan “HAFİF AGREGALARIN GEOPOLİMER HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **24.04.2025** 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	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Osman GENÇEL Bartın Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ Kastamonu Üniversitesi

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

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ
----------------	-----------------------	-------

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.

Mert KIVANÇ KILIÇOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAFİF AGREGALARIN GEOPOLİMER HARÇ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

MERT KIVANÇ KILIÇOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. HASBİ YAPRAK

Hafif jeopolimer betonlar, üstün durabilite, düşük çevresel etkileri ve sürdürülebilir özellikleri nedeniyle dikkat çekmekte ve çimentosuz beton malzemeleri kullanarak bir yapının ölü yüklerini azaltmak ve jeopolimer beton (GP) kapsamını artırmak için özgün çözümler sunmaktadır. GP'ler, düşük özgül ağırlıklıdaki doğal/yapay agregaların alüminosilikat bağlayıcılar ve alkali çözeltilerle karıştırılmasıyla elde edilen ürünlerdir.

Çalışmada, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen, karbon salınımını azaltan ve çimento tüketimini minimuma indiren yenilikçi jeopolimer malzemelerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmada, hafif agrega olarak pomza ve genleştirilmiş vermikülit (GV), bağlayıcı olarak uçucu kül (UK) ve CEM II/B-S 42,5 R çimentosu, aktivatörler olarak sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) kullanılmıştır. Bağlayıcı malzemeler ve aktivatörler tüm karışım serilerinde sabit miktarlarda kullanılmış, GV %25; 50; 75; 100 oranlarında pomza ile yer değiştirilmiştir.

40x40x160 mm boyutunda harç prizmalar üretilmiş, bir gün sonra kalıptan çıkartılan numuneler, kür odasında test süresince bekletilmiş, sertleşmiş numunelerin, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları, 30 ve 60 günlük sülfat, asit durabilite testleri, 300 ve 400°C yüksek sıcaklık testleri yapılmış, ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir.

GV oranındaki artışa bağlı olarak, numunelerin taze ve birim hacim ağırlıklarının azaldığı, GV nin eğilme ve basınç dayanımlarını düşürdüğü gözlemlenmiştir. 28 günlük eğilme dayanımlarının 1,20-1,94 MPa, basınç dayanımlarının 13,5-21,3 MPa aralığında değiştiği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER:Hafif Agrega, Pomza, Genleştirilmiş Vermikülit, Uçucu Kül

Nisan 2025, 76 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE EFFECTS OF LIGHTWEIGHT AGGREGATES ON THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTARS

MERT KIVANÇ KILIÇOĞLU

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: PROF. DR. HASBİ YAPRAK

Lightweight geopolymer concretes are attracting attention due to their superior durability, low environmental impact and sustainable properties and offer unique solutions to reduce dead loads and increase the geopolymer concrete (GP) coverage of a structure using cementless concrete materials. GPs are products obtained by mixing low specific gravity natural/artificial aggregates with aluminosilicate binders and alkaline solutions.

This study aims to develop innovative geopolymer materials that support environmental sustainability, reduce carbon emissions, and minimize cement consumption. In the experimental program, pumice and expanded vermiculite (EV) were used as lightweight aggregates, while fly ash (FA) and CEM II/B-S 42.5 R cement served as binders. Sodium silicate (SS) and sodium hydroxide (SH) were employed as alkaline activators. The quantities of binders and activators were kept constant across all mixture series, with EV replacing pumice at rates of 25%, 50%, 75%, and 100%.

Mortar prisms with 40x40x160 mm dimensions were produced, the samples were removed from the mold after one day and kept in the curing room during the test period, 7 and 28 day flexural and compressive strengths, 30 and 60 day sulphate, acid durability tests, 300 and 400°C high temperature tests were performed and thermal conductivity coefficients were determined.

As the EV content increased, both the fresh and unit weight of the mixtures decreased. However, EV was observed to reduce flexural and compressive strengths. The 28-day flexural strength ranged from 1.20 to 1.94 MPa, while the compressive strength varied between 13.5 and 21.3 MPa.

KEYWORDS: Lightweight Aggregate, Pumice, Expanded Vermiculite, Fly Ash

April 2025, 76 Page

TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasında tez konunun araőtırılmasında, belirlenmesinde, laboratuvar alıőmalarında ve tezin yazımı esnasında alıőmalarına ilgiyle yön veren, değerli fikir ve katkılarıyla çalıőmamı destekleyen, bana her türlü desteği sağlayan danıőmanım Sayın Prof. Dr. Hasbi YAPRAK'a ve değerli hocam Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ'e, meslektaőım ve arkadaőım İnő. Yük. Müh. Selma İZBELİ TURHAL'a teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini eksiksiz hissettiğim aileme, her sabah uyandığında etrafına neőe saçan ve hayat enerjimizi artıran oğlum Kuzey'e ve hayatımın her anını güzelleőtirerek destekleyen sevgili eőime minnettarım.

MERT KIVANÇ KILIçOğLU

Kastamonu, 2025

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Geopolimerler	4
2.2 Geopolimerlerin Tarihçesi	5
2.3 Geopolimerlerin Yapısı.....	6
2.4 Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri.....	10
2.5 Geopolimerlerde Durabilite	12
2.6 Geopolimerlerin Yangın Direnci	14
2.7 Geopolimerlerin Kullanım Alanları	15
2.7.1 İnşaat Sektörü	15
2.7.2 Yangın ve Yüksek Sıcaklık Uygulamaları.....	16
2.7.3 Atık Yönetimi ve Nükleer Endüstri	16
2.7.4 Yol ve Altyapı Uygulamaları.....	17
2.7.5 Deniz Yapıları ve Liman Uygulamaları.....	17
2.7.6 Enerji ve Savunma Sanayi	17
2.7.7 3D Yazıcılarla Üretim.....	17
2.8 Geopolimerlerin Avantajları ve Çevresel Etkileri	18
2.9 Geopolimer Betonlar İçin Kullanılan Bileşenler	22
2.9.1 Agregalar	22
2.9.1.1 Pomza.....	23
2.9.1.2 Genleştirilmiş vermikülit (GV)	26
2.9.2 Bağlayıcılar	29
2.9.2.1 Uçucu kül (UK).....	29
2.9.2.2 Çimento	31
2.9.3 Aktivatörler	35
2.10 Literatüre Ait Bazı Çalışmalar	37
3. MATERYAL VE YÖNTEM	40
3.1 Materyal	40
3.1.1 Agregalar	40
3.1.2 Bağlayıcılar	42
3.1.3 Aktivatörler	43
3.1.4 Numune Üretim Prosesi	44
3.2 Yöntem.....	45
3.2.1 Yayılma Deneyi	45
3.2.2 Basınç Dayanımı Deneyi	46

3.2.3	Eğilme Dayanımı Deneyi.....	47
3.2.4	Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	49
3.2.5	Sülfat Testi.....	50
3.2.6	Asit Testi.....	51
3.2.7	Termal İletkenlik Deneyi.....	52
4.	TARTIŞMA VE BULGULAR	54
4.1	Birim Ağırlık Testi Sonuçları	54
4.2	İşlenebilirlik Testi Sonuçları.....	55
4.3	Eğilme Dayanımı Testi sonuçları.....	56
4.4	Basınç Dayanım Testi Sonuçları.....	57
4.5	Yüksek Sıcaklık Testi Sonuçları.....	59
4.6	Sülfat Testi Sonuçları.....	63
4.7	Asit Testi Sonuçları.....	64
4.8	Termal İletkenlik Testi Sonuçları	66
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	68
	KAYNAKLAR	70
	ÖZGEÇMİŞ.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Geopolimerizasyon denklemi	7
Şekil 2.2 Geopolimer oluşumunun şematik gösterimi	8
Şekil 3.1 Geopolimer harç karışımında kullanılan agregalar	40
Şekil 3.2 Geopolimer harç karışımında kullanılan bağlayıcılar	42
Şekil 3.3 Geopolimer harç karışımında kullanılan aktivatörler	43
Şekil 3.4 Numune örnekleri	45
Şekil 3.5 Yayılma deneyine tabi tutulan harç numuneleri	46
Şekil 3.6 Basınç dayanımı ölçülen numune	47
Şekil 3.7 Eğilme dayanım testine tabi tutulan numune örneği	48
Şekil 3.8 Sülfat deneyine tabi tutulan 30 ve 60 günlük numune örnekleri	51
Şekil 3.9 Asit deneyine tabi tutulan 30 ve 60 günlük numune örnekleri	52
Şekil 3.10 Termal iletkenlik deneyine tabi tutulan numuneler	53
Şekil 4.1 Birim ağırlık ölçümü ve numune örneği	54
Şekil 4.2 Numunelerin taze birim ağırlıkları	54
Şekil 4.3 Deneylerde kullanılan numunelerin kuru birim ağırlıkları (g/cm^3)	55
Şekil 4.4 Numunelerdeki yayılma miktarları (cm)	56
Şekil 4.5 Geopolimer numunelerin eğilme dayanımı değerleri	57
Şekil 4.6 Geopolimer numunelerin basınç dayanım değerleri	58
Şekil 4.7 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçları	59
Şekil 4.8 300°C sıcaklık sonrası oluşan ağırlık kaybı	61
Şekil 4.9 400°C sıcaklık sonrası oluşan ağırlık kaybı	62
Şekil 4.10 Sülfat testi sonrası basınç dayanım sonuçları	63
Şekil 4.11 Asit testi sonrası basınç dayanım sonuçları	64

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Geopolimerler malzemelerin avantajları	21
Tablo 2.2 Hafif agregaların geopolimer beton üzerindeki etkileri.....	23
Tablo 2.3 Pomzanın mekanik özellikleri	24
Tablo 2.4 Pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri	25
Tablo 2.5 GV'nin özellikleri	28
Tablo 2.6 GV'nin mekanik özellikleri	28
Tablo 2.7 GV'nin kimyasal özellikleri.....	29
Tablo 2.8 UK'nin kimyasal bileşimi.....	30
Tablo 2.9 UK'nin mekanik özellikleri	31
Tablo 2.10 CEM II 42,5R B-S tip çimento özellikleri.....	33
Tablo 2.11 CEM II 42,5 R çimentosu kimyasal özellikleri ve bileşenleri.....	34
Tablo 2.12 CEM II 42,5 R çimentosu dayanımı	34
Tablo 2.13 CEM II 42,5 R çimentosu fiziksel özellikleri	34
Tablo 3.1 GV Tane boyutu dağılımı	41
Tablo 3.2 Pomza fiziksel özellikleri.....	42
Tablo 3.3 Pomza elek analizi	42
Tablo 3.4 GP karışım malzemeleri (kg/m ³)	44
Tablo 4.1 Isıl iletkenlik katsayıları	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
CO₂	: Karbondioksit
K₂SiO₃	: Potasyum Silikat
Na₂SiO₄	: Sodyum Silikat
NaCl	: Sodyum Klorür
NaOH	: Sodyum Hidroksit
SiO₂	: Silisyum Dioksit (Silika)

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials
GP	: Genleştirilmiş Perlit
GV	: Genleştirilmiş Vermikülit
HG	: Hafif Geopolimer
kN	: Kilonewton
MPa	: Megapascal
OPC	: Geleneksel Portland Çimentosu
SH	: Sodyum Hidroksit
SM	: Sodyum Metasilikat
SS	: Sodyum Silikat
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

Dünyanın hızla artan nüfusu ve kentleşme eğilimleri, inşaat sektörüne olan talebi her geçen gün artırmakta ve bu durum enerji tüketimi ile doğal kaynak kullanımında ciddi bir artışa neden olmaktadır. Özellikle çimento endüstrisi, inşaat sektörünün temel bileşenlerinden biri olarak önemli çevresel riskler taşımaktadır. Çimento üretimi sürecinde yüksek sıcaklıklarda kalsinasyon ve sinterleme işlemleri gerçekleştirilmekte, bu işlemler hem yüksek miktarda enerji tüketimine hem de sera gazı salımına neden olmaktadır. Her bir ton çimento üretiminde yaklaşık 0,8-1 ton CO₂ atmosfere salınmakta ve bu oran, küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %7-8'ini oluşturmaktadır (Davidovits, 2008; Mehta ve Monteiro, 2014).

Çimento üretimi sadece karbon salımı ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda yoğun su ve hammadde tüketimiyle de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Kalker ve kil gibi hammaddelerin madenciliği, biyolojik çeşitliliğin bozulmasına, erozyona ve arazi tahribatına yol açarken, üretim sırasında açığa çıkan toz emisyonları, hava kalitesini olumsuz etkilemekte ve insan sağlığını tehdit etmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2012). Aynı zamanda çimento bazlı ürünlerin uzun vadede karşılaştığı kimyasal bozulmalar da hem ekonomik hem çevresel açıdan ek maliyetler doğurmaktadır. OPC'nin hidrasyonu sırasında oluşan kalsiyum hidroksit, sülfat iyonlarıyla etkileşime girerek etrenjit ve taumasit gibi zararlı ürünlerin oluşmasına neden olmakta, bu da betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir (Bellmann ve Stark, 2008; Rashad, 2013).

Bu sorunlara alternatif olarak geliştirilen geopolimer bağlayıcı sistemler, düşük karbon salımı, enerji verimliliği, atık malzeme kullanımı ve uzun ömürlü performans avantajları ile sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında öne çıkmaktadır. Geopolimerler, silis (SiO₂) ve alüminyum oksit (Al₂O₃) içeriği yüksek endüstriyel atıkların veya doğal minerallerin alkali çözeltilerle aktive edilmesiyle oluşturulan bağlayıcılardır. Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) gibi aktivatörlerin etkisiyle meydana gelen polimerizasyon tepkimesi sonucunda N-A-S-H (sodyum alüminosilikat hidrat) ve C-A-S-H jelleri oluşur. Bu jeller, çimento esaslı

sistemlere kıyasla daha düşük geçirgenlik, daha yüksek sülfat ve asit direnci, yangın dayanımı ve uzun ömür gibi üstün özellikler sergiler (Duxson vd., 2007; Yip vd., 2005).

Geopolimer bağlayıcıların en önemli avantajlarından biri, çevresel etkiyi azaltarak endüstriyel atıkların yeniden kullanımına olanak sağlamasıdır. Termik santrallerde oluşan uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), metakaolin, alt kül ve geri dönüştürülmüş cam atıkları, geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Provis ve Van Deventer, 2014).

Bu malzemeler, çevreye zarar vermeden değerlendirilerek hem atık sorununun azaltılmasına hem de doğal kaynak tüketiminin önlenmesine katkıda bulunur. Nath ve Sarker (2015), UK ve YFC bazlı geopolimer betonların hem çevresel hem ekonomik açıdan OPC betonlara kıyasla üstünlük sağladığını ortaya koymuştur.

Geopolimer sistemlerin teknik performansı da oldukça güçlüdür. Zhang vd. (2014), farklı agregalarla üretilen geopolimer betonların termal iletkenlik, akustik emilim, yangın dayanımı ve basınç dayanımı gibi parametrelerde geleneksel betonlardan üstün performans sergilediğini belirtmiştir. Ayrıca cam atığı kullanılan geopolimer sistemler, mikroyapı yoğunluğunda artış ve su emme oranında azalma gibi avantajlar da sağlamaktadır (Cho vd., 2023). Benzer şekilde hafif agregaların kullanılması ile yapı malzemelerinin yoğunluğu azaltılabilirken, aynı zamanda ısı yalıtım kapasitesi de artırılmaktadır (Zhang vd., 2014).

Geopolimer sistemlerin bir diğer avantajı da yüksek sıcaklıklara direnç göstermesidir. Rashad (2013), yaptığı çalışmada, 800°C üzeri sıcaklıklara maruz kalan geopolimer örneklerinin mukavemetlerini büyük oranda koruduğunu, buna karşın OPC bazlı betonlarda çatlama, yapısal bozulma ve dayanım kaybı görüldüğünü belirtmiştir. Bu özellik, geopolimer sistemleri yangın dayanımı yüksek yapı elemanlarında kullanılabilir hale getirmekte; özellikle tünel, otopark ve endüstriyel tesislerde güvenliği artırmaktadır.

Geopolimer sistemlerin karbon ayak izinin OPC'ye kıyasla %60-80 daha düşük olduğu Turner ve Collins (2013) tarafından yapılan yaşam döngüsü analizlerinde de

doğrulanmıştır. Bununla birlikte, sistemlerin pratik uygulama açısından geliştirilmesi gereken yönleri de mevcuttur. Aktivasyon için kullanılan sıvı alkali çözeltilerin taşınması, depolanması ve kullanımı güvenlik açısından bazı sorunlara neden olabilmektedir. Bu sorunun aşılması amacıyla geliştirilen “tek bileşenli” geopolimer sistemlerde sadece su eklenerek aktivasyon gerçekleşmektedir (Abdel-Gawwad vd., 2022). Bu tür sistemler, şantiyede kullanım kolaylığı ve operatör güvenliği sağladığı için gelecekte yaygınlaşma potansiyeline sahiptir.

Ayrıca geopolimer sistemlerin kullanım alanları oldukça geniştir. Altyapı sistemleri, prefabrik yapı elemanları, yol kaplamaları, deniz yapıları, yüksek sıcaklığa dayanıklı duvar panelleri, nükleer atık kapsülleme sistemleri ve sürdürülebilir inşaat projeleri gibi birçok alanda kullanılabilir (Bernal vd., 2014; Temuujin vd., 2010). Bu çeşitlilik, geopolimer sistemlerin hem teknik hem çevresel hem de ekonomik performans açısından OPC'ye karşı güçlü bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Geopolimer kompozitler genel olarak değerlendirildiğinde, yapı malzemeleri alanında sürdürülebilirlik odaklı dönüşümün öncülerinden biri olma potansiyeline sahiptir. Atık yönetimi, karbon emisyonunun azaltılması, enerji verimliliği ve dayanıklılık gibi kritik alanlarda sağladığı faydalar sayesinde gelecek inşaat sistemlerinde önemli bir yer edinmesi beklenmektedir. Ancak bu sistemlerin geniş ölçekli benimsenmesi için standardizasyon çalışmaları, saha testleri, ekonomik analizler ve çevresel etki değerlendirmelerinin birlikte yürütülmesi gerekmektedir.

Yapılan deneysel çalışmada, agrega olarak pomza ve GV, bağlayıcı malzeme olarak UK ve CEM II B-S 42,5 R, aktivatör olarak SH ve SM kullanılmıştır. Karışım çizelgesinde verilen malzeme miktarları karıştırılarak hazırlanan hafif geopolimer numunelerin mekanik ve durabilite özellikleri test edilmiştir. Çalışmada özellikle hafif, ısı iletkenliği düşük, çevreci, sürdürülebilir ve servis ömrü uzun bir yapı malzemesinin üretimi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Geopolimerler

Geopolimerler, son yıllarda inşaat ve yapı malzemeleri alanında çevre dostu alternatif bağlayıcı sistemler olarak önemli bir yer edinmiştir. İlk olarak Davidovits (1970'ler) tarafından tanımlanan bu malzemeler, SiO_2 ve Al_2O_3 bakımından zengin kaynakların alkali aktivasyonu ile oluşan inorganik polimer yapılı bağlayıcılardır (Davidovits, 2008). Geopolimerler, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla hem çevresel hem de teknik açılardan birçok üstünlük sunmaktadır.

Geopolimerlerin temel kimyasal yapısı, genellikle sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) jeli üzerinden tanımlanır. Eğer sistem kalsiyum içeriyorsa (örneğin YFC kullanıldığında), bu yapıya ek olarak kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) jeli de oluşabilmektedir (Duxson vd., 2007). Bu jel yapılar, malzemenin dayanım, geçirimsizlik, durabilite ve yüksek sıcaklık direnci gibi özelliklerini belirler.

Geopolimerlerin en belirgin özelliklerinden biri düşük karbon ayak izidir. OPC üretimi sırasında atmosfere yaklaşık 0,8-1 ton CO_2 salınırken, geopolimer sistemlerde bu değer %60-80 oranında daha düşük olabilmektedir (Turner ve Collins, 2013). Bu durum, özellikle UK, çürük, metakaolin, cam tozu ve alt kül gibi endüstriyel atıkların ikincil kaynak olarak değerlendirilmesiyle mümkündür (Nath ve Sarker, 2015).

Mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, geopolimerler oldukça yüksek dayanım gösterir. Uygun karışım tasarımı ve kür koşulları sağlandığında, 28 günlük basınç dayanımları 40-80 MPa arasında değişebilmekte, hatta bazı özel sistemlerde 100 MPa'yı aşabilmektedir (Zhang vd., 2014). Ayrıca geopolimer sistemler, donma-çözülme döngülerine, klor iyonu penetrasyonuna, asit ve sülfat etkilerine karşı Portland çimentosuna kıyasla daha dirençlidir (Rashad, 2013).

Geopolimerlerin ısı ve yangına karşı dayanımı da öne çıkan bir özelliktir. Yapılan deneysel çalışmalarda, geopolimer harçların 800°C üzerindeki sıcaklıklara maruz kalmasına rağmen önemli miktarda mekanik dayanımını koruyabildiği gösterilmiştir

(Rashad, 2013). Bu özellik, onları yangına dayanıklı paneller, refrakter malzemeler ve nükleer atıkların immobilizasyonu gibi özel uygulamalarda cazip kılmaktadır.

Geopolimerlerin ayarlanabilir yapıya sahip olması, uygulama alanlarını genişletmektedir. Karışım içerisindeki Si/Al oranı, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ oranı, alkali aktivatör tipi ve konsantrasyonu, kür sıcaklığı gibi parametreler değiştirilerek malzemenin özellikleri kontrol edilebilmektedir (Provis ve van Deventer, 2014). Bu özelleştirilebilir yapı, onları hem yapısal beton elemanlarında hem de ön üretimli yapı bileşenlerinde, yol kaplamalarında, deniz yapılarında ve onarım sistemlerinde kullanılabilir hale getirmektedir (Bernal vd., 2014).

Son olarak, geopolimerler döngüsel ekonomi açısından da stratejik öneme sahiptir. UK ve çürük gibi sanayi atıklarının değerlendirilmesiyle hem atık miktarının azaltılması hem de doğal kaynak kullanımının minimize edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yönüyle geopolimer teknolojisi, sadece teknik değil aynı zamanda çevresel ve ekonomik bir sürdürülebilirlik sağlamaktadır (Pacheco-Torgal vd., 2012).

2.2 Geopolimerlerin Tarihçesi

Geopolimer teknolojisinin tarihçesi, geleneksel çimento ve beton teknolojisinin sınırlarını zorlayan, çevresel sürdürülebilirliği öncelik edinen alternatif bağlayıcı sistem arayışlarıyla başlamıştır. Geopolimer terimi ilk kez 1970'li yıllarda Fransız kimyager Joseph Davidovits tarafından ortaya atılmıştır. Davidovits (1978), alüminosilikat bazlı kaynakların alkali aktivasyon yoluyla polimerik bir yapıya dönüştürülebileceğini ve bu yapıların Portland çimentosuna kıyasla daha çevreci özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.

Davidovits'in çalışmaları, doğal volkanik tüflerin ve endüstriyel atıkların kimyasal olarak aktive edilerek bağlayıcı malzeme üretilebileceğini kanıtlamıştır. Özellikle eski medeniyetlerin volkanik tüf esaslı dayanıklı yapılar üretmiş olması, geopolimerlerin tarihi perspektifte incelenmesini mümkün kılmıştır. Bu bağlamda, antik Roma betonlarının dayanıklılığı geopolimer yapıların erken örnekleri olarak değerlendirilmektedir (Davidovits,1991). 1990'lerden itibaren geopolimer araştırmaları mühendislik düzeyinde ivme kazanmıştır. Başta UK ve YFC gibi

endüstriyel atıkların değerlendirilmesi ile çevreci bağlayıcı sistemlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Avustralya, Çin, Hindistan, Hollanda ve ABD gibi ülkelerde bu alanda çok sayıda deneysel ve uygulamalı çalışma yürütülmüştür (Provis ve van Deventer, 2009).

2000'li yıllarla birlikte sürdürülebilir inşaat teknolojileri çerçevesinde geopolimerler akademik literatürde hızla yer edinmiş, mekanik dayanım, kimyasal dayanıklılık, termal performans ve karbon salımı gibi parametreler açısından incelenmiştir. Ayrıca, 3D baskı ve prefabrik yapı elemanları gibi yeni nesil üretim tekniklerinde geopolimer malzemelerin kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir (Zhang vd., 2021). Sonuç olarak, geopolimerler hem tarihsel hem de modern bağlamda malzeme bilimi açısından kritik bir dönüşümü temsil etmektedir. OPC bazlı sistemlerin çevresel etkileri göz önünde bulundurulduğunda, geopolimerlerin gelişim süreci sürdürülebilir malzeme araştırmalarının öncüsü konumundadır.

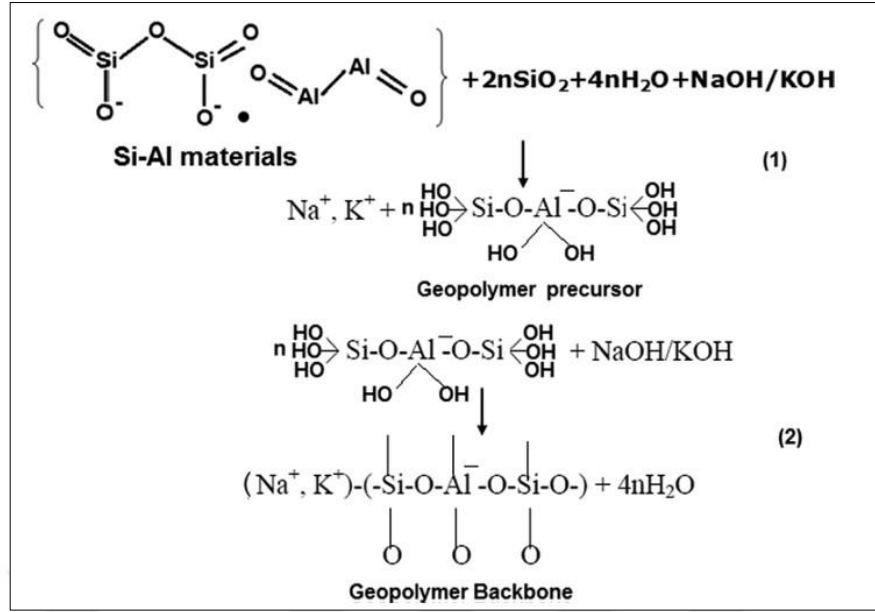
2.3 Geopolimerlerin Yapısı

Geopolimerler, modern yapı malzemesi teknolojilerinde sürdürülebilirlik hedeflerini destekleyen inorganik polimerlerdir. İlk olarak Joseph Davidovits tarafından 1970'lerde tanımlanan bu malzemeler, çevresel avantajları ve mühendislik performansları ile geleneksel Portland çimentosuna bir alternatif olarak önerilmiştir (Baran vd., 2023; Davidovits, 1979). Geopolimerler, alüminosilikat içeren malzemelerin alkali aktivasyon süreciyle bağlayıcı özellik kazanması sonucu oluşan üç boyutlu ağ yapısına sahip malzemelerdir (Singh ve Middendorf, 2020).

Geopolimerler, yüksek Al₂O₃ ve SiO₂ içeriğine sahip hammaddelerin alkali aktivasyon reaksiyonları sonucu oluşan dayanıklı bağlayıcı sistemlerdir. Bu polimerler, kimyasal olarak aşağıdaki formülle ifade edilir:



Burada M, alkali metal iyonlarını (örneğin Na⁺ veya K⁺), n ise polimerin üç boyutlu yapısındaki tekrarlanan birimleri ifade eder (Hardjito ve Rangan, 2014).



Şekil 2.2 Geopolimer oluşumunun şematik gösterimi (Singh vd., 2020)

Geopolimerler, genellikle UK, YFC ve metakaolin gibi endüstriyel atıklardan veya doğal alüminosilikat minerallerden üretilir (Baran vd., 2023). Bu malzemelerin tanımı, düşük enerji tüketimi ve düşük karbon ayak izi ile sürdürülebilir inşaat uygulamalarında benzersiz bir yere sahiptir (Singh ve Middendorf, 2020).

Geopolimerler, inorganik ve sentetik olarak oluşturulan alüminosilikat esaslı bağlayıcılardır ve yapısal özellikleri onları geleneksel Portland çimentosuna alternatif kılmaktadır. Temel olarak, geopolimerlerin yapısı, silisyum ve alüminyum içeren kaynakların yüksek alkalinite ortamında çözünmesi ve bu iyonların polikondensasyon tepkimeleri ile üç boyutlu amorf veya kısmen kristalin ağ yapıları oluşturmasıyla meydana gelir. Bu süreç, kimyasal olarak "geopolimerizasyon" olarak tanımlanır (Davidovits, 2008).

Geopolimerlerin yapısal omurgasını, N-A-S-H jeli oluşturur. Bu jel, düşük kalsiyum içeriğine sahip öncül malzemeler (örneğin UK sınıf F veya metakaolin) kullanıldığında oluşur. Eğer kalsiyum içeriği yüksek olan öncüller (örneğin cüruf) kullanılırsa, bu yapıya ek olarak kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) jeli de gelişir (Provis ve van Deventer, 2014). Bu iki jel fazı, geopolimerlerin dayanıklılık, su geçirimsizlik, mekanik dayanım ve kimyasal direnç gibi mühendislik özelliklerini belirleyen temel yapılarıdır.

Geopolimer yapı, alüminyum ve silisyum tetrahedralarının oksijen atomları aracılığıyla birbirine bağlanmasından oluşur. Bu bağlar, AlO_4^- ve SiO_4 tetrahedra birimlerinin birbirine bağlı olduğu, kovalent bağlarla güçlendirilmiş ağ yapılarını meydana getirir. AlO_4^- birimleri negatif yüklü olduğundan, yapının elektriksel dengesini sağlamak için sodyum (Na^+), potasyum (K^+) gibi alkali metal katyonları ile dengelenmeleri gerekir. Bu katyonlar, yapının gözenekli bölgelerinde mobil halde bulunur ve iyon iletkenliği gibi fiziksel özellikleri etkiler (Duxson vd., 2007).

Geopolimerlerdeki Si/Al oranı, yapının fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Bu oran genellikle 1,0 ile 3,5 arasında değişmekte olup, oran arttıkça yapı daha yoğun ve daha yüksek mekanik dayanıma sahip hale gelir. Düşük Si/Al oranı, daha fazla üç boyutlu bağ yapısı ve sertlik getirirken, yüksek Si/Al oranı viskoziteyi artırabilir ve işlenebilirliği zorlaştırabilir (Yip vd., 2005). Aynı şekilde, kullanılan aktivatörlerin ($NaOH$ ve Na_2SiO_3) oranı ve molar konsantrasyonu, geopolimerizasyon tepkimesinin kinetiğini ve nihai ürünün mikroyapısını etkiler.

Yapı, sadece kimyasal bağlarla değil, mikro gözeneklilik ve jel fazlarının düzenlenmesi yoluyla da mekanik özellik kazanır. Geopolimerlerin düşük gözenekliliğe sahip olması, su geçirgenliğini azaltırken; iç yapıda gelişen homojen jel dağılımı ise çatlak ilerlemesini önlemekte etkilidir (Zhang vd., 2014). Bu özellikler, özellikle kimyasal dayanıklılığın ve uzun ömürlü yapı elemanlarının geliştirilmesinde önem arz etmektedir.

Geopolimerlerde gözlenen ikili jel sistemi (N-A-S-H ve C-A-S-H), kalsiyum içeren sistemlerde birlikte bulunabilir. Bu yapıların bir arada bulunması, farklı iyonların (örneğin Ca^{2+} , Na^+ , Al^{3+}) çözünürlüğüne, pH ortamına ve kür koşullarına bağlıdır. Provis ve Bernal (2014), bu jel fazlarının geçişli olarak da oluşabileceğini ve bu durumun dayanım-mikroyapı ilişkisini belirlemede kritik olduğunu belirtmiştir.

Son olarak, bazı geopolimer sistemlerinde kristalin fazların oluşumu da gözlenebilir. Özellikle yüksek sıcaklıkta kür uygulanan geopolimerlerde zeolit benzeri kristal fazlar, amorf jeller arasında büyüyerek termal kararlılığı artırabilir. Bu faz geçişleri,

XRD ve SEM analizleriyle detaylı olarak izlenebilmektedir (Rashad, 2013; Yip vd., 2005).

Genel olarak değerlendirildiğinde, geopolimerlerin yapısı; öncül malzeme türü, alkali aktivatör bileşimi, Si/Al oranı, kür süresi ve sıcaklığı gibi birçok parametrenin etkisiyle şekillenen karmaşık ancak kontrollü bir inorganik polimer ağıdır. Bu yapı, onları hem mühendislik uygulamaları hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından oldukça değerli bir malzeme sınıfı haline getirmektedir.

2.4 Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri

Geopolimerlerin mekanik özellikleri, bağlayıcı sistemin içyapısı, kullanılan kaynak malzemenin reaktivitesi, aktivatör tipi ve oranı, kür koşulları, su/katı oranı ve mineral katkıların türüne bağlı olarak geniş bir değişkenlik göstermektedir. Bu özellikler hem malzemenin yapısal taşıyıcılık kapasitesi hem de uzun vadeli dayanıklılığı açısından belirleyicidir. Özellikle basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme mukavemeti ve elastik modül gibi parametreler, geopolimerlerin beton endüstrisinde portland çimentosuna alternatif olarak kullanılabilirliğini değerlendirmede temel ölçütlerdir (Duxson vd., 2007).

En yaygın mekanik özelliklerden biri olan basınç dayanımı, geopolimer sistemlerin olgunluk süreci ve bağlayıcı jel fazlarının yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Hardjito ve Rangan (2005), düşük kalsiyum içerikli UK (F sınıfı) bazlı sistemlerde NaOH ve Na₂SiO₃ kombinasyonu ile 60 MPa'ya kadar dayanım elde edilebileceğini belirtmiştir. Özellikle YFC içeren sistemlerde 28 günlük basınç dayanımı 70-90 MPa seviyelerine ulaşabilmekte, bu da C-A-S-H fazlarının ilavesiyle açıklanabilmektedir (Bernal vd., 2011).

Geopolimer betonun eğilme ve çekme dayanımı, bağlayıcının kırılma yapısı nedeniyle klasik betona kıyasla daha düşük olabilmektedir. Ancak bu durum, çelik, karbon veya polipropilen liflerle takviye edilerek önemli ölçüde iyileştirilebilir. Kumaravel ve Thivya (2014), polipropilen lif katkısıyla eğilme dayanımında %30'a varan artış gözlemlemiş, liflerin çatlak yayılımını kontrol altına alarak tokluk kazandırdığını bildirmiştir. Nematollahi vd. (2015) ise, lif takviyesinin sadece

mekanik değil, aynı zamanda süneklik üzerinde de olumlu etkileri olduğunu vurgulamıştır.

Elastisite modülü, yani rijitlik katsayısı, geopolimerin deformasyona karşı gösterdiği dirençle ilgilidir. Sofi vd. (2007) çalışmalarında, cüruf bazlı sistemlerde elastisite modülünün 30–35 GPa aralığında olduğunu; UK bazlı sistemlerde ise bu değer 20–28 GPa arasında seyrettiğini belirtmişlerdir. Bu farklılık, bağlayıcı fazın yoğunluğu ve jelin polimerizasyon derecesine bağlanmaktadır. Kür sıcaklığı bu noktada büyük önem taşır; çünkü özellikle düşük reaktif UK içeren sistemlerde ortam sıcaklığında kür uygulandığında polikondensasyon gecikmekte, bu da mekanik performansı zayıflatmaktadır (Temuujin vd., 2011).

Katkı maddeleri ve mineral katkıları geopolimer betonun mikro yapısını güçlendirerek hem kısa hem de uzun vadeli mekanik dayanımı olumlu yönde etkilemektedir. Nano-silika, mikrosilika, metakaolin ve zeolit gibi katkı maddeleri, bağlayıcı jel fazlarının yoğunlaşmasını sağlayarak boşluk oranını düşürür ve dayanımı artırır. Bernal vd. (2014), %2 nano-silika katkısının basınç dayanımını %15 oranında artırdığını ve gözenek yapısında önemli ölçüde iyileşme sağladığını belirtmiştir. Ayrıca, yüksek oranda kalsiyum içeren cürufların kullanımı, NaOH gibi kuvvetli aktivatörlerin etkisini artırarak hem C-A-S-H hem de N-A-S-H jellerinin eş zamanlı oluşumunu sağlamaktadır.

Geopolimerlerin mekanik özellikleri ile dayanıklılık performansı arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır. Bu bağlayıcı sistemler, asidik ve sülfatlı ortamlara karşı yüksek direnç göstermeleriyle öne çıkar. Bu direnç, bağlayıcının geçirgenliğinin düşük olması ve klorür iyonlarının içeriye difüze olmasını engelleyen sıkı mikro yapısı ile sağlanmaktadır. Rashad (2013), geopolimer harçların 800°C üzerindeki sıcaklıklarda dahi dayanımını koruduğunu ve yangına dayanıklı uygulamalar için uygun olduğunu vurgulamıştır.

Donma-çözülme döngüleri ve nem değişimlerine karşı dayanım da geopolimer betonun dayanıklılığını artırmaktadır. Kim vd. (2013), geopolimerlerin donma-çözülme dayanımının OPC esaslı betonlara eşit veya daha üstün olduğunu ve bu

özelliğın özellikle altyapı ve dış cephe uygulamaları için avantaj sağladığını belirtmiştir.

Geopolimerlerin mekanik özellikleri birçok parametreye bağılı olarak değışkenlik gösterse de uygun tasarım, katkı ve kür koşulları ile yüksek performanslı sistemler elde edilebilmektedir. Bu malzemeler, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamalarının yanında, yapısal güvenlik ve uzun ömür açısından da önemli potansiyel barındırmaktadır. Ancak standartların belirlenmesi ve uygulama koşullarının netleştirilmesi için ileri düzeyde araştırmalara ve sahada uygulanabilir örneklere ihtiyaç duyulmaktadır.

2.5 Geopolimerlerde Durabilite

Geopolimer bağlayıcı sistemlerin inşaat malzemesi olarak en dikkat çeken avantajlarından biri, kimyasal ve fiziksel çevresel etkenlere karşı gösterdikleri üstün dayanıklılıktır. Özellikle sülfat, asit, klorür ve karbonatlaşma etkilerine karşı direnci, donma-çözülme döngüsüne karşı kararlılığı ve düşük geçirgenlik özellikleri, geopolimerleri geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha uzun ömürlü ve sürdürülebilir bir seçenek haline getirmektedir.

Geopolimer sistemlerin yüksek dayanıklılığı, temel olarak bağlayıcı fazda oluşan N-A-S-H (sodyum alüminosilikat hidrat) jelinin yoğun, süreksiz ve kristal olmayan yapısından kaynaklanmaktadır. Bu yapı, su ve iyonların geçişine karşı dirençli olup, gözenekliliğı düşük ve bağ yapısı güçlüdür. Buna ek olarak, yüksek kalsiyum içeren kaynak malzemelerin kullanıldığı durumlarda C-A-S-H jellerinin varlığı, daha da sıkı bir matris oluşturarak dayanıklılığı artırmaktadır.

Sülfat dayanımı, özellikle kanalizasyon, zemin suyu ve endüstriyel tesislerdeki agresif çevre koşullarında önemlidir. Geopolimer sistemler, klasik çimento esaslı sistemlere göre sülfat iyonlarının bağlayıcı matrise zarar vermesine karşı çok daha dirençlidir. Bunun nedeni, kalsiyum sülfatın reaksiyona girmesiyle etrenjit ve thaumasit oluşumunun geopolimerlerde minimum düzeyde kalmasıdır. Çalışmalar, UK esaslı geopolimer harçların Na₂SO₄ çözeltisinde geleneksel çimentoya göre %30 daha az genleşme ve dayanım kaybı yaşadığını göstermiştir.

Asit dayanımı açısından da geopolimer sistemlerin performansı dikkat çekicidir. Çimento esaslı bağlayıcılarda kalsiyum bileşenlerinin çözünürlüğü nedeniyle pH değeri düşük ortamlarda bağlayıcı bozulurken, geopolimerlerde N-A-S-H jeller çözünmeye karşı daha dirençlidir. Rashad (2013), %5 H₂SO₄ ortamına maruz kalan geopolimer harçların 28 gün sonunda dayanımlarının yalnızca %10 azaldığını, klasik çimentolarda ise bu oranın %40'lara çıktığını rapor etmiştir.

Klorür iyon geçiş direnci, özellikle donatılı beton yapıların servis ömrünü doğrudan etkileyen bir parametredir. Klorür iyonları, donatıya ulaştığında paslanmaya yol açar. Geopolimer betonlar, klasik çimentolu sistemlere göre çok daha düşük klorür difüzyon katsayısına sahiptir. Bu durum, bağlayıcı fazdaki sıkı matris yapısı ve mikro yapının geçirgenliğinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Donma-çözülme döngüsüne karşı dayanıklılık da özellikle soğuk iklimlerdeki dış yapı elemanları için kritik öneme sahiptir. Geopolimer betonlar, yüksek yoğunluklu matris yapıları sayesinde su emme oranları düşük olduğu için donma esnasında hacimsel değişimlerden daha az etkilenmektedir. Bu da yüzeyde çatlama ve parçalanma riskini azaltır. Araştırmalar, 300'den fazla donma-çözülme çevrimi sonrası bile geopolimer betonlarda %90 üzeri dayanım korunumu sağlandığını göstermektedir.

Karbonatlaşma, CO₂ gazının beton içerisine difüze olup kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek kalsiyum karbonat oluşturması sonucu pH değerinin düşmesine yol açar. Bu da donatının paslanmasına zemin hazırlar. Geopolimer sistemlerde, portland çimentosuna göre çok daha az kalsiyum içeriği bulunması sebebiyle karbonatlaşmaya karşı direnç daha yüksektir.

Uzun dönem dayanıklılık açısından geopolimerlerin sunduğu avantajlar, özellikle altyapı, deniz yapıları, enerji santralleri ve asidik ortamlara maruz kalan endüstriyel tesislerde kullanım potansiyelini artırmaktadır. Mikroyapı analizleri, zamanla geopolimer matrisin daha kompakt hale geldiğini ve bu durumun geçirimsizliği daha da azalttığını ortaya koymuştur.

Geopolimer bağlayıcılar dayanıklılık bakımından çevresel etkilere karşı üstün performans sunmakta, bu sayede betonarme yapıların servis ömrünü artırmakta ve

bakım-onarım maliyetlerini düşürmektedir. Özellikle agresif çevre koşullarında geopolimerlerin tercih edilmesi, sürdürülebilir yapı üretimi açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

2.6 Geopolimerlerin Yangın Direnci

Geopolimer betonlar, yüksek sıcaklık ve yangına karşı dayanım performanslarıyla öne çıkan inşaat malzemeleri arasında yer almaktadır. Geleneksel Portland çimentosuna dayalı betonlar, yüksek sıcaklıklarda ($\geq 400^{\circ}\text{C}$) kalsiyum hidroksit, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve diğer hidrat fazlarının bozunması sonucu dayanım kaybına uğrarken, geopolimer sistemlerde dayanımın büyük bir kısmı korunabilmektedir. Bu avantaj, geopolimer bağlayıcıların silika ve alümina esaslı amorf jel yapısına sahip olmasından ve kalsiyum içeriğinin oldukça düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Çalışmalar, 600°C 'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz bırakılan geopolimer betonların %70'e kadar basınç dayanımı koruduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle UK ve YFC gibi endüstriyel atıklarla elde edilen geopolimer betonlar, termal stabilite açısından geleneksel betona göre üstün performans sergilemektedir. Bu durum, N-A-S-H jel fazının sıcaklıkla birlikte mikroskobik seviyede yeniden yapılandığını ve gözenek hacmindeki artışa rağmen bağlayıcı bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir.

Özellikle hafif agregalı geopolimer beton sistemleri, hem termal iletkenlik açısından düşük değerlere sahip olması hem de ısıya dayanıklı bağlayıcı matris yapısı ile yangına karşı yüksek direnç sunmaktadır. Bu sistemlerin ısıyı geç iletmesi, yangın sırasında yapının diğer bölümlerine ısı yayılımını geciktirir ve böylece taşıyıcı elemanların ani göçmesini önler.

Termal davranışın mekanik performans üzerindeki etkisini değerlendiren çalışmalarda, 800°C 'ye kadar olan sıcaklıklarda geopolimer betonların hacimsel stabiliteyi büyük ölçüde koruduğu ve ciddi çatlama ya da yapısal ayrışma göstermediği bildirilmiştir. Rashad (2013), özellikle YFC ile modifiye edilen geopolimerlerin ısı etkisi altında dahi bağlayıcılık özelliklerini sürdürdüğünü ve dayanım kayıplarının geleneksel çimentolu betonlara göre çok daha sınırlı olduğunu ifade etmektedir.

Yüksek sıcaklıklara maruziyet sonrasında yapılan mikroyapı analizlerinde, bağlayıcı matrisin camsı karakterinin arttığı, fakat geopolimerizasyonun geriye dönüşmediği, yani bağlayıcının kalıcı olarak yapısal stabilitesini koruduğu gözlemlenmiştir. Bu da geopolimer sistemleri, refrakter paneller, yangın duvarları ve fırın astarları gibi yüksek sıcaklık maruziyetinin söz konusu olduğu alanlar için ideal bir çözüm haline getirmektedir.

Yangın dayanıklılığı açısından, geopolimer betonların düşük termal genleşme katsayısı, yavaş kütle kaybı, düşük termal iletkenlik ve artan camsı faz oranı avantaj olarak öne çıkmaktadır. Özellikle lif katkıları (çelik, bazalt, polipropilen) ile zenginleştirilmiş geopolimer sistemlerde, yüksek sıcaklık kaynaklı çatlamlar sınırlandırılmakta ve tokluk artışı sağlanmaktadır. Yangına maruz kalan bu tür kompozitlerde, yapısal bütünlük korunarak can ve mal güvenliği açısından riskler azaltılabilmektedir.

Kısacası, geopolimer bağlayıcı sistemler, sadece çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda yangına karşı dayanıklılık performansı açısından da modern yapı teknolojilerinin gerekliliklerine yüksek düzeyde yanıt verebilen bir alternatiftir. Yüksek sıcaklık maruziyeti altında dayanım kaybının sınırlı olması, yapısal bütünlüğün korunması ve mikro yapının stabil kalması, bu sistemlerin özellikle afet riski taşıyan bölgelerde ve endüstriyel yapılarda kullanımını cazip hale getirmektedir.

2.7 Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Geopolimer teknolojisi, sahip olduğu çevresel ve teknik avantajlar sayesinde geleneksel çimento esaslı sistemlerin yerini alabilecek potansiyele sahiptir. Özellikle yüksek mekanik dayanım, kimyasal direnç, düşük karbon ayak izi ve yangına dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur. Bu alanlar hem yapısal hem de fonksiyonel uygulamaları kapsamaktadır.

2.7.1 İnşaat Sektörü

Geopolimerlerin en yaygın kullanım alanı, klasik yapı elemanlarının üretimidir. Taş, tuğla, blok ve prefabrik yapı elemanları, UK bazlı geopolimerler, yapı blokları ve

tuğlaların üretiminde kullanılarak hem yüksek dayanım hem de düşük karbon emisyonu sağlar (Wallah ve Rangan, 2006).

Zemin ve temel uygulamaları: Özellikle cüruf katkılı geopolimer bağlayıcılar, zemin stabilizasyonunda başarılı sonuçlar vermektedir. Geopolimer zemin sertleştiriciler, zeminlerin taşıma gücünü artırmakta kullanılmaktadır (Bakharev, 2005).

Yapı malzemeleri onarımı: Geopolimer harçları, tuzlanma ve sülfat etkisine karşı yüksek dirençleri nedeniyle altyapı onarımlarında tercih edilmektedir (Mehta ve Monteiro, 2014).

2.7.2 Yangın ve Yüksek Sıcaklık Uygulamaları

Geopolimerler, yüksek sıcaklıklara karşı üstün direnç göstermeleriyle öne çıkar. Bu nedenle:

Yangına dayanıklı paneller ve kaplamalar: Geopolimer kompozitler, yangın geciktirici malzeme olarak binaların iç ve dış cephelerinde kullanılır.

Refrakter tuğlalar ve döküm astarları: 1000°C üzeri dayanım gösteren geopolimer sistemler, endüstriyel fırın ve ocakların kaplamasında tercih edilmektedir (Rashad, 2013).

2.7.3 Atık Yönetimi ve Nükleer Endüstri

Geopolimerler, toksik ve radyoaktif maddeleri immobilize edebilme yeteneğine sahiptir. Örneğin:

Ağır metal ve radyoaktif atık stabilizasyonu: Stronsiyum, sezyum gibi iyonları yapısında hapsederek sızdırmazlık sağlar (Provis ve van Deventer, 2014).

Atık camların geri dönüşümü: Atık cam tozları, geopolimer öncülü olarak kullanılarak hem malzeme üretilmekte hem de atıklar değerlendirilmektedir (Zhang vd., 2014).

2.7.4 Yol ve Altyapı Uygulamaları

Geopolimer bağlayıcılar, yol yapımı ve zemin iyileştirmede kullanılmaktadır:

Yol kaplamaları: Cüruf ve UK esaslı geopolimer betonlar, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek dayanımı sayesinde asfalt ve beton yolların alt katmanlarında başarıyla kullanılmaktadır.

Borular ve menfezler: Geopolimer betonlar, sülfatlı ve klorürlü toprak ortamlarına karşı daha dayanıklı olduğu için kanalizasyon sistemlerinde kullanılmaktadır (Kumar ve Bhattacharjee, 2014).

2.7.5 Deniz Yapıları ve Liman Uygulamaları

Deniz ortamları, yüksek klor iyonu ve sülfat içeriği nedeniyle çimento esaslı sistemler için agresif koşullar sunar. Geopolimer betonlar, rıhtım duvarları ve iskele temelleri, beton şamandıralar ve su altı boru hatlarında yaygın kullanım alanına sahiptir. Geopolimer betonun düşük geçirgenliği, tuzlu suyun zararlı etkilerine karşı üstün durabilite özelliği sunar (Nath ve Sarker, 2015).

2.7.6 Enerji ve Savunma Sanayi

Jeotermal enerji santralleri: Geopolimerler, yüksek sıcaklığa dayanıklı döküm astarları ve yalıtkanlar olarak kullanılır.

Balistik koruma: Bazalt fiberle takviye edilmiş geopolimerler, darbe dayanımı yüksek panellerin üretiminde tercih edilmektedir (Sofi vd., 2007).

2.7.7 3D Yazıcılarla Üretim

Geleneksel üretim tekniklerinin aksine, geopolimer malzemeler 3D beton yazıcılarda başarıyla kullanılmaktadır. Özellikle hızlı priz süresi, düşük büzülme ve istenilen reolojik davranışlar bu alandaki kullanımını teşvik etmektedir (Duxson vd., 2007).

2.8 Geopolimerlerin Avantajları ve Çevresel Etkileri

Geopolimerler, modern inşaat sektöründe sürdürülebilirlik eksenli arayışlara verilen en güçlü teknik yanıtlardan biridir. Özellikle geleneksel Portland çimentosunun neden olduğu yüksek karbon salımı, enerji tüketimi ve çevresel tahribat, alternatif bağlayıcı sistemlere olan ihtiyacı ön plana çıkarmıştır. Bu bağlamda, 1970'lerde Davidovits tarafından teorik temelleri atılan geopolimer teknolojisi, yalnızca mühendislik anlamında değil, çevresel ve ekonomik açılardan da büyük fırsatlar sunmaktadır (Davidovits, 2008). Geopolimerler, alümina ve silika açısından zengin olan endüstriyel atıkların (örneğin UK, YFC, metakaolin gibi) alkali aktivatörlerle reaksiyona sokularak bağlayıcı bir matris oluşturması esasına dayanır. Bu sayede, klasik çimento proseslerinden çok daha düşük sıcaklık ve enerjiyle bağlayıcı üretimi mümkün olurken, aynı zamanda çevreye zararlı atıkların yeniden değerlendirilmesi sağlanır.

OPC üretimi sırasında, yalnızca kireçtaşının kalsinasyonu değil aynı zamanda klinker üretim sürecinde kullanılan enerji de ciddi bir karbon ayak izine neden olur. Ortalama olarak, bir ton çimento üretimi yaklaşık 0,8 ila 1 ton karbondioksit salımına yol açmaktadır (Turner ve Collins, 2013). Buna karşın, geopolimer sistemlerde kullanılan hammadde kaynakları çoğunlukla önceden yüksek sıcaklıklara maruz kalmış endüstriyel atıklardır; bu da ilave enerji ihtiyacını azaltır. Ayrıca, bağlayıcının kimyasal oluşumu yüksek sıcaklık prosesine ihtiyaç duymaksızın ortam koşullarında veya düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilir. Böylece toplam enerji tüketimi %50'lere varan oranlarda düşerken, CO₂ emisyonlarında da %60-80 arasında azalma sağlanabilmektedir (Habert vd., 2011).

Geopolimerlerin çevresel etkileri, sadece düşük karbon salımıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda endüstriyel atıkların geri kazanımı ve hammaddelerin yeniden değerlendirilmesi açısından da önemli katkılar sağlarlar. Özellikle UK ve YFC gibi yan ürünler, geopolimer üretiminde başlıca kaynaklar olarak kullanılmakta ve bu sayede hem atık miktarı azaltılmakta hem de yeni kaynakların çıkarılmasına duyulan ihtiyaç minimuma indirilmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2012). Bu yönüyle geopolimerler, dögüsel ekonomi ilkeleriyle tam uyum içinde bir yapı malzemesi

çözümüdür. Bununla birlikte, cam atıkları, tuğla tozu, pirinç kabuğu külü, kaolinik killer ve hatta atık kâğıt hamuru gibi çok çeşitli kaynaklar da geopolimer matrislerine dâhil edilerek malzemenin işlevselliği ve sürdürülebilirliği artırılmaktadır (Zhang vd., 2014).

Geopolimer sistemlerin mühendislik açısından sunduğu avantajlar da oldukça dikkat çekicidir. Bunlar arasında yüksek mekanik dayanım, düşük geçirgenlik, termal direnç, sülfat ve asit gibi agresif kimyasallara karşı yüksek dayanıklılık, düşük büzülme oranı ve yangına karşı üstün direnç yer almaktadır. Geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımları 40–80 MPa aralığında değişebilirken, özel formülasyonlarda bu değer 100 MPa seviyelerine kadar ulaşabilmektedir (Duxson vd., 2007). Ayrıca donma–çözülme döngülerine karşı yüksek dayanıklılık göstermeleri, onları özellikle dış ortam koşullarına maruz kalan altyapı uygulamalarında cazip hale getirir. Geopolimerlerin bu yüksek dayanıklılığı, mikroyapısında bulunan yoğun N-A-S-H ve C-A-S-H jel fazlarının iyon difüzyonunu sınırlandırmasıyla doğrudan ilişkilidir.

Bir diğer önemli avantaj, geopolimerlerin yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olmasıdır. OPC esaslı betonlar, 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ciddi dayanım kaybına uğrarken, geopolimer betonlar 800-1000°C sıcaklıklarda dahi mekanik özelliklerinin büyük kısmını koruyabilmektedir (Rashad, 2013). Bu özellikleri sayesinde, yangına maruz kalma riski bulunan yapılar, enerji santrali altyapıları, refrakter elemanlar ve ısı yalıtım panellerinde kullanımları mümkündür. Benzer şekilde, deniz yapılarında ve atık su arıtma tesislerinde, klorür ve sülfat iyonlarına karşı gösterdikleri üstün direnç sayesinde, klasik betonlardan daha uzun ömürlü performans sunarlar.

Geopolimer teknolojisinin bir diğer çevresel katkısı da düşük su gereksinimi ve düşük hidrasyon ısısıdır. OPC sistemlerinde su/çimento oranı, betonun işlenebilirliği ve dayanımı açısından kritik bir faktörken, geopolimer sistemlerde bağlayıcının alkali ortamda çözünmesi ve yeniden polimerizasyonu daha az suyla gerçekleşebilir. Bu sayede çökme, çatlama ve iç gerilme problemleri minimize edilir. Ayrıca, OPC sistemlerinde hidrasyon sürecinde yüksek miktarda ısı açığa çıkarken, geopolimerlerde bu ısı oldukça düşüktür; bu da sıcak hava koşullarında veya büyük hacimli dökümlerde termal çatlama azalır.

Geopolimerlerin yaşam döngüsü analizine göre, çimento bazlı sistemlere göre daha düşük çevresel etki katsayılarına sahip olduğu görülmüştür. Özellikle sera gazı salımı, su tüketimi ve enerji kullanımı bakımından üstünlük sağlarlar (Habert vd., 2011). Dahası, yerel atıkların kullanılması sayesinde hem nakliye kaynaklı emisyonlar düşmekte hem de bölgesel kalkınmaya katkı sağlanmaktadır. Ayrıca, geopolimer sistemlerin üretiminde kullanılan ekipman ve tesisler, büyük ölçüde çimento esaslı sistemlere benzerlik gösterdiğinden, mevcut altyapıların dönüştürülmesi maliyet açısından da avantajlıdır (Provis ve van Deventer, 2014).

Geopolimerlerin farklı mühendislik uygulamalarındaki başarısı, onların çok yönlü yapısından kaynaklanmaktadır. Zemin stabilizasyonu, otoyol tabakaları, kanalizasyon boruları, menfez sistemleri, prefabrik betonarme elemanlar, hafif yapı panelleri, 3D baskı malzemeleri, enerji santrali baca kaplamaları gibi çok çeşitli alanlarda geopolimer kullanımı mümkündür. Özellikle 3D beton yazıcılarında geopolimerlerin tercih edilmesi, onların düşük büzülme, hızlı priz ve yüksek viskozite özellikleriyle ilişkilidir. Bu tür uygulamalar, gelecekte yapı üretim süreçlerinin daha hızlı, daha esnek ve çevresel olarak daha az zararlı olmasını sağlayacaktır (Shilar ve Arce, 2022).

Savunma ve enerji sektörlerinde de geopolimerler geniş yer bulmaktadır. Nükleer atık immobilizasyonunda, geopolimer yapının iyon değişimine karşı direnci, radyoaktif iyonların hapsedilmesini sağlar. Özellikle sezyum ve stronsiyum gibi iyonlar, N-A-S-H jel yapısına kimyasal olarak bağlanarak uzun süreli stabilite sağlar (Provis ve van Deventer, 2014). Benzer şekilde, jeotermal enerji santrallerinde ısıya dayanıklı geopolimer astarlar kullanılmakta, bu sayede enerji verimliliği artırılmaktadır. Savunma sanayinde ise bazalt veya karbon fiberle güçlendirilmiş geopolimer matrisler, darbe dayanımı yüksek panellerin üretiminde tercih edilmektedir (Sofi vd., 2007).

Kentsel altyapılarda da geopolimer teknolojisinin çevresel etkisi önemlidir. Beton yolların altında kullanılan geopolimer esaslı temel katmanlar hem yapısal bütünlük sağlar hem de düşük bakım gerektirir. Aynı şekilde, atık su arıtma tesislerinin havuz ve boru kaplamalarında, geopolimerin düşük geçirgenliği sayesinde su sızıntısı, iyon migrasyonu ve betonarme donatı korozyonu engellenir.

Sonuç olarak, geopolimerler geleneksel çimentoya yalnızca çevresel değil, aynı zamanda teknik, ekonomik ve uygulama kolaylığı açısından da güçlü bir alternatif sunmaktadır. Sahip oldukları düşük karbon ayak izi, atık geri dönüşüm kapasitesi, mühendislik üstünlükleri ve çevre dostu üretim süreçleri, onları sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için vazgeçilmez kılmaktadır. Ancak, standartların oturması, büyük ölçekli uygulamaların yaygınlaşması ve alkali aktivatörlerin çevresel etkilerinin daha fazla incelenmesi, bu teknolojinin gelecek yıllarda daha etkili şekilde kullanılmasının önünü açacaktır.

Tablo 2.1 Geopolimerler malzemelerin avantajları (Baran vd., 2023; Davidovits, 2011; Singh ve Middendorf, 2020)

Bileşen	Özellikler	Avantajlar
Hafif Agregalar	Düşük yoğunluk, yüksek termal yalıtım	Enerji tasarrufu, düşük ağırlık
Normal Agregalar	Yüksek mekanik dayanım	Aşınma direnci, ekonomik çözüm
Uçucu Kül	Yüksek reaktivite, düşük maliyet	Düşük karbon ayak izi, dayanıklılık
Alkali Aktivatörler	Sodyum ve potasyum bazlı çözeltiler	Yüksek dayanıklılık, hızlı reaksiyon
Katkılar	Plastikleştiriciler, nano-silika, elyaflar	İşlenebilirlik, çatlak önleme, dayanım

Küresel ısınmayla mücadelede enerji tasarrufu, geopolimerlerin en önemli avantajlarından biridir. Portland çimentosunun yüksek sıcaklık gerektiren kalsinasyon süreçleriyle karşılaştırıldığında, geopolimer üretimi daha az enerji tüketir. Bu durum hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir fark yaratır (Kop ve Yazıcıoğlu, 2023). Bunun yanı sıra, geopolimerlerin uzun ömürlü kullanım avantajları, enerji tasarrufunu yapıların tüm yaşam döngüsü boyunca sürdürmesine olanak tanır (Bingöl, 2022).

Geopolimerlerin termal dayanıklılığı da öne çıkan özelliklerinden biridir. Yüksek sıcaklık dayanımı, yangın güvenliği gerektiren uygulamalarda bu malzemelerin kullanımını artırmaktadır (Çakmak ve Uysal, 2021). Yapılan araştırmalar, farklı kür koşullarının geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerinde belirgin etkiler

yaratabileceğini göstermektedir. Örneğin, yüksek sıcaklık kür işlemleri, basınç dayanımını artırarak malzemenin performansını iyileştirebilir (Demir vd., 2020). Ayrıca, geopolimerlerin korozyona karşı dayanıklı yapısı, yapıların uzun vadeli dayanıklılığına katkıda bulunmaktadır (Yıldırım ve Demir, 2019).

Geopolimerlerin uygulanabilirliği kullanılan hammaddelere ve üretim süreçlerine bağlıdır. Hammadde çeşitliliği nedeniyle her endüstriyel atık malzemenin aynı reaktiviteye sahip olmadığı ve bu durumun nihai ürünün performansını etkilediği bilinmektedir (Kara vd., 2019). Uygun hammaddelerin seçimi ve üretim süreçlerinin optimize edilmesi gereklidir. Geopolimerlerin bu çeşitliliği, aynı zamanda farklı mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanı yaratmaktadır (Yılmaz vd., 2020).

Sonuç olarak, geopolimerler, çevresel sürdürülebilirlik ve performans açısından yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Düşük karbon emisyonları, enerji tasarrufu ve atık geri dönüşümü gibi özellikleriyle geleceğin inşaat sektöründe önemli bir yer edinmesi beklenmektedir (Kaya vd., 2021).

2.9 Geopolimer Betonlar İçin Kullanılan Bileşenler

2.9.1 Agregalar

Hafif agregalar, betonun yoğunluğunu azaltmak ve termal yalıtım özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılır. Pomza, genleştirilmiş perlit (GP), genleştirilmiş kil ve EPS gibi malzemeler bu grupta yer alır (Davidovits, 2011). Kaya (2022), pomzanın düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik özellikleriyle enerji tasarrufu gerektiren yapı projelerinde yaygın olarak kullanıldığını belirtmiştir. GP, düşük yoğunluğu ve mükemmel termal yalıtım özellikleriyle hafif geopolimer betonlarda tercih edilen bir agrega türüdür (Singh ve Middendorf, 2020). EPS ise, betonun ağırlığını önemli ölçüde azaltırken termal performansı artıran modern bir hafif agrega olarak öne çıkmaktadır (Baran vd., 2023).

Tablo 2.2 Hafif agregaların geopolimer beton üzerindeki etkileri (Aydın ve Baradan, 2013; Baran vd., 2023; Demirboğa ve Gül, 2003; Kaya, 2022; Topçu ve Uygunoğlu, 2010)

Agrega Türü	Yoğunluk (kg/m ³)	Termal İletkenlik (W/mK)	Dayanıklılık Etkisi
Pomza	600-900	0,2-0,4	Orta
GP	150-300	0,05-0,08	Yüksek
EPS	50-150	0,03-0,06	Düşük

Kum, çakıl ve kırma taş gibi normal agregalar, yüksek mekanik dayanım ve aşınma direnci sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Yazıcı ve Karagöl, 2022). Bu agregalar, özellikle yüksek dayanım gerektiren altyapı projelerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Geri dönüştürülmüş beton agregalarının kullanımı ise çevresel etkilerin azaltılmasında ve atık yönetimi süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Hardjito ve Rangan, 2014).

Hafif agregalar, geopolimer betonun yoğunluğunu azaltarak hem enerji verimliliği sağlar hem de yapısal uygulamalarda kullanılabilirliği artırır. Bu malzemelerin seçimi, projenin gereksinimlerine ve çevresel hedeflere göre optimize edilmelidir. Pomza, geliştirilmiş perlit ve EPS gibi agregalar, HG beton üretimi için etkili çözümler sunmaktadır (Yazıcı ve Karagöl, 2022).

2.9.1.1 Pomza

Pomza taşı, volkanik kökenli doğal bir agregadır ve özellikle inşaat sektörü açısından dikkate değer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Magmanın ani soğuması sırasında içerisinde hapsolan gazların dışarı çıkamamasıyla oluşan gözenekli yapısı, pomzayı hafiflik ve yüksek yalıtım kabiliyeti ile donatır. Bu çok gözenekli yapı, onu hem düşük yoğunluklu hem de mükemmel bir termal ve akustik yalıtım malzemesi haline getirir. Yoğunluğu genellikle 450 ile 800 kg/m³ arasında değişir ve bu değer onu hafif beton üretiminde kullanılabilir kılar. Kimyasal olarak incelendiğinde, pomzanın yüksek oranda silis (SiO₂) ve alümina (Al₂O₃) içerdiği, ayrıca belirli oranlarda potasyum oksit, sodyum oksit, kalsiyum oksit gibi bileşenlere sahip olduğu görülmektedir. Bu bileşim, onu potansiyel bir pozolan olarak çimento esaslı sistemlerde veya geopolimer üretiminde reaktif bir katkı malzemesi haline getirir.

Amorf yapısı sayesinde, özellikle ince öğütüldüğünde çimento hidratasyon ürünleriyle reaksiyona girerek ikincil bağlayıcı fazlar oluşturabilir.

Pomza agregası, hafif beton blokların üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kayseri-Talas bölgesine ait pomza kullanılarak üretilen hafif beton blokların mekanik özellikleri ve yangın altındaki davranışları incelenmiştir. Normal agregalı beton bloklarla karşılaştırıldığında, pomza içeren hafif beton blokların yangın direnci açısından daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Yangın etkisine maruz kalan hafif beton bloklarda basınç dayanım kaybı %6 iken, normal beton bloklarda bu kayıp %18 olarak tespit edilmiştir (Akyüncü, 2019).

Tablo 2.3 Pomzanın mekanik özellikleri (ASTM D4404; TS EN 1097-3/1097-6/933-1; Baran vd., 2023; Davidovits, 2011; Demirboğa ve Gül, 2003; Kaya, 2022; Topçu ve Uygunoğlu, 2007)

Özellik	Değer/Aralık	Test Standardı/Açıklama
Tane Boyutu Dağılımı	< 2,36 mm	TS EN 933-1 veya ASTM C136
Birim Ağırlık (kg/m ³)	500-800	TS EN 1097-3 (Hafif malzeme sınıfı)
Özgül Ağırlık	2,2-2,6 g/cm ³	TS EN 1097-6 (Gözeneklilik nedeniyle düşük)
Su Emme (%)	20-50	TS EN 1097-6 (24 saat suda bekletme)
Gözeneklilik (%)	40-70	ASTM D4404 (Mercek yöntemi veya civa porozimetre)
Isı İletkenliği	0,10-0,30 W/mK	ISO 8301 (Düşük değer, yalıtım avantajı)
Sertlik (Mohs)	5-6	Mineralojik test
pH	7,5-9,0	EPA 9040D (Bazik karakter, toprak düzenlemede kullanım avantajı)

Pomza agregasının köpük beton üretiminde kullanımı da araştırılmıştır. Farklı bölgelerden temin edilen pomza agregaları kullanılarak üretilen köpük betonların yoğunluk, basınç dayanımı, ısı iletkenlik katsayısı, ses yutma katsayısı ve ses iletim kaybı değerleri incelenmiştir. Sonuçlar, pomza agregası ile üretilen köpük betonların düşük yoğunluk ve iyi ısı yalıtım özellikleri sergilediğini göstermektedir (Kılınçarslan vd., 2017). Mekanik dayanımı düşüktür; basınç dayanımı 1-5 MPa civarındadır, bu nedenle yapısal taşıyıcı olmayan uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak yüzey yapısının pürüzlü oluşu, bağlayıcı matrikslerle güçlü aderans oluşturmasına olanak tanır. Bu özelliği, geopolimer betonlarda ya da hafif çimentolu sıvalarda ideal bir

agrega haline gelmesini sağlamaktadır. Isıl iletkenlik katsayısı düşük olup yaklaşık 0,1-0,3 W/mK arasında değişmektedir; bu özelliği sayesinde enerji verimliliği hedeflenen yapılarda kullanılmaktadır. Ayrıca yanmaz bir malzeme olup yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır ve bu nedenle yangına dayanıklı sistemlerin tasarımında da kullanılabilir. Doğal, toksik olmayan ve bol miktarda bulunan bir kaynak olması, pomzanın çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir yere sahip olmasını sağlamaktadır. Türkiye gibi volkanik kuşakta yer alan ülkelerde rezervlerin genişliği nedeniyle hem ekonomik açıdan uygun fiyatlıdır hem de yerli kaynakların değerlendirilmesine olanak tanır. Tüm bu nitelikleri göz önüne alındığında, pomza taşı hem konvansiyonel hem de alternatif bağlayıcı sistemlerle birlikte kullanılarak hem çevresel hem de teknik anlamda sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.

Geopolimer harçlarda agrega türünün etkisi üzerine yapılan bir diğer çalışmada, pomza agregası ve CEN standart kumu kullanılarak üretilen geopolimer harçların birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık dirençleri incelenmiştir. Sonuçlar, pomza agregası ile üretilen harçların daha düşük birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı sergilediğini, ancak yüksek sıcaklık direnci açısından avantajlı olduğunu göstermektedir (Yazar, 2021).

Tablo 2.4 Pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri (Baran vd., 2023; Davidovits, 2011; Demirboğa ve Gül, 2003; Ekmen ve Algın, 2023; Kaya, 2022; Topçu ve Uygunoğlu, 2007)

Özellik	Açıklama
Yoğunluk	Düşük yoğunluk sayesinde hafif yapıların üretimine olanak tanır.
Su Emme Kapasitesi	Yüksek su emme kapasitesi, betonun işlenebilirliğini artırır.
Gözenekli Yapı	Isı ve ses yalıtımı sağlar.
Termal İletkenlik	Düşük termal iletkenlik ile enerji verimliliğini destekler.
Mekanik Dayanım	Optimum karışım oranları ile yüksek mekanik dayanım elde edilir.
Yangın Direnci	Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması, güvenlik açısından avantaj sağlar.
Çevresel Sürdürülebilirlik	Geopolimer matrislerle uyumu çevre dostu yapı malzemesi olmasını sağlar.
Kimyasal Yapısı	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ ve K ₂ O gibi bileşenlerden oluşur; asidik karakterlidir.

Pomza agregası, hafif ve dayanıklı yapısıyla geopolimer kompozitlerde ve hafif beton üretiminde önemli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Pomza kullanımı, betonun mekanik özelliklerini iyileştirirken, birim ağırlığını azaltmakta ve ısı iletkenliğini düşürmektedir. Ancak, optimum performans için karışım oranları, aktivatör konsantrasyonları ve üretim koşullarının dikkatlice belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, pomza agregasının farklı uygulamalardaki etkilerini daha iyi anlamak için ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.9.1.2 Genleştirilmiş vermikülit (GV)

Genleştirilmiş vermikülit, volkanik kökenli doğal bir silikat mineralidir ve yüksek sıcaklıklarda ani ısıtma işlemi sonucu hacminin 8 ile 20 katına kadar genişmesiyle elde edilir. Bu işlem sonucunda oluşan boşluklu, hafif ve gözenekli yapı; yapı malzemeleri içerisinde dolgu, hafif agrega ve ısı yalıtım katkısı olarak kullanımını mümkün kılmaktadır (Albayrak ve Yılmaz, 2022). Düşük yoğunluklu yapısı (80-150 kg/m³), yüksek su tutma kapasitesi ve ısı iletkenliğinin düşüklüğü (yaklaşık 0,11-0,15 W/m·K), bu malzemeyi hem enerji verimliliği hem de sürdürülebilirlik açısından avantajlı kılmaktadır (Yıldız ve Sarıoğlu, 2020).

Isı iletkenliği açısından, vermikülit katkılı betonlar ve harçlar geleneksel karışımlara kıyasla belirgin avantaj sağlar. Yapılan çalışmalarda, %30-50 oranında genleştirilmiş vermikülit kullanılan karışımlarda ısı iletim katsayısı %40-60 oranında düşmüştür (Albayrak ve Yılmaz, 2022). Bu durum, enerji verimli bina kabuklarının tasarımında önemli avantaj sağlamaktadır.

Genleştirilmiş vermikülitin kullanımı aynı zamanda malzemenin toplam yoğunluğunu azaltmakta ve böylece yapının taşıdığı ölü yükü düşürmektedir. Yıldız ve Sarıoğlu (2020) tarafından yapılan çalışmada, çimento esaslı harçlarda %40'a kadar vermikülit kullanımıyla yoğunluğun yaklaşık %35 oranında azaldığı ve bu sayede hafif yapı elemanları üretiminin mümkün olduğu belirtilmiştir.

Yangın dayanımı ise vermikülit katkısının öne çıkan diğer bir yönüdür. Zhang ve Wang (2023), yüksek sıcaklıklarda test ettikleri vermikülit katkılı yüksek dayanımlı çimentolu kompozitlerde 800°C'nin üzerinde bile yapısal bütünlüğün ve kırılma

tokluğunun korunduğunu göstermiştir. Bu özellik, yangına dayanıklı paneller, baca duvarları ve fırın sistemleri gibi yüksek sıcaklık maruziyeti olan yapılarda kullanım için ideal bir çözüm sunmaktadır.

Vermikülit aynı zamanda, çimento veya geopolimer matrisle olan ara yüzey bağ dayanımını da olumlu etkiler. Gözenekli ve pürüzlü yüzey yapısı, bağlayıcı faz ile mekanik kilitlenmeyi artırır. Bunun sonucu olarak, bağ dayanımı artar ve agregadan kaynaklı çatlakların yayılması engellenebilir (Kurt ve Akın, 2021). Bu durum özellikle çekme dayanımı ve eğilme mukavemeti üzerinde olumlu sonuçlar doğurmaktadır.

Ancak, yüksek su emme kapasitesi, vermikülit kullanılan sistemlerde dikkatle yönetilmesi gereken bir parametredir. Yüksek emme özelliği, taze harçlarda su/bağlayıcı oranının hassas şekilde ayarlanmasını gerekli kılar. Aksi takdirde işlenebilirlikte bozulmalar ve kıvam kayıpları yaşanabilir (Yıldız ve Sarıoğlu, 2020). Bu nedenle optimum vermikülit oranı genellikle %10–30 arasında sınırlandırılmaktadır.

Geopolimer bağlayıcı sistemlerde yapılan çalışmalarda, vermikülitin bu alternatif bağlayıcılarla da uyumlu olduğu görülmüştür. Kurt ve Akın (2021), UK ve YFC bazlı geopolimer karışımlarda %20 oranında vermikülit kullanımının hem yoğunluğu düşürdüğünü hem de 28 günlük basınç dayanımını 30-35 MPa seviyelerinde tuttuğunu bildirmiştir. Bu sonuç, konut tipi taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında güvenle kullanılabilmesini göstermektedir.

Son olarak, geliştirilmiş vermikülitin sürdürülebilirlik açısından önemi büyüktür. Doğal kaynaklardan elde edilebilmesi, inert yapısı, geri dönüştürülebilirliği ve düşük enerji tüketimiyle üretilebilmesi, yapı sektöründe dögüsel ekonomi ve karbon salımının azaltılması hedefleriyle örtüşmektedir (Albayrak ve Yılmaz, 2022). Bu yönüyle vermikülit, çevre dostu malzeme arayışlarında geleceğin potansiyel katkılarından biri olarak değerlendirilmektedir.

GV hafiflik ve çok yönlülüğü nedeniyle geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bunlar arasında yalıtım malzemesi, hafif beton ve harç üretimi, yangın geciktirici sistemler

gibi kullanım alanları bulunmaktadır. Düşük termal iletkenlik katsayısı sayesinde binalarda ısı ve ses yalıtımında kullanılır (Türeyen, 2019).

Tablo 2.5 GV'nin özellikleri (Baran vd., 2023; Davidovits, 2011; Demirboğa ve Gül, 2003; Ekmen ve Algın, 2023; Kaya, 2022; Topçu ve Uygunoğlu, 2007)

Özellik	Açıklama
Düşük Yoğunluk	Hafifliği sayesinde hafif beton ve harç üretiminde kullanılır.
Yüksek Porozite	Yüksek porozite ile ısı ve ses yalıtımı sağlar.
Termal Dayanım	Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olup yangın geciktirici sistemlerde tercih edilir.
Puzolanik Aktivite	Çimento matrisleriyle reaksiyona girerek dayanımı artırır.
Kimyasal Bileşim	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO gibi bileşenlerden oluşur.
Mekanik Dayanım	Düşük mekanik dayanım, ancak hafif beton uygulamalarında yeterli performans sunar.
Akustik Yalıtım	Akustik yalıtım malzemesi olarak kullanılır.

Tablo 2.6 GV'nin mekanik özellikleri (ASTM C330; TS EN 1097-6; Demirboğa ve Gül 2003; Kaya, 2022)

Özellik	Değer/Aralık	Test Standardı	Uygulama Örneği	Kullanım Alanı
Yoğunluk (kg/m ³)	60-130 (gevşek)	ASTM D7481	Hafif dolgu malzemeleri	Hafif beton çalışması
Basınç Dayanımı (MPa)	0,1-2,5	ASTM C165	Yalıtım panelleri	Kompozit malzemeler
Elastisite Modülü (MPa)	10-20	ASTM C623	Esnek kaplamalar	İnşaat uygulamaları
Çekme Dayanımı (MPa)	0,05-0,3	ASTM D1623	Polimer kompozitler	Malzeme bilimi
Eğilme Dayanımı (MPa)	0,2-1,0	ASTM C393	Duvar panelleri	Yapı malzemeleri
Darbe Direnci	Düşük (kırılgan)	ASTM D256	Koruyucu kaplamalar	Mekanik testler
Aşınma Direnci	Orta (Mohs 1,5-2,5)	ASTM G65	Zemin dolguları	Jeoteknik çalışmalar

Hafiflik ve iyi işlenebilirlik özellikleri, GV'yi hafif beton üretiminde ideal bir agrega yapar (Mo vd., 2018). Yüksek sıcaklıklara dayanımı nedeniyle yangın geciktirici sistemlerde kullanılır (Kalem ve Harmancı, 2022). Vermikülit ve GV, fiziksel ve

kimyasal özellikleri nedeniyle inşaat sektöründe hafif ve yalıtım performansını artırıcı malzeme olarak tercih edilmektedir. Ancak, bu malzemenin farklı uygulama alanlarındaki etkilerini daha iyi anlamak için ileri düzeyde araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 2.7 GV'nin kimyasal özellikleri (Baran ve Atabey, 2023; Kaya, 2022; Topçu ve Uygunoğlu, 2007)

Özellik	Değer	Test standardı	Açıklama
Kimyasal Formül	-	-	Hidrate magnezyum-alüminyum silikat yapısı.
SiO ₂	38-46%	ASTM C128	Yüksek silika içeriği ısı direncini artırır.
MgO	24-30%	ASTM C128	Bazik karakter sağlar, asitlere direnç.
Al ₂ O ₃	10-16%	ASTM C128	Termal stabiliteye katkıda bulunur.
Fe ₂ O ₃	6-12%	ASTM C128	Renk (kahverengi/altın) ve kimyasal inertlik sağlar.
K ₂ O	1-5%	ASTM C128	Düşük alkali içerik, çimento ile uyumluluk.
CaO	1-3%	ASTM C128	Düşük içerik, alkali reaktiviteyi sınırlar.
H ₂ O	4-12%	ASTM C221	Genleşme sırasında buharlaşan yapısal su.
pH	7-9	ISO 787-9	Nötr-bazik karakter, toprak düzenlemede uygun.
Elektriksel İletkenlik	0,5-2,5 dS/m	ASTM D1125	Düşük tuz içeriği

2.9.2 Bağlayıcılar

2.9.2.1 Uçucu kül (UK)

UK, kömürün termik santrallerde yakılması sonucu oluşan ince partiküllü bir atık malzeme olup hem çimento esaslı sistemlerde hem de geopolimer beton üretiminde geniş çapta bağlayıcı materyal olarak değerlendirilmektedir. Kimyasal olarak silis (SiO₂), alümina (Al₂O₃), kalsiyum oksit (CaO) ve demir oksit (Fe₂O₃) gibi bileşenleri içeren UK, özellikle puzolanik aktivitesi yüksek olan düşük kalsiyumlu (sınıf F) türleriyle bağlayıcılık özellikleri sergiler.

Geopolimer sistemlerde UK bağlayıcı olarak kullanılmasındaki temel etken, alkali aktivasyon altında amorf yapılı silikat ve alüminatların çözünerek üç boyutlu N-A-S-H (sodyum-alümino-silikat-hidrat) jel yapısını oluşturmasıdır. Bu jel, bağlayıcı matrisin mekanik dayanımını, dayanıklılığını ve uzun vadeli stabilitesini sağlamaktadır. Özellikle düşük kalsiyum içeriğine sahip UK kullanımı, sistemde sekonder hidrat fazların oluşmasını engelleyerek, saf geopolimerizasyon reaksiyonunun ön plana çıkmasını sağlar. Çok sayıda çalışmada, UK esaslı geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımı 25-50 MPa aralığında tespit edilmiş ve bu değerlerin özellikle konut ve altyapı yapıları için yeterli olduğu vurgulanmıştır. Bunun yanında, UK kullanılan karışımların işlenebilirliğinin yüksek, hidrasyon ürünlerinin homojen ve gözeneklilik oranının düşük olduğu belirtilmektedir. Bu durum, düşük geçirgenlik ve yüksek dayanıklılığa katkıda bulunur. Özellikle yüksek kalsiyum içeriğine sahip UK (sınıf C) kullanıldığında sistemde C-A-S-H (kalsiyum-alümino-silikat-hidrat) jelleri de oluşmakta ve erken dayanımlar artmaktadır. Ancak, bu sistemlerde uzun süreli durabilite açısından bazı dezavantajlar söz konusu olabilir. Düşük kalsiyumlu UK ile elde edilen geopolimer sistemler ise sülfat, asit ve klorür gibi kimyasal saldırılara karşı daha yüksek direnç göstermektedir. UK bazlı bağlayıcı sistemlerde alkali aktivatörlerin türü ve oranı büyük önem taşımaktadır. NaOH ve sodyum silikat çözeltileri en yaygın kullanılan aktivatörler arasında yer alır. Yapılan çalışmalar, Na₂O içeriğinin belirli bir aralıkta optimize edilmesi durumunda hem dayanımın arttığını hem de alkali silikat tüketiminin azaltılarak maliyet ve çevresel etki açısından avantaj sağlandığını göstermiştir.

Tablo 2.8 UK'nin kimyasal bileşimi

Kimyasal Analiz	
Oksit	%
SiO ₂	58,70
Al ₂ O ₃	23,95
Fe ₂ O ₃	6,37
CaO	0,80
MgO	2,18
Na ₂ O	0,39
K ₂ O	3,28
TiO ₂	1,20
SO ₃	0,72
LOI	2,20

Geopolimer sistemlerde UK kullanımının bir diğer avantajı, malzemenin yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği dirençtir. Yangına dayanıklı yapı elemanlarında kullanılmak üzere geliştirilen sistemlerde, UK esaslı geopolimer karışımlar 800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bile mekanik dayanımlarını önemli ölçüde koruyabilmektedir.

Tablo 2.9 UK'nin mekanik özellikleri (Baradan vd., 2023; Yazıcı ve Karagöl, 2022)

Özellik	Değer/Aralık	Test Standardı	Açıklama
Özgül Ağırlık	2,1-2,8 g/cm ³	ASTM C188	Silis (SiO ₂) ve alümina (Al ₂ O ₃) içeriğine bağlı değişir.
Birim Ağırlık	600-1200 kg/m ³ (gevşek)	ASTM C29	Kompakt durumda 1000-1500 kg/m ³ 'e çıkabilir.
Blaine Özgül Yüzey Alanı	250-600 m ² /kg	ASTM C204	Yüksek yüzey alanı, puzolanik aktiviteyi artırır.
Basınç Dayanımı (7 gün)	3-10 MPa	ASTM C311	Çimento ile karıştırıldığında elde edilen mortar dayanımı.
Basınç Dayanımı (28 gün)	15-30 MPa	ASTM C311	Puzolanik reaksiyonun zamanla gelişmesi.
Elastisite Modülü	10-25 GPa	ASTM C469	Çimento matrisine göre daha düşük, ancak dayanıklılık sağlar.
Su Emme Oranı	%10-25	ASTM C642	Gözenekli yapı nedeniyle yüksek su emme kapasitesi.

UK hem çimento hem de geopolimer sistemlerde ekonomik, çevresel ve performans açısından değerli bir bağlayıcı alternatifi olarak ön plana çıkmaktadır. Bu malzeme hem endüstriyel atıkların geri dönüşümüne katkı sağlamakta, hem de karbon salımı yüksek olan portland çimentosunun yerine geçerek daha sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

2.9.2.2 Çimento

Portland çimentosu esaslı bağlayıcı sistemler, Avrupa Standardı EN 197-1 kapsamında CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V olmak üzere beş temel sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, çimentonun içerisindeki portland klinker oranına, kullanılan mineral katkıların türüne ve belirli performans özelliklerine göre şekillenmektedir (Özdemir ve Kaya, 2021). Her sınıf hem teknik performans hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından farklı avantajlar ve dezavantajlar sunar. Günümüz inşaat mühendisliğinde ve sürdürülebilir malzeme üretiminde, bu sınıflar arasında seçim yapılırken hem yapısal hem de ekolojik faktörler dikkate alınmaktadır.

CEM I çimentosu, katkı maddesi içermeyen ve portland klinkeri %95 ila %100 oranında barındıran klasik portland çimentosudur. Bu tip çimento, hızlı priz alma ve yüksek erken dayanım gerektiren betonarme yapılarda sıkça tercih edilmektedir. Bununla birlikte, CEM I üretim süreci oldukça yüksek enerji tüketimine ve CO₂ salımına neden olmaktadır. Literatürde, her bir ton CEM I çimentosu üretimi için yaklaşık 0,9 ton CO₂ salındığı ve bu durumun inşaat sektöründe çevresel baskıyı artırdığı belirtilmektedir (Mehta ve Monteiro, 2014).

CEM II tipi çimentolar, portland-kompoze çimento olarak adlandırılır ve klinkerin yanı sıra UK, granüle YFC, doğal puzolan, kalker gibi katkı maddelerini belirli oranlarda içerebilir. Klinker oranı genellikle %65 ile %94 arasında değişir. Katkı oranı %6 ile %35 arasında olabilir ve bu oranlar hem mekanik hem de kimyasal performansı etkiler (Turner ve Collins, 2013). UK içeren CEM II çimentolar, düşük ısı açığa çıkarma özellikleri sayesinde kütle betonlarda tercih edilirken, cüruf katkılı türler deniz yapıları gibi agresif ortamlara uygundur.

CEM III sınıfı çimentolar, granüle YFC içeren çimentolardır. Bu sınıfta klinker oranı genellikle %5 ila %65 arasında olup, cüruf oranı %35 ila %95 arasında değişebilir. Bu tür çimentolar, hidrasyon sürecinde daha yavaş tepkimeler verir ancak uzun vadeli basınç dayanımları oldukça yüksektir. Özellikle sülfat, klorür ve magnezyum içeren çevre koşullarında yüksek dayanıklılık sunar. Bu özellikleri nedeniyle tünel yapımı, liman inşaatları ve atık su altyapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Scrivener vd., 2018).

CEM IV tipi çimentolar ise puzolan içeren portland-kompoze çimentolardır. Puzolanlar, doğal ya da yapay kaynaklı silikat esaslı malzemelerdir ve bağlayıcı özellik göstermezler; ancak portlandit gibi hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek bağlayıcı faz oluştururlar. CEM IV çimentolar, düşük hidrasyon ısı ve yüksek kimyasal dayanıklılığı sayesinde baraj inşaatlarında, temel sistemlerinde ve agresif çevre koşullarındaki betonlarda tercih edilmektedir. Bu çimentolar, çevreye olan etkileri en düşük olanlar arasında yer alır (Duxson vd., 2007).

CEM V sınıfı çimentolar, iki farklı mineral katkının birlikte kullanıldığı kompoze çimentolardır. Genellikle UK ile cüruf ya da puzolan ile kalker gibi kombinasyonlar içerir. Bu sınıf, farklı katkı türlerinin sinerjik etkilerini bir araya getirerek hem mekanik hem kimyasal performans açısından çok yönlü sonuçlar doğurur. CEM V çimentoların dayanıklılık, düşük ısı açığa çıkarma ve karbon salımının düşük olması gibi özellikleri, sürdürülebilir inşaat malzemeleri üretiminde tercih edilmelerini sağlar (Provis ve van Deventer, 2014).

Bu çimento sınıfları arasındaki temel fark, içerdiği klinker miktarına bağlı olarak değişen çevresel etkilerdir. Klinker üretimi, yüksek sıcaklık gerektirdiğinden enerji yoğun bir süreçtir ve bu da doğrudan karbon salımını etkiler. CEM I gibi yüksek klinkerli çimentoların çevresel etkileri daha fazlayken, CEM III ve CEM V gibi katkı oranı yüksek çimentolar daha sürdürülebilir seçeneklerdir. Yapılan yaşam döngüsü analizlerine göre, CEM III tipi çimentoların karbon ayak izi, CEM I'e kıyasla %40'a kadar daha düşük olabilmektedir (Turner ve Collins, 2013).

Tablo 2.10 CEM II 42,5R B-S tip çimento özellikleri (Baran vd., 2023; Davidovits, 2011; Ekmen ve Algin, 2023; Kaya, 2022; Singh ve Middendorf, 2020; Yazıcı ve Karagöl, 2022)

Özellik	Açıklama
Basınç Dayanımı	2 günlük dayanım en az 20 N/mm ² , 28 günlük dayanım 42,5-62,5 N/mm ² arasında
Sülfat Direnci	YFC içeriği ile sülfatlı ortamlara dayanıklı
Kimyasal Dayanıklılık	Deniz yapıları ve agresif kimyasal koşullarda uzun vadeli dayanıklılık sağlar
Hidratasyon Isısı	Düşük hidratasyon ısı ile termal çatlamalara karşı dirençlidir
İşlenebilirlik	Betonun kolay işlenebilirliğini artırır
Karbonatlaşma Direnci	Farklı çevre koşullarında karbonatlaşmaya karşı iyi direnç sağlar

Ek olarak, CEM sınıfları sadece çevresel değil, performans açısından da uygulama alanlarına göre çeşitlilik göstermektedir. Örneğin, CEM I çimentosu erken yaş dayanımı nedeniyle prefabrik elemanlarda tercih edilirken, CEM III ve CEM IV sınıfları kimyasal dayanıklılığı nedeniyle altyapı ve su altı uygulamalarında daha yaygındır.

Tablo 2.11 CEM II 42,5 R çimentosu kimyasal özellikleri ve bileşenleri

Oksit	Değer (%)
SiO ₂	23,60
Al ₂ O ₃	6,02
Fe ₂ O ₃	3,13
CaO	56,23
MgO	3,43
SO ₃	2,58
Serbest Kireç	1,17
Na ₂ O+ 0,658 K ₂ O	0,69
Klorür	0,0064

Ayrıca CEM II çimentolarının alkali aktivasyon potansiyeli, geopolimer sistemlerinin kararlılığına olumlu katkı sağlar. Yani hem klasik hidrasyon ürünlerinin hem de geopolimerizasyon reaksiyonlarının aynı ortamda yürütülebildiği hibrit bağlayıcı sistemler elde edilebilir. Bu yaklaşım, özellikle %30-50 oranında portland çimentosu içeren hibrit sistemlerde uzun vadeli performansın artırılmasına yardımcı olur (Puertas vd., 2018).

Tablo 2.12 CEM II 42,5 R çimentosu dayanımı

Gün	Dayanım (MPa)
1 Gün	18,2
2 Gün	25,3
7 Gün	37,3
28 Gün	54,1

Tablo 2.13 CEM II 42,5 R çimentosu fiziksel özellikleri

Özellikler	Değerler
Özgül Yüzey (cm ² /g)	4717
90 mm elek bakiye %	0,1
32 mm elek bakiye %	2,7
Özgül Ağırlık g/cm ³)	3,09
(Su/Çimento, %)	30,1
Priz başlangıcı – priz sonu (dak)	130 - 180

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, CEM II çimentosunun geopolimer sistemlerde kullanımını, karbon ayak izinin azaltılmasına da katkı sağlar. Özellikle UK ve cüruf gibi atık bazlı katkıların yer aldığı CEM II/B-V ve CEM II/B-S türleri, klinker oranının düşük olması nedeniyle %20-30 oranında daha az CO₂ emisyonu sağlar (Turner ve Collins, 2013). Bu özellik, geopolimerlerin çevresel sürdürülebilirlik hedefine hizmet eder.

2.9.3 Aktivatörler

Alkali aktivatörler, geopolimer bağlayıcı sistemlerinin temelini oluşturan, alüminosilikat esaslı malzemelerin çözünürlüğünü sağlayarak reaksiyon kinetiğini yönlendiren bileşiklerdir. Geopolimerizasyon süreci, reaktif silika ve alümina içeren kaynak malzemelerin yüksek pH ortamında çözünerek N-A-S-H (sodyum alüminosilikat hidrat) veya C-A-S-H (kalsiyum alüminosilikat hidrat) türü amorf jel fazlarına dönüşmesiyle gerçekleşmektedir (Davidovits, 2008; Duxson vd., 2007). Bu süreçte, aktivatör türü ve özellikleri sistemin erken ve nihai dayanımı, dayanıklılığı, su emme, termal davranış gibi temel yapı malzemesi performanslarını doğrudan etkilemektedir.

En yaygın kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) olmakla birlikte, potasyum bazlı aktivatörler ve karbonat tuzları da araştırmalarda alternatif olarak ele alınmıştır (Provis ve van Deventer, 2014). NaOH, alüminosilikat yapıları çözmede oldukça etkilidir ve özellikle düşük reaktiviteye sahip UK bazlı sistemlerde yüksek molarite değerlerinde tercih edilmektedir. Ancak tek başına kullanıldığında oluşan jel yapının zayıf olduğu ve nihai dayanımların düşük kaldığı gözlemlenmiştir (Hardjito ve Rangan, 2005).

Na₂SiO₃ kullanımını ise sistemdeki Si/Al oranını artırarak oluşan jel fazın yoğunluğunu ve dayanıklılığını artırmakta; işlenebilirliği düşürse de uzun vadeli performansa önemli katkı sağlamaktadır. Nath ve Sarker (2015) çalışmalarında sodyum silikat/NaOH oranının 1,5-2,5 aralığında optimum sonuçlar verdiğini ve bu oranın dışında kalan sistemlerde çatlama risklerinin arttığını bildirmiştir. Na₂SiO₃ aynı

zamanda bağlayıcının kalınlaşma sürecini de etkileyerek sistemin reolojik davranışına yön verir (Chindaprasirt vd., 2009).

Son yıllarda, çevresel ve ekonomik nedenlerle daha düşük alkaliniteye sahip alternatif aktivatörler araştırılmaktadır. Bunlar arasında en öne çıkanlar sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum sülfattır (Na_2SO_4). Bu bileşiklerin kullanımı hem maliyeti düşürmekte hem de karbon ayak izini azaltmaktadır (Bernal vd., 2014). Ancak bu sistemlerin aktivasyon potansiyeli düşüktür ve genellikle ek kür sıcaklığı, reaksiyon süresinin uzatılması veya yüksek kalsiyumlu bileşenlerin (örneğin GGBFS) ilavesi gerekmektedir.

Özellikle düşük kalsiyumlu sistemlerde (örneğin F sınıfı UK) yüksek molaritede NaOH çözeltileri (12M-16M) tercih edilmektedir. Ancak bu durum karışımın işlenebilirliğini önemli ölçüde düşürmekte ve yerleştirme zorluklarına yol açmaktadır (Yip vd., 2008). Buna karşın, YFC gibi kalsiyum içeriği yüksek malzemeler ile oluşturulan geopolimer sistemlerde daha düşük molarite değerlerinde bile yüksek dayanım elde edilebilmektedir. Bu da alkali aktivatör seçiminin, kaynak malzeme ile doğrudan ilişkili olduğunun önemli bir göstergesidir.

Geopolimerlerde kullanılan alkali aktivatörlerin bir diğer önemli yönü, hidrasyon ve polikondensasyon süreçlerine etkileridir. Özellikle hibrit bağlayıcı sistemlerde (örneğin CEM II ile desteklenmiş geopolimerler), hem portland çimentosunun hidrasyonu hem de geopolimerizasyon eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Puertas vd. (2018), Na_2SiO_3 bazlı sistemlerde CEM II çimentosunun hidrasyonunun hızlandığını ve nihai mikroyapının daha homojen olduğunu belirtmiştir.

Kür sıcaklığı ve süresi, aktivatörün reaktivitesini belirleyen diğer önemli faktörlerdir. Düşük sıcaklıkta (20-30°C) kürlenmiş sistemlerde özellikle Na_2SiO_3 kullanımı ön plana çıkmaktadır. Çünkü bu tür ortamlarda NaOH tek başına yeterli çözünürlüğü sağlayamamakta ve bağlayıcının mukavemet kazanımı yavaşlamaktadır (Yıldız ve Sarıoğlu, 2020). Isıl kür uygulaması (60-90°C), aktivasyon sürecini hızlandırmakta ve erken yaş dayanımını artırmaktadır. Bu, özellikle prefabrik eleman üretiminde yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir.

Alkali aktivatörlerin çevresel etkileri de değerlendirilmelidir. NaOH üretimi, endüstriyel ölçekte oldukça enerji yoğundur ve karbon salınımı yüksektir. Turner ve Collins (2013), NaOH kullanımı ile oluşturulan geopolimerlerin karbon ayak izinin klasik portland çimentosuna göre %50-60 oranında düşük olduğunu; ancak bu farkın aktivatör tipi ve dozajına göre değiştiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda daha düşük dozajlı sistemler veya alternatif aktivatörlerin tercih edilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, geopolimerlerde kullanılan alkali aktivatörler sadece bir bağlayıcı bileşeni değil, sistemin tüm fiziksel, kimyasal ve çevresel parametrelerini belirleyen temel unsurlardır. Uygun aktivatör seçimi hem ekonomik verimlilik hem de malzeme performansı açısından kritik öneme sahiptir. Geopolimer teknolojisinin geniş ölçekli uygulamaları için, aktivatör-malzeme etkileşimlerinin daha fazla araştırılması ve standartlaştırılması gerekmektedir.

2.10 Literatüre Ait Bazı Çalışmalar

Geopolimerler, geleneksel bağlayıcı malzemelere alternatif olarak sürdürülebilir ve çevre dostu özellikleriyle öne çıkan malzemelerdir. Hafif agregalar, geopolimerlerde yoğunluğu azaltmak ve yalıtım özelliklerini iyileştirmek amacıyla sıkça tercih edilmektedir. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar arasında UK ve CEM II 42,5R B-S tipi çimentonun bağlayıcı olarak kullanıldığı ve pomza ile vermikülit gibi hafif agregaların dahil edildiği birçok araştırma bulunmaktadır.

Kaya vd. (2020), UK ve YFC'nin geopolimer bağlayıcı olarak kullanıldığı çalışmalarında, farklı oranlarda alkali aktivatör ile hazırlanmış hafif agregalı karışımların mekanik dayanım ve su geçirgenliği özelliklerini incelemişler, UK ve cüruf karışım oranlarının mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Ekmen ve Algin (2023), geri dönüştürülmüş geopolimer agregalarının çimento esaslı harçlarda kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, farklı oranlarda geopolimer agregası ve bazalt lif takviyesi ile üretilen harçların basınç dayanımı, çekme dayanımı ve su emme özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş agregaların

mekanik özellikler üzerinde olumlu etkiler yarattığını, ancak yüksek oranlarda kullanımının çekme dayanımı üzerinde sınırlı etkiler oluşturduğunu göstermiştir.

İlkentapar ve Eren (2021), hafif agrega olarak geliştirilmiş EPS içeren UK tabanlı geopolimer harçlar üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Farklı EPS oranlarının kullanıldığı karışımlarda, agreganın artırılmasının birim ağırlığı önemli ölçüde azalttığı, ancak dayanım özelliklerinde belirgin bir azalma gözlemlendiği belirtilmiştir. Çalışmada, EPS'nin yalıtım özelliklerini geliştirdiği ve özellikle yapı hafifliği gerektiren projelerde avantaj sunduğu vurgulanmıştır.

Aydın vd. (2021), hafif beton üretiminde yapay sinir ağları ile optimizasyon çalışmaları yapmış ve farklı bağlayıcı malzeme oranlarının betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, UK ve pomza kombinasyonunun, mekanik dayanım açısından başarılı sonuçlar verdiği ve su geçirgenliğini azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bağlayıcı olarak kullanılan çimento ve UK oranlarının termal özellikler üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Duran ve Mermerdaş (2016), YFC ve UK içeren geopolimer harçlarda farklı alkali aktivatörlerin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, pomza agregasının dayanım ve termal iletkenlik özelliklerine olan katkıları değerlendirildiğinde, özellikle yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybının düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, pomza içeren numunelerde hidrasyon ürünlerinin homojen dağılım gösterdiği belirtilmiştir.

Örüş (2022), GP ve kil agregalarının HG harçlarda kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, UK ve alkali aktivatörler ile hazırlanan karışımların düşük yoğunluk ve yüksek izolasyon özellikleri sunduğu, ancak dayanım değerlerinin belirli bir seviyede kaldığı rapor edilmiştir. Özellikle, kür koşullarının mekanik dayanım üzerinde belirleyici olduğu belirtilmiştir.

Karaaslan vd. (2022), kalsiyum alüminat çimentosu ve UK katkılı HG harçların sülfat direncini değerlendirmiştir. Sonuçlar, kalsiyum alüminat çimentosunun harçların kimyasal dayanıklılığını artırdığını ve özellikle zorlu çevresel koşullarda performansı olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Pomza bazlı karışımların ise hafiflik ve mekanik dayanım özellikleri açısından avantaj sağladığı ifade edilmiştir.

Güneş (2019), yapay hafif agregalı çelik lif takviyeli yüksek dayanımlı kompozitlerin rötre ve dayanım özelliklerini incelemiştir. Farklı çimento ve UK oranlarının kullanıldığı bu çalışmada, çelik lif oranının artmasıyla kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştiği ve rötre davranışının minimize edildiği gözlemlenmiştir. Hafif agregaların kompozitlere entegre edilmesiyle yoğunluğun azaldığı ve termal performansın arttığı belirtilmiştir.

Kılıç ve Sert (2011), pomza ve perlit içeren hafif agregalı betonların mekanik özelliklerini değerlendirmiştir. Sonuçlar, hafif agregaların betonun su emme kapasitesini artırırken, yoğunluğunu azalttığını ve termal iletkenlik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, pomza kullanımının özellikle hafif yapı uygulamalarında önemli bir avantaj sunduğu ifade edilmiştir.

Literatürdeki bu çalışmalar, hafif agregaların ve geopolimer bağlayıcıların yapı malzemesi olarak kullanımını konusundaki çeşitliliği ve potansiyeli gözler önüne sermektedir. UK ve CEM II 42,5R B-S tipi çimento ile pomza ve vermikülit kombinasyonları hem dayanıklılık hem de hafiflik açısından sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, farklı agrega ve bağlayıcı kombinasyonlarının optimize edilmesi, gelecekteki yapı malzemesi uygulamaları için büyük önem taşımaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu çalışmada, geopolimer betonun laboratuvar ortamında üretilmesi, temel mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi ve çevresel etkiler karşısındaki performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Geopolimer üretiminde; pomza, GV, SH, SM, Çatalağzı Termik Santrali'nden elde edilen UK (F tipi kül) ve CEM II tipi çimento kullanılmıştır.

3.1.1 Agregalar

Geopolimer beton üretiminde kullanılan hafif agregalar, betonun yoğunluğunu düşürerek yapıların daha hafif ve enerji verimli olmasını sağlamakla birlikte, termal ve akustik yalıtım özelliklerini artırır. Hafif agrega olarak yaygın şekilde kullanılan pomza, volkanik kökenli doğal bir malzeme olup, gözenekli yapısı sayesinde düşük yoğunluk ve yüksek ısı dayanımı sunar (Smith ve Jones, 2015). GV ise ısıtma işlemiyle hacmi artırılmış bir silikat mineralidir; yüksek yüzey alanı ve su tutma kapasitesi ile hem bağlayıcıların kimyasal reaksiyonunu destekler hem de betonun genel performansını iyileştirir (Brown, 2017).

Çalışmada hafif agrega olarak pomza ve GV kullanılmış, GV pomza yerine, %25; 50; 75 ve 100 oranlarında hacimsel olarak yer değiştirilerek karışımlarda yer almıştır. Şekil 3.1'de kullanılan agrega malzemelerin görselleri yer almaktadır.



Şekil 3.1 Geopolimer harç karışımında kullanılan agregalar

Malzemenin dikkat çeken özelliklerinden biri, 800-1000°C'de ısıtılma sonucu hacminin 8-12 kat artması ve gözenekli bir yapı kazanmasıdır. Bu genişleme prosesi sırasında kimyasal bileşimde önemli bir değişiklik olmamakta, ancak fiziksel yapı tamamen dönüşmektedir. Genleşmiş vermikülitin pH değeri 7-9 aralığında olup, bu özelliği onu nötr-bazik karakterli bir malzeme yapmaktadır (Marcos, 2009).

Tablo 3.1 GV Tane boyutu dağılımı

Tane Boyutu (mm)	Elekten Geçen (%)
1,4	46,30
1,0	35,00
0,7	12,50
0,5	4,30
0,25	1,90

Pomza, düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik ve doğal puzolanik özellikleri sayesinde geopolimer beton karışımlarında yaygın olarak kullanılan hafif agregalardan biridir. Türkiye'nin dünya pomza rezervlerinin yaklaşık %40'ına sahip olması, bu doğal kaynağın yapı malzemelerinde kullanımını cazip hale getirmektedir (Kaya, 2022).

Geopolimer bağlayıcı sistemlerde pomza kullanımı, betonun yoğunluğunu azaltarak hem termal yalıtımı iyileştirmekte hem de taşıma ve işçilik maliyetlerini düşürmektedir. Bununla birlikte, pomzanın yüksek su emme kapasitesi, karışımın su/bağlayıcı oranını ve işlenebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, karışım dizaynı yapılırken agreganın nem dengesi göz önünde bulundurulmalıdır (Baran vd., 2023).

Çalışmalar, pomza katkılı geopolimer betonların dayanım açısından geleneksel agregalarla kıyaslandığında benzer performans sergilediğini göstermektedir. Aynı zamanda karbon ayak izini azaltıcı etkisi, pomzayı sürdürülebilir inşaat malzemesi olarak öne çıkarmaktadır (Yazıcı ve Karagöl, 2022).

Tablo 3.2 ve 3.3'de pomzanın özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 3.2 Pomza fiziksel özellikleri

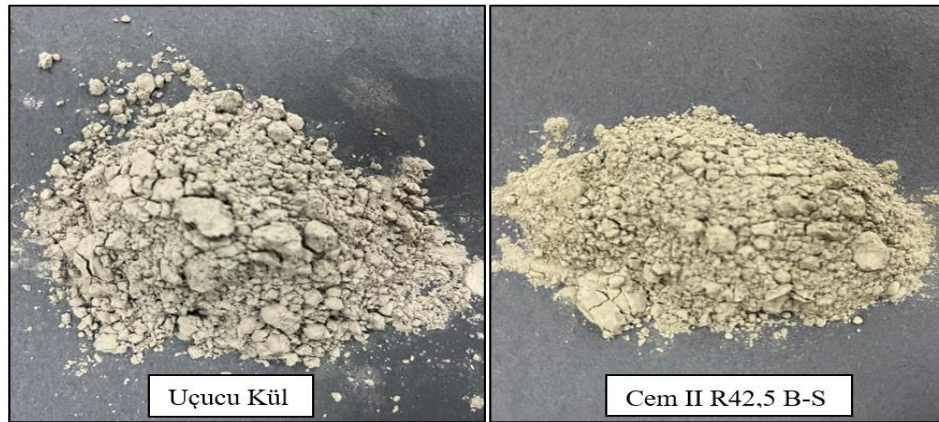
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,08
Su Emme Kapasitesi	14,03

Tablo 3.3 Pomza elek analizi

Pomza	
Tane Boyutu (mm)	Elekten geçen (%)
2,36	99,84
1,18	82,6
600μ	78,48
300μ	72,13
150μ	82,58
75μ	93,8
Pan	90,57

3.1.2 Bağlayıcılar

Geopolimer betonun temel bileşenlerinden biri olan bağlayıcılar, alüminosilikat kaynaklarının aktivasyonu ile sertleşme sağlayan kimyasal reaksiyonları başlatır. Bu süreçte, UK ve YFC gibi alüminosilikat bakımından zengin malzemeler bağlayıcı olarak kullanılır. Bu malzemeler, alkalin aktivatörlerle reaksiyona girerek geopolimerleşme adı verilen süreci oluşturur.

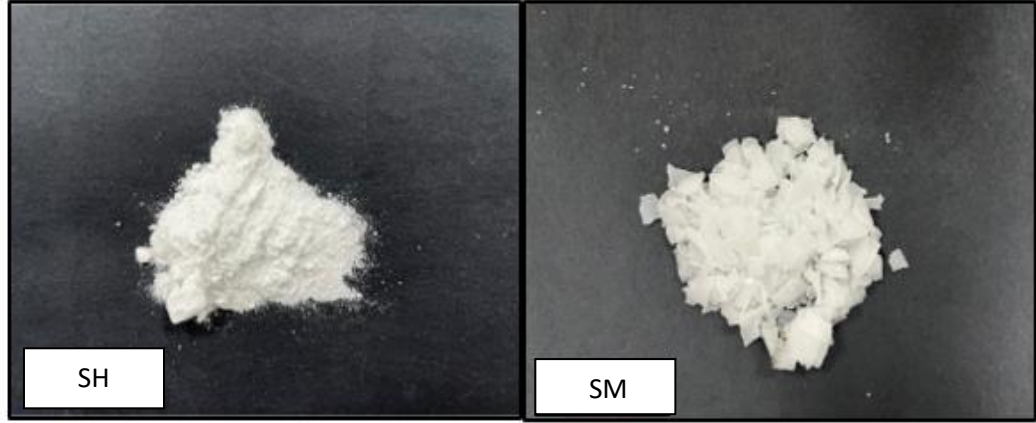


Şekil 3.2 Geopolimer harç karışımında kullanılan bağlayıcılar

Bu deneysel çalışmada bağlayıcı olarak, Çatalağzı Termik Santrali'nden elde edilen UK (F tipi kül) ve CEM II B-S 42,5R tipi çimento sabit oranda bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Şekil 3.2'de kullanılan bağlayıcı malzemeler gösterilmiştir.

3.1.3 Aktivatörler

Bu çalışma SH ve SM olmak üzere iki tip aktivatör kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Geopolimer harç karışımında kullanılan aktivatörler

SH çözeltisi 16 M'ye göre laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Molalite (M) (3.1) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

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

• Hacim = 1 litre

• $M = n / V$ (1 lt çözücü) = $16 / 1 = 16 \text{ mol / litre} = 16 \text{ molalite (M)}$

Çözeltinin molalitesi Denklem (3.2)'ye göre hesaplanmıştır:

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

NaOH: 40 gram

• $16 \text{ mol} * 40 = 640 \text{ g SH}$ 1 litre suda çözdürülmüştür.

SM çözeltisi ise 10 M'ye göre laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Molalite (M) (3.1) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

• Hacim = 1 litre

• $M = n / V$ (1 lt çözücü) = $10 / 1 = 10 \text{ mol} / \text{litre} = 10 \text{ molalite (M)}$

Çözeltinin molalitesi Denklem (3.2)'ye göre hesaplanmıştır:

$\text{Na}_2 \text{SiO}_3$: 80 gram

• $10 \text{ mol} * 80 = 800 \text{ g SM}$ 1 litre suda çözdürülmüştür.

Geopolimer üretiminde kullanılan SH çözeltisi, laboratuvar ortamında %10 molar konsantrasyonda, granül NaOH'in saf su içerisinde çözündürülmesiyle ortam sıcaklığında hazırlanmıştır. SS çözeltisi ise ticari sıvı formda temin edilir veya NaOH ile SiO_2 'nin kontrollü karıştırılmasıyla hazırlanarak, 20-25°C'de sabit tutularak deneye hazır hale getirildi.

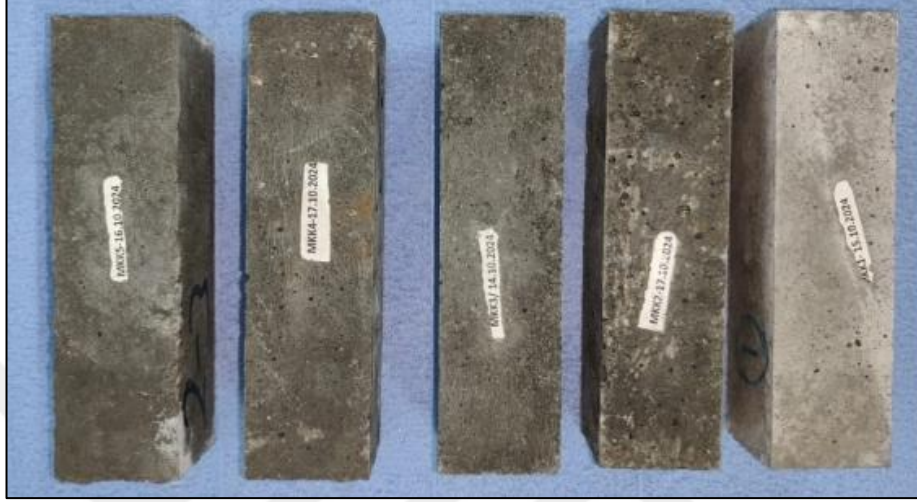
3.1.4 Numune Üretim Prosesi

TS-EN196-1 ile uyumlu olarak agrega (pomza ve GV), bağlacı (UK ve CEM II B-S 42.5 R), aktivatör (SH ve SM) ve su kullanılmıştır. Her karışım için bağlayıcı sabit tutulmuş GV hacimce pomza yerine ikame edilmiştir (Tablo 3.4).

Tablo 3.4 GP karışım malzemeleri (kg/m^3)

Kod	Pomza (kg)	GV (kg)	UK (kg)	CEM II B-S 42,5 R (kg)	SM (kg)	SH (kg)	Su (l)
MKK1	670	0	350	150	150	100	155
MKK2	500	24	350	150	150	100	156,6
MKK3	335	48	350	150	150	100	120,5
MKK4	170	72	350	150	150	100	125
MKK5	0	96	350	150	150	100	85

Geopolimer harç hazırlanırken, bağlayıcı ve alkali aktivatör oranları dikkatle belirlenmiştir. UK ve çimento bağlayıcıları ile GV ve pomza homojen olarak kuru karışımı yapılmıştır. SH ve SM çözeltileri uygun sıcaklıkta ve vizkozitede homojen olana kadar karıştırılıp kuru karışıma eklenmiştir.



Şekil 3.4 Numune örnekleri

3.2 Yöntem

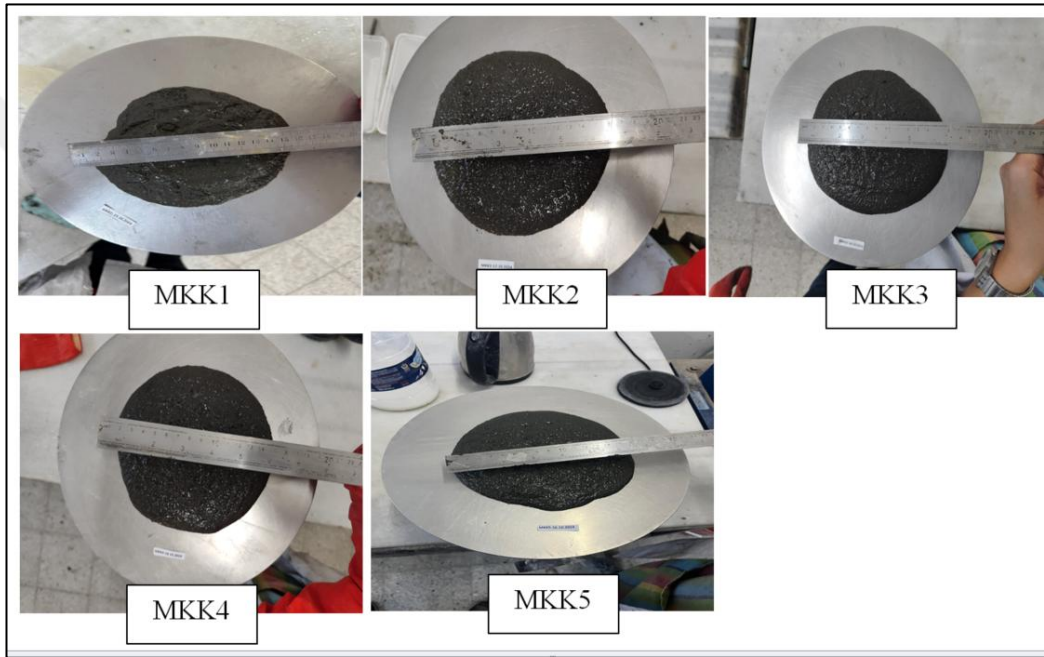
3.2.1 Yayılma Deneyi

Yayılma deneyi taze harcın işlenebilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu deney, karışımın kendi ağırlığıyla yayılma kapasitesini ölçerek kıvam ve akıcılık gibi özellikleri hakkında bilgi verir. Yayılma çapı, harcın kalıba yerleşebilme kabiliyetini, yüzey düzgünlüğünü ve saha uygulamalarındaki davranışını önceden öngörmeyi sağlar. Bu bağlamda, deneyin standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir.

Yayılma deneyinin gerçekleştirilmesinde hazırlanan harç, Abram konisi ($\varnothing 70$ mm üst, $\varnothing 100$ mm alt, 60 mm yükseklik) kullanılarak metal tabla üzerine yerleştirilir. Kalıp hızlıca ve dik bir şekilde yukarı kaldırıldığında harç serbest şekilde yayılmaya başlar. Oluşan yayılma çapı iki dik yönde ölçülerek ortalaması alınır. Deneyin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığının 20-25 °C aralığında sabitlenmesi önerilmektedir.

Yayılma çapı sonuçları genellikle 160-200 mm aralığında olduğunda karışım işlenebilir kabul edilir. Daha düşük değerler, karışımın sert kıvamlı ve kalıba yerleşme kapasitesinin düşük olduğunu gösterir. Aşırı yayılma ise, segregasyon, homojen olmayan yerleşme ve mekanik dayanım kaybı gibi problemlere yol açabilir. Bu nedenle yayılma çapının, karışım tasarımına göre optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu işlemten sonra yayılma tablasındaki harcın çapı (cm hassasiyetinde) iki yönden ölçülür ve sonuçlar kaydedilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Yayılma deneyine tabi tutulan harç numuneleri

3.2.2 Basınç Dayanımı Deneyi

Çalışmalar, SH konsantrasyonu arttıkça basınç dayanımının belirli bir noktaya kadar yükseldiğini, ancak çok yüksek molaritelerde dayanımın azaldığını göstermektedir (Ekmen ve Algın, 2023). UK oranı yüksek olan karışımlar daha düşük erken yaş dayanımı gösterirken, metakaolin ve YFC içeriği arttıkça ilk gün dayanımları da artmaktadır (Kaya, 2022).

Kürleme sıcaklığı da dayanımı etkileyen bir başka önemli parametredir. Geopolimer harçlarda 60-90 °C arasında yapılan 24 saatlik termal kür işlemi, bağlayıcı matrisin daha hızlı gelişmesini ve yüksek basınç dayanımlarının elde edilmesini sağlar (Singh

ve Middendorf, 2020). Basınç dayanımı deneyi aynı zamanda katkı malzemelerinin etkisini de değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 3.6 Basınç dayanımı ölçülen numune

Basınç dayanım testi Denklem (3.3)'e göre hesaplanmaktadır. Deney sonucu ve denklem hesapları MPa cinsinden kaydedilir.

$$\sigma = P/A \quad (3.3)$$

P: Uygulanan kuvvet (N)

A: Kesit alanı (mm²)

σ : Basınç dayanımı (MPa)

3.2.3 Eğilme Dayanımı Deneyi

Geopolimer harçların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde eğilme dayanımı deneyi, özellikle çatlak oluşumu ve çatlama öncesi davranışın incelenmesi açısından önemli bir test yöntemidir. Çekme dayanımıyla doğrudan ilişkili olan bu parametre, yapı malzemesinin kırılma derecesi ve çatlama karşı direnci hakkında bilgi verir. Eğilme dayanımı, harcın fiber katkısı içeriği, bağlayıcı özellikleri, agrega tipi ve kür koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Baran vd., 2023).

TS EN 196-1 ve ASTM C348 standartlarına göre gerçekleştirilen bu deneyde genellikle 40×40×160 mm boyutlarındaki prizma numuneler tercih edilir. Deney sırasında numune üç nokta eğilme aparatına yerleştirilir ve ortadan yükleme uygulanarak kırılma anındaki maksimum yük kaydedilir (Şekil 3.7). Elde edilen değer, yükün uygulandığı mesafe ve numune kesitine göre hesaplanarak MPa cinsinden eğilme dayanımı olarak raporlanır (Yazıcı ve Karagöl, 2022). Bu test aynı zamanda, harcın elastik modülünü ve sünekliğini değerlendirmek için de kullanılır.

Kürleme koşulları da eğilme dayanımı üzerinde etkili bir parametredir. Termal kür uygulaması (60-90°C), bağlayıcı matrisin daha hızlı gelişmesini sağlayarak eğilme dayanımında artışa neden olur. Geopolimer harçlarda eğilme dayanımı deneyi, malzemenin mekanik davranışını anlamak ve katkı malzemelerinin etkilerini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.7 Eğilme dayanım testine tabi tutulan numune örneği

Bir numunenin eğilme dayanımının (gerilmesinin) hesabı için aşağıdaki denklem (3.4)'ten yararlanılarak hesaplanmaktadır.

$$\sigma = 1,5 PL/bd^2 \quad (3.4)$$

σ : Eğilme dayanımı (MPa)

P: Uygulanan yük (kN)

L: Numunenin mesnet arasındaki uzunluğu (mm)

b: Numunenin genişliği (mm)

d: Numunenin kalınlığı (mm)

3.2.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi

Geopolimer harçların yüksek sıcaklık testi, malzemelerin yangına maruz kalabilecek yapıların uygunluğunu değerlendirmek açısından kritik bir parametredir. Geleneksel çimentolu kompozit malzemelerin dayanımları, yüksek sıcaklık etkisi sonucu hidrasyon ürünlerini kaybetmesi nedeniyle, ciddi şekilde azalırken, amorf alüminosilikat matris yapısı sayesinde geopolimerlerin dayanım kayıpları daha düşük değerler de kalabilmektedir (Davidovits, 2011).

Yüksek sıcaklık dayanımı deneyleri genellikle 200°C ile 1000°C arasında değişen sıcaklıklarda yapılmakta olup, numuneler bu sıcaklıklara belirli ısı artışlarla maruz bırakılır. Deney prosedürüne göre, numuneler istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra bu sıcaklıkta 1-2 saat bekletilir, kontrollü soğutma sonrası numunelerin mekanik dayanımları yeniden test edilir (Yazıcı ve Karagöl, 2022). Ayrıca numunelerin yüksek sıcaklık sonrası yapısal bütünlüğü de değerlendirilir.

Yapılan çalışmalar, UK esaslı geopolimer harçların 600°C'ye kadar önemli bir dayanım kaybı göstermediğini, hatta bazı durumlarda ısı etkisiyle bağlayıcı yapının daha da yoğunlaştığını ortaya koymuştur (Baran vd., 2023). Ancak 800°C ve üzeri sıcaklıklarda, kristalleşme ve camsı yapının bozulması sonucu mikroyapıda çatlak oluşumu ve dayanım kaybı gözlemlenmektedir.

Metakaolin ve YFC içeren geopolimer sistemlerin, ısıya dayanım açısından UK esaslı sistemlere göre daha üstün performans gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca, kütleme süresi, aktivatör tipi ve katkı maddeleri de yüksek sıcaklık dayanımı üzerinde belirleyici faktörler arasındadır (Singh ve Middendorf, 2020).

Bu çalışma kapsamında 300°C ve 400°C olarak iki farklı sıcaklık belirlenmiştir. 40x40x160 mm boyutundaki harç numuneleri, yüksek sıcaklık test cihazında belirlenen sıcaklığa 2 saat süreyle maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında yavaş şekilde soğumaya bırakılmışlardır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde oluşan ağırlık kaybı ve basınç dayanımı değerleri test edilmiştir.

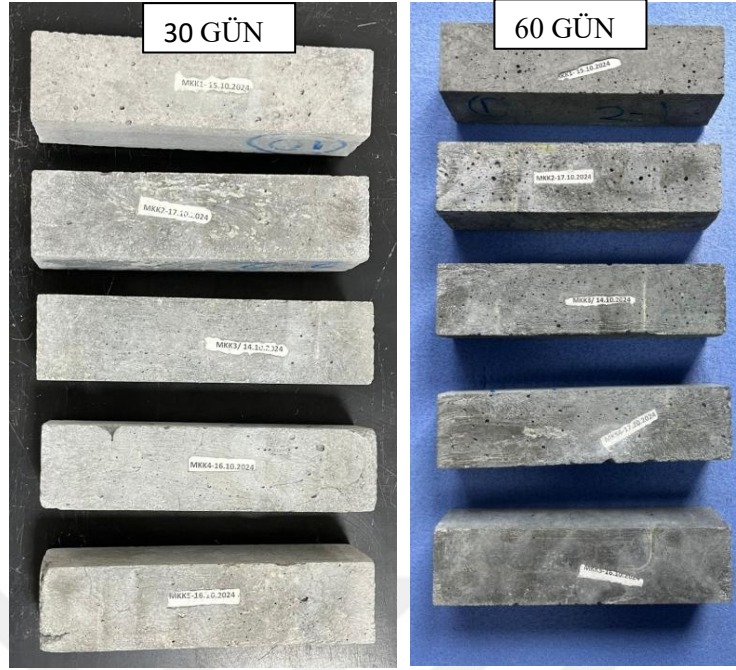
3.2.5 Sulfat Testi

Geopolimer harçların sulfat dayanımı, bu malzemelerin özellikle altyapı sistemleri, kanalizasyon hatları ve kimyasal tesisler gibi agresif çevresel koşullara maruz kalan yapılarda kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla uygulanan önemli bir kimyasal dayanım testidir.

OPC, sulfat iyonlarına karşı yüksek geçirgenlik göstermekte ve zamanla etrenjit oluşumu nedeniyle genleşme, çatlak ve dayanım kaybına neden olmaktadır. Buna karşılık, geopolimer bağlayıcı sistemler, düşük kalsiyum içeriği ve yoğun alüminosilikat matrisi sayesinde sulfat iyonlarının penetrasyonuna karşı daha dirençlidir (Davidovits, 2011; Yazıcı ve Karagöl, 2022).

Sulfat dayanımı testlerinde genellikle TS EN 12390-12 veya ASTM C1012 standartları referans alınmaktadır. Bu testlerde, standart ebatlarda hazırlanan numuneler %5 MgSO₄ çözeltisine belirli sürelerde bekletilir (30; 60 gün gibi). Süreç boyunca hacim değişimi, ağırlık kaybı ve basınç dayanımı ölçümleri yapılır. Bu ölçümler, numunenin kimyasal bozunmaya karşı direncini değerlendirmek amacıyla yorumlanır (Ekmen ve Algın, 2023).

Sulfat testi için 40x40x160 mm boyutundaki prizmatik numuneler %5'lik MgSO₄ çözeltisi içerisinde 30 ve 60 gün süreyle bekletilmiş, bu sürenin sonunda numunelerin ağırlık kaybı ve mekanik dayanımları belirlenmiştir. Sulfat deneyine tabi tutulan numuneler Şekil 3.8'da gösterilmiştir.

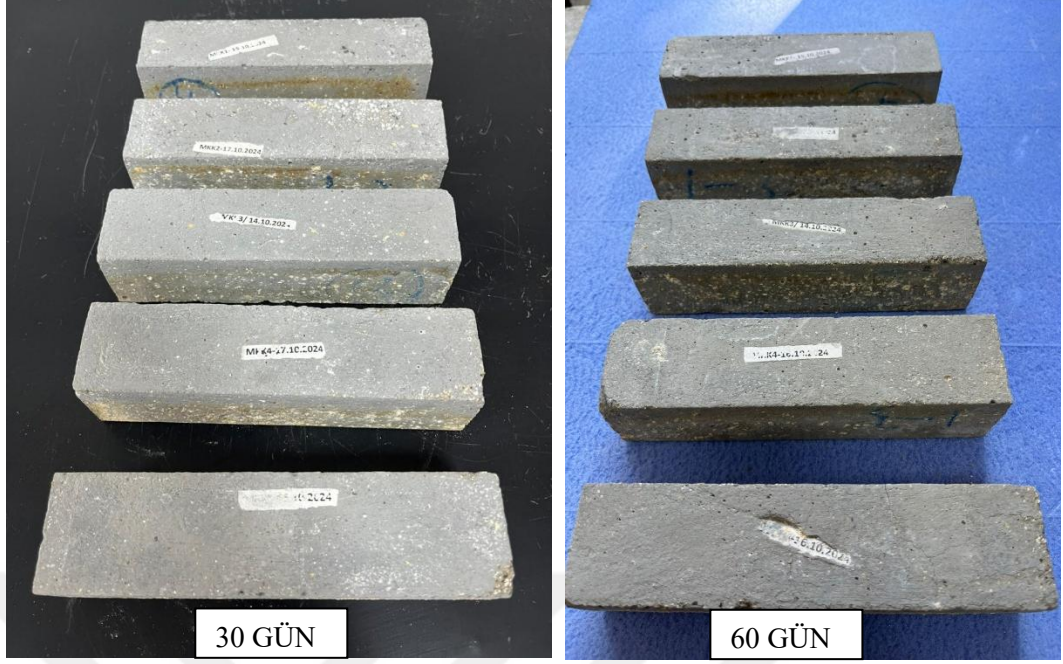


Şekil 3.8 Sülfat deneyine tabi tutulan 30 ve 60 günlük numune örnekleri

3.2.6 Asit Testi

Geopolimer harçların asit dayanımı, özellikle endüstriyel tesisler, atık su arıtma yapıları ve kimyasal maruziyeti yüksek ortamlar gibi agresif çevresel koşullarda kullanıma uygunluğunu değerlendirmek için uygulanan önemli bir kimyasal direnç testidir. Geleneksel Portland çimentosu esaslı harçlar, asidik ortamda kalsiyum hidroksit gibi bileşenlerin çözünmesiyle mukavemet kaybı yaşarken, geopolimer harçlar amorf alüminosilikat yapıları sayesinde bu tür ortamlara karşı daha dirençlidir (Davidovits, 2011).

Asit dayanımı deneyinde %2,5 sülfürik asit çözeltisinde 30 ve 60 gün periyotlarla bekletilen 40x40x160 mm boyutundaki numunelerin mekanik özellikleri test edilmiştir. Numunelerde, yüzey bozulmaları gözlemlenmiştir. Asit deneyine tabi tutulan numuneler Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



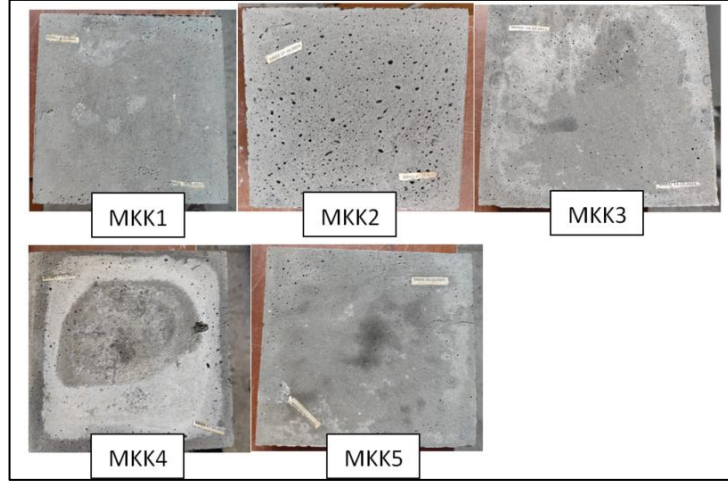
Şekil 3.9 Asit deneyine tabi tutulan 30 ve 60 günlük numune örnekleri

3.2.7 Termal İletkenlik Deneyi

Geopolimer harçların termal iletkenliği, genellikle sıcak plaka metodu veya ısı akış ölçer kullanılarak belirlenmektedir. Bu yöntemler, malzemenin ısı transferi kapasitesini standart koşullar altında ölçmektedir (Demirboğa ve Gül, 2003).

Sıcak plaka metodu, termal iletkenlik ölçümünde güvenilir bir yöntemdir ve ISO, ASTM ve EN gibi standartlarla desteklenmektedir.

200x200x30 mm boyutunda ki harç plakalarının ısıl iletkenlik değerleri test edilmiş, teste tabi tutulan numuneler Şekil 3.10'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Termal iletkenlik deneyine tabi tutulan numuneler

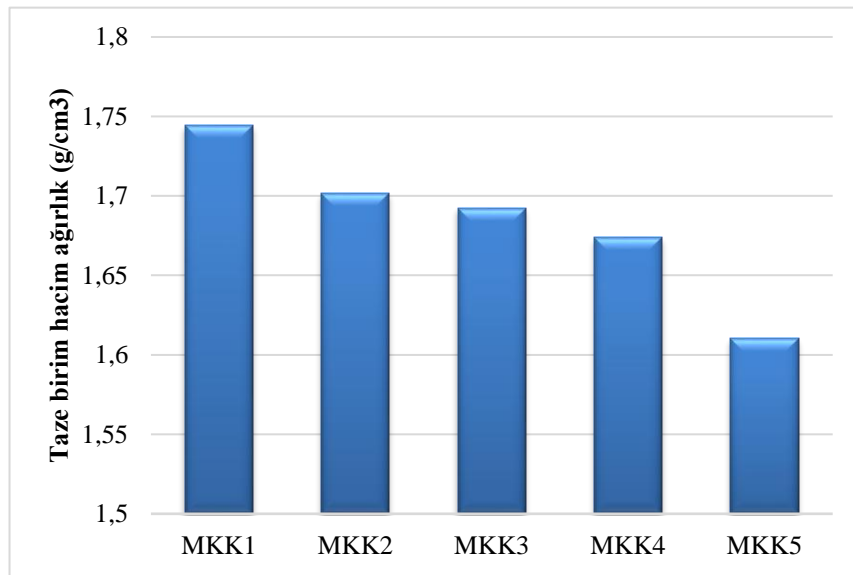
4. TARTIŞMA VE BULGULAR

4.1 Birim Ağırlık Testi Sonuçları

Taze geopolimer beton birim ağırlığı, belirli bir birim hacim içerisindeki ağırlığını ifade etmektedir.



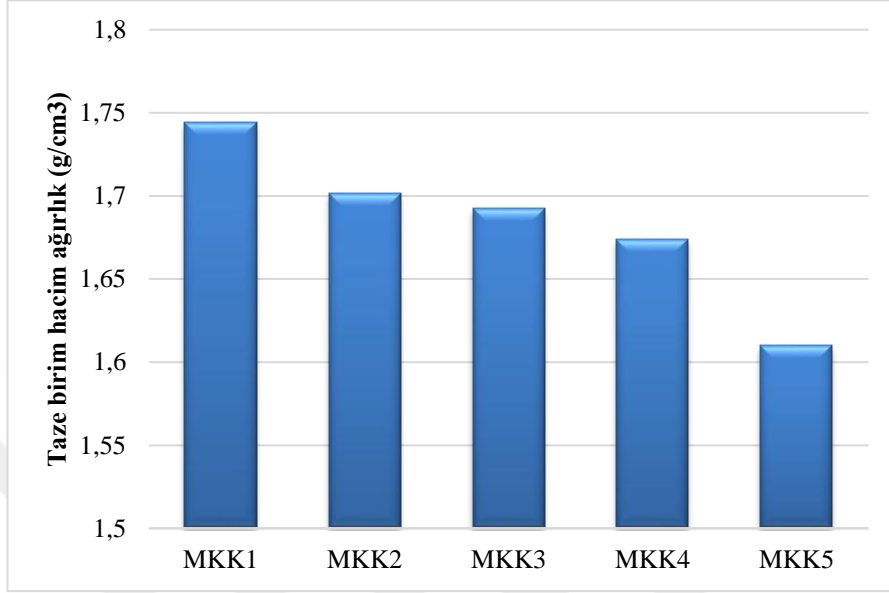
Şekil 4.1 Birim ağırlık ölçümü ve numune örneği



Şekil 4.2 Numunelerin taze birim ağırlıkları

Taze birim ağırlıkları ölçüm sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir.

Kuru birim ağırlıkları ölçüm sonuçları Şekil 4.3’de verilmiştir.



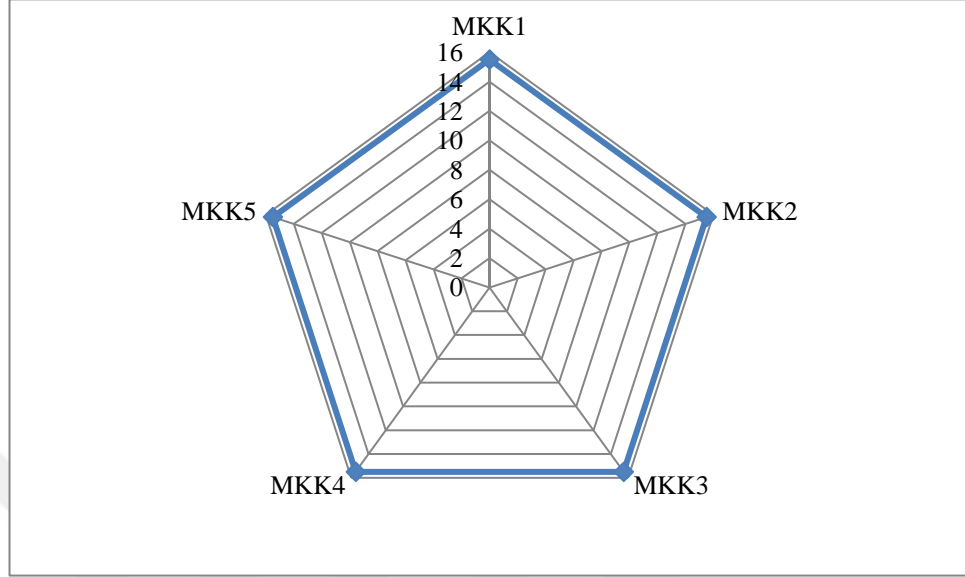
Şekil 4.3 Deneylerde kullanılan numunelerin kuru birim ağırlıkları (g/cm³)

4.2 İşlenebilirlik Testi Sonuçları

Pomza ve GV, geopolimer betonlarda hafif agrega olarak kullanıldığında, karışımın işlenebilirlik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Durak ve Şimşek (2021), bu tür agregaların kullanıldığı betonlarda yayılma tablası testi sonuçlarının, daha akışkan bir yapı sağladığını ve işlenebilirliği artırdığını ifade etmiştir. Özellikle bu malzemelerin gözenekli yapısı, taze betonun homojenliğini desteklemekte ve akışkanlığını artırmaktadır.

Yapılan çalışmalar, yayılma tablası testinin hafif agrega türü ve boyutunun beton karışımı üzerindeki etkilerini değerlendirmede kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Durak ve Şimşek (2021), pomza agregası kullanılarak hazırlanan betonların, işlenebilirlik ve homojenlik açısından yüksek performans sergilediğini ifade etmiştir. Hafif agregaların beton karışımında işlenebilirliği artırması, bu malzemelerin tercih edilme oranını artırmaktadır.

Taze birim hacim ağırlık alındıktan hemen sonra yayılma tablası deneyi yapılmış olup sonuçlar Şekil 4.4'te verilmiştir.



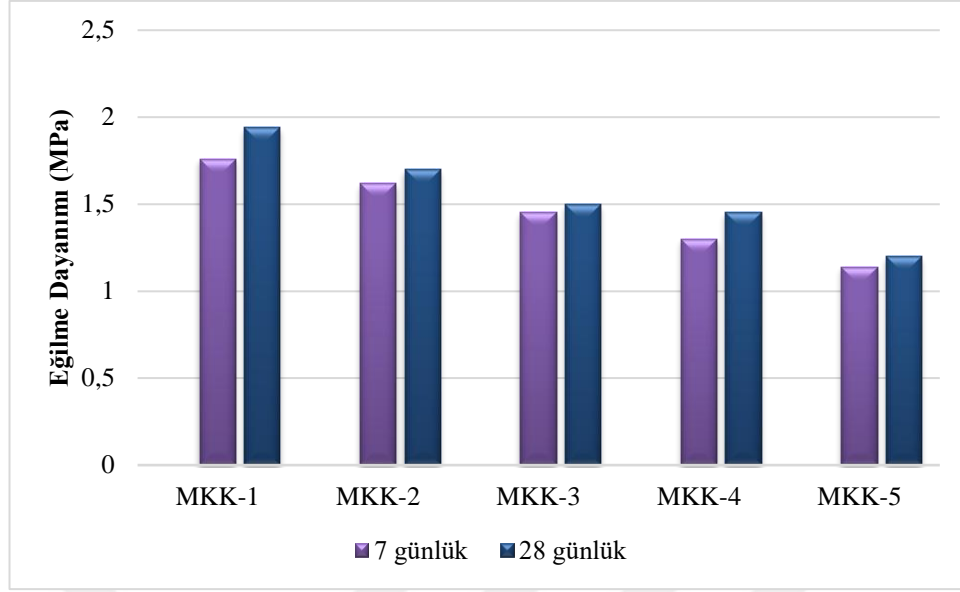
Şekil 4.4 Numunelerdeki yayılma miktarları (cm)

4.3 Eğilme Dayanımı Testi sonuçları

Geopolimer betonların mekanik özelliklerini incelemek için yaygın olarak kullanılan testlerden biri eğilme dayanımı testidir. Bu test, beton numunelerinin çekme dayanımını dolaylı olarak ölçmek amacıyla uygulanır. Pomza ve GV, geopolimer betonlarda hafif agrega olarak kullanıldığında eğilme dayanımı üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır.

Durak ve Şimşek (2021) çalışmalarında, pomza ve GV içeren numunelerin, düşük yoğunluklarıyla birlikte eğilme dayanımlarında kayda değer bir artış sağladığını ifade etmişlerdir. Özellikle gözenekli yapılarının betonun çatlama direncini artırdığı vurgulanmıştır. Yapılan testlerde GV, betonun dayanıklılığını artırdığı ve çatlama eğilimlerini azalttığı görülmüştür.

Pomza, GV, UK ve CEM II B-S tip çimento içeren geopolimer beton numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı hafif agrega oranlarına bağlı değişiklikleri Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 Geopolimer numunelerin eğilme dayanımı değerleri

4.4 Basınç Dayanım Testi Sonuçları

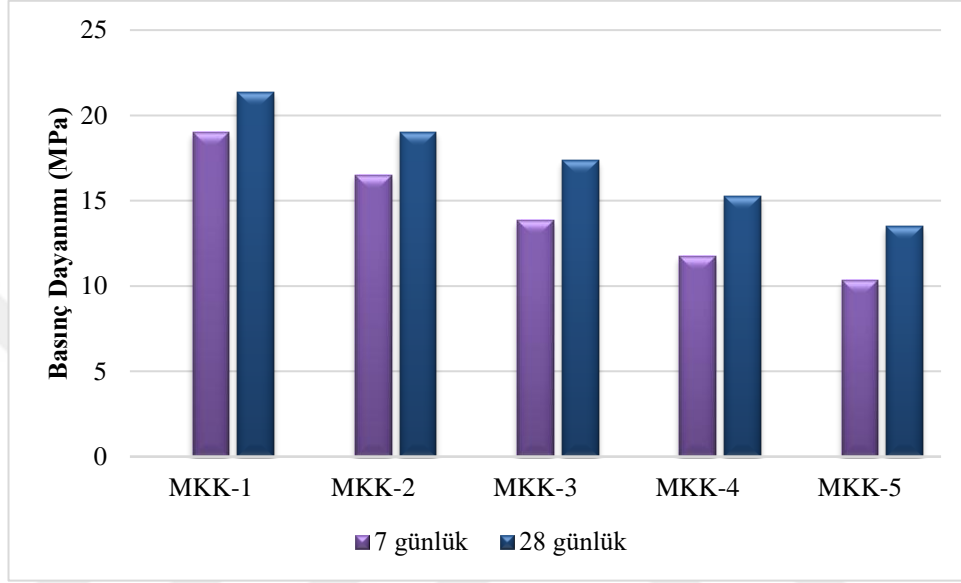
Geopolimer betonlarda basınç dayanımı, malzemenin mekanik özelliklerini değerlendirmek ve uygun kullanım alanlarını belirlemek için en yaygın kullanılan testlerden biridir. Bu test, özellikle pomza ve GV gibi hafif agregalar ile UK ve CEM II B-S tipi çimento bağlayıcılarının etkilerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Pınarcı (2024), geopolimer betonlarda pomza ve GV basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu malzemelerin betonun yoğunluğunu düşürürken dayanıklılığını artırdığını belirtmiştir. Çalışmada, pomza agregası kullanılarak hazırlanan betonların düşük yoğunluğu sayesinde hafif yapı elemanları için uygun bir seçenek sunduğu, aynı zamanda yüksek basınç dayanımına sahip olduğu ifade edilmiştir.

Pomza, GV, UK ve CEM II B-S tip çimento içeren geopolimer beton numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı hafif agrega oranlarına bağlı değişkenlikleri Şekil 4.6'de verilmiştir.

7 günlük basınç dayanımları 10,32 MPa ile 18,99 MPa arasında değişkenlik göstermekte olup, en yüksek basınç dayanımı MKK1 numunesinde %100 pomza agregalıdır. Erken dayanım artışında pomza etkisinin yüksek olduğu görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımları 13,47 MPa ile 21,33 MPa arasında değişkenlik

göstermektedir. %100 pomza agregalı MKK1 kodlu numune dayanım kazanmaya devam etmiş olup en yüksek basınç dayanımına sahiptir.

7 ve 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde her numune için zamanla basınç dayanımı arttığı görülmüştür.



Şekil 4.6 Geopolimer numunelerin basınç dayanım değerleri

Geopolimer harçlarda hafif agrega olarak kullanılan pomza ve GV, mekanik özellikler üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, pomza içeren karışımların, GV kullanılanlara göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği saptanmıştır. Pomzanın gözenekli ancak daha rijit yapısı, bağlayıcı matrise daha iyi aderans sağlayarak yük aktarımını optimize etmekte ve çatlak ilerlemesini sınırlamaktadır (Kaya, 2022). GV ise yüksek su emme kapasitesi nedeniyle bağlayıcı fazda zayıflık oluşturmakta ve bu durum dayanımın düşmesine neden olmaktadır (Baran vd., 2023). Ayrıca, pomzanın agregaya bağlı boşluk oranını dengelemesi, geopolimer harçların iç yapısında daha homojen bir yoğunluk sağlamak ve uzun vadeli dayanım performansını artırmaktadır.

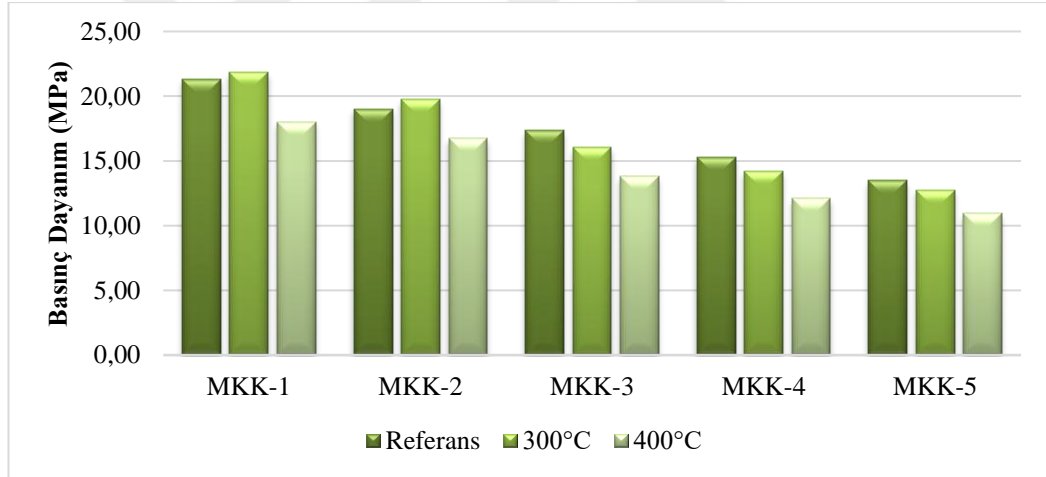
Baran vd. (2023), GV'nin, alkali çözeltiyi absorbe ederek bağlayıcı fazın hidrasyonuna zamanla katkıda bulunduğunu, bunun geç reaksiyonların tamamlanmasını destekleyerek ileriki yaş dayanımına olumlu etki ettiğini, GV'nin içerdiği magnezyum ve demir oksit gibi minerallerin, geopolimerizasyon sürecine

ikincil reaksiyonlarla katılarak bağlayıcı ağ yapısının kristalleşme düzeyini artırdığını ifade etmiştir.

İlk 7–14 gün içinde yeterli reaksiyon gerçekleşmediğinden dolayı dayanım düşük kalabilirken, 28. güne gelindiğinde bağlayıcının iç yapısı yoğunlaşmakta ve dayanım performansı ani şekilde yükselmektedir. Bazı çalışmalarda bu etki, düşük sıcaklıkta kürlenmiş karışımlarda daha da belirgin hale gelmiştir (Yazıcı ve Karagöl, 2022).

4.5 Yüksek Sıcaklık Testi Sonuçları

Pomza, GV, UK ve CEM II B-S tip çimento içeren geopolimer beton numunelerine 28 günlük kür sonrası 300°C ve 400°C sıcaklık testi yapılmıştır. Yüksek sıcaklık testi sonrası oluşan basınç dayanım değerlerinin değişimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçları

28 günlük kür sonrasında 300°C ve 400°C sıcaklık testi uygulanmış olup numuneler yüzeylerindeki rötre ve çatlaklar incelenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisiyle bazı numunelerde kılcal çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Sıcaklık artışıyla birlikte basınç dayanım kayıpları oluştuğu görülmüştür.

Yüksek sıcaklık testleri, geopolimer betonların termal dayanımını ve yapısal stabilitesini değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir. Pomza ve GV, geopolimer betonların termal dayanımını artırmada etkili malzemelerdir. Özellikle gözenekli yapıları, ısı iletimini azaltarak betonun çatlama riskini düşürmektedir.

Pomza agregası, düşük yoğunluğa sahip volkanik kökenli bir malzeme olup yüksek silis ve alümina içeriğiyle geopolimer sistemlerde kimyasal bağ oluşumuna katkı sağlamaktadır. Isıl dayanımı yüksek olan pomza, ısıtma ile boyutsal stabilitesini koruyarak çatlak oluşumunu sınırlamakta ve bağlayıcı fazla uyumlu davranış göstermektedir (Kaya, 2022). 200–600°C arasındaki sıcaklıklarda pomza katkılı geopolimer harçların basınç dayanımında belirgin bir artış veya dayanım kaybı yaşanmadığı, hatta bazı çalışmalarda sıcaklık artışının içyapıyı sıkılaştırarak dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir (Baran vd., 2023).

GV oldukça hafif ve gözenekli bir yapıya sahiptir, sıcaklık artışı sonucu yapısında bulunan suyun buharlaşması, hacim değişimine neden olur, bu değişim, yüksek sıcaklıklarda matris-agrega ara yüzünde zayıflık oluşturma potansiyeli taşır. Ancak, ısıya dayanıklı yapısı sayesinde 200–400°C sıcaklıklarda GV agregalı harçların dayanımında artışlar gözlenmiştir. Bu artış, iç yapının daha kompakt hale gelmesi ve nemli GV'nin geopolimerizasyonu desteklemesiyle açıklanabilir (Yazıcı ve Karagöl, 2022). Ancak 600°C üzerindeki sıcaklıklarda yapısal bozulma eğilimi, basınç dayanımında ani düşümlere neden olabilir (Ekmen ve Algın, 2023).

Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, pomza agregalı geopolimer harçlar, yüksek sıcaklık koşullarında daha stabil bir basınç dayanımı profili sunmakta, dayanım kaybı minimal düzeyde kalmaktadır. GV agregalı sistemler ise, orta sıcaklıklarda olumlu sonuçlar üretse de GV agregasının numune içindeki yoğunluğuna bağlı olarak mikro yapısal bozulmalar nedeniyle dayanım düşüşü yaşayabilmektedir. Bu durum, pomzanın yapısal rijitliğinin ve ısıl genleşme katsayısının GV'e göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır (Ekmen ve Algın, 2023; Yazıcı ve Karagöl, 2022).

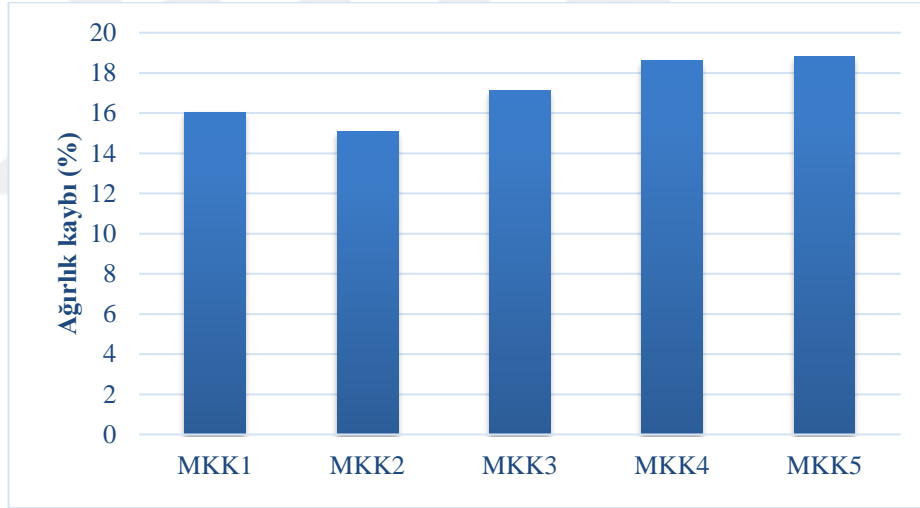
Uslu (2020), bu tür agregaların kullanıldığı betonlarda yüksek sıcaklık testlerinde olumlu sonuçlar elde edildiğini ve pomza ile GV'in betonun yapısal bütünlüğünün korunmasına yardımcı olduğunu, bu malzemelerin yangına dayanıklı yapı elemanları için ideal olduğunu ifade etmiştir.

Antaki ve Wahhab (2020), bağlayıcı olarak UK ve CEM II B-S tipi çimento kullanımının, geopolimer betonun termal dayanımını artırdığını, özellikle UK'nin

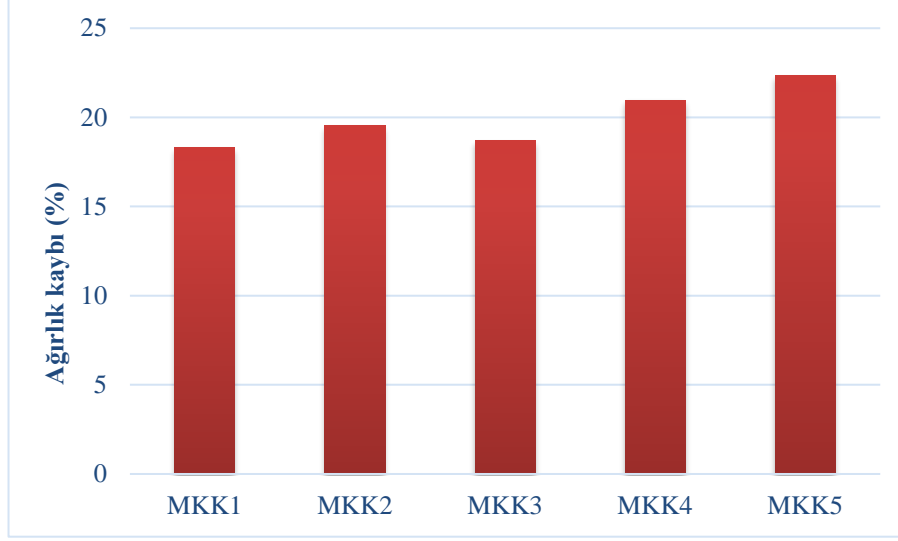
yüksek silika içeriğinin, alkali aktivasyon süreçlerinde kimyasal bağlanmayı iyileştirerek betonun yüksek sıcaklıklara karşı direncini artırdığını, UK ve CEM II B-S çimento kombinasyonlarının termal dayanım üzerinde belirgin bir iyileşme sağladığını rapor etmiştir.

Geopolimer betonların yüksek sıcaklık koşullarına dayanımını değerlendirmek için yapılan ağırlık kaybı ölçümleri malzemenin performansını analiz etmekte kritik bir öneme sahiptir.

Yüksek sıcaklık testleri sonrası oluşan ağırlık kayıpları Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. 300°C sıcaklığa maruz kalan numunelerin ortalama ağırlık kaybının %15-19; 400°C sıcaklığa maruz kalan numunelerin ortalama ağırlık kaybının %18-22 değerleri arasında değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 4.8 300°C sıcaklık sonrası oluşan ağırlık kaybı



Şekil 4.9 400°C sıcaklık sonrası oluşan ağırlık kaybı

Pınarcı (2024), hafif agrega kullanılan geopolimer betonlarda yüksek sıcaklık etkisini değerlendirmiş ve 600°C'nin üzerinde pomza ve GV içeren betonlarda ağırlık kaybının %8-10 arasında değiştiğini rapor etmiştir. Bu sonuçlar, hafif agregaların, yüksek sıcaklıklarda betonun stabilitesini korumada etkili olduğunu göstermektedir. GV kullanılan betonlarda, gözenekli yapının termal genleşmeyi minimize ettiği ve ağırlık kaybını azalttığı belirtilmiştir (Uslu, 2020). Ayrıca, UK ve YFC gibi bağlayıcıların, alüminosilikat bazlı kimyasal bağlanma mekanizmaları sayesinde betonun yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığını artırdığı görülmüştür. Ören (2017), bu bağlayıcıların katkısıyla ağırlık kaybının kontrol altına alındığını ve betonun yapısal bütünlüğünü koruduğunu ifade etmiştir.

Yaklaşık 300–400°C sıcaklıklarda, OPC hidrasyon ürünleri ayrışır ve su kaybeder; bu sırada ortaya çıkan su buharı ve içeride sıkışmış hava, mikro gözeneklerin iç duvarlarını patlatır ve bu da basınç dayanımında ani bir düşüşe neden olur. OPC'deki C-S-H jeli ve betonun içerdiği malzemeler, ısıl direnci etkileyen başlıca bileşenler olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, birçok araştırmacı yüksek sıcaklığa dayanıklı çimentolara odaklanmıştır.

Geopolimer betonlar, genel olarak OPC betonlarına kıyasla daha iyi ısı direnci göstermektedir. Gourley vd. (2005), geopolimer ile geleneksel çimentoyu karşılaştırmış ve geopolimerlerin esasen cam benzeri bir yapıya sahip olduğunu, buna karşın çimentonun hidrat bir bileşik olduğunu ortaya koymuştur. Geopolimer

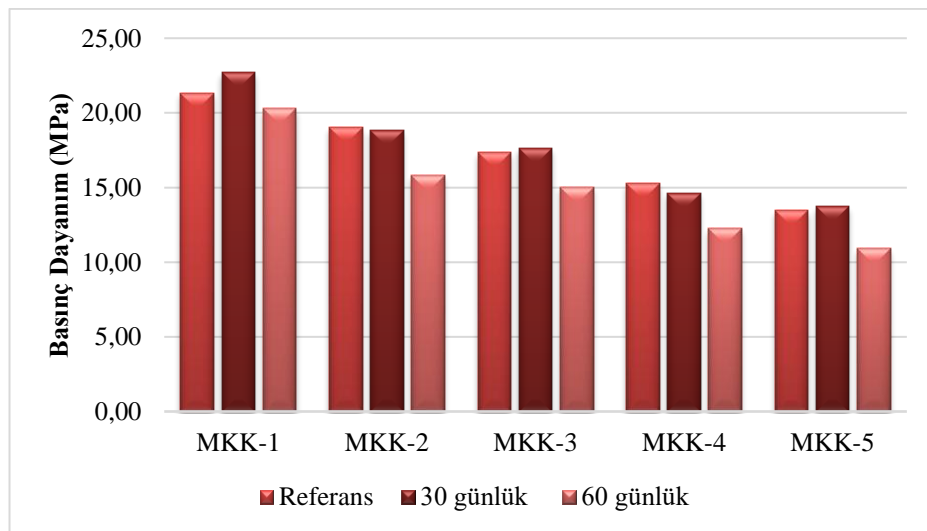
betonların ısı direncinin değerlendirilmesinde görsel görünüm, kalıcı dayanım ve ısı iletkenlik gibi parametreler kullanılmaktadır.

Duran vd., akışkan yatak UK ve metakaolin kullanarak Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltisiyle aktive edilen geopolimer betonların dayanıklılık parametrelerini araştırmışlardır. Isıl dayanıklılık, sıcaklık profili, basınç dayanımı ve yapısal stabilite gibi kriterlerle değerlendirilmiştir.

4.6 Sülfat Testi Sonuçları

Özalp ve Sak (2024), geopolimer betonlarda sülfat etkisinin incelendiği bir çalışmada, hafif agregaların sülfat saldırılarına karşı betonun dayanıklılığını artırdığını rapor etmiştir. Pomza ve GV gibi gözenekli malzemeler, sülfat dayanımı üzerinde olumlu etkiler göstermektedir. Bu malzemeler, betonun geçirgenliğini azaltarak sülfat iyonlarının iç yapıya nüfuz etmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle UK ve YFC gibi bağlayıcılarla bir arada kullanıldığında, betonun kimyasal direnci önemli ölçüde artmaktadır (Özalp ve Sak, 2024). Sülfat testlerinde, bu tür karışımların uzun süreli dayanıklılık sağladığı belirtilmiştir.

P, GV, UK ve CEM II B-S çimento içeren 28 gün süreyle kür uygulanan HG numunelerin 30 ve 60 günlük sülfat testi sonrası oluşan basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.10'de verilmiştir.

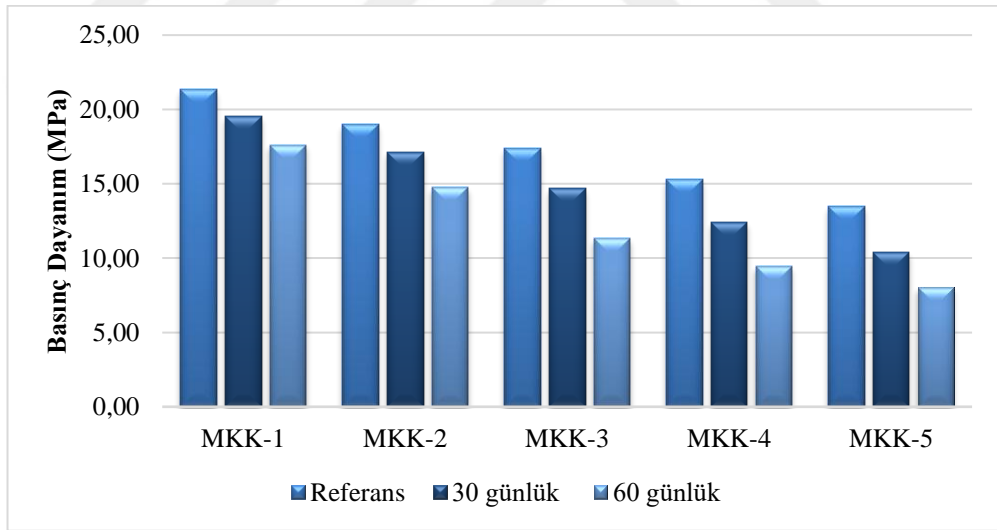


Şekil 4.10 Sülfat testi sonrası basınç dayanım sonuçları

4.7 Asit Testi Sonuçları

Geopolimer betonların kimyasal dayanıklılığını değerlendirmek için yapılan asit testleri, malzemenin asidik ortamlara karşı performansını ölçmekte kritik bir öneme sahiptir. Bu testlerde özellikle pomza ve GV gibi hafif agregalar ile UK ve YFC kullanılan bağlayıcıların etkileri incelenmektedir. Pınarcı (2024), bu tür karışımlarda hafif agregaların ve mineral bağlayıcıların betonun kimyasal dayanımını artırdığını rapor etmiştir.

P, GV, UK ve CEM II B-S çimento içeren 28 gün süreyle kür uygulanan HG numunelerin 30 ve 60 günlük asit testi sonrası oluşan basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir. Pomza, yüksek silis ve alümina içeriğiyle geopolimer bağlayıcı ile kimyasal uyum içinde olup, düşük kalsiyum içeriği sayesinde asit etkilerine karşı yüksek direnç gösteren agregalardan biridir. Bu özellik, özellikle sülfürik ve nitrik asit gibi agresif çözeltiler altında dayanım kaybını sınırlandırmaktadır (Kaya, 2022).



Şekil 4.11 Asit testi sonrası basınç dayanım sonuçları

Baran vd. (2023), pomza içeren harçların, asit çözeltisinde 28 gün sonunda yalnızca %5–8 arasında basınç dayanımı kaybı yaşadığını, eğilme dayanımında ise mikro çatlakların sınırlı kalması nedeniyle değerlerin büyük oranda korunduğunu, pomzanın bağlayıcı matrise iyi entegre olması ve gözenek yapısının asit girişini sınırladığını belirtmiştir.

GV, ısı ile oluşan genleşme sonucu yüksek gözenekliliğe sahiptir ve bu özellik, asidik çözeltilerde iyon penetrasyonunu artırarak bağlayıcı matrisin zayıflamasına yol açabilir (Yazıcı ve Karagöl, 2022).

Asitli ortamlarda oluşan dayanımın kaybının bir diğer nedeni de agregaların bağlayıcı ile olan arayüz geçiş zonudur. Pomza, silisli yapısı sayesinde bu geçiş zonunda daha sıkı bağlar oluşturarak mikroyapıyı korurken, GV yüzeyi daha az reaktif olduğundan matrisle yeterince güçlü etkileşim kuramayabilir. Bu durum, eğilme dayanımında özellikle ilk çatlak oluşumunda rol oynamakta ve çatlak genişlemesini hızlandırmaktadır (Ekmen ve Algın, 2023).

Pomza agregalı geopolimer harçlar, asit etkilerine karşı daha kararlı bir basınç ve eğilme dayanımı profili sunarken, GV agregalı sistemlerde, özellikle uzun süreli asit maruziyetinde dayanım daha hızlı düşmektedir. Bu fark, agregaların kimyasal bileşimi, gözenek yapısı ve bağlayıcı ile olan etkileşim düzeyiyle açıklanmaktadır. Pomza içeriği artırılan karışımlar, özellikle kimyasal dayanım gerektiren altyapı uygulamaları için tercih edilen sistemler olarak değerlendirilmektedir (Singh ve Middendorf, 2020).

Test sonuçlarına göre, pomza ve GV içeren betonlar, yüksek gözeneklilikleri sayesinde asidik çözeltilere karşı yüksek dayanım sergilemiştir. Bu agregalar, kimyasal saldırılara karşı direnci artırırken betonun hafifliğini korumaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan UK ve YFC, geopolimer betonun kimyasal bağlarını güçlendiren alüminosilikat yapılar oluşturarak asit dayanımını artırmaktadır. Yılmaz (2024), bu bağlayıcıların, betonun yüzeyindeki bozulmaları en aza indirerek uzun vadeli dayanıklılık sağladığını ifade etmiştir. Uygulanan testlerde, bu bağlayıcılarla üretilen betonların, %2,5'lik sülfürik asit çözeltisinde 28 günlük maruz kalma süresi sonunda minimum ağırlık kaybı yaşadığı rapor edilmiştir.

Tokdemir ve Gültekin (2024), GV nin betonun geçirgenliğini azaltarak asit iyonlarının iç yapıya nüfuz etmesini zorlaştırdığını, GV içeren betonların asidik ortamda üstün performans sergilediğini, yüzey bozulmalarının diğer agregalara kıyasla daha az olduğunu belirtmiştir.

Geopolimer betonun, asit saldırısına karşı OPC betonuna göre daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Asidik çözeltilerle temas halinde, alüminosilikat polimerlerin depolimerizasyonu sonucunda Si–O–Si ve Si–O–Al bağları kırılır, bu da silisik asidin salınmasına neden olur ve çatlakların ya da zeolit kristallerinin oluşumu ile sonuçlanır. Ancak bu bozunma mekanizması, kullanılan asit türüne de bağlıdır.

4.8 Termal İletkenlik Testi Sonuçları

Geopolimer beton sistemlerinde hafif agregaların kullanımı, sadece mekanik dayanım üzerinde değil, aynı zamanda termal iletkenlik (ısı geçirgenliği) gibi önemli fiziksel özellikler üzerinde de doğrudan etkilidir. Özellikle pomza ve GV gibi düşük yoğunluklu ve gözenekli agregalar, betonun toplam ısı iletim katsayısını düşürmekte ve yapıya ısı yalıtımı avantajı kazandırmaktadır.

Pomza agregası volkanik kökenli olup doğal gözenekli yapısıyla düşük termal iletkenliğe sahiptir. Geopolimer beton içerisinde kullanıldığında, ısı iletim katsayısını yaklaşık 0,25–0,35 W/m.K aralığına düşürebilmektedir (Kaya, 2022). Pomza, hem fiziksel gözenekliliği hem de düşük özgül ağırlığı nedeniyle özellikle yapı kabuğunda ısı köprüsü oluşumunu sınırlayan bir katkı olarak değerlendirilmektedir.

GV, ısı iletimle genişletilmiş tabakalı silikat yapısı sayesinde çok daha düşük ısı iletim katsayısı sağlayabilir. Literatürde genişletilmiş vermikülit katkılı geopolimer betonların termal iletkenlik değerlerinin 0,12–0,22 W/m.K aralığında olduğu belirtilmiştir. Bu değerler, özellikle yangına dayanıklı ve enerji verimliliği yüksek yapılar için önem taşımaktadır (Baran vd., 2023; Ekmen ve Algın, 2023).

Ancak, bu iki malzemenin karşılaştırmalı değerlendirmesinde vermikülitin termal performansının pomzaya göre daha üstün olduğu, ancak mekanik dayanım açısından daha düşük değerler ürettiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, uygulama alanına göre termal iletkenlik ile mekanik dayanım arasında bir denge kurmak gerekmektedir.

Tablo 4.1 Isıl iletkenlik katsayıları

Kod	λ (W/m.K)
MKK-1	0,32584
MKK-2	0,28202
MKK-3	0,26020
MKK-4	0,24542
MKK-5	0,22294

Deneysel alışmalar, ısı iletim katsayısının, agregaların hacimce oranı, bağlayıcı türü, kütleme yöntemi ve agrega–matris ara yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. Yüksek oranlarda vermikülit ilavesi ısı iletkenliğini minimuma indirirken, pomza ile üretilen geopolimer betonlar ise daha dengeli mekanik ve termal performans sunmaktadır (Yazıcı ve Karagöl, 2022).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve literature dayalı analizler birlikte değerlendirildiğinde;

1. Pomza ve GV nin düşük yoğunluğu ve gözenekli yapısı sayesinde numunelerin yoğunluğunu azalttığı,
2. GV oranındaki artışa bağlı olarak, GV nin numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarını düşürdüğü,
3. Pomzanın, sülfat ve asit etkilerine karşı direncinin daha yüksek olduğu, GV oranındaki artışın numunelerin sülfat ve asit direncini düşürdüğü,
4. Pomza ve pomza-GV agregalı numunelerin 300 ve 400°C sıcaklıklara direncinin yüksek olduğu,
5. GV oranında ki artışın numunelerin ısı iletkenlik katsayısını düşürdüğü,
6. CEM II B-S tipi çimentoların içerdiği yüksek cüruf içeriği sayesinde geopolimer betonların üretiminde kullanılabileceği görülmüştür.

Çalışmada elde edilen verilen ışığında, öneriler ise aşağıda sıralanmıştır.

1. Hafif geopolimerler daha maliyetli olmaları nedeniyle ülkemizde yeterince kabul görmemektedir. Ancak enerji tüketimine ve çevresel etkilere sağladığı katkılar da dikkate alındığında, bu malzemelerin daha ekonomik olarak üretilebilmesine yönelik disiplinler arası çalışmalar yapılabilir.
2. Ülkemiz açısından önemli bir rezerv niteliği taşıyan pomza farklı hafif agregalar ve puzolanik katkılarla birlikte kullanılarak, hafif, çevreci, ısı iletkenlik katsayısı düşük hafif geopolimer betonlar üretilebilir.

Üretimi yapılacak yeni ürünlerin dayanım, durabilite, yüksek sıcaklık, yangın direnci ve ısı iletkenlik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar farklı çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Akyüncü, V. (2019). Kayseri-Talas Bölgesi Pomzası Kullanılarak Üretilen Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin ve Yangın Etkisi Altındaki Davranışlarının İncelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 26-35.
- Antaki, A., & Wahhab, T. S. (2020). Pomza Katkılı Normal ve Hafif Betonların Kimyasal Durabilitesinin İncelenmesi. *İstanbul Gelişim Üniversitesi*.
- Arpacı, Ş.S., & Güntekin, E. (2023). Geopolimer Esaslı Ahşap Kompozitleri. *Ağaç ve Orman*, 3(2), 6-13.
- Aydın, S., ve diğerleri. (2021). Hafif beton üretimi için optimizasyon yöntemleri. *İnşaat Teknolojileri Dergisi*, 9(3), 201-215.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolimer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658-670. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>
- Baran, B., Çelikten, S., & Atabey, İ. (2023). Uçucu Kül, Cam Tozu ve Çimento Esaslı Hibrit Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri. *NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(3), 835-843.
- Brown, R. (2017). Expanded Vermiculite in Geopolymer Concrete Applications. *Construction Materials Research*, 18(2), 102-114.
- Davidovits, J. (1979). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Geopolymer Institute.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 131-149.
- Davidovits, J. (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Geopolymer Institute.
- Davidovits, J. (2013). *The Role of Geopolymers in Reducing Carbon Emissions in Construction*. Geopolymer Institute Publications.
- Doğan-Sağlamtimur, N., & Bilgil, A. (2018). Atık Kazan Altı Külü ve Pomza Elek Altı Atığından Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi. *ÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 590-599.
- Durak, U., & Şimşek, A. A. (2021). Alkali ile Aktive Edilmiş EPS İkameli Harçların Mekanik Özelliklerinin, Isı Geçirimsizlik Özelliklerinin ve Yüksek Sıcaklığa Karşı Dirençlerinin Araştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 145-158.

- Duran, A., & Mermerdaş, K. (2016). Cüruf ve uçucu kül içeren hafif geopolimer harçlar. *Beton ve Çimento Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 65-80.
- Duran, A., & Mermerdaş, K. (2016). Farklı Aktivator Çeşitlerinin Cürufli Geopolimer Harçların Rötire Özelliklerine Etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 45-54.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590-1597. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>
- Ekmen, D., Yıldırım, N., & Şimşek, M. (2022). Hafif Geopolimer Kompozitlerde Pomza Agregası Kullanımının Otojen Rötire ve Mikroyapısal Özelliklere Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 109-121.
- Ekmen, Ş., & Algın, A. (2023). Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalarının mühendislik özellikleri. *Yapı Malzemeleri Dergisi*, 12(4), 134-150.
- Ekmen, Ş., & Algın, Z. (2023). Geri Dönüştürülmüş Geopolimer Agregaları ile Üretilen Çimento Esaslı Harçların Mühendislik Özellikleri. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 13(2), 235-247.
- Ekmen, Ş., & Mermerdaş, K. (2017). Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(2), 93-102.
- Gourley, J.T., & Johnson, G.B. (2005). Developments in Geopolymer Precast Concrete. World Congress Geopolymer.
- Gökçe, M.V. (2010). Diyatomit Esaslı Hafif Yapı Elemanı Üretiminde Üre-Formaldehitin Bağlayıcı Olarak Kullanılması. Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Konya.
- Güneş, E. (2019). Çelik lif katkılı yüksek dayanımlı hafif betonların rötire davranışı. *İnşaat Mühendisliği Dergisi*, 7(2), 123-135.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete (Research Report GC 1). Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- İlkenntapar, S., & Eren, H. (2021). EPS İle İkame Edilmiş Uçucu Küllü Geopolimer Hafif Harcın Fiziksel, Mekanik ve Isıl Geçirimsizlik Özelliklerinin İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 10(3), 215-228.
- İlkenntapar, A., & Eren, E. (2021). EPS katkılı geopolimer harçların termal ve mekanik analizi. *Fen ve Mühendislik Araştırmaları Dergisi*, 18(1), 78-89.

- Kalem, M., & Harmancı, F. N. (2022). Betonda Atık Uçucu Küllerin Kullanımının Mekanik ve Kimyasal Etkilere Yansımaları. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 848-863.
- Kalem, M., & Harmancı, F. N. (2022). Betonda Atık Vermikülit Kullanımının Betonun Mineralojik ve Kimyasal Yapısına Olan Etkisinin İncelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 848-863.
- Kalem, M., & Harmancı, F. N. (2022). Çimento Türlerinin Beton Performansına Etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 848-863.
- Karaaslan, C., ve diğerleri. (2022). Hafif geopolimer harçlarda sülfat dayanımı. *Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 14(3), 177-193.
- Kaya, F. (2022). Geopolimer Betonlarda Hafif Agrega Kullanımı ve Çevresel Etkileri. *Çevre ve İnşaat Teknolojileri Dergisi*, 5(1), 45-52.
- Kılıç, H., & Sert, T. (2011). Pomza ve perlit içeren hafif betonların özellikleri. *Beton Teknolojileri Dergisi*, 4(1), 33-45.
- Kılınçarslan, S., Demir, A., & Yılmaz, H. (2017). Pomza Agregası Kullanılarak Üretilen Köpük Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), 561-570.
- Kop, M., & Yazıcıoğlu, S. (2023). Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Mortars in Thermal Curing Environment. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 756-765.
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-Part Alkali-Activated Materials: A Review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21-34.
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9-10), 1080-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Mo, K. H., Lee, H. J., Liu, M. Y. J., & Ling, T. C. (2018). Incorporation of Expanded Vermiculite Lightweight Aggregate in Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 302-306.
- Mo, K. H., Lee, H. J., Liu, M. Y. J., & Ling, T. C. (2018). The Role of Fly Ash in Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 179, 302-306.
- Mo, K. H., Lee, H. J., Liu, M. Y. J., & Ling, T. C. (2018). The Role of Cement Types in Geopolymer Concrete Performance. *Construction and Building Materials*, 179, 302-306.
- Moon, J., & Oh, S. (2014). Synthesis and Characterization of Geopolymers Derived from Metakaolin and Red Mud. *Materials*, 7(8), 6104-6118.

- Nadoushan, M. J. M., & Ramezaniapour, A. A. (2016). The Effect of Type and Concentration of Alkali Activator on Strength, Microstructure and Autogenous Shrinkage of Natural Pozzolan-Based Geopolymer Cement. *Construction and Building Materials*, 111, 337-347.
- Oymael, S. (2024). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonlar. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 378-386.
- Oymael, S. (2024). Vermikülitin Çimento Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 378-386.
- Oymael, S. (2024). Yüksek Fırın Cürufu ve Çimento Karışımlarının Mekanik Özellikleri. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 378-386.
- Ören, O. H. (2017). Granüle yüksek fırın cürufunun köpük beton özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Bartın.
- Örücü, S. (2022). Genleştirilmiş perlit ve kil agregalarının geopolimer harçlarda kullanımı. *Yapı ve Çevre Dergisi*, 11(4), 291-308.
- Özalp, F., & Sak, Ö. F. (2024). Genleştirilmiş Perlit ve Poliüretan Atık Agregaların Hafif Betonların Mekanik Davranış ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkileri. *Van Yüzcü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2(2), 31-45.
- Palacios, M., ve Puertas, F. (2007). Effect of Shrinkage-Reducing Admixtures on the Properties of Alkali-Activated Slag Mortars and Pastes. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 691-702.
- Pınarcı, İ. (2024). Portland Çimentosuna Perlit ve Pomza İkamesinin Çimento Özellik Gelişimine Katkıları. *Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 215-228.
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
- Rangan, B. V. (2008). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Concrete Construction Engineering Handbook*, Chapter 26, CRC Press.
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.
- Smith, J., & Jones, A. (2015). Pumice as a Lightweight Aggregate in Construction Materials. *Journal of Sustainable Building Materials*, 12(3), 45-60. <https://doi.org/10.xxxxx/sbm.2015.1234>
- Şahbudak, K. (2021). Alkali Aktive Edilmiş Uçucu Külün Sinterlenmesi ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 60(3), 153-157.

- Şahin, M. (2011). Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Çelik Tel Takviyeli-Çimento Esaslı Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Dirençleri. Yüksek Lisans Tezi, *Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Yozgat.
- Taylor, P., Anderson, L., & Bennett, J. (2019). Properties of Geopolymer Concrete Using Lightweight Aggregates. *Advances in Concrete Technology*, 23(4), 225–240. <https://doi.org/10.xxxxx/act.2019.7890>
- Tokdemir, M., & Gültekin, A. (2024). Agrega Türünün Uçucu Kül ve Tuğla Tozu Esaslı Geopolimer Harç Özelliklerine Etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 200-215.
- Türeyen, A. C. (2019). Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Köpük Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, *Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Yozgat.
- Türeyen, A. C., & Yıldırım, N. (2019). Betonların Karbonatlaşma Direnci Üzerine Çimento Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 109-121.
- Türeyen, A. C., & Yıldırım, N. (2019). Geopolimer Malzemelerin Durabilite ve Dayanım Özellikleri. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 109-121.
- Uslu, M. (2020). Genleştirilmiş Kil Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*. Bayburt.
- Yazar, Z. (2021). Geopolimer Harçlarda Agrega Türünün Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(3), 220-235.
- Yazıcı, N., & Karagöl, F. (2022). Uçucu Kül Esaslı ve Cüruf Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(3), 1592–1606.
- Yıldırım, N., & Şimşek, M. (2019). Yüksek ve Düşük Kalsiyum İçeren Uçucu Küller ile Üretilen Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 377-383
- Kaya, M., ve diğerleri. (2020). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren geopolimerlerin mekanik özellikleri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(2), 45-59.
- Yılmaz, İ., Demir, İ., & Şimşek, M. (2018). Çimento Katkılarının Beton Dayanımı Üzerindeki Etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 26-35.
- Yılmaz, İ., Demir, İ., & Şimşek, M. (2018). Pomza Agregalı Hafif Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), 561-570.
- Yılmaz, İ., Demir, İ., & Şimşek, M. (2018). Uçucu Kül Katkılı Betonların Mekanik ve Fiziksel Performansı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 26-35.

Yılmaz, T. (2024). Silika Tozu Tane Boyutu ve Dozajının Kendiliğinden Yerleşen Harçların Dayanım, Durabilite ve Porozite Performansına Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(1), 175-190.

