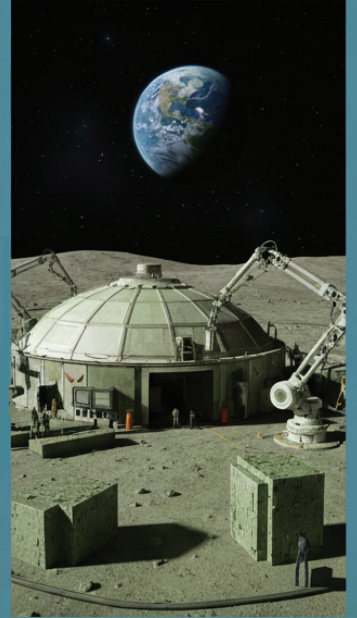


JEOPOLİMER MALZEMELER:

TEMELLERİ, ÖZELLİKLERİ VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

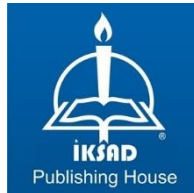


Prof. Dr. Fatih ÇALIŞKAN
Öğr. Gör. Turgay TEHÇİ

JEOPOLİMER MALZEMELER: TEMELLERİ, ÖZELLİKLERİ VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

Prof. Dr. Fatih ÇALIŞKAN
Öğr. Gör. Turgay TEHÇİ

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17903601>



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-433-1

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

ÖNSÖZ

Jeopolimer bilimi, son otuz yılda yapı malzemeleri alanında ortaya çıkan en yenilikçi ve sürdürülebilir teknolojilerden biri olarak dikkat çekmektedir. Geleneksel çimentoya (Portland cement) alternatif bir bağlayıcı sistem olarak başlayan bu yolculuk, bugün artık nano ölçekli tasarım stratejilerinden ileri kompozit uygulamalarına, gezegen dışı inşa senaryolarından kültürel miras koruma tekniklerine kadar uzanan geniş bir yelpazeye dönüşmüştür. Jeopolimerler; düşük karbon ayak izleri, yüksek dayanım potansiyelleri, çok yönlü formülasyon esneklikleri ve atıkların katma değerli malzemelere dönüştürülmesini mümkün kılan çevresel kazanımlarıyla modern malzeme mühendisliğinde yeni bir paradigmayı temsil etmektedir.

Bu kitabın amacı, jeopolimer alanındaki temel bilimsel ilkeleri, deneysel yöntemleri, teknolojik gelişmeleri ve uygulama perspektiflerini bütüncül bir çerçeve içinde sunmaktır. Kitap boyunca kimyasal reaksiyon mekanizmalarından faz oluşumu ve mikroyapısal gelişime; taze ve sertleşmiş hal özelliklerinden dayanıklılık performansına; nano-takviyeli kompozitlerden fonksiyonel jeopolimer köpüklere; endüstriyel ölçekleme yöntemlerinden yaşam döngüsü değerlendirmelerine kadar uzanan geniş bir içerik ele alınmıştır. Böylece hem araştırmacılara hem de uygulayıcılara, jeopolimer sistemlerini anlamak, analiz etmek, optimize etmek ve yeni nesil malzeme tasarımı için kullanmak üzere kapsamlı bir başvuru kaynağı sunmak hedeflenmiştir.

Jeopolimer bilimi yalnızca laboratuvar ölçeğinde geliştirilen bir bağlayıcı sistemi değil, aynı zamanda küresel ölçekte malzeme tüketimini, enerji kullanımını ve karbon salımını yeniden düşünmeyi sağlayan stratejik bir yaklaşımdır. Endüstriyel yan ürünlerin, tarımsal atıkların ve yerel doğal kaynakların yüksek performanslı malzemelere dönüştürülmesi; hem döngüsel ekonomi ilkeleri hem de sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle güçlü bir uyum göstermektedir. Bu nedenle jeopolimerler, geleceğin yapı teknolojilerinde bilimsel ve çevresel açıdan kilit bir role adaydır.

Kitabın hazırlanmasında, jeopolimer araştırmalarının uluslararası literatürdeki hızlı gelişimi büyük bir ilham kaynağı olmuştur. Alanın önde gelen bilim insanlarının katkıları, deneysel bulguların çeşitliliği ve disiplinler arası yaklaşımın zenginliği, kitabın teorik ve uygulamalı kapsamını şekillendirmiştir. Kitabın, jeopolimer üzerine çalışan lisans ve lisansüstü

öğrenciler, araştırmacılar, mühendisler ve ilgili endüstri de çalışanlar için güvenilir bir kaynak olmasını diliyorum.

Bilimin ilerlemesi, sürekli merak eden, sorgulayan ve yeni çözümler üretmeye odaklanan bir topluluğun ortak çabasıyla mümkündür. Jeopolimer biliminin geleceği de bu kolektif birikim sayesinde daha güçlü ve daha yaratıcı olacaktır.

Prof. Dr. Fatih ÇALIŞKAN¹

Öğr. Gör. Turgay TEHÇİ²

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Sakarya / Türkiye. fcaliskan@subu.edu.tr ORCID: 0000-0002-9568-7049

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya Meslek Yüksekokulu, Metalurji Bölümü, Sakarya / Türkiye. turgaytehci@subu.edu.tr ORCID: 0000-0003-4831-0668

TEŞEKKÜR

Bu kitabın ortaya çıkış süreci, yoğun çalışma dönemlerini, merakla geçen araştırma saatlerini ve bazen yorucu olmakla beraber, bir o kadar da öğretici tartışmaları bir arada barındıran uzun bir yolculuktu. Bu yolculukta bizlere destek olan, katkı sunan ve motivasyon sağlayan kurumumuza ve çalışma arkadaşlarımıza içtenlikle teşekkür ederiz.

Kitabın hazırlanması süresince, zaman zaman yoğunlaşan çalışma temposunu anlayışla karşılayan ve sabırla destek veren ailelerimize özel olarak teşekkür etmek isteriz. Bu süreçte gösterdikleri moral ve motivasyon, çalışmamızı tamamlamak için önemli bir itici güç olmuştur.

Son olarak, jeopolimer malzemeler alanına ilgi duyan tüm okuyuculara teşekkür ederiz. Bu kitabın, alanda yeni çalışmalara ilham vermesi ve farklı bakış açılarını teşvik etmesi en büyük dileğimizdir.

Katkı veren herkese içten teşekkürlerimizle...

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
TEŞEKKÜR.....	iii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
TABLolar LİSTESİ	xvi
BÖLÜM 1	1
JEOPOLİMER BİLİMİNİN TEMELLERİ VE KAVRAMSAL ÇERÇEVESİ.....	1
GİRİŞ.....	1
1. JEOPOLİMER BİLİMİNİN TEMELLERİ	1
1.1.Jeopolimer Kavramı	2
1.2.Jeopolimerlerin Tarihsel Gelişimi ve Modern Uygulamaları	2
1.3.Terminolojideki Evrim	4
1.3.1. Alkali-Aktive Edilmiş Malzemeler.....	4
1.3.2.Jeopolimer	5
1.4.Geleneksel Portland Çimentosu ile Karşılaştırmalı Üstünlükler ve Zorluklar	6
BÖLÜM 2	9
JEOPOLİMERLERİN KİMYASAL YAPISI, REAKSİYON MEKANİZMALARI VE MİKROYAPISAL EVRİMİ	9
GİRİŞ.....	9
2.KİMYASAL YAPI VE REAKSİYON MEKANİZMALARI.....	9
2.1.Kimyasal Formülasyonlar.....	10
2.1.1.Metakaolin	10
2.1.2.Uçucu Kül.....	13
2.1.3.Cüruf.....	16
2.1.4.Diğer Ön Malzemeler	18
2.2.Aktivatör Mekanizmaları.....	20

2.2.1.Katı ve Sıvı Aktivasyon Mekanizmaları.....	21
2.2.2.Sodyum ve Potasyum Esaslı Sistemler.....	22
2.3.Polimerizasyon Süreci ve Mikro Yapı Oluşumu.....	23
2.3.1.Çözünme.....	24
2.3.2.Yönelim / Taşınım.....	25
2.3.3.Yoğunlaşma / Polikondenzasyon.....	26
2.3.4.Mikroyapısal Evrim ve Sınıflandırma	26
2.3.5.Polimerizasyon Derecesi ve Etki Eden Parametreler	28
2.4.Termodinamik ve Kinetik Temeller	29
2.4.1.Termodinamik Temeller	30
2.5.Mikroyapısal Gelişim ve N-A-S-H, C-A-S-H Jel Fazları.....	32
BÖLÜM 3	35
ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE İŞLEME TEKNİKLERİ	35
GİRİŞ.....	35
3.1.Hammadde Hazırlığı ve Aktivasyon	35
3.1.1.Hammadde Türleri ve Özellikleri.....	36
3.1.2.Öğütme, Eleme ve Tane Boyutu Kontrolü	37
3.1.3.Kimyasal Aktivasyon Öncesi İşlemler	37
3.1.4.Aktivasyon Çözeltilisinin Hazırlanması ve Optimizasyonu	38
3.1.5.Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilir Hammadde Seçimi	39
3.2.Kürleme Yöntemleri.....	40
3.2.1.Isıl Kürleme	40
3.2.2.Buhar Kürleme	41
3.2.3.Mikrodalga Kürleme.....	41
3.2.4.Çevresel Kürleme	42
3.2.5.Nem Oranı, CO ₂ Etkisi ve Su/Aktivatör Oranı	42
3.2.6.Kürleme Rejimlerinin Mikro Yapı, Dayanım ve Dayanıklılığa Etkisi.....	43
3.3.Katkı Malzemeleri ve Hibrit Sistemler.....	43

3.3.1.Nano Katkılar	44
3.3.2.Elyaf Takviyesi.....	44
3.3.3.Polimer/Jeopolimer Hibritleri	45
3.3.4.Mineral Katkılar	45
3.3.5.Reolojik Davranış ve İşlenebilirlik Kontrolü	46
3.4.Ölçek Büyütme ve Endüstriyel Uygulama Teknikleri.....	48
3.4.1.Pilot Ölçek Deneyimleri: Karıştırma Ekipmanları ve Homojenizasyon Teknikleri	48
3.4.2.Kalıplama, Ekstrüzyon ve 3D Yazıcı Teknolojileri.....	49
3.4.3.Enerji Verimliliği ve Maliyet Analizleri.....	50
3.4.4.Sürekli Üretim Sistemleri ve Proses Otomasyonu.....	51
3.4.5.Endüstriyel Standartlar, Kalite Kontrol ve Sertifikasyon Gereklikleri.....	52
3.5.Priz Süresi Kontrolü	52
BÖLÜM 4.....	55
JEOPOLİMERLERİN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	55
GİRİŞ.....	55
4.1.Basınç ve Eğilme Dayanımı	56
4.1.1.Kimyasal Bileşim ve Si/Al Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi. 57	
4.1.2.Alkali Aktivatörün Kimyasal Yapısı ve Konsantrasyonunun Sistem Davranışına Etkisi	59
4.1.3.Kür Koşullarının Optimizasyonu ve Malzeme Özelliklerine Zamana Bağlı Etkileri.....	62
4.1.4.Agrega ve Katkı Malzemelerinin Kompozit Davranış Üzerindeki Etkileri	65
4.1.5.Lif Takviyeli Jeopolimer Kompozitlerde Mekanik Davranış ve Tokluk Mekanizmaları	69
4.1.6.Basınç-Eğilme Dayanımı İlişkisi ve Kırılma Mekanizması Prensip ve Davranışları	73
4.2.Yoğunluk, Gözeneklilik ve Geçirgenlik İlişkileri	77
4.2.1.Yoğunluğu Etkileyen Temel Faktörler ve Mikroyapısal İlişkiler..	78

4.2.2.Gözenek Yapısının Oluşum Mekanizmaları ve Morfolojik Sınıflandırılması	81
4.2.3.Gözenek Yapısının Karakterizasyonu: Cıva Porozimetresi, BET ve SEM Analiz Yöntemleri	85
4.2.4.Geçirgenlik ve Su Emilim Karakteristiği: Mekanizmalar ve Dayanıklılık İlişkileri.....	89
4.2.5.Gözeneklilik Dayanım Dayanıklılık İlişkisi	92
4.2.6 Karbonatlaşma ve Klor İyonu Difüzyonuna Etkiler	95
4.3.Dayanıklılık: Donma Çözülme, Asit ve Sülfat Etkileri	96
4.3.1.Donma Çözülme Çevrimlerinde Mikro Yapı Değişimleri	96
4.3.2.Tuz Çözeltileri ve Buzlanma Etkisi Altında Davranış.....	96
4.3.3.Asidik Ortamlarda Kimyasal Stabilitate.....	97
4.3.4.Sülfat Etkisi ve Genleşme Mekanizmaları	97
4.3.5.Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) Açısından Değerlendirme.....	97
4.3.6.Deniz Ortamı Koşullarında Performans	98
4.3.7.Deneysel Dayanıklılık Testleri ve Standart Yöntemler	98
4.4.Yangın ve Yüksek Sıcaklık Performansı	99
4.4.1.Jeopolimer Matrisinin Termal Bozunma Mekanizmaları	99
4.4.2.200-1000 °C Arası Mekanik Özellik Değişimleri	100
4.4.3.Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Sonuçları.....	100
4.4.4.Yüksek Sıcaklık Sonrası Mikro Yapı	101
4.4.5.Refrakter ve Yangına Dayanıklı Yapı Uygulamaları	101
4.4.6.Termal Şok ve Isı İletkenliği Davranışı.....	102
4.5.Uzun Dönem Dayanım ve Sürdürülebilirlik.....	102
4.5.1.Zamanla Mekanik Özelliklerde Değişim (1-5 Yıl Arası İzleme Çalışmaları)	103
4.5.2.Mikroyapı Kararlılığı ve Faz Dönüşümleri	103
4.5.3.Karbonatlaşma ve Yaşlanma Etkileri	103
4.5.4.Çevresel Etkiler Altında Performans	104

4.5.5.Geri Dönüştürülmüş Agregalarla Üretilen Jeopolimerlerin Uzun Dönem Davranışı	104
4.5.6.Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi	104
4.5.7.Ekonomik ve Çevresel Performansın Karşılaştırılması	105
BÖLÜM 5	106
FONKSİYONEL KATKILAR VE GELİŞMİŞ JEOPOLİMER KOMPOZİTLER	106
GİRİŞ.....	106
5.1.Nanomalzemeler ile Takviye.....	107
5.1.1.Karbon Esaslı Nanomalzemeler: CNT'ler ve Grafen.....	107
5.1.2.Seramik Nanomalzemeler: SiC ve Si ₃ N ₄	110
5.1.3.Nano-Silika (nSiO ₂) ve Nano-Alümina (nAl ₂ O ₃)	112
5.2.Fiber Takviyeli Jeopolimer Kompozitler.....	115
5.2.1.Karbon Fiber Takviyeli Jeopolimerler.....	115
5.2.2.Bazalt ve Cam Fiber Takviyeli Jeopolimerler	118
5.2.3.Polimerik Fiber Takviyeler.....	120
5.3.Hafif Jeopolimerler ve Köpük Jeopolimerler	124
5.3.1.Köpük Oluşturma Mekanizmaları	124
5.3.2.Yapı-Hücre İlişkisi ve Özellikler.....	127
5.3.3.Uygulama Alanları	131
5.4.İzolasyon Malzemesi Olarak Kullanımı	134
5.4.1.Termal İzolasyon Özellikleri	134
5.4.2.Akustik İzolasyon Özellikleri	136
5.4.3.Endüstriyel Uygulamalar	138
5.5.İnce Film ve Kaplama Olarak Jeopolimerler	140
5.5.1.Kaplama Yöntemleri.....	140
5.5.2.Korozyon Önleyici Kaplamalar	141
5.5.3.Refrakter ve Ateşe Dayanıklı Kaplamalar	142
5.6.Hibrit Organik İnorganik Sistemler	143

5.6.1. Polimer Jeopolimer Hibritleri	143
5.6.2. Geçiş Metali Oksit Katkıları (TiO ₂ , ZnO) ile Fonksiyonellik Kazandırma.....	144
5.6.3. İleri Fonksiyonel Uygulamalar: Sensörler, İletken Boyalar, Biy uyumlu Kaplamalar	145
5.7. Fonksiyonel Özelliklerin İyileştirilmesi	146
5.7.1. Termal Kararlılık ve Genleşme	146
5.7.2. Elektriksel İletkenlik ve Dielektrik Özellikler.....	148
BÖLÜM 6	151
ÇEVRESEL VE ENERJİ BOYUTU	151
GİRİŞ.....	151
6.1. Jeopolimerlerin Karbon Ayak İzi ve Sürdürülebilirlik Analizi	151
6.1.1. Geleneksel Çimentoyla Karşılaştırmalı Karbon Ayak İzi	151
6.1.2. Hammaddelerin Üretim ve Taşınma Aşamalarında Emisyonlar .	152
6.1.3. Alkali Aktivasyon Sürecinde Enerji ve CO ₂ Dengelemesi.....	153
6.1.4. Karbon Ayak İzinin Azaltılması için Stratejiler	153
6.1.5. Sürdürülebilirlik Endeksleri ve Çevresel Performans Değerlendirmesi	154
6.2. Atık Tabanlı Jeopolimerler	155
6.2.1. Uçucu Kül, Cüruf, Metakaolin ve Diğer Endüstriyel Yan Ürünler	156
6.2.2. Tarımsal Atıkların Kullanımı	157
6.2.3. Atıkların Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerinin Jeopolimerizasyon Üzerindeki Etkisi	158
6.2.4. Atık Yönetimi Perspektifinden Döngüsel Ekonomi Yaklaşımı ...	159
6.2.5. Atık Kaynaklı Jeopolimerlerin Çevresel Risk Analizi	160
6.3. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)	161
6.3.1. LCA Kavramı ve Jeopolimer Malzemelere Uygulanabilirliği	161
6.3.2. Fonksiyonel Birim ve Sistem Sınırlarının Belirlenmesi	162
6.3.3. Envanter Analizi: Girdi-Çıktı Parametrelerinin Hesaplanması ...	163

6.3.4.Etki Değerlendirmesi	163
6.3.5.Duyarlılık ve Senaryo Analizleri	164
6.3.6.Jeopolimer–Portland Çimento LCA Karşılaştırması	165
6.4.Enerji Verimliliği ve Çevresel Avantajlar	167
6.4.1.Üretim Sürecinde Enerji Tüketim Analizi	167
6.4.2.Düşük Sıcaklıkta Kütleme ve Enerji Kazanımı Yaklaşımları	168
6.4.3.Isıl ve Kimyasal Dayanımın Enerji Korunumuna Katkısı	169
6.4.4.Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu	169
6.4.5.Jeopolimerlerin Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemlerindeki Rolü	170
BÖLÜM 7	172
JEOPOLİMERLERİN UYGULAMA ALANLARI	172
GİRİŞ.....	172
7.1.İnşaat ve Yapı Malzemeleri.....	172
7.1.1.Yapısal Beton ve Prefabrik Elemanlarda Kullanım.....	172
7.1.2.Yüksek Dayanımlı ve Uzun Ömürlü Yol Kaplamaları.....	173
7.1.3.Jeopolimer Harçlar ve Yapıştırıcı Sistemler.....	174
7.1.4.Asidik ve Sülfatlı Ortamlara Dayanıklı Yapı Elemanları	175
7.1.5.Betonarme Uygulamalarda Çelik Uyumluluk ve Bağ Dayanımı	175
7.2.Yüksek Sıcaklık ve Yangın Dayanımlı Malzemeler.....	176
7.2.1.Termal Kararlılık ve Yüksek Sıcaklık Davranışı.....	176
7.2.2.Isı Yalıtım Özellikleri ve Termal Genleşme Analizi	177
7.2.3.Yangın Direnci ve Duman Emisyonu Performansı	178
7.2.5.Enerji Santralleri ve Endüstriyel Fırın Uygulamaları	179
7.3.Radyasyon Kalkanlama Malzemeleri.....	180
7.3.1.Jeopolimerlerin Radyasyon Soğurma Mekanizması.....	180
7.3.2.Ağır Metal ve Barit Katkılı Jeopolimer Kompozitler	181
7.3.3.Nükleer Tesislerde Atık Depolama ve Koruma Sistemleri	182
7.3.4.Medikal ve Endüstriyel Radyasyon Alanlarında Kullanım	183

7.3.5.Radyasyon Dayanımı Mekanik Özellik İlişkisi	183
7.4.Enerji Depolama ve Elektriksel Uygulamalar	184
7.4.1.Elektriksel İletkenliğin Arttırılması ve İyonik Taşıma Mekanizmaları	185
7.4.2.Jeopolimer Tabanlı Katı Elektrolitler	186
7.4.3.Süperkapasitör ve Pil Elektrotlarında Kullanım	186
7.4.4.Termoelektrik ve Piezoelektrik Özellikler.....	187
7.4.5.Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Sistemlerle Entegrasyon	187
7.5.Uzay ve Havacılıkta Kullanım Potansiyeli.....	188
7.5.1.Aşırı Ortam Koşullarında Mekanik ve Termal Performans.....	188
7.5.2.Mikrometeorit ve Radyasyon Etkilerine Karşı Direnç	189
7.5.3.Hafif ve Yüksek Dayanımlı Jeopolimer Kompozitler	190
7.5.4.Ay ve Mars Regolitinden Jeopolimer Üretimi.....	191
7.5.5.Uydu ve Roket Bileşenlerinde Kullanım Senaryoları.....	191
7.6.Sanatsal ve Kültürel Miras Uygulamaları.....	192
7.6.1.Tarihi Yapıların Restorasyonunda Jeopolimer Harçlar	192
7.6.2.Antik Seramik ve Heykel Replikasyonlarında Kullanım	193
7.6.3.Estetik ve Renk Stabilitesi Özellikleri	194
7.6.4.Biyolojik Bozulmaya ve Çevresel Etkilere Karşı Dayanım	194
7.6.5.Geleneksel Malzemelerle Uyum ve Sürdürülebilirlik Yaklaşımı	195
KAYNAKÇA.....	196

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- AAM: Alkali-Aktive edilmiş malzemeler
AR-Glass: Alkali dirençli cam
ASR: Alkali SiO₂ reaksiyonu
ASTM: Amerikan Malzeme ve Test Standartları Kuruluşu
BET: Yüzey alanı analizi
BT: Eğme testi
C-A-S-H: Kalsiyum - Alüminyum - Silikat – Hidrat
CED: Birincil enerji tüketimi
CNT: Karbon nanotüp
CTE: Termal genleşme katsayısı
C-S-H: Kalsiyum silikat hidrat
D_{Cl}: Klorür iyonu difüzyon katsayısı
D_{eff}: Efektif difüzyon katsayısı
DSC: Diferansiyel Taramalı kalorimetri
ΔG: Gibbs serbest enerji değişimi
ΔH: Reaksiyonun entalpi değişimi
ΔS: Entropi değişimi
EMI: Elektromanyetik girişim
EN: Avrupa standardı
EPS: Genleştirilmiş polistiren
ESS: Çevresel stres tarama sistemi
FIB: Odaklanmış iyon demeti
FTIR: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
f_c: Basınç dayanımı
f_{et}: Eğilme/çekme dayanımı
G_F: Kırılma enerjisi
GO: Grafen oksit
GYFC / GGBFS: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
HPC: Yüksek performanslı beton
ISRU: Yerinde kaynak kullanımı
ITZ: Arayüzey geçiş bölgesi
k: Geçirgenlik
KIP: Küresel Isınma Potansiyeli
K_{IC}: Kritik gerilme yoğunluk faktörü

K₂CO₃: Potasyum karbonat
LEFM: Lineer Elastik Kırılma Mekanığı
LCA: Yaşam döngüsü analizi
MJ: Megajul
MIP: Cıva İntrüzyon Porozimetresi
MK: Metakaolin
MPa: Megapascal
Ms: Silikat modülü
MSF: Melamin sülfonat
NMR: Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi
N-A-S-H: Sodyum - Alüminyum - Silikat – Hidrat
NT BUILD 492: Hızlandırılmış klor geçirgenliği
NSF: Naftalin sülfonat
-OH: Hidroksil
PAT: Proses analiz teknolojisi
PCE: Poli karboksilat eter
PP: Polipropilen
PVDF: Poliviniliden florür
PVA: Polyvinil alkol
pH: Konsantrasyon
rGO: İndirgenmiş grafen oksit
RHA: Pirinç Kabuğu Külü
SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu
SHM: Yapısal Sağlık İzleme
 σ_e : Elektriksel iletkenlik
SPC: İstatistiksel proses kontrolü
T: Mutlak sıcaklık
TCLP: Toksikite özellikli sızma testi
TGA: Termogravimetrik Analiz
TPS: Isı kalkanları ve termal koruma sistemleri
TS: Türk standardı
UV: Ultraviyole
W/S: Su/Katı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Jeopolimerlerin Termogravimetrik Analizi (TGA).....	11
Şekil 2: Jeopolimer bağlayıcı teknolojisinin farklı teknik ve bilimsel yönleri arasındaki karşılıklı ilişkileri gösteren şematik diyagram.	21
Şekil 3: Jeopolimerizasyon sürecinin şematik diyagramı.....	25
Şekil4: Polimerizasyonun çözünme, yönelim/taşınım ve koagülasyon/jelasyon aşamalarını gösteren şematik diyagram.....	27
Şekil 5: Farklı Si/Al oranlara sahip jeopolimerlerin genel SEM yapısı [a: Na+/10C , b: K+/10C	28
Şekil 6: N-A-S-H jel yapısının idealize edilmiş moleküler modeli.	29
Şekil 7: Jeopolimerizasyon reaksiyonunun net ΔG 'sinin pH'a bağlı değişimini gösteren şematik akış.....	31

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1: Kaolinitin Isıl İşlem Sıcaklığına Göre Dönüşüm Aşamaları ve Faz Değişimleri.	12
Tablo 2: ASTM C618'e Göre F Tipi ve C Tipi Uçucu Külün Tipik Kimyasal Bileşimi (Ağırlıkça %) (ASTM C618-23, 2023).	14

BÖLÜM 1

JEOPOLİMER BİLİMİNİN TEMELLERİ VE KAVRAMSAL ÇERÇEVESİ

GİRİŞ

Jeopolimer bilimi, alkali-aktif edilmiş aluminosilikat esaslı malzemelerin kimyasal yapısını, reaksiyon mekanizmalarını, terminolojik evrimini ve geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak sunduğu çevresel ve mühendislik üstünlüklerini kapsayan geniş bir araştırma alanıdır. Bu alan, yalnızca bir bağlayıcı sınıfını tanımlamakla kalmayıp, sürdürülebilir malzeme tasarımı, döngüsel ekonomi, endüstriyel atık değerlendirme, ileri kompozit teknolojileri ve yüksek performanslı yapı malzemeleri gibi çok disiplinli temaları bir arada barındırmaktadır.

Modern jeopolimer bilimi; başlangıçta Joseph Davidovits'in 1970'li yıllarda önerdiği teorik temellere dayansa da, günümüzde nano-takviyeli jeopolimerler, hibrit bağlayıcı sistemler, derin deniz ve uzay uygulamaları, radyasyon kalkanlama teknolojileri ve kendini iyileştiren yapılar gibi ileri araştırma alanlarına doğru genişlemiştir. Bu bölüm, jeopolimer kavramının temel tanımlarından tarihsel gelişimine, terminolojik farklılıklarından Portland çimentosu ile karşılaştırmalı analizine kadar uzanan kapsamlı bir bakış sunmaktadır. Böylece, kitabın ilerleyen kısımlarında detaylandırılacak kimyasal süreçlerin, üretim tekniklerinin ve uygulama alanlarının anlaşılabilmesi için gerekli bilimsel zemin oluşturulmaktadır (Davidovits, 1991).

1. JEOPOLİMER BİLİMİNİN TEMELLERİ

Jeopolimer biliminin temeli, aluminosilikat kaynaklı malzemelerin yüksek pH'lı çözeltilerle reaksiyona girerek üç boyutlu amorf bir ağ oluşturması esasına dayanır. Bu temel kavrayış, hem jeopolimerizasyon mekanizmasının anlaşılması hem de jeopolimerlerin neden yüksek dayanım, düşük gözeneklilik, kimyasal kararlılık ve termal direnç gibi üstün özellikler sunduğunun açıklanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu alt bölüm, jeopolimer davranışını belirleyen bilimsel ilkelerin bütün bölüm boyunca ele alınacak konulara nasıl temel oluşturduğunu kısaca ortaya koyar.

1.1. Jeopolimer Kavramı

Jeopolimerler; doğal kaynaklı veya endüstriyel bir atık ürün olan uçucu kül, metakaolin, deniz kumu gibi yüksek oranda Al ve Si içeren malzemelerin alkali aktivatörlerle reaksiyona girmesiyle oluşan üç boyutlu amorf aluminosilikat yapısına sahip inorganik polimer bir bağlayıcıdır (Davidovits, 1991). Bu bağlayıcılar, jeopolimerizasyon olarak bilinen karmaşık bir kimyasal reaksiyon dizisi ile meydana gelir. Jeopolimerizasyon süreci sonrası elde edilen jeopolimerler yüksek sıcaklık direnci, kimyasal korozyona karşı dayanıklılık, düşük gözeneklilik ve uzun ömür gerektiren alanlarda tercih sebebi olmaktadır (Duxson ve diğerleri, 2007). Ayrıca düşük karbon ayak izi sergilemeleri sebebiyle günümüz amaçlarına hizmet etmektedir. Kimyasal olarak, jeopolimerizasyon reaksiyonu beş aşamadan oluşan karmaşık bir süreci içermektedir. Süreçler; çözünme, taşınım, yeniden düzenlenme, yoğunlaşma ve polimerleşme aşamalarından oluşan bir diziyi takip eder (Duxson ve diğerleri, 2007). Jeopolimer malzemelerin en çekici yönlerinden biri, sürdürülebilirliğe olan katkılarıdır. Geleneksel çimento üretimi, küresel CO₂ emisyonlarının çok düşük seviyelerde katkı sağlarken (Scrivener, John, Gartner, 2018), jeopolimerler ise neredeyse %80 oranında katkı sağlamaktadır (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011). Bu durum termik santraller, demir-çelik fabrikaları gibi yoğun enerji endüstrilerinden çıkan uçucu kül, cüruf benzeri atık malzemeleri değerlendirerek atıktan servete dönüşümünü sağlamasıyla mümkün olmaktadır.

Jeopolimerler, malzeme bilimi ve inşaat mühendisliğinde, yapısal performansı yüksek, çevresel etkisi düşük, yeni nesil, sürdürülebilir bir malzeme ailesinin temsilcisidir. Kitabın devamında, jeopolimerlerin kimyası, karakterizasyon yöntemleri, üretim süreçleri, çeşitli uygulama alanları ve gelecek perspektifleri detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

1.2. Jeopolimerlerin Tarihsel Gelişimi ve Modern Uygulamaları

Geleneksel inanca göre; antik Mısır'daki piramitlerin inşasında kullanılan devasa kireçtaşı blokları tamamen doğal taş ocaklarından çıkarılıp taşınması ile oluşturulmuştur. Ancak 1970'li yılların sonunda Fransız bilim insanı Prof. Dr. Joseph Davidovits'in ortaya attığı bir tezle geleneksel inanın tam aksi bir durum aktararak modern jeopolimer biliminin temelleri

atılmıştır. Bu teze göre; Mısır topraklarında yaygın bir kil türü olan, silis ve alümina bakımından zengin olan kaolinit alkali aktivatörlerle reaksiyona sokulmasıyla bugünkü polimerizasyon süreçlerine benzer bir şekilde dökme taş yöntemiyle üretildiğini iddia etmiştir (Davidovits, 1991). Davidovits jeopolimerizasyon olarak adlandırılan kimyasal sürecin, insanlık tarihindeki en etkileyici yapılardan birinin inşasının ardındaki gerçek teknoloji olabileceğini öne sürerek, malzeme biliminde yeni bir alanın doğuşuna öncülük etmiştir. Atılan bu teorik temelden hareketle 1980’li yıllarda ilk uygulamaların başladığı görülmektedir. Jeopolimerlerin asit direncinin yüksek olması, yangına karşı mukavemetli olması ve yüksek sıcaklıklarda kararlılık göstermesi gibi üstün performans özelliklerinin sanayi tarafından keşfedilmesiyle belirtilen on yılda pek çok alanda ticarileşme yolunda ilk adımlar atılmıştır. Örneklendirmek gerekirse; başta Pyrament markası altında geliştirilen ve hızlı kürleşme özelliği gösteren jeopolimer bağlayıcılar olmak üzere, endüstriyel kaplamalar, yangına dayanıklı panel ve kaplamalar ile yüksek sıcaklık refrakter malzemeleri öne çıkan ürünler olduğu görülmektedir (Davidovits, 2008). Öncü araştırmalar, malzemenin Portland çimentosundan (PC) farklı, amorf yapıdaki aluminosilikat ağının onu yüksek derecede korozif ortamlarda ve termal şoklara karşı son derece dayanıklı kıldığını ortaya koymuştur. Çok hızlı gelişim sergileyen jeopolimerler ondokuzuncu yüzyılın son on yılında büyük bir atılım gerçekleştirmiştir. Aynı dönemde sürdürülebilir malzeme kimliğini kazanmaya başlamıştır. Küresel ısınma vb. etkiler sebebiyle artan çevresel kaygılar, Portland çimentosu üretim sürecinin kaynaklık ettiği yüksek karbon dioksit (CO₂) emisyonlarına dikkat çekmiş ve alternatif, düşük karbon ayak izine sahip bağlayıcılar arayışını hızlandırmıştır. Tam da bu noktada ideal bir çözüm olarak Jeopolimerler öne çıkmıştır. Nitekim Jeopolimerler, ana hammadde olarak sanayi yan ürünlerini; uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolini kullanırlar. Böylece hem sentez süreçleri geleneksel çimento üretimine kıyasla çok daha düşük enerji tüketimi ve CO₂ salımı gerektirir hem de bahsi geçen atıkların değerlendirilmesi yoluyla döngüsel ekonomiye katkı sağlarlar (Duxson ve diğerleri, 2007). Günümüzde ise jeopolimer araştırmaları çok daha karmaşık ve çeşitli alanlara yayılmış durumdadır. Çalışmalar, sadece mekanik dayanımı artırmakla kalmamıştır (Al-Buriah, Alzahrani, Yılmaz, Çalışkan, Olarino, 2025; Echeweozo ve diğerleri, 2024). Aynı zamanda kendi kendini iyileştirebilen

(Wu, Li, Chen, Shi, Ghiassi, 2024), nano parçacıklarla güçlendirilmiştir (Adak, Sarka, Mandal, 2014). Derin deniz (Li ve diğerleri, 2024; Zhang, Zhong, Fan, 2024), ve uzay (Lee, Riessen, 2022), için dayanıklı kompozitler ve radyasyon (Al-Buriahi, Alomayrah, Alsaiari, Tehçi, Çalışkan, 2025) gibi yenilikçi uygulamalar üzerine odaklanmaktadır.

Joseph Davidovits'in ortaya attığı bir fikrin, sürdürülebilirlik gibi 21. yüzyılın en önemli mühendislik sorunlarına en umut vaat eden çözümlerden birine dönüşmesi bilim ve teknoloji tarihindeki döngü selliğinde dikkat çekici bir örnek teşkil etmektedir.

1.3. Terminolojideki Evrim

Jeopolimer bilimi zaman içinde malzemenin kökenleri, reaksiyon mekanizmaları ve uygulama alanlarındaki ilerlemelere paralel olarak dinamik bir terminolojik dönüşüm geçirmiştir. Söz konusu dönüşüm, araştırmacıların malzemeye dair kavrayışındaki derinleşmeyi ve disiplinler arası etkileşimlerle genişleyen kuramsal çerçeveyi yansıtmaktadır. Çeşitli araştırma grupları ve farklı coğrafi bağlamlarda benimsenen terimler, bazen birbirinin yerine kullanılsa da, aralarında ince ancak önemli nüanslar bulunmaktadır. Bu terminolojik çeşitlilik alanı zenginleştirmekle birlikte, aynı zamanda kavramsal birlik ve standardizasyon gerekliliğini de gündeme getirmiştir (Provis, Van Deventer, 2014). Aşağıda terminolojik evrimin en kritik örnekleri detaylandırılmıştır:

1.3.1. Alkali-Aktive Edilmiş Malzemeler

Alkali-Aktive edilmiş malzemeler (AAM), jeopolimerleri de içeren en kapsamlı üst kavram olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, herhangi bir alumino-silikat kaynağının yüksek pH'lı bir alkali çözelti ile reaksiyona girerek oluşturduğu bağlayıcı sistemleri ifade eder (Shi, Jiménez, Palomo, 2011). Söz konusu sistemler, kalsiyum (Ca) içeriğine bağlı olarak iki ana gruba ayrılır:

- **Düşük kalsiyum içeriğine sahip sistemler:** Kimyasal bileşimleri itibarıyla düşük kalsiyum (Ca) ve yüksek alümina (Al_2O_3) içeren alkali çözeltiler ile reaksiyonu, matris yapısının başlıca N-A-S-H (Sodyum - Alüminyum - Silikat - Hidrat) jeli şeklinde polimerleşmesine yol açar. Oluşan reaksiyon mekanizması ve nihai

mikro yapı, Davidovits'in öngördüğü modelle birebir uyum içindedir (Davidovits, 1991).

- **Yüksek Kalsiyumlu Sistemler:** Daha çok C-A-S-H (Kalsiyum - Alüminyum - Silikat - Hidrat) veya C-(A)-S-H jelleri ile N-A-S-H veya C-A-S-H jellerinin mekanik karışımlarını oluşturur. Buradaki yapı, geleneksel Portland çimentosundaki C-S-H jeline benzerlik gösterir, yapıdaki alüminyum içeriği daha yüksektir (Ben Haha, Le Saout, Winnefeld, Lothenbach, 2011).

1.3.2. Jeopolimer

Joseph Davidovits tarafından 1970'lerin sonunda amorf veya yarı kristal alüminyum silikat malzemeleri tanımlamak üzere ortaya atılmış bir terimdir (Davidovits, 1991). Davidovits, bahsi geçen malzemelerin polimerik zincir ve ağ yapısına vurgu yapmak için polimer ve doğal mineraller gibi doğal jeolojik benzerlerine atıfta bulunmak için "jeo-" önekini birleştirmiştir. Kimyasal olarak, genel formülü $M_n[-(SiO_2)_z-AlO_2]_n \cdot wH_2O$ şeklindedir. Burada M alkali bir katyonu, n polimerizasyon derecesini, z ise Si/Al oranını temsil eder. Bu formül, düşük kalsiyum içerikli ve yapısında esas olarak N-A-S-H (Sodyum-Alüminyum-Silikat-Hidrat) jeli barındıran malzemeleri ifade etmektedir (Davidovits, 2008). Günlük dilde çoğunlukla Alkali ile Aktive Edilmiş Malzemeler (AAM) ile aynı anlamda kullanılsa da, teknik ve bilimsel sınıflandırmada jeopolimerler, AAM'ler içerisinde özel bir grubu oluşturur.

- **Puzzolanik Malzemeler:** Alkali-active edilmiş malzemelerin hammaddelerini tanımlamak için kritik öneme sahiptir. Kendi başlarına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan Puzzolanlar, sadece ince taneli haldeyken ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanan silisli ve alüminli malzemelerdir (ASTM C125-23, 2023). Bahsedilen tanım, hem volkanik kül, tuf, diatomit, killer gibi doğal hem de uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi yapay malzemeleri kapsar. Alkali-active edilmiş sistemlerde, $Ca(OH)_2$ yerine NaOH veya KOH gibi alkali aktivatörler, bu puzzolanik reaksiyonu tetikler ve hızlandırır.
- **Jeopolimerizasyon:** Alkali-active edilmiş malzemelerin sertleşme ve mukavemet kazanma sürecini tanımlayan kimyasal ve fiziksel

olaylar bütünü ifade eder. Süreç, temelde üç aşamalı bir mekanizma ile ilerler (Duxson ve diğerleri, 2007).

1. Çözünme (Dissolution):

Alkali çözeltisinin etkisiyle, alumino-silikat kaynağındaki (puzzolan) Si ve Al atomları yapıdan koparak çözelti fazına geçer.

2. Yönelim / Taşınım (Orientation / Transportation):

Çözünmüş silikat ve alüminat iyonları, çözelti içindeki hareketlilikleri sayesinde birleşir ve böylece daha büyük oligomer yapılarının temelini atar.

3. Yoğunlaşma / Sertleşme (Condensation / Hardening):

Oligomerik yapılar, birbirleriyle bağlanarak üç boyutlu amorf bir ağ yapı (N-A-S-H veya C-A-S-H jeli) oluşturur. Su, oluşan reaksiyonun bir yan ürünü olarak açığa çıkar ve sonuçta katı, dayanıklı bir matris meydana gelir.

Yukarıdaki terminolojik ayrımlar, malzemelerin performansını, kimyasal yapısını ve uygulama potansiyelini daha net bir şekilde sınıflandırarak anlamak için hayati öneme sahiptir.

1.4. Geleneksel Portland Çimentosu ile Karşılaştırmalı Üstünlükler ve Zorluklar

Jeopolimerlerin potansiyelini ve konumunu anlamak için geleneksel Portland Çimentosu (PC) ile karşılaştırmalı bir analiz yapılması gerekmektedir. Analiz sonrası jeopolimerlerin hem sürdürülebilirlik açısından üstünlükleri hem de endüstriyel ölçekte yaygınlaşmasının önündeki engeller net bir şekilde görülecektir.

Jeopolimerlerin Üstünlükleri:

- **Çevresel Sürdürülebilirlik:** Yaşam döngüsünün tamamı değerlendirildiğinde Portland Çimentosu'nun çevresel etkisi, ham madde hazırlama, klinker üretimi ve enerji tüketimi dahil olmak üzere oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bahsedilen süreçlerin tamamı insan kaynaklı küresel CO₂ salınımının önemli bir bölümünü oluşturur (Scrivener, John, Gartner, 2018). Jeopolimer teknolojisi ise soruna iki yönlü bir çözüm sunar: Birincisi, düşük

enerjili bir üretim yolunu temsil eder. Bu sayede, klinker üretiminde olduğu gibi yüksek sıcaklık ve yoğun emisyon gerektiren bir işleme gerek kalmaz. İkinci ve daha kritik avantajı ise, ısı enerjisi santrali uçucu külü ve demir-çelik tesislerinin cürufu gibi endüstriyel yan ürünleri ana hammadde kaynağı haline getirerek döngüsel ekonomiye doğrudan katkıda bulunmasıdır. İşte bu sinerjik yaklaşım, geleneksel çimentoya kıyasla bağlayıcı başına düşen karbon ayak izinin önemli ölçüde azaltılmasının en önemli hususları arasında yer almaktadır (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).

- **Üstün Dayanıklılık Performansı:** Jeopolimerler özellikle 800-1200°C sıcaklıklara kadar dayanabilen üstün yangın/ısı direnci sergiler. Aynı zamanda PC'den daha yüksek erken dayanım, asit/sülfat direnci ve kompakt mikroyapıları sayesinde geçirgenlikleri düşüktür, bu da donatı korozyonu ve donma-çözülme hasarına karşı direnci artırır (Bakharev, 2004; Kong, Sanjayan, 2010).

Jeopolimerlerin Zorluklar ve Sınırlamalar

- **Standardizasyon Eksikliği:** Portland Çimentosu (PC), yüz yılı aşkın bir süredir ASTM, EN, TS gibi uluslararası ve ulusal standart kuruluşlarınca mekanik özellikleri, dayanıklılık kriterleri, karışım tasarım prosedürleri ve performans test metodolojileri kesin olarak tanımlanmıştır. Buna karşın, jeopolimer bağlayıcılar, heterojen bir yapı sergilemektedir. Bahsi geçen farklılığa ham maddelerinin (uçucu kül, metakaolin, cüruf) kimyasal ve mineralojik bileşimindeki doğal değişkenlik ve aktivasyon için kullanılan alkali aktivatör çeşitliliği (Na_2SiO_3 , NaOH, KOH vb.) neden olmaktadır. Oluşan heterojen yapı, malzemenin mekanik dayanım, kür sıcaklığı bağımlılığı ve uzun vadeli performansı gibi kritik parametrelerin öngörülebilirliğini ve standardizasyonunu büyük ölçüde zorlaştırmaktadır. Uygulama bakımından jeopolimerlerin benimsenmesi ve yaygınlaşmasındaki en büyük engeli yukarıda belirtilen sebeplerle beton tasarım kodu ve spesifikasyonlarının

jeopolimer sistemleri için oluşturulamamış olması yaratmaktadır (Provis, 2018).

- **Ham Madde Değişkenliği:** Jeopolimerin performansı, kullanılan uçucu kül veya cürufun kimyasal bileşiminden doğrudan etkilenir. Bu durum malzemelerin bileşiminin tekrarlanabilir ve tutarlı bir ürün kalitesi elde etmeyi zorlaştırmaktadır (Provis, 2018).
- **Pratik ve Ekonomik Engeller:** Birçok jeopolimer sisteminin yüksek sıcaklıkta kür gerektirmesi sebebiyle yerinde döküm uygulamalarında sınırlamalar getirmektedir. Diğer bir sınırlama ise, sodyum silikat, sodyum hidroksit gibi alkali aktivatörlerin nispeten yüksek maliyeti ve aşındırıcı doğasıdır. Bu durum, hem toplam üretim giderlerini yükseltebilir hem de işleme ve güvenlik aşamalarında zorluklar oluşturabilir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011; Provis, 2018).

Jeopolimerler, çevresel faydalar ve üstün performans özellikleriyle PC'ye güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ancak, beklenen potansiyelin tam olarak gerçekleşebilmesi, standardizasyon çalışmalarının tamamlanmasına, ham madde tutarlılığının sağlanmasına ve pratik/ekonomik engellerin aşılmasına bağlıdır.

BÖLÜM 2

JEOPOLİMERLERİN KİMYASAL YAPISI, REAKSİYON MEKANİZMALARI VE MİKROYAPISAL EVRİMİ

GİRİŞ

Jeopolimer malzemelerin bilimsel temelleri, onların benzersiz kimyasal yapısına ve bu yapının oluşumunu yöneten reaksiyon mekanizmalarına dayanır. Geleneksel Portland çimentosu hidrasyonuna kıyasla tamamen farklı bir kimyasal paradigma sergileyen jeopolimerizasyon, amorf veya yarı-kristalin aluminosilikat yapıların güçlü alkali ortamda çözünmesiyle başlayan, çok aşamalı ve topokimyasal bir dönüşüm sürecidir. Bu süreç; prekürsörün mineralojisi, alkali aktivatörün tipi ve kimyasal modülü, reaksiyon sıcaklığı, iyonik kuvvet, Si/Al oranı, CaO içeriği ve mikroyapısal evrim dinamikleri tarafından belirlenen karmaşık bir kimyasal sistemdir.

Jeopolimerizasyon mekanizmalarının kavranması, reaksiyonun kimyasal adımlarının ötesine geçerek; moleküler düzeydeki çözünme-yoğunlaşma süreçlerini, jel fazlarının (N-A-S-H, C-A-S-H, N-(C)-A-S-H) oluşumunu ve mikroyapısal olgunlaşmayı içeren bütüncül bir perspektif gerektirir. Metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve diğer alternatif ön malzemeler, farklı kimyasal yapılarına bağlı olarak özgün çözünme davranışları ve farklı jel fazı oluşumları ile jeopolimerizasyon kinetiğini derinden etkilemektedir.

Bu bölümde; jeopolimerlerin kimyasal formülasyonları, aktivatör mekanizmaları, polimerizasyon basamakları ve mikroyapısal evrim süreçleri ayrıntılı biçimde ele alınarak, malzemenin atomik ölçekteki dönüşümünün makro ölçekli mühendislik özelliklerine nasıl yansıdığı açıklanacaktır. Böylece, jeopolimer teknolojisinin bilimsel temelini oluşturan kimyasal süreçlerin, hem teorik hem de uygulamaya yönelik yönleriyle anlaşılması hedeflenmektedir.

2.KİMYASAL YAPI VE REAKSİYON MEKANİZMALARI

Jeopolimerizasyon, çimento kimyasından kökten farklılık gösteren bir reaksiyon mekanizmasıdır. Böylesine bir farklılığın temelinde jeopolimerin esas olarak amorf veya yarı-kristal yapıdaki aluminosilikat başlangıç

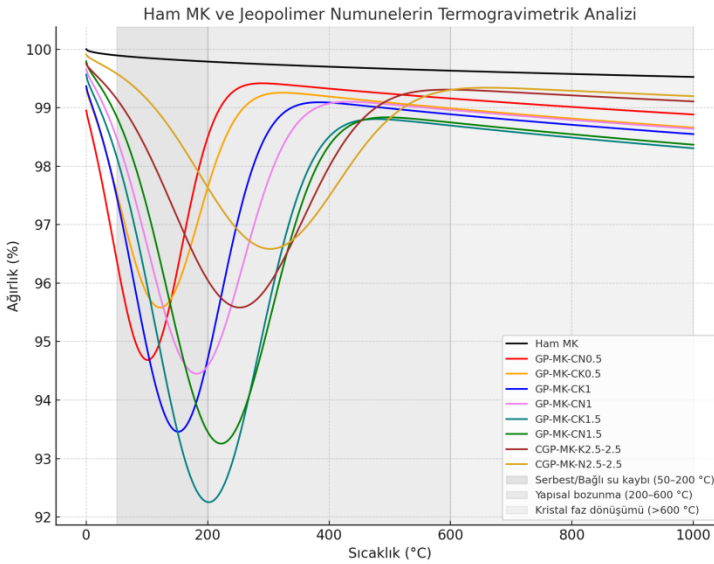
malzemelerinin yüksek pH'lı alkali bir çözelti ile çözünerek polimerleşme reaksiyonu sonucu üç boyutlu aluminosilikat ağları oluşturmaya dayanmaktadır (Provis, 2018). Bu sürecin temelini, nihai malzeme özelliklerinin ve kimyasal formülasyonun mimarı olan hammadde seçimi oluşturur. Nihai jeopolimer ağının yapı taşlarını sağlayan hammaddenin kimyasal bileşimi (Si/Al, Ca/Si oranları), mineralojik faz içeriği (amorf/camsı faz miktarı), partikül morfolojisi ve reaktivitesi, jeopolimerizasyon kinetiğini, jel fazının doğasını ve malzemenin özelliklerini doğrudan belirler (Provis, 2014). Temel araştırmalarda, yüksek saflıkta ve homojen yapıdaki metakaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) model bir başlangıç malzemesi olarak kullanılarak reaksiyon mekanizmaları aydınlatılır. Endüstriyel uygulamalarda ise, atık kökenli düşük kalsiyumlu uçucu külün küresel morfolojisi işlenebilirliği destekler ve bu özelliğiyle sürdürülebilir ürünlerin temel bileşeni haline gelir (Fernández-Jiménez, Palomo, 2005). Kalsiyumca zengin olan yüksek fırın cürufu ise C-(A)-S-H ile N-A-S-H jellerinin etkileşim halinde olduğu hibrit sistemleri teşvik ederek yüksek erken dayanım ve düşük geçirgenlik gibi üstün performans özellikleri kazandırır (Ben Haha, Le Saout, Winnefeld, Lothenbach, 2011). Dolayısıyla, bir başlangıç malzemesinin seçimi sadece bir hammadde tercihi değildir. Jeopolimer ağının nano-yapısal mimarisinden makro ölçekteki performansına kadar uzanan pek çok kritik parametreyi kontrol eden bir husustur (Provis, 2014). Bu nedenle, başlangıç malzemesinin kimyasının iyi anlaşılması, hedeflenen uygulama için optimize edilmiş jeopolimer formülasyonlarına giden yolda kilit aşamayı oluşturur.

2.1.Kimyasal Formülasyonlar

2.1.1.Metakaolin

Metakaolin (MK) genel olarak $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ kimyasal formülü ile temsil edilir. Yüksek oranda amorf yapıda ve reaktif bir aluminosilikat başlangıç malzemesidir. Doğal kaynağı, kaolinit grubuna ait bir kil minerali olan kaolindir ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), bu nedenle kalsine edilmiş kil olarak da adlandırılır. Metakaolin, kaolinitin kontrollü termal dönüşümüne dayanan bir prosten elde edilir ve bahsedilen süreç, yapısal suyun (hidroksil gruplarının) uzaklaştırıldığı bir dehidroksilasyon işlemidir. Dehidroksilasyon işlemi yaklaşık 500-600°C sıcaklıkta başlar ve 650-800°C aralığında optimum seviyeye ulaşır (San Nicolas, Cyr, Escadeillas, 2013). Kaolinitin için belirtilen

sıcaklık aralığı hekzagonal-laminar kristal yapısı bozularak amorf bir faza dönüştüğü faz geçiş bölgesidir. İşte bu meta-kararlı amorf yapı, içerdiği yüksek iç enerji ve kısa mesafeli düzen nedeniyle jeopolimer reaksiyonlarında yüksek reaktivite gösterir. Karakteristik bir dönüşüm aşamasına sahiptir. Adsorbe suyun kaybı 100°C'ye kadar, diyorspor veya jips gibi hidratlı safsızlıkların ayrışması yaklaşık 400-600°C aralığında gerçekleşir. Ana dehidroksilasyon bölgesi ise 500-800°C arasındaki gerçekleşmektedir. Bahsedilen sıcaklık parametrelerinin tamamlanmasının akabinde kaolinit, ağırlıkça yaklaşık %14'lük teorik bir kütle kaybı gerçekleştirir ve yapı metakaoline dönüşür (He, Osbaeck, Makovicky, 1995). Termogravimetrik Analiz (TGA) eğrisinde (Şekil 1) (Zerzouri, Hamzaoui, Ziyani, Alehyen, 2024). Söz konusu kayıp, belirtilen sıcaklık aralığına denk gelen belirgin bir düşüş ile gözlemlenir.



Şekil 1: Jeopolimerlerin Termogravimetrik Analizi (TGA) (Zerzouri, Hamzaoui, Ziyani, Alehyen, 2024).

900-1000°C gibi optimum sıcaklık değerinin üzerine çıkıldığında metakaolin fazı meta kararlılığını kaybederek spinel ($\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}$) ve nihayetinde müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) gibi kristal fazlar oluşturmaya başlar. Oluşan fazlar aşırı kalsinasyon olarak isimlendirilir ve alkali reaktifliği büyük ölçüde düşürdüğü için bu fazın oluşumundan kaçınılması gerekir.

(Badogiannis, Kakali, Dimopoulou, Chaniotakis, Tsivilis, 2005). Metakaolinin jeopolimer reaksiyonlarındaki üstün reaktivitesi, bu kontrollü ısı işlem sonucu kazandığı yapısal özelliklerden kaynaklanır. Belirtilen ısı dönüşümün aşamaları ve her bir aşamadaki faz değişimleri, reaktivitenin kontrol edilmesinin anlaşılması açısından önemlidir. Aşağıdaki Tablo 1’ de kaolinitin metakaoline dönüşüm sürecindeki kritik aşamaları özetlemektedir.

Tablo 1: Kaolinitin Isıl İşlem Sıcaklığına Göre Dönüşüm Aşamaları ve Faz Değişimleri (Tironi, Trezza, Irassar, Scian, 2012).

Sıcaklık (°C)	Aşama Adı	Ana Mineralojik Fazlar	Fiziksel / Kimyasal Değişimler	Reaktivite Durumu
Oda - 100	Fiziksel Kuruma	Kaolinit	Adsorbe edilmiş su moleküllerinin buharlaşır.	Yapısal değişim olmaz. Reaktivite değişmez.
100 - 450	Dehidroksilasyon Öncesi	Kaolinit	Kristal yapıda küçük titreşimler, yapısal hidroksil grupları henüz ayrılmaz.	Reaktivite hala düşüktür.
450 - 600	Başlangıç Aşaması	Kaolinit’den Metakaolin (Geçiş Fazı)	Yapısal hidroksil gruplarının uzaklaşmaya başlar. Amorfizasyonun başlangıcı.	Reaktivite artmaya başlar ancak hala kararsızdır.
600 - 750	Optimum Kalsinasyon	Metakaolin	Tüm yapısal hidroksil grupları uzaklaşır. Hekzagonal yapının tamamen bozulması ve amorf bir ağ oluşumu görülür.	Maksimum Reaktivite görülür. Alkali çözünürlük çok yüksektir. İdeal jeopolimer ön malzemesidir.
750 - 925	Spinel Oluşum Aşaması	Metakaolin’den Alümina (Gamma)	Amorf metakaolin yapısının yeniden düzenlenmeye başlar. Spinel veya gamma-alümina gibi ara kristal fazların oluşumu görülür.	Reaktivite önemli ölçüde azalır. Amorf yapı kaybolmaya başlar. Jeopolimer için verim düşer.
925-950	Müllit Oluşumu ve Sinterleme	Spinel’den Müllit	Müllit ve kristobalit gibi yüksek sıcaklık fazlarının oluşumu ve büyümesi gerçekleşir. Sinterleme görülür.	Minimum reaktivite elde edilir. Malzeme büyük ölçüde inert hale gelir. Alkali çözeltide çok zor çözünür. jeopolimer için uygun değildir.

Metakaolinin jeopolimer kimyasındaki yüksek reaktivitesinin temel nedeni, atomik düzeyde yapısal bir dönüşüm gerçekleştirmesine dayanır ve Katı Hal Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) Spektroskopisi gibi ileri karakterizasyon yöntemleriyle net bir şekilde anlaşılmaktadır (Rocha, Klinowski, 1990). NMR analizlerine göre artış alüminyum atomlarının koordinasyon geometrisindeki köklü bir değişime dayanmaktadır. Alüminyum atomları kaolinitin kristal yapısında altı oksijen atomu ile çevrelenmiş ve nispeten kararlı olan oktahedral $[AlO_6]^{9-}$ halinde bulunur. Dehidroksilasyon amacıyla gerçekleştirilen kalsinasyon işlemi, kararlı yapıyı bozarak alüminyumun, dört oksijen atomuna bağlandığı, daha yüksek enerjili ve reaktif bir hal olan tetrahedrale $[AlO_4]^{5-}$ dönüşmesine neden olur (White, Provis, Proffen, Van Deventer, 2010). ^{27}Al NMR spektrumlarında açıkça izlenebilen bu oktahedraldan tetrahedrale geçişi, metakaolin reaktivitesinin temel nedenini oluşturur (Rocha, Klinowski, 1990; Walkley, Provis, 2019).

2.1.2.Uçucu Kül

Jeopolimerlerin sentezinde en yaygın kullanılan öncül malzeme uçucu küldür. Uçucu kül termik santraller gibi sanayi dallarında atık durumundaki bir yan üründür. Kimyasal kompozisyonu, partikül morfolojisi ve amorf yapısı gibi özellikleri jeopolimerizasyon sürecindeki davranışını yönlendirir. Özelliklerin başında ise silisyum (Si) ve alüminyum (Al) içeriği, kalsiyum oksit (CaO) miktarı ve söz konusu bileşenlerin birbirlerine oranı gelir. Uçucu külleri kimyasal bileşimlerine, özellikle de kalsiyum oksit (CaO) içeriğine ve puzzolanik aktiviteye bağlı olarak ASTM C618 standardı tarafından sınıflandırılmıştır (ASTM C618-23, 2023). Tip C küller yüksek kalsiyumlu ($> \%18-20$), F tipi küller ise düşük kalsiyumlu ($< \%15-18$), olarak tanımlanır. İşte bu temel ayrım, her iki tipin reaktivitesini, jeopolimerizasyon mekanizmasını, reaksiyon ürünlerini ve dolayısıyla nihai kompozit malzemenin mühendislik özelliklerini doğrudan etkiler (ASTM C618-23, 2023).

Tablo 2'de aktarıldığı üzere, F tipi küllerin baskın bileşenleri SiO_2 ve Al_2O_3 iken, C tipi küller önemli miktarda CaO içerir. Belirtilen kompozisyonel fark, mekanik özelliklere de yansır. F tipi uçucu küller, temelde silis ve alüminadan oluşan bir amorf faz ile mullit, kuvars gibi kristal fazlardan oluşur (Qaidi ve diğerleri, 2022).

Tablo 2: ASTM C618'e Göre F Tipi ve C Tipi Uçucu Külün Tipik Kimyasal Bileşimi (Ağırlıkça %) (ASTM C618-23, 2023).

Bileşen	F Tipi (Min.-Maks. / Ort.)	C Tipi (Min.-Maks. / Ort.)	Notlar
SiO ₂	48 - 58 / 52	35 - 45 / 40	Ana aluminosilikat kaynağı
Al ₂ O ₃	23 - 30 / 26	15 - 25 / 20	Ana aluminosilikat kaynağı
Fe ₂ O ₃	4 - 10 / 7	4 - 10 / 7	Genellikle inert manyetit/hematit
CaO	1 - 10 / 5	15 - 35 / 25	Reaktiviteyi ve mekanizmayı belirler
MgO	0.5 - 2 / 1	1 - 5 / 3	-
SO ₃	0.1 - 1.5 / 0.8	0.5 - 4 / 2	Aşırı miktarda etringit oluşumuna neden olabilir
Na ₂ O	0.2 - 1 / 0.6	0.5 - 4 / 2	Alkali kaynağı, reaktiviteyi artırır
K ₂ O	0.5 - 3 / 2	0.5 - 3 / 2	Alkali kaynağı, reaktiviteyi artırır
Kayıp	1 - 5 / 2.5	0.5 - 3 / 1.5	Yanmamış karbon, işlenebilirliği olumsuz etkiler

Söz konusu amorf faz, genellikle sodyum/potasyum hidroksit veya bunların silikatları gibi konsantre alkali çözeltilerle temas ettiğinde hızla çözünür ve bu şekilde jeopolimerizasyon reaksiyonu için gerekli olan silikat ([SiO₄]⁴⁻) ile alüminat ([AlO₄]⁵⁻) anyonlarını açığa çıkarır (Provis, Bernal, 2014). Bu anyonlar, çözeltideki alkali iyonlarının (Na⁺, K⁺) varlığında koordinasyonları yeniden düzenleyerek, SiO₄ ve AlO₄ tetrahedralarının oksijen köprüleri (Si-O-Si, Si-O-Al) ile birbirine bağlandığı amorf bir üç boyutlu aluminosilikat ağı oluşturur. Oluşan yapısal matris, N-A-S-H (Sodyum - Alüminyum - Silikat - Hidrat) veya K-A-S-H jeli şeklinde adlandırılır ve jeopolimerin ana bağlayıcı fazını oluşturur (Duxson ve diğerleri, 2007). Alüminat tetrahedralarının negatif yükü, ağ yapısı içinde dağılmış alkali katyonları ile dengelenir (Fernández-Jiménez, Palomo, 2005).

Yüksek miktarda CaO içeren C tipi uçucu kül hem mineralojik kompozisyonu hem de reaksiyon mekanizmasını ve elde edilen ürünleri önemli ölçüde değiştirir. Bu küller, hem amorf glasofaz hem de anhidrit, belit (C₂S) ve hatta reaktif trikalsiyum alüminat (C₃A) gibi kristal kalsiyum

bileşikleri içerebilir (Alterary, Marei, 2021). C sınıfı uçucu külün alkali aktivasyonu sırasında, F tipi külle ortak olan çözünme-yoğunlaşma mekanizmasına ek olarak, yüksek kalsiyum içeriği nedeniyle Portland çimentosu hidratasyonuna benzer bir ikinci reaksiyon yolu daha devreye girer. Bu süreç, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) veya kalsiyum (alümino) silikat hidrat (C-(A)-S-H) gibi fazların ortaya çıkmasına neden olur (García-Lodeiro, Palomo, Fernández-Jiménez, Macphee, 2011). Toparlamak gerekirse, C tipi uçucu kül esaslı sistemlerde, bağlayıcı matris genellikle N-A-S-H jeli ve C-(A)-S-H fazlarının bir karışımından oluşan hibrit veya geçiş tipi bir yapıdır (Jagadisha ve diğerleri, 2025). Bahsi geçen hibrit sistem, reaktiviteyi artırarak ilk dayanım kazanımını belirgin şekilde hızlandırabilir. Ancak nihai basınç dayanımı, asit dayanımı ve yüksek sıcaklık performansı gibi özellikler faz bileşiminin oranına bağlı olarak, yüksek safiyetteki N-A-S-H veya C-S-H jel oluşumlarına kıyasla farklı davranışlar gösterebilir (Dener, Karatas, Shi, Mohabbi, 2025). Uçucu külün jeopolimerizasyon reaktivitesini ve nihai ürün özelliklerini etkileyen en kritik parametrelerden biri, toplam Si/Al molar oranıdır. XRF (X-Işını Floresans) analizi gibi tekniklerle hassas bir şekilde belirlenen bu oran, oluşan jeopolimer ağının yapısal bütünlüğünü, yoğunluğunu ve dolayısıyla mekanik dayanımına doğrudan etki eder (Qaidi ve diğerleri, 2022). Yaklaşık 1.0-1.5 değerlerindeki düşük Si/Al oranı, daha fazla AlO_4 tetrahedrası içeren ve daha yüksek negatif yüke yani daha fazla bağ yapıcı alkali katyon ihtiyacına sahip, daha açık ve gözenekli bir ağ yapısına yol açar. Yaklaşık 2.0-3.2 oranlarında artan Si/Al oranı, ağdaki silikon köprülerinin (Si-O-Si) sayısını artırarak daha yoğun, daha kompakt, daha yüksek mukavemet ve düşük geçirgenlik sağlayan bir yapı oluşturur (Castillo ve diğerleri, 2021). Ancak, Si/Al oranının çok yüksek olması, aşırı silika nedeniyle reaksiyona girmemiş fazların kalmasına, polikondenzasyonun zorlaşmasına ve işlenebilirliğin azalmasına yani aşırı viskozite artışına bağlı olarak dayanımda bir düşüşe neden olabilir (Wang, Wu, Xing, Wang, Dai, 2021). Uçucu külün fiziksel morfolojisi de reaktivitesinde, işlenebilirlikte ve sıkıştırma yoğunluğunda hayati bir rol oynar. F tipi uçucu külünün SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsü büyük oranda küresel ve amorf yapıdadır (Yao ve diğerleri, 2015). Bu pürüzsüz, küresel morfoloji, partikül sıkıştırmasını iyileştirerek su ihtiyacını azaltır ve jeopolimer hamurunun

akışkanlığını önemli ölçüde artırır (Ma, Wang, Zhao, Duan, Yang, 2021; Ram, Mohanty, 2022).

F tipi küller, düşük reaktiviteye bağlı olarak yavaş bir kinetikle ilerlese de, sonuçta yüksek dayanım potansiyeline sahip N-A-S-H jeli oluşturan saf bir jeopolimerizasyon süreci gösterir. Tip C küller ise, N-A-S-H ve C-(A)-S-H fazlarının birlikte olduğu daha karmaşık bir hibrit reaksiyon mekanizması sergiler ve hızlı dayanım kazanımı istenen durumlarda avantaj sağlar (Alnahhal, Kim, Hajimohammadi, 2021). Her iki durumda da, aktivatör tipi, konsantrasyon, sıcaklık gibi alkali aktivasyon koşulları ile birlikte uçucu külün bu içsel özellikleri, jeopolimer malzemelerin mühendislik özelliklerini ve mikro yapı özelliklerini optimize etmek için hassasiyetle kontrol edilmesini gerektiren en önemli husustur (Singh, Ishwarya, Gupta, Bhattacharyya, 2015). Atık yönetimi ve sürdürülebilir yapı malzemeleri bağlamında, uçucu külün jeopolimerlerde etkin kullanımı, döngüsel ekonomiye önemli bir katkı sunmaktadır.

2.1.3.Cüruf

Granüle Yüksek Fırın Cürufu (GYFC veya GGBFS), jeopolimer formülasyonlarında hem temel bir başlangıç malzemesi hem de özellik geliştirici katkı olarak merkezi bir role sahiptir (Davidovits, 2011). Bu işlev, esas olarak yapısında yer alan ve büyük ölçüde amorf kalsiyum silikat fazları şeklinde (gehlenit, akermanit vb.) bulunan yüksek reaktif kalsiyum (Ca) içeriğiyle açıklanmaktadır (Davidovits, 2011; Gao, Yu, Brouwers, 2015). Cüruf sodyum veya potasyum silikat çözeltileri ile aktive edildiğinde çözünme-polikondenzasyon mekanizmasıyla hızlı bir şekilde reaksiyona girer. Bu süreçte, kalsiyum katyonları (Ca^{2+}), geleneksel uçucu kül kaynaklı jeopolimerlerin temelini oluşturan N-A-S-H (Sodyum-Alüminyum-Silikat-Hidrat) jel yapısıyla etkileşime girer. Böylece kalsiyum içeren bir C-A-S-H (Kalsiyum-Alüminyum-Silikat-Hidrat) veya N-(C)-A-S-H gibi hibrit bir jel sisteminin oluşumuna neden olur (Fernández-Jiménez, García-Lodeiro, Palomo, 2007). Oluşan hibrit jel matrisi ne N-A-S-H ne de Portland çimentosundaki C-S-H yapısına benzer. Bahsedilen yapı yüksek erken dayanım ve uzun vadeli dayanıklılığı bir arada sunmaktadır. Kalsiyum iyonları, reaksiyon kinetiğini hızlandıran katalitik bir rolde olup silikat ve alüminatların polimerizasyon sürecini hızlandırır. Böylece priz süresi kontrol altında tutulabilir (Provis, Bernal, 2014). Kimyasal dengenin karmaşıklığı,

optimum formülasyon sürecini zorunlu kılmaktadır. Optimum jeopolimer formülasyonu oluşturulurken, aktivatör tipi (örneğin $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ veya $\text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{KOH}$), molarite ve silika modülü ($\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$; M: Na veya K) doğrudan etkindir. Yüksek modüllü aktivatörler, alkalın çözeltideki silikat ve alüminat monomerlerinin çözünürlük kinetiğini önemli ölçüde artırarak reaksiyonun çözünme aşamasını hızlandırır. Ancak çok yüksek konsantrasyon işlenebilirliği bozma eğilimindedir. Ayrıca, prekürsör karışımındaki CaO/SiO_2 ve $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranları nihai jel fazlarının bileşim ve miktarını belirleyici etki gösterir (Duxson ve diğerleri, 2007).

Kür sıcaklığı, reaksiyonun termodinamiğini ve kinetiğini yöneten bir diğer temel parametredir. Oda sıcaklığında yapılan kürleme, reaksiyonun tamamlanmasını oldukça yavaşlatır ve yüksek kalsiyum içeriğine rağmen sistemde latent hidratasyon ürünleri gelişir. (Ukritnukun ve diğerleri, 2021). Bu nedenle, 60-80°C aralığında kürleme uygulaması, polimerleşme derecesini artırarak daha yoğun, gözenekleri azaltılmış ve homojen bir mikroyapı elde edilmesini sağlar (Fernández-Jiménez, García-Lodeiro, Palomo, 2007; Ukritnukun ve diğerleri, 2021).

Ancak, rampa hızı, tepe sıcaklığı ve süresi gibi parametrelerden oluşan kür rejiminin özenle ayarlanması şarttır. Bunun nedeni, aşırı hızlı su kaybının malzeme içinde gerilim birikimine yol açması ve bunun sonucunda mikro ölçekli çatlakların oluşumunu teşvik etmesidir. Kür süresi, hibrit ağın olgunlaşması ve stabilizasyonu için elzem bir parametredir (Ukritnukun ve diğerleri, 2021). Jeopolimerler, tipik olarak 7 ila 28 günlük kür sürelerinde hızlı bir dayanım gelişimi gösterir. Bu malzemelerin mekanik performans ve dayanıklılık açısından eriştiği en yüksek seviyeye ulaşması ise, süreci aylar ve hatta yıllar ölçeğine taşıyan iki temel mekanizma aracılığıyla gerçekleşir. Bunlardan birincisi; ağ oluşumunu tamamlayıcı nitelikteki yavaş polikondenzasyon reaksiyonlarıdır. İkincisi ise C-A-S-H/N-A-S-H hibrit jelinin içinde kalsiyum iyonlarının hareketi ve yeniden düzenlenmesidir. Devam eden mikroyapısal olgunlaşma süreçleri, malzemeye yüksek dayanımın kalıcılığını, üstün boyutsal stabiliteyi ve artmış kimyasal direnç kazandırır (Palomo, Monteiro, Martauz, Bilek, Fernandez-Jimenez, 2019).

GGBFS ile modifiye edilmiş jeopolimer sistemleri, N-A-S-H ve C-A-S-H/C-S-H fazlarının sinerjistik etkileşimiyle oluşan kompozit bir bağlayıcı matrisi temsil eder. Bu hibrit matris yapısı, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha üstün mekanik performans, daha düşük geçirgenlik ve artırılmış asit-sülfat direnci gibi gelişmiş dayanım özellikleri kazandırmaktadır.

2.1.4.Diğer Ön Malzemeler

Jeopolimer teknolojisinin temelini oluşturan metakaolin, uçucu kül ve cüruf gibi malzemelere ek olarak, sürdürülebilirliği daha da artırmak ve nihai ürünün özelliklerini belirli yönlerde iyileştirmek amacıyla, son yıllarda çok çeşitli alternatif aluminosilikat kaynakları üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Amaç doğrultusunda, volkanik kül, laterit ve özellikle kırmızı çamur gibi endüstriyel yan ürünler ya da doğal kaynaklar önem taşımaktadır (Vukovic ve diğerleri, 2024). Bahsedilen alternatif hammaddeler, sahip oldukları kimyasal ve mineralojik çeşitlilik nedeniyle, jeopolimer matrisinin faz bileşimini çeşitlendirme, mekanik dayanımını yükseltme ve uzun dönemli performansını geliştirme potansiyeli taşır (Qaidi, Tayeh, Ahmed, Emad, 2022). Ayrıca, en güncel çalışmalarda kırmızı çamur ve uçucu külün birlikte kullanıldığı jeopolimer kompozitlerin mekanik ve mikro yapısal özelliklerinin ayrıntılı olarak değerlendirildiği, sinerjistik etkiler ile içsel faz gelişimlerinin optimize edildiği görülmektedir (Luo, Du, Zhang, Chen, Song, 2025).

2.1.4.1.Volkanik Kül

Volkanik küller, volkanik patlamalar sırasında atmosfere yayılan ve hızlı soğuyan yüksek reaktivite potansiyeline sahip doğal bir malzemedir. Silisyum (Si) ve alüminyum (Al) bakımından zengin, amorf veya yarı-kristalin yapıdadır (Bakharev, Sanjayan, Cheng 1999). Kimyasal kompozisyonları, kaynağına bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik göstermekle birlikte, genellikle bazik veya nötr koşullarda çözünebilir silika ve alümina içerirler (Nie, Li, Wang, Bai, 2020). Jeopolimer matrisinde volkanik kül kullanımının en önemli katkılarından birisi, reaktif silika kaynağı olması ve dolayısıyla polikondenzasyon reaksiyonları için gerekli olan $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetrahedra birimlerini sağlamasıdır. Volkanik küller, metakaoline benzer şekilde, güçlü mekanik özelliklere sahip ve yoğun mikroyapılı jeopolimerlerin üretilmesine olanak tanır, ancak bu durumun gerçekleşebilmesi için kullanılan külün yüksek safiyatta olması gerekmektedir (Plando, Supnad, Maquiling, 2025). Ancak feldispat, kristobalit gibi kristalin fazlar içermesi halinde reaktivitesi düşüş eğiliminde olur. Optimum reaksiyon için daha yüksek konsantrasyonlu alkali çözelti, ısıtma işlemi gibi daha agresif aktivasyon koşulları gerekir (Overmann, Vollpracht, Matschei, 2024; Ulloa ve diğerleri, 2024). Bu

durumda, volkanik kül genellikle reaktivitesi yüksek olan uçucu kül veya metakaolin gibi bir malzeme ile kombinasyon halinde kullanılır. Bu kombinasyon, hem reaktiviteyi artırır hem de malzeme temin maliyetlerini düşürerek hem teknik hem de ekonomik anlamda avantaj sağlar (Nana ve diğerleri, 2021).

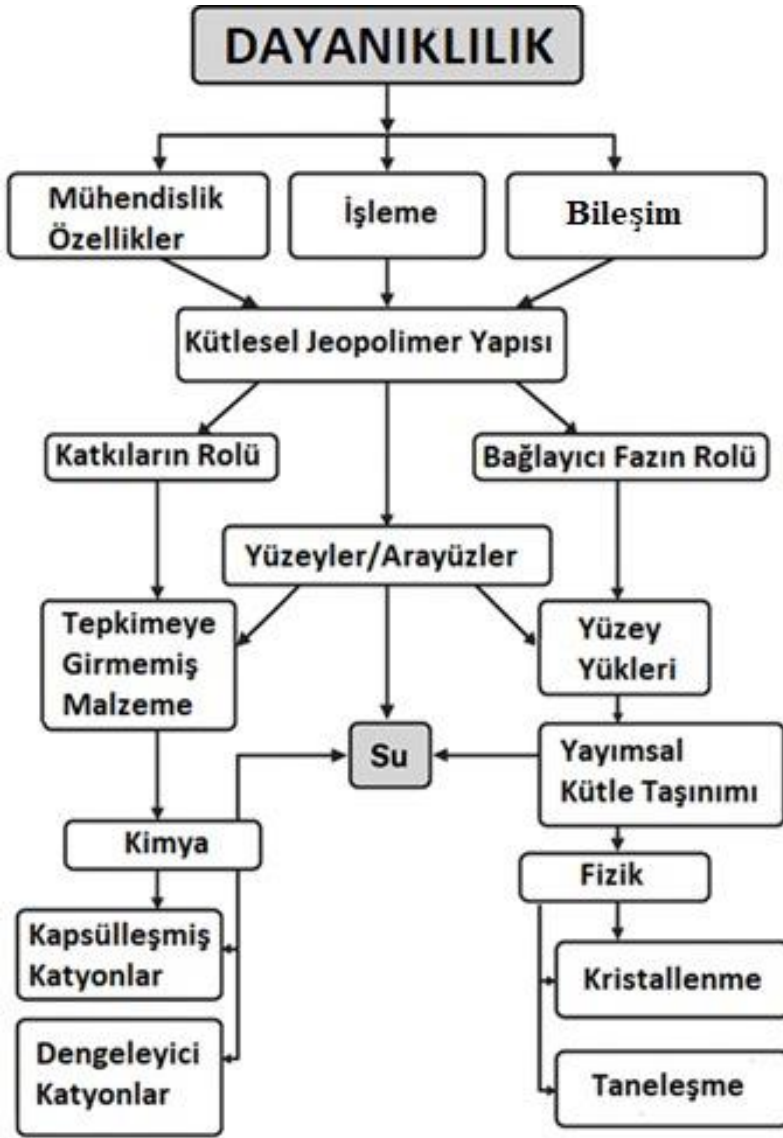
2.1.4.2. Laterit ve Kırmızı Çamur

Lateritler demir ve alüminyum oksitlerce zenginleşmiş toprak ve kayalarlardır. Tropikal ve subtropikal bölgelerde yoğun yağış ve ayrışma sonucu olur. Kırmızı çamur ise, boksit cevherinin Bayer prosesi ile alüminaya dönüştürülmesi sırasında elde edilen yüksek alkali ve ağır metal içerikli bir endüstriyel atıktır. Her iki malzeme de yüksek oranda demir oksit (Fe_2O_3) içermektedir (Pontikes, Angelopoulos, 2013). Laterit ve Kırmızı Çamur'un jeopolimerizasyonda kullanımı, geleneksel malzemeler ile kıyaslandığında önemli derecede farklılık gösterir. Yüksek demir içeriği, jeopolimer matrisinin oluşum mekanizmasını ve nihai özelliklerini doğrudan etkiler. Demir iyonları ($[\text{FeO}_4]^{4-}$ veya $[\text{FeO}_6]^{9-}$), alüminyum iyonlarına ($[\text{AlO}_4]^{5-}$) benzer şekilde, alkali çözelti içinde çözünerek jeopolimer ağ yapısına dahil olmasıyla feopolimer veya ferro-sialat bağlarının oluşumunu destekler (Lemougna, MacKenzie, Jameson, Rahier, Melo, 2013). Bu durum, nihai malzemeye karakteristik kırmızı-kahverengi rengini verirken, aynı zamanda yoğunluk ve kimyasal direnç gibi özellikleri de modifiye etmektedir. Fakat demir içeriğinin fazlalığı bazı zorlukları da beraberinde getirir. Hematit, goetit(götit) gibi demir oksit minerallerinin çözünürlüğü aluminosilikat fazlarına kıyasla nispeten daha düşüktür. Bu nedenle, laterit ve özellikle de kırmızı çamurun reaktivitesini artırmak için öğütme, kalsinasyon gibi ön işlemler gerekli olabilir (Chen, Razaqpur, Wang, 2023). Ayrıca, kırmızı çamurun yüksek alkali içeriği, karışımın reolojisini ve kür rejimini olumsuz etkileyebilir; bu nedenle karışım oranlarının ve aktivasyon koşullarının dikkatli bir şekilde optimum şartlarının tespiti gerekir. Buna rağmen, bu malzemelerin, özellikle de büyük hacimli atık depolama sorunu oluşturan kırmızı çamurun değerlendirilmesi, jeopolimerlerin çevresel faydasını katbekat artırmaktadır.

2.2.Aktivatör Mekanizmaları

Jeopolimerizasyon alkali aktivasyon kimyasının temelini oluşturur. Süreç olarak endüstriyel atık/yan ürünler veya doğal hammaddeler gibi aluminosilikat kaynaklarının, yapısal ve mekanik performansı yüksek bağlayıcılara dönüşüm içerir (Davidovits, 2017). Bu dönüşümün gerçekleşmesi ve istenilen özelliklerin kazanılması, kullanılan aktivatörlerin kimyasal mekanizmalarına doğrudan bağlıdır. Aktivatör olarak katı veya sıvı formlar ve sodyum ile potasyum esaslı kimyasallar kullanılmaktadır. Her bir aktivatör, reaksiyon ortamının pH'sı, iyonik gücü ve silikat türlerinin polimerizasyon derecesi üzerinde farklı etkiler yaratır (Yip, Van Deventer, 2003). Bu etkileri niceliksel olarak tanımlayan ana parametre ise $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ modül oranıdır. Belirli bir modül aralığı, aluminosilikat çözünürlüğünü teşvik ederken, aşırı yüksek veya düşük değerler reaktiviteyi ve nihai ürün kalitesini olumsuz etkileme eğilimindedir (Ekolu, Tchadjié, Naghizadeh, 2022). Aktivasyon sürecinin verimli bir şekilde yönetilebilmesi, aktivasyonun termodinamik ve kinetik temellerinin anlaşılmasına dayanır. Termodinamik, reaksiyonun istikametini ve çözünme için gerekli koşulları belirlerken, kinetik yaklaşım, reaksiyon hızını kontrol eden faktörlerin ve ara ürünlerin oluşum mekanizmalarının anlaşılmasını sağlar (Duxson, Provis, Lukey, Van Deventer, 2007).

Aktivasyon sürecinin yalnızca kimyasal mekanizmalar üzerinden değil, aynı zamanda jeopolimer bağlayıcıların mekanik özellikleri, mikro yapı oluşumu ve uzun dönemli dayanıklılık boyutlarıyla beraber ele alınması önem arz etmektedir. Bu ilişkiler bütüncül bir yaklaşımla Şekil 2'de şematik olarak aktarılmıştır (Duxson, Provis, Lukey, Van Deventer, 2007).



Şekil 2: Jeopolimer bağlayıcı teknolojisinin farklı teknik ve bilimsel yönleri arasındaki karşılıklı ilişkileri gösteren şematik diyagram (Duxson, Provis, Lukey, Van Deventer, 2007).

2.2.1.Katı ve Sıvı Aktivasyon Mekanizmaları

Alkali aktivasyon reaksiyonlarını başlatmak için kullanılan aktivatörler, fiziksel hallerine bağlı olarak katı, sıvı veya hibrit karışımlar şeklinde sınıflandırılabilir. Katı aktivatör grubunda genellikle toz halde sodyum

hidroksit (NaOH) peletleri, sodyum veya potasyum silikatların tozları ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) gibi bileşikler yer alır. Toz haldeki aktivatörün kullanımı uçucu kül, cüruf gibi diğer katı bileşenlerle ön karışımına imkan vererek homojen bir dağılım ve dolayısıyla reaksiyonların tutarlılığını katkı sağlar (Provis, Van Deventer, 2014). Sıvı aktivatörlerin kullanımı ise su içerisinde çözülmüş konsantre NaOH çözeltileri veya sodyum/potasyum silikat çözeltilerinden oluşur. Sıvı fazın, prekürsör katı partiküllerinin yüzeyiyle daha hızlı ve üniform bir temas kurması, reaksiyonun başlangıç kinetiğini önemli ölçüde hızlandırmaktadır (Duxson, Provis, Lukey, Van Deventer, 2007). Özellikle sodyum silikat çözeltileri (su camı), hem Na_2O kaynağı olarak yüksek alkalinite hem de ek çözünen silika (SiO_2) içeriği sayesinde polikondenzasyon reaksiyonların da gerekli olan silikat monomerlerinin konsantrasyonunu hızla yükselterek jel oluşumunu tetikler (Matinfar, Nychka, 2023; Nordström ve diğerleri, 2013). Katı sıvı karışımı yaklaşımlar ise katı ve sıvı aktivatörlerin avantajlarını birleştirir. Özellikle reaktivite ve işlenebilirlik üzerinde hassas bir kontrol sağlar. Örneğin, toz haldeki bir silikatın, belirli bir konsantrasyondaki NaOH çözeltisi ile karıştırılması, hem istenen $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ (M: Na veya K) mol oranının doğru ayarlanabilmesine hem de karışımın akışkanlık, priz süresi gibi reolojik özelliklerinin optimize edilmesine olanak tanır (Dong ve diğerleri, 2023). Aktivatörlerin endüstriyel alanda kullanım tercihi ise temelde pratik ve ekonomik faktörlere dayanır. Katı haldeki aktivatörler, yoğun yapıları ve düşük nem içerikleri nedeniyle taşıma giderlerini düşürür ve depolanma açısından göreceli avantajlar sunar. Öte yandan, bu kimyasalların aşındırıcı ve nem çekici (higroskopik) karakteri, özel paketlenme çözümlerini ve işleme sırasında ek önlemleri zorunlu kılar. Sıvı silikat çözeltilerinin donma ihtimali bulunur ve yüksek viskoziteleri nedeniyle pompalamada zorluk çıkarabilir. Bu nedenle, aktivatör seçimi, üretim tesisinin altyapısı, uygulamanın gerektirdiği performans özellikleri ve nihai ürünün toplam maliyeti hesaplanarak yapılan kapsamlı bir optimize edilmesi ile belirlenen bir husustur (Fernández-Jiménez, Palomo, 2005).

2.2.2.Sodyum ve Potasyum Esaslı Sistemler

Jeopolimer sentezinde alkali aktivatör olarak yaygın bir şekilde sodyum (Na^+) ve potasyum (K^+) katyonlar kullanılmaktadır. Aktivatördeki katyon

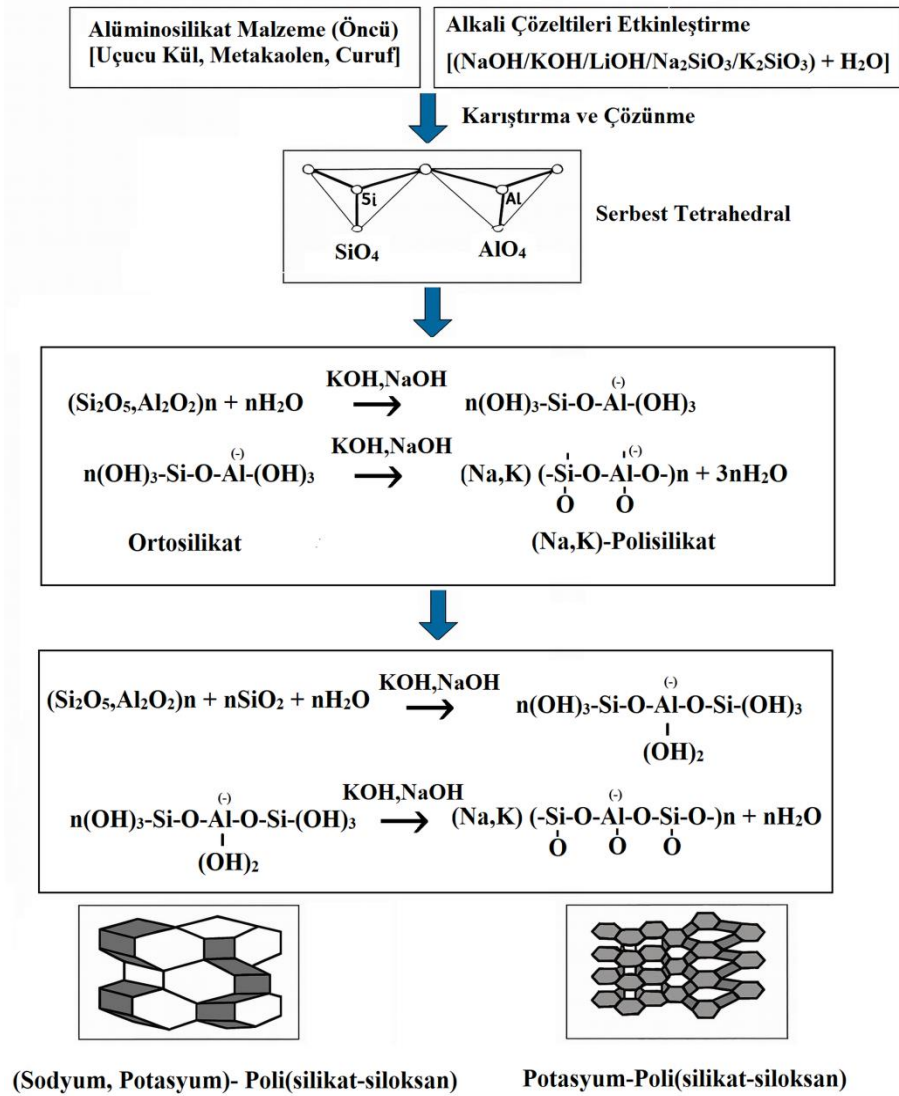
seçimi, mekanik performansı ve mikroyapısal gelişimi doğrudan belirleyen önemli bir parametredir (Dai, Wang, An, Yuan, 2022). Sodyum bazlı aktivatörler ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ve NaOH), yüksek basınç dayanımı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Na^+ iyonunun küçük iyonik yarıçapı, polikondenzasyon sırasında daha sıkı ve yoğun bir jel ağının (N-A-S-H) oluşumunu kolaylaştırır. Bu durum, hem erken yaşlarda hem de uzun vadede üstün mekanik dayanım değerlerinin elde edilmesine olanak tanır (Duxson ve diğerleri, 2007). Potasyum esaslı aktivatörler ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ve KOH), daha büyük iyonik yarıçapa sahip K^+ iyonu içerdiğinden jelasyon sürecinde daha açık ve gözenekli bir mikroyapının (K-A-S-H jeli) oluşumuna neden olur (Komljenovi', Bašćarevi', Bradi', 2010). Ayrıca, potasyum silikat çözeltilerinin genellikle daha düşük viskozite gösterme eğiliminde olması, karışımların işlenebilirliğini artırırken daha az su gereksinimi sağlar. Ortaya çıkan gözenekli yapı malzemenin termal yalıtım performansını geliştirmektedir (Komljenovi', Bašćarevi', Bradi', 2010). Uygulama esaslı tercih kriterleri incelendiğinde sodyum esaslı sistemlerin, yüksek dayanım gerektiren prefabrike elemanlar ve yapısal beton uygulamalarında öne çıktığı görülmektedir. Ancak termal dayanımın ön planda olduğu hafif yalıtım malzemeleri veya yangına dayanıklı kaplamalar için potasyum esaslı sistemlerin gözenekli yapısı tercih edilmektedir (Barbosa, MacKezie, 2003). Asidik ortamlara karşı direnç durumu dikkate alındığında jeopolimerlerin genel bir üstünlüğü bulunmaktadır. Fakat oluşan jel tipine bağlı olarak farklılıklar gözlemlenir. N-A-S-H jelinin asitte maruz kalması halinde daha kararlı kaldığı, buna karşın K-A-S-H jelinin daha gözenekli yapısı nedeniyle asidik çözeltilerin içeriye nüfuz etme hızının daha yüksek olabileceği bildirilmiştir (Yi, Boluk, Bindiganavile, 2025).

2.3. Polimerizasyon Süreci ve Mikro Yapı Oluşumu

Jeopolimer sistemlerde, alkali aktivatörlerin metakaolin, uçucu kül veya diğer alüminosilikat kaynaklardan Al ve Si iyonlarını çözündürmesiyle başlayan süreç; çözünme, yönelim/taşınım ve kondenzasyon polikondenzasyon olmak üzere üç temel aşamada ilerleyerek üç boyutlu amorf bir siliko-alüminat ağının oluşumuyla sonuçlanır.

2.3.1.Çözünme

Kuvvetli alkali bir ortam sağlayan aktivatör çözeltisi, metakaolin veya uçucu kül parçacıkları yüzeyindeki kovalent Si-O-Si ve Al-O-Si bağlarının hidroliz yoluyla kopmasını mümkün kılar (Provis, Bernal, 2014). Bu hidroliz reaksiyonu sonucunda, monomerler ve küçük oligomerler ortaya çıkar. Söz konusu monomerler veya küçük oligomerler, silikat türleri için genellikle $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}]$ veya $[\text{SiO}(\text{OH})_3^-]$, alüminat türleri için ise $[\text{Al}(\text{OH})_4^-]$ şeklinde ifade edilir (Davidovits, 2020). Çözünme aşamasının kinetiği ve derecesi, aktivatörün konsantrasyonu (pH), reaksiyon sıcaklığı ve reaktif fazın amorf/kristalin yapısı gibi parametrelerden doğrudan etkilenmektedir (Fernández-Jiménez, Palomo, 2005). Şekil 4’de Polimerizasyonun çözünme, yönelim/taşınım ve koagülasyon/jelasyon aşamalarını gösteren şematik bir diyagram aktarılmıştır.



Şekil 3: Jeopolimerizasyon sürecinin şematik diyagramı (Adewuyi, 2021).

2.3.2.Yönelim / Taşınım

Çözünmeyle oluşan monomerik silikat ve alüminat anyonları, yüksek pH'lı ortamda elektrostatik olarak çözelti içerisinde difüzyon yoluyla hareket eder. Bu aşamda anyonik türlerin, polimerizasyon reaksiyonları için uygun geometrik konfigürasyonlara yönelmesi ve birbirleriyle etkileşime girebilecekleri mesafelere taşınması gerçekleşir. Ortamın yüksek iyonik

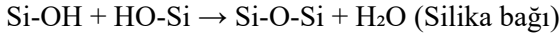
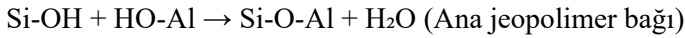
kuvveti ve pH'ı, çözünürlüğü ve mobilitayı koruyarak taşınım sürecinin verimliliğini belirler (Duxson ve diğerleri, 2007; Ranjbar, Kuenzel, Spangenberg, Mehrali, 2020).

2.3.3. Yoğunlaşma / Polikondenzasyon

Polimerizasyon reaksiyonlarında taşınan monomerik türler, koagülasyon ve jelasyon olmak üzere iki alt aşamada polimerize olur.

Koagülasyon: Zıt yüklü silikat ($[\text{SiO}(\text{OH})_3^-]$) ve alüminat ($[\text{Al}(\text{OH})_4^-]$) anyonları arasındaki elektrostatik çekim kuvvetleri ve hidrojen bağları, geçici olarak nano-ölçekli küme veya oligomerlerin (nano-kümeler) oluşumuna yol açar (Chass, Tian, Bodo 2023).

Jelasyon (Ağ Oluşumu): Nano-kümeler halindeki oligomerlerin arasında, bir oksijen köprüsü (-O-) oluşturarak su molekülünün (H_2O) eliminasyonu ile sonuçlanan kondenzasyon reaksiyonları meydana gelir. Söz konusu reaksiyonlar, jeopolimer zincirlerinin ilerleyen süreçte üç boyutlu ağ yapısına dönüşmesinin temelinde önemli rol oynamaktadır (Barbosa, MacKenzie, Thaumaturgo, 2000). Ana kondenzasyon reaksiyonları aşağıdaki gibi formüle edilebilir:



Oluşan Si-O-Al (silikato-alüminat) bağları, jeopolimer ağının karakteristik temel yapı taşlarını oluşturur. Polikondenzasyon reaksiyonlarının ilerlemesiyle ortamın viskozitesi hızla artar ve bu süreç, şekil verilebilir özellikte plastik bir jeopolimer jelinin oluşumuna neden olur (Duxson ve diğerleri, 2007).

2.3.4. Mikroyapısal Evrim ve Sınıflandırma

Polikondenzasyonun tamamlanmasıyla elde edilen nihai yapı, temelde amorf ve üç boyutlu bir siliko-alüminat ağıdır. Ancak, jeopolimer matrisi genellikle homojen olmayıp, mikroskobik düzeyde dolu jel fazı ve gözenekli çözelti fazı olmak üzere iki ana fazdan müteşekkil heterojen bir kompozit yapıya sahiptir (Duxson, Provis, Lukey, Van Deventer, 2007).

Dolu jel fazı (N-A-S-H veya K-A-S-H): Polimerizasyon sürecinin ana ürünüdür. Na^+ ya da K^+ iyonları tarafından stabilize edilen, hidratlı amorf bir alümino-silikat ağ yapısı içermektedir. Yapısı gereği, yüksek derecede çapraz

bağlanmış olması bakımından düşük kalsiyum içerikli C-A-S-H jelleriyle yapısal benzerlik gösterirken; Ca/O oranı ve alüminyum katkısı açısından belirgin farklılıklar içerir. Yoğun morfolojisi, jeopolimer matrisine temel mekanik dayanımı sağlayan kritik bileşeni ifade eder (Wang, Li, Ding, Shan, Zhao, 2024). Gözenekli çözelti fazı, dolu jel fazı içerisinde dağılmış halde bulunan ve kısmen reaksiyona girmiş ya da tamamen reaksiyona girmemiş katı tanecikler, kapiler boşluklar ile artık alkali çözeltiden oluşan yapısal bir bileşendir. Özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanıldığı sistemlerde bu tür tanecikler yaygın şekilde gözlenmektedir. Çekirdek-kabuk modeline uygun olarak, bu taneciklerin etrafında jeopolimerleşme sonucu gelişen jel tabakası, kompozit benzeri bir mikroyapının ortaya çıkmasına yol açmakta ve malzemenin mekanik ile dayanıklılık özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Wang, Li, Ding, Shan, Zhao, 2024).

Gözenekli Çözelti Fazı: Dolu jel fazı içerisinde dağılmış halde bulunan ve içerisinde reaksiyona kısmen girmiş veya girmemiş katı parçacıkların, kapiler boşlukların ve alkali çözeltinin bulunduğu fazdır. Özellikle endüstriyel yan ürünlerin kullanıldığı sistemlerde, reaksiyona girmemiş parçacıklar yaygın olarak gözlemlenir. Bu parçacıkların etrafında, çekirdek-kabuk modeline uygun olarak, jeopolimerleşme reaksiyonları sonucu oluşan bir jel kabuğun geliştiği bilinmektedir. Söz konusu parçacıklar, kompozit benzeri bir mikroyapı oluşturarak malzeme özelliklerini etkiler (Lee, van Deventer, 2002; Huseiena, Mirzaa, Ismaila, Ghoshalc, Husseina, 2017).

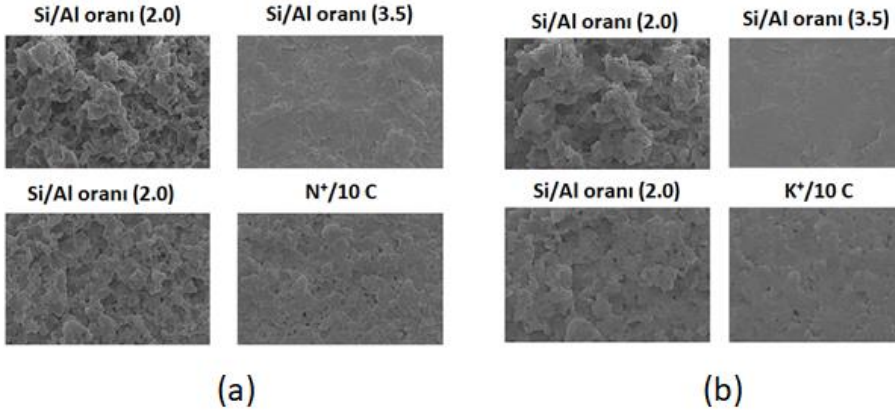


Şekil 4: Polimerizasyonun çözünme, yönelim/taşınım ve koagülasyon/jelasyon aşamalarını gösteren şematik diyagram.

2.3.5. Polimerizasyon Derecesi ve Etki Eden Parametreler

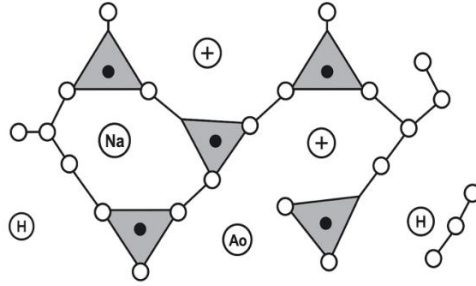
Nihai mikroyapının morfolojisi ve dolayısıyla malzemenin mühendislik özellikleri, polimerizasyon sürecini kontrol eden bir dizi parametre tarafından belirlenir. Bu parametrelerden öne çıkanlara aşağıda değinilmiştir.

Si/Al Oranı: Tasarımındaki karışımın Si/Al molar oranı, oluşan ağ yapısının polimerizasyon derecesini ve çapraz bağlanma yoğunluğuna doğrudan etki eder. Düşük Si/Al oranları daha düşük polimerizasyon dereceli, yüksek alüminat içerikli ve daha rijit ağ yapılarına yol açarken, yüksek Si/Al oranları daha uzun silikat zincirleri ve daha yüksek çapraz bağlanma içeren yapıların oluşumunu destekler, bu da genellikle mekanik mukavemetin artması ile sonuçlanır (Duxson, Lukey, Van Deventer, 2007).



Şekil 5: Farklı Si/Al oranlara sahip jeopolimerlerin genel SEM yapısı [a: Na⁺/10C (W. Han ve diğerleri, 2023), b: K⁺/10C (Xu, Van Deventer, 2000)].

Alkali Katyon Türü (Na⁺ vs. K⁺): Alkali katyonun (Na⁺ veya K⁺) iyon büyüklüğü, su moleküllerine afinite derecesi ve polarizasyon eğilimi, jeopolimer mikroyapısının dönüşümünü doğrudan etkileyen parametrelerdir. Küçük iyon yarıçapına sahip sodyum (Na⁺), kompakt ve daha yoğun bir jel ağının gelişimine olanak sağlarken; daha büyük iyon yarıçaplı potasyum (K⁺), gözenekliliği yüksek ve daha açık bir mikroyapının oluşumuna neden olma eğilimindedir (Şekil 5) (Xu, Van Deventer, 2000). Şekil 6'de N-A-S-H jel yapısının idealize edilmiş moleküler modeli aktarılmıştır.



Şekil 6: N-A-S-H jel yapısının idealize edilmiş moleküler modeli (Wan, Yuan, Zhang, 2020).

Kür Koşulları (Sıcaklık ve Süre): Termal kür işlemi, reaksiyon kinetiğini hızlandırarak polimerizasyon derecesini yükseltir ve mikroyapının olgunlaşmasını sağlar. Yüksek sıcaklık koşullarındaki bir kürleme ile daha homojen ve yoğun bir jel fazının oluşumunu elde edilirken; oda sıcaklığında gerçekleştirilen kürleme işleminde ise daha yavaş ilerleyen reaksiyonlarla birlikte heterojen ve nispeten düşük olgunlukta bir mikroyapının oluşumunu elde edilir (Rovnaník, 2010).

Katkı Malzemeleri ve Agregalar: İnert agregaların jeopolimer sistemine dâhil edilmesi, agrega ile bağlayıcı matris arasında mikroyapı ve gözeneklilik gibi özelliklerinin farklılık gösterdiği özel bir geçiş zonu olan Interfacial Transition Zone zonunun gelişimine yol açar. Bu zonun karakteristikleri, matris agrega arasındaki aderansı belirleyerek kompozit yapının mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Shi, Jiménez, Palomo, 2011).

2.4. Termodinamik ve Kinetik Temeller

Kimyasal reaksiyonların hangi nihai ürünlere ulaşacağı ve bu ürünlerin hangi süreçler aracılığıyla oluşacağı, temel olarak termodinamik ve kinetik prensipleriyle belirlenir. Termodinamik, reaksiyonların gerçekleşme potansiyelini ve denge konumunu tanımlayarak nihai durumun nerede olacağını ortaya koyar. Kinetik ise, reaksiyonların gerçekleşme hızını ve mekanizmasını açıklayarak bu sonuca nasıl ve hangi hızla ulaşılacağını açıklar (Khale, Chaudhary, 2007). Jeopolimerizasyon gibi karmaşık, kademeli ve katı halden başlayan heterojen reaksiyon sistemlerinin anlaşılması, bu iki

disiplinin sinerjik bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir (Khale, Chaudhary, 2007).

2.4.1. Termodinamik Temeller

Termodinamiğin temel yasaları sayesinde jeopolimerizasyon reaksiyonlarının temelini oluşturan kimyasal süreçlerin anlaşılması mümkün olmuştur. Reaksiyon süreçlerinin kendiliğinden yürüyüp yürümediğinin, denge konumunun ve reaktif türlerin çözünürlüklerinin belirlenmesinde termodinamik parametreler kritik bir rol oynar (Khale, Chaudhary, 2007).

2.4.1.1. Serbest Enerji Değişimi

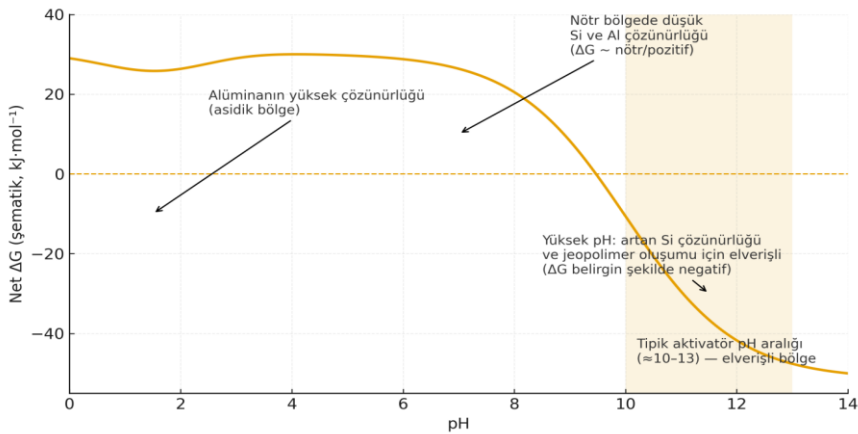
Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG) kavramı bir kimyasal reaksiyonun kendiliğinden gerçekleşme potansiyelini ifade eder. Negatif bir ΔG değeri, reaksiyonun ileri yönde kendiliğinden ilerleyebileceğini; pozitif bir değer sürecin termodinamik olarak elverişsiz olduğunu; sıfıra eşit olması ise sistemin denge durumunda bulunduğunu gösterir (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024). Jeopolimerizasyon süreci, çok aşamalı ve karmaşık mekanizmalardan oluşsa da, genel termodinamik davranışı bu temel prensip çerçevesinde değerlendirilmektedir. Bu kural sayesinde karmaşık ve çok aşamalı reaksiyonlar dizisi olan jeopolimerizasyon süreci net bir şekilde anlaşılabilir (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024). Jeopolimerizasyonun kendiliğindenliğini incelemek için temel denklem (1) kullanılır:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

Burada ΔH reaksiyonun entalpi değişimi, T mutlak sıcaklık (Kelvin) ve ΔS ise entropi değişimini ifade etmektedir (Owino, Shikuku, Nyairo, Kowenje, Otieno, 2023). Jeopolimerizasyon reaksiyonları ekzotermik bir karaktere sahiptir ($\Delta H < 0$). Aynı zamanda çözünmüş katı yapıların düzenli bir ağ yapısına dönüşümü sırasında entropide bir azalma ($\Delta S < 0$) yaşanır. Reaksiyonun kararlılığı, genellikle negatif entalpi teriminin (ΔH), negatif entropi teriminin ($-T\Delta S$) mutlak değerinden daha büyük olmasına bağlıdır. Bu işlemin sonucunda toplam ΔG negatif olur (Chen ve diğerleri, 2024). Yüksek sıcaklıklar, negatif entropi değişiminin istemsizliğe katkısını artırdığı için, jeopolimerizasyonun oda sıcaklığında veya düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi termodinamik açıdan avantajlıdır. Reaksiyonun

termodinamiği üzerinde, reaktanların çözünürlüğü belirleyici bir faktördür. Silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) kaynağı olan uçucu kül veya metakaolin gibi katıların yapısının yüksek pH altında bozunması ve çözünmeleri, reaksiyonun ilk ve en kritik adımını oluşturur (Aliabdo, Abd Elmoaty, Salem, 2016). Silikanın çözünürlüğü, çözeltinin pH değeri ile doğrusal olmayan bir bağıntı sergiler. Düşük pH değerlerinde yani asidik koşullarda oldukça sınırlı olan çözünürlük, nötr pH civarında en düşük seviyesine ulaşmakta; bunun ardından ise alkalın ortamlarda, özellikle pH 10 gibi yüksek pH değerlerinde, belirgin bir artış göstermektedir (Fernández-Jiménez, Palomo, 2005). Alüminanın çözünürlüğü ise amfoterik bir karakteristiğe sahiptir; asidik koşullarda ($\text{pH} < 4$) ve kuvvetli bazik ortamlarda ($\text{pH} > 12$) yüksek düzeyde gerçekleşirken, nötr pH değerlerine yakın bölgede ise belirgin şekilde azalmaktadır. Bu nedenle, jeopolimer sentezi için optimum pH aralığı, her iki oksidin de yeterli çözünürlüğe ulaştığı 12-14 aralığında bulunur (Fernández-Jiménez, Palomo, 2005).

pH'in serbest enerji üzerindeki etkisi, pH- ΔG diyagramları ile nitel olarak gösterilebilir. Şematik olarak jeopolimerizasyon reaksiyonunun net ΔG 'sinin pH'a bağlı değişimini gösteren bir grafik Şekil 7'de aktarılmıştır. Bu tür bir diyagram, düşük ve nötr pH değerlerinde pozitif olan serbest enerji değişiminin, yüksek alkali koşullarda belirgin bir şekilde negatif değerlere düştüğünü ve reaksiyonun termodinamik olarak istemli hale geldiğini tamamlamaktadır (Khale, Chaudhary, 2007).



Şekil 7: Jeopolimerizasyon reaksiyonunun net ΔG 'sinin pH'a bağlı değişimini gösteren şematik akış (Chen ve diğerleri, 2024).

2.4.1.2.Faz Dönüşümlerinde Enerji Denklikleri

Jeopolimerizasyon süreci, çözünme-jel oluşumu ve yeniden polikondenzasyon adımlarından oluşan çok aşamalı bir faz dönüşümünü içermektedir. Amorf yapıda bulunan uçucu kül ya da metakaolin gibi aluminosilikat öncüller, güçlü alkalın ortamda çözünerek silikat ve alüminat monomer/oligomerleri oluşturur (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024). Gerçekleşen ilk çözünme evresi; katı fazdaki bağların ve kafes enerjisinin kırılması gerektirdiği için genellikle endotermik özellik gösterir ve haliyle pozitif bir entalpi değişimi ($\Delta H > 0$) ile ilişkilendirilebilir. Ortaya çıkan çözeltideki monomerik türler, ilerleyen süreçte hızla yoğunlaşarak bir jeopolimerik jel ve üç boyutlu aluminosilikat ağ yapısı oluşturur. Takip eden polikondenzasyon ve çökeltme adımları ise ekzotermiktir (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024; Izadifar, Ukrainczyk, Koenders 2024).

Nihai matrisin oluşumu, bağlı bir amorf yapıya geçişi temsil eden çok evreli bir faz dönüşümü niteliğindedir. Dönüşümün toplam enerji dengesi öncelikle üç bileşenin toplamı olarak ifade edilebilir. Bu bileşenler şu şekilde gruplandırılmaktadır;

- i) katı öncü maddelerin çökeltilmesinin ve bağların kırılmasının gerektirdiği çözünme enerjisi
- ii) suyla etkileşim ve hidrasyon süreçlerinin açığa çıkardığı hidrasyon enerjisi
- iii) monomer/oligomerlerin kondenzasyonu ile yeni bir üç boyutlu ağ kurulmasına bağlı ağ oluşum enerjisi (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024; Izadifar, Ukrainczyk, Koenders 2024).

Deneysel kalorimetrik çalışmalar, genel olarak net sürecin ekzotermik olduğunu ve reaksiyon ısısının (ΔH_{rxn}) genellikle -25 ila -50 kJ/mol SiO_2 aralığında değiştiğini göstermektedir. Bu enerji denkliği, nihai ürünün, başlangıçtaki ham maddelere kıyasla daha düşük bir serbest enerji seviyesine sahip olduğunu ve jeopolimerin termodinamik açıdan kararlı bir faz olduğunu göstermektedir (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024).

2.5.Mikroyapısal Gelişim ve N-A-S-H, C-A-S-H Jel Fazları

Alkali aktivasyon süreçlerinin mikroyapısal gelişimi; amorf ya da yarı kristalin yapıdaki puzolanik ya da latent hidrolik özellikli hammaddelerin, yüksek pH'lı alkali aktivatör çözeltileriyle etkileşime girerek, sonunda

kompakt, kohezyonlu ve yüksek mekanik performanslı bir bağlayıcı matrise dönüşümünü kapsar (Vázquez-Rodríguez ve diğerleri, 2023; Kamath, Prashant, Ralegaonkar, 2023). Bu dönüşüm üç ardışık aşamada gerçekleşir: Sürecin ilk basamağında hammadde çözünür ve amorf hale gelir; ikinci basamakta ara fazların çekirdeklenmesi gerçekleşir. Son aşamada ise N-A-S-H ve C-A-S-H jel fazları polikondenzasyon ile olgunlaşarak mikroyapıda yeniden bir düzenleme meydana gelir (Vázquez-Rodríguez ve diğerleri, 2023; Kamath, Prashant, Ralegaonkar, 2023). Kalsiyum bakımından zengin sistemlerde, C-A-S-H tipi jeller yoğunluk gösterir iken, düşük kalsiyumlu sistemlerde N-A-S-H tipi jeller ana fazı oluşturur; bazı durumlarda bu iki yapının etkileşimiyle hibrit (N,C)-A-S-H fazları oluşur. Bu jel fazlarının oransal dağılımı ve içyapılarındaki süreksizlikler, nihai yoğunluk, gözeneklilik ve mekanik dayanım gibi özellikler üzerinde belirleyici rol oynar (Vázquez-Rodríguez ve diğerleri, 2023; Kamath, Prashant, Ralegaonkar, 2023).

İlk aşama olan çözünme süreci, konsantre sodyum veya potasyum hidroksit (NaOH/KOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) gibi aktivatörlerin, hammadde partikül yüzeyindeki kovalent Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarını kırmasıyla yapıyı oluşturan SiO_4 ve AlO_4 tetrahedrallerinin solüsyona geçmesini ve ortamda $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$, $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ gibi çeşitli silikat ve alüminat oligomerlerinin oluşumunu karakterize eder (El Fadili ve diğerleri, 2025). Bu aşamada, özellikle uçucu küller gibi tamamen amorf yapılar camsı yapının çözünerek bozulması anlamına gelen devitrifikasyon reaksiyonun kinetiğini belirleyen kritik bir basamak görevi ihtiva eder (Provis, 2014).

Çözünme ürünlerinin kritik bir doygunluk seviyesine ulaşmasının hemen akabinde, sistem koagülasyon/nükleasyon aşamasına girer. Bu aşamada, çözelti içindeki iyonik türler ve küçük oligomerler, elektrostatik çekim ve van der Waals kuvvetleri etkisiyle bir araya gelerek koaservat benzeri, düzensiz ve geçici kolloidal kümelecikler oluşturur. Bu kümelecikler, henüz kararlılığı olmayan, amorf bir proto-jel yapısını temsil eder (Fernández-Jiménez, Palomo, 2005).

Sistemin kimyasal yapısı ve özellikle CaO konsantrasyonu, bu evrede hangi jel fazının öne çıkacağını kontrol eden ana faktördür. Düşük kalsiyum içeren F sınıfı uçucu kül veya metakaolin kökenli karışımlarda, bağlayıcı faz tipik olarak alüminosilat yapıları N-A-S-H $[(\text{Na}_2\text{O})-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}]$ jelinden

oluşur. Buna karşılık, yüksek fırın cürufu esaslı bileşimler gibi yüksek kalsiyum içeriğine sahip sistemlerde oluşan başlıca faz; C-A-S-H [(CaO)-Al₂O₃-SiO₂-H₂O] jeli dir. Bu yapı klasik kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazının alüminyum ile modifiye edilmiş bir türevidir (Ben Haha, Le Saout, Winnefeld, Lothenbach, 2011).

Nihai ve en uzun süreli aşama olan polikondenzasyon ve mikroyapısal olgunlaşma ise, oluşan bu proto-jel yapısının, polimerizasyon reaksiyonları ile kendini yeniden düzenleyerek, üç boyutlu dayanıklı bir ağ yapısı inşa ettiği süreçtir. Burada, silanol (Si-OH) ve alüminol (Al-OH) grupları arasında su kaybıyla gerçekleşen kondenzasyon reaksiyonları (Si-OH + HO-Si → Si-O-Si + H₂O) oluşur. Böylece daha yüksek polimerizasyon derecesine sahip, por çözeltisi ile dengede olan amorf bir aluminosilikat jel matrisi meydana gelir (Ben Haha, Le Saout, Winnefeld, Lothenbach, 2011; El Fadili ve diğerleri, 2025). Zamanla, bu jel fazı içinde devam eden çözünme çökeltme dayalı reaksiyonlar daha küçük ve daha az kararlı porların kaybolarak, mikroyapının yoğunlaşmasına ve jel fazının mekanik mukavemet kazanmasına neden olur. Bu süreçte, gözenek boyutu dağılımı daralır, kapiler porların bir kısmı jelle dolar ve N-A-S-H jelinde zeolitik benzeri kısa menzilli düzenlilikler ortaya çıkarak matrisin rijitliği artar (Granizo, Blanco Varela, Palomo, 2000). Böylece, alkali aktivasyondaki mikroyapısal gelişim, hammaddeden nihai jeopolimer matrisine uzanan, reaksiyon koşullarına ve kimyaya bağlı olarak kinetiği ve morfolojisi değişkenlik gösteren, dinamik ve topokimyasal bir evrim süreci olarak tanımlanması mümkündür (Granizo, Blanco Varela, Palomo, 2000).

BÖLÜM 3

ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE İŞLEME TEKNİKLERİ

GİRİŞ

Jeopolimer malzemelerin istenen mühendislik performansını gösterebilmesi, kimyasal formülasyon kadar üretim sürecinin de bilimsel kriterlere göre yönetilmesine bağlıdır. Bu sebepten jeopolimer üretimi; hammadde hazırlığı, aktivasyon çözeltisinin optimize edilmesi, kürlleme koşullarının seçimi, katkı malzemeleriyle modifikasyon ve endüstriyel ölçek proseslerinin kontrolü gibi çok aşamalı bir işlem zincirini içerir.

Bölüm 3'ün ilk kısmında, jeopolimerizasyonun verimini belirleyen hammadde türleri, tane boyutu kontrolü ve ön işlemler ele alınmaktadır. Aktivasyon çözeltisinin kimyasal yapısı, özellikle silikat modülü ve alkalinite düzeyi, oluşacak jel fazının karakterini ve reaksiyon hızını doğrudan etkilediği için kritik önem taşır.

Kürlleme yöntemleri ikinci temel başlığı oluşturur. Isıl, buhar, mikrodalga veya çevresel kürlleme rejimleri; reaksiyon kinetiğini, gözenek yapısını ve erken/nihai dayanımı farklı şekillerde etkiler. Uygulamada, kürlleme stratejisinin doğru seçimi malzemenin uzun vadeli kararlılığı açısından belirleyicidir.

Bu bölüm ayrıca, nano katkılar, elyaf takviyeleri, mineral bileşenler ve polimer/jeopolimer hibritleri gibi modifikasyon tekniklerinin, matrisin reolojisi, mekanik dayanımı ve dayanıklılığı üzerindeki iyileştirici etkilerini incelemektedir.

Son olarak, karıştırma ekipmanları, kalıplama-ekstrüzyon teknikleri, 3D yazıcı uygulamaları, sürekli üretim hatları ve kalite kontrol gereklilikleri; jeopolimerlerin laboratuvar ölçeğinden endüstriyel üretime taşınmasında karşılaşılan mühendislik gereksinimlerini ortaya koymaktadır. Bu bölüm, tüm bu aşamaları bütüncül bir bakışla sunarak jeopolimer üretim süreçlerinin bilimsel ve teknolojik çerçevesini oluşturmaktadır.

3.1.Hammadde Hazırlığı ve Aktivasyon

Jeopolimerizasyon, doğada yaygın olarak bulunan veya endüstriyel yan ürünlerden elde edilen alüminosilikat kaynaklarının, alkali bir çözelti yardımıyla çözünerek amorf karakterli, üç boyutlu polimerik ağ yapıları

oluşturması esasına dayanır. Bu sürecin etkinliği ve ortaya çıkan ürünün performansı, büyük ölçüde hammaddenin fiziksel ve kimyasal olarak doğru hazırlanmasına bağlıdır (Davidovits, 2008).

3.1.1.Hammadde Türleri ve Özellikleri

Jeopolimer sentezi için kullanılabilecek hammaddeler, kimyasal kompozisyonlarındaki reaktif silisyum (SiO_2) ve alüminyum (Al_2O_3) oksitlerin varlığı ve erişilebilirliği ile değerlendirilir. Bu bağlamda, hammaddeler genellikle doğal ve endüstriyel kaynaklı olmak üzere iki ana grupta toplanabilir.

- **Metakaolin:** Yüksek saflıktaki kaolinitik kilin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) 600°C - 800°C aralığında kalsinasyonu ile elde edilen metakaolin, jeopolimer literatüründe en yaygın kullanılan model hammaddedir (Davidovits, 2008). Kalsinasyon işlemi, kilin kristal yapısını bozarak amorf ve yüksek reaktif bir faz oluşturur. Metakaolin, nispeten homojen kimyasal bileşimi ve düşük karbon ayak izi ile kontrollü laboratuvar koşulları için ideal olmakla birlikte, ön işlem gerektirmesi maliyetleri artırabilir (Davidovits, 1991; Davidovits, 2008).
- **Uçucu Kül:** Kömürle çalışan enerji santrallerinde yakma işlemi sonunda oluşan ince partiküllü bir yan ürün olan uçucu kül, ekonomik olması ve atık geri kazanım fırsatı sunması nedeniyle jeopolimer üretiminde tercih edilen temel hammaddeler arasındadır. Kalsiyum içeriğine bağlı olarak C-sınıfı (yüksek CaO) ve F-sınıfı (düşük CaO) olarak ikiye ayrılır. F-sınıfı uçucu kül, yüksek silisyum ve alüminyum içeriği ile daha kararlı jeopolimer matrisi oluşturur (El Fadili ve diğerleri, 2025).
- **Yüksek Fırın Cürufu:** Demir-çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan cüruf, öğütüldüğünde latent hidrolik özellikler gösterir. Yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği, jeopolimer reaksiyonuna ek olarak hidrasyon reaksiyonlarını da tetikleyerek karışıma bağlanma hızını ve erken mukavemeti önemli ölçüde artırır. Genellikle uçucu kül gibi diğer hammaddelerle kombine halinde kullanılır (Yip, Lukey, van Deventer, 2005).

- **Vulkanik Tüf ve Diğer Doğal Malzemeler:** Doğal vulkanik kökenli malzemeler (perlit, puzzolan) de yüksek amorf silis ve alümina içerikleri sayesinde jeopolimerleşmeye uygun hammaddeler arasında yer alır. Bu malzemelerin kullanımı, tamamen endüstriyel atıklara bağımlılığı azaltarak sürdürülebilirliği daha da güçlendirebilir (Kamel Khouadjia ve diğerleri, 2025).
- **Pirinç Kabuğu Külü (RHA):** Pirinç kabuklarının kontrollü yakılmasıyla elde edilen RHA, %85-95 oranında amorf silis içeriği ile son derece değerli bir silis kaynağıdır. Gözenekli yapısı ve yüksek spesifik yüzey alanı, aktivasyon çözeltisi ile etkileşimi kolaylaştırır. Ancak, külün reaktivitesi yakma sıcaklığı ve süresine son derece bağlıdır (Zain, Islam, Mahmud, Jamil, 2011).

3.1.2.Öğütme, Eleme ve Tane Boyutu Kontrolü

Hammaddenin fiziksel özellikleri, özellikle de toz boyut dağılımı ve özgül yüzey alanı, jeopolimerizasyon kinetiğini doğrudan etkileyen temel parametrelerdir. Bu nedenle, hammaddelerin genellikle mekanik öğütme işleminden geçirilmesi ve belirli bir partikül boyutuna getirilmesi gereklidir (Nath, Kumar, 2019).

Öğütme işlemi, malzemenin yüzey alanını artırarak alkali aktivasyon çözeltisi ile temas edecek reaktif yüzeyi genişletir. Bu durum, çözünme aşamasının hızını ve verimini önemli ölçüde artırır (Provis, Van Deventer, 2014). Tane boyutunun azalması, reaksiyonun başlama süresini kısaltır ve nihai ürünün mekanik özelliklerinde iyileşme sağlar. İdeal tane boyutu dağılımı, hem yeterli reaktiviteyi sağlayacak kadar ince, hem de karışım suyu ihtiyacını aşırı artırmayacak kadar kaba tanelerden oluşan bir dağılım olarak kabul edilir (Provis, Van Deventer, 2014; Nath, Kumar, 2019).

3.1.3.Kimyasal Aktivasyon Öncesi İşlemler

Bazı hammaddeler, özellikle de doğal killeri, yapısal olarak su veya istenmeyen empüriteler barındırdığından, kimyasal aktivasyona hazır hale getirilmek için ön ısıtma işlemine tabi tutulmalıdır.

- **Kalsinasyon:** Kaolinitik kilin metakaoline dönüştürülmesi, bu sürecin en karakteristik örneklerinden birisidir. Kalsinasyon

sıcaklığı ve süresi, elde edilen ürünün amorf yapısını ve dolayısıyla reaktivitesini belirleyen en kritik faktörler arasında yer alır. Çok düşük sıcaklıklarda yapısal su tamamen uzaklaştırılamaması ve 900°C gibi çok yüksek sıcaklıklarda ise malzeme yeniden kristalleşerek mullit fazı oluşumu eğiliminde olduğu için reaktivitesini kaybeder. Bu sebeple genellikle kalsinasyon sıcaklığı genellikle 600-800°C aralığında ve 1-2 saat süreyle gerçekleştirilir (Davidovits, 2008).

- **Ön Isıtma/Kurutma:** Uçucu kül veya cüruf gibi hammaddeler neme olan ilgisi çok yüksektir. Bu nedenle, depolama sırasında yüzeylerinde adsorbe olan nem, alkali çözeltinin konsantrasyonunu seyreltebileceğinden, kullanım öncesi 100-110°C gibi düşük sıcaklıklarda kurutulmaları önerilir (Benavidez, Grasselli, Quaranta, 2003).

3.1.4. Aktivasyon Çözeltisinin Hazırlanması ve Optimizasyonu

Alkali aktivasyon çözeltisi, jeopolimerizasyon reaksiyonunu başlatan bir katalizördür. Bu yapı taşı çözeltisinin hazırlanma aşaması, jeopolimer formülasyonunun en kritik aşamalarından biridir.

- **Alkali Kaynağı ve Silikat Kaynağı:** Yaygın olarak kullanılan alkali kaynakları; sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH)'tir. Silikat kaynağı olarak ise genellikle sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya potasyum silikat (K_2SiO_3) çözeltileri kullanılır. Bu iki çözeltinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla aktivasyon çözeltisi hazırlanır (Castillo ve diğerleri, 2021).
- **Karışım Oranları ve Silikat Modülü (M_s):** Aktivasyon çözeltisinin kimyasını tanımlayan en önemli parametre, silikat modülüdür ($M_s = \text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$, burada M Na veya K'dır). Bu modül değeri, jeopolimer jelin oluşum hızını, yoğunluğunu ve kararlılığını kontrol eder (Fernández-Jiménez, Palomo, 2005).
 - **Düşük M_s (<1.0):** Yüksek alkalinite, hızlı çözünmeyi teşvik eder. Fakat bunun yanında oluşan jel daha az polimerize ve gözenekli olma eğilimi gösterir (Alaneme, Olonade, Esenogho, Lawan, 2024).

- **Yüksek Ms (>1.5 - 2.5):** Ortamda daha fazla silikat türleri bulunur, bu da daha yoğun, daha iyi polimerize olmuş ve mekanik performansı daha yüksek bir jeopolimer matrisinin oluşumunu destekler. Ancak, aşırı yüksek Ms değerleri viskoziteyi artırarak işlenebilirliği zorlaştırıcı etki oluşturur (Alaneme, Olonade, Esenogho, Lawan, 2024).
- **Çözeltinin Olgunlaştırılması ve Soğutulması:** Konsantre NaOH veya KOH çözeltilerinin hazırlanması ısıveren bir tepkimedir ve açığa çıkan ısı çözeltinin sıcaklığını önemli ölçüde artırır. Sıcak çözelti ile anında yapılan karışımlar, reaksiyon hızını kontrol edilemeyecek şekilde artırılabilir. Bu nedenle, hazırlanan alkali silikat çözeltisinin kullanımdan önce 24 saat kadar oda sıcaklığında dinlendirilerek olgunlaşması ve soğuması önerilir. Bu süreç, çözelti içindeki silikat türlerinin polimerizasyon derecesini dengeleyerek daha homojen bir aktivasyon sağlar (Skane ve diğerleri, 2025).

3.1.5.Çevresel Etkiler ve Sürdürülebilir Hammadde Seçimi

Jeopolimerlerin en önemli avantajlarından biri, geleneksel Portland çimentosuna göre daha düşük çevresel etki potansiyeline sahip olmalarıdır. Bu avantajın sürdürülebilmesi, kullanılan hammaddelerin türüne ve uygulanan işlem koşullarına bağlıdır.

- **Endüstriyel Atıkların Değerlendirilmesi:** Jeopolimer sentezinde uçucu kül, cüruf ve pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel atıkların kullanımı, çift taraflı bir çevresel kazanım sunar. Bir yandan, bu malzemelerin depolanması için kullanılan arazi, yüzey ve yeraltı suyu kirliliği riskleri ile partikül madde yayılımı gibi olumsuz etkiler azaltılır. Diğer yandan, atık konumundaki bu malzemelerin değerli bir kaynağa dönüştürülmesi, doğrusal üretim-tüketim çizgisini kırarak, kaynakların maksimum verimlilikle kullanıldığı döngüsel ekonomi paradigmasının somut bir örneğini teşkil eder (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Enerji Tüketimi ve Karbon Ayak İzi:** Metakaolin üretimi, kalsinasyon aşamasında önemli miktarda enerji tüketir. Buna karşılık, uçucu kül ve cüruf gibi hammaddeler için ek bir ısıl işlem

gerekmediğinden, bunların karbon ayak izi neredeyse sıfırdır. Yaşam Döngüsü Analizi çalışmaları, uçucu kül esaslı jeopolimer betonların, Portland çimentosu betonuna kıyasla %50-80'e varan oranlarda daha düşük küresel ısınma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Tasiopoulou, Katsourinis, Giannopoulos, Founti, 2023).

- **Alkali Aktivatörlerin Etkisi:** Alkali aktivatörlerin üretimi, jeopolimerlerin çevresel sürdürülebilirliği bakımından önemli bir faktördür. Sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat gibi alkali çözeltilerin hazırlanması, yüksek sıcaklık ve enerji tüketimi gerektiren ekzotermik reaksiyonlar içerir, bu durum karbon ayak izini artırır. Daha düşük konsantrasyonlu aktivatörlerin kullanılması veya alternatif, daha az enerji gerektiren aktivatör kaynaklarının geliştirilmesi, jeopolimerlerin çevresel etkilerini azaltmada kritik öneme sahiptir. Yerel ve bol miktarda bulunan atık malzemelerin kullanımı, aktivatörlerin çevresel maliyetini dengelemekte önemli bir rol oynar (Skane ve diğerleri, 2025).

3.2.Kürleme Yöntemleri

Kürleme aşaması, jeopolimerizasyon reaksiyonunun tamamlanması ve sonucunda üç boyutlu bir aluminosilikat ağ yapısının oluştuğu kritik süreci ifade eder. Bu aşamada oluşan yapı, nihai malzemenin mekanik mukavemeti, dayanıklılığı ve boyutsal kararlılığı açısından belirleyici özellikler kazanır. Kürleme rejimi doğrudan reaksiyon kinetiğini, jel oluşum mekanizmasını ve nihai mikro yapının yoğunluğunu kontrol eder. Dolayısıyla bu rejimin titizlikle seçilmesi, malzemenin performansını doğrudan etkiler (Nurruddin, Haruna, Mohammed, Sha'aban, 2018; Matsimbe, Dinka, Olukanni, Musonda, 2022).

3.2.1.Isıl Kürleme

Isıl kürleme, jeopolimer numunelerinin çoğunlukla 40–90 °C aralığında ki belli bir sıcaklıkta kontrollü olarak tutulması işlemidir. Bu sıcaklık artışı, reaktif parçacıkların kinetik enerjisini yükselterek çözünme, taşınım ve polikondenzasyon reaksiyonlarını hızlandırır. Özellikle 60 -80 °C aralığında yapılan kürlerde, jel oluşum hızı yüksek olmakta ve 24 saat gibi kısa sürelerde

dahi yüksek erken dayanım (örneğin ≥ 20 MPa) elde edilebilmektedir (Dong, Gao, Li, Wang, 2025; Aschoff, Partschefeld, Schneider, Osburg, 2024).

Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus, kürleme süresi ve sıcaklığın optimum değerlerinin doğru belirlenmesidir. Zira çok yüksek sıcaklıklar (örneğin ≥ 90 °C) ya da çok uzun süreli ısıl kürlemeler, iç gerilimlerin artmasına, mikroçatlakların oluşmasına ve bunun sonucunda dayanımın düşmesine yol açabilir. Özetle, ısıl kürleme yönteminde amaç, jeopolimer ağının homojen ve yoğun şekilde bağlanmasını mümkün kılarken, aynı zamanda iç gerilim kaynaklı bozulmaların önüne geçmektir (Dong, Gao, Li, Wang, 2025; Yu ve diğerleri, 2025).

3.2.2.Buhar Kürleme

Buhar kürleme, özellikle ön üretilmiş jeopolimer beton uygulamalarında yaygın şekilde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde numuneler, yüksek bağıl nem ve ılık sıcaklık koşullarında buhar odası ya da otoklav benzeri atmosferlerde tutulur. Yüksek nem ortamı sayesinde karışım içindeki suyun buharlaşarak kaybolması engellenir ve reaksiyon için gerekli olan su korunarak daha homojen, yoğun bir matris oluşumu teşvik edilir (Matsimbe, Dinka, Olukanni, Musonda, 2022; Yu ve diğerleri, 2025).

Bu süreç, klasik C-S-H jeli oluşumuna benzer şekilde jeopolimerizasyonu hızlandırır ve sonuçta daha düşük gözeneklilik ve daha yüksek yüzey dayanıklılığına sahip yapı elde edilir. Ancak uygulamada dikkat edilmesi gereken, bu tür kürlemenin ekipman gereksinimi ve saha koşullarında uygulanabilirliğinin sınırlı olabileceğidir (Yu ve diğerleri, 2025; Khasawneh, 2025).

3.2.3.Mikrodalga Kürleme

Mikrodalga kürleme, geleneksel ısı iletimi yerine, malzeme içerisindeki su molekülleri ve iyonik türlerin dipol polarizasyonu yoluyla hacimsel ve hızlı bir ısıtma sağlayan yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu içten dışa ısıtma mekanizması, enerji verimliliğini önemli ölçüde artırırken, kürleme süresini saatlerden dakikalara düşürme potansiyeli taşır (Aschoff, Partschefeld, Schneider, Osburg, 2024; Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022). Böyle bir hızlı ısıtma sayesinde polimerizasyon süreci hızlanır, daha ince taneli ve homojen bir mikro yapı oluşur; geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek mekanik

dayanım ve daha iyi boyutsal kararlılık elde edilebilir. Tabii ki bu yöntemin pratik uygulama açısından hacim, penetrasyon ve eşit ısı dağılımı gibi hususlara dikkat edilmesi gerektiği unutulmamalıdır (Aschoff, Partschefeld, Schneider, Osburg, 2024).

3.2.4.Çevresel Kürleme

Çevresel kürleme, numunelerin oda sıcaklığında ve atmosferik koşullarda bekletilmesi anlamına gelir. Bu yöntem, ek enerji girdisi gerektirmediğinden en ekonomik ve sürdürülebilir seçenektir ve özellikle saha uygulamaları ya da büyük ölçekli dökümler için idealdir. Ancak reaksiyon kinetiği oldukça yavaştır; bu nedenle erken dayanım kazanımı sınırlı olabilir ve nihai malzeme özelliklerine ulaşmak günler ya da haftalar sürebilir (Matsimbe, Dinka, Olukanni, Musonda, 2022; Yu ve diğerleri, 2025). Ayrıca, çevresel kürleme sırasında ortam sıcaklığı ve nem dalgalanmalarının malzeme performansı üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır; düşük sıcaklıklar veya nem düşüklüğü, reaksiyonun yarım kalmasına ve zayıf bir mikro yapıya yol açabilir. Bu bakımdan, bu yöntemde sabit ve kontrollü bir ortam sağlanabilmesi büyük avantajdır (Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022).

3.2.5.Nem Oranı, CO₂ Etkisi ve Su/Aktivatör Oranı

Kürleme sürecinde nem şartları, reaksiyon için gerekli suyu sağlayarak polimerizasyonun devamlılığını garanti eder. Düşük nem oranları, prematür kurumaya ve reaksiyonun yarıda kalmasına yol açarak zayıf ve gözenekli bir mikro yapı oluşmasına neden olabilir (Matsimbe, Dinka, Olukanni, Musonda, 2022; Dong, Gao, Li, Wang, 2025). Buna ilaveten, atmosferik karbondioksit (CO₂), özellikle yüksek kalsiyum içeren jeopolimer sistemlerinde karbonatlaşmaya yol açabilir; bu durum yüzey sertleşmesine sebep olabilir, ancak uzun vadede geç dayanım artışına veya yapıda olumsuz değişimlere de neden olabilir (Dong, Gao, Li, Wang, 2025; Shamsah, Kalfat, Subramaniam, Hanumananaik, 2025).

Su/aktivatör oranı da kritik bir parametredir: Yüksek oranlar işlenebilirliği artırsa da, kür sonrası buharlaşma ile geride fazla gözenek bırakma riski taşır ki bu da dayanım ve dayanıklılığı düşürür. Optimum oran, yoğun ve dayanıklı bir matris oluşturabilmek için şarttır. Araştırmalar, su/aktivatör oranının ve nem koşullarının jeopolimerin gözenekliliğini,

dolayısıyla da mekanik ve kimyasal dayanımını doğrudan etkilediğini göstermektedir (Dong, Gao, Li, Wang, 2025; Khasawneh, 2025).

3.2.6.Kürleme Rejimlerinin Mikro Yapı, Dayanım ve Dayanıklılığa Etkisi

Kürleme rejiminin seçimi, jeopolimerin nihai özelliklerini doğrudan şekillendirir. Yüksek enerjili yöntemler olarak kabul edilen ısı ve buhar kürleme gibi uygulamalar, genellikle daha hızlı jel oluşumu, daha düşük porozite ve daha yüksek mukavemet sağlama eğilimindedir (Nurruddin, Haruna, Mohammed, Sha'aban, 2018; Dong, Gao, Li, Wang, 2025). Öte yandan, çevresel kürleme daha gözenekli bir yapı üretebilir; bu da asit ve sülfata karşı kimyasal direnç gibi bazı dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkileyebilir (Matsimbe, Dinka, Olukanni, Musonda, 2022; Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022). Ayrıca, mikrodalga kürleme yüksek derecede homojen bir içyapı oluşturma potansiyeli taşır; bu sayede hem mekanik performans hem de ısı kararlılık anlamında iyileşme sağlanabilir. Dolayısıyla kürleme optimizasyonu, gözenek boyutu dağılımı, jel fazının homojenliği gibi istenen mikroyapısal özellikler ile hedeflenen mekanik ve dayanıklılık performansı arasında bir denge kurulmasını zorunlu kılar. Yanlış veya yetersiz bir kürleme rejimi, malzemenin potansiyelinin altında kalmasına yol açabilir (Aschoff, Partschefeld, Schneider, Osburg, 2024; Khasawneh, 2025).

3.3.Katkı Malzemeleri ve Hibrit Sistemler

Bilindiği üzere jeopolimerler, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla üstün mekanik özellikler, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük karbon ayak izi gibi önemli avantajlar sunar (Guo, Lv, Liu, Wang, 2022). Ancak, belirli uygulama alanlarına yönelik optimize edilmiş performans gereksinimleri, ham matrisin özelliklerinin modifikasyonunu zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, çeşitli katkı malzemeleri ve hibrit sistemler, jeopolimer kompozitlerin mühendislik niteliklerini artırmak amacıyla stratejik olarak kullanılmaktadır (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023; Šimonová ve diğerleri, 2024).

3.3.1.Nano Katkılar

Nanoteknolojinin inşaat malzemeleri alanındaki yükselişi, jeopolimerlerin performans sınırlarını genişletmede nano boyuttaki katkıların rolünü ön plana çıkarmıştır. Nano-SiO₂ ve nano-Al₂O₃ gibi puzzolanik ve dolgu nitelikli nanopartiküller, jeopolimerizasyon reaksiyonlarında hem fiziksel hem de kimyasal olarak etki gösterir. Yüksek spesifik yüzey alanları sayesinde, reaksiyon için gerekli olan alkalın çözeltiyi bünyelerine hapsederek reolojik özellikleri olumsuz etkileyebilirler; ancak aynı zamanda, çözünmüş silikat ve alüminat türleri için çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak polikondenzasyon reaksiyonlarını hızlandırır ve jeojel (N-A-S-H) oluşumunu teşvik ederler. Bu durum, matrisin yoğunluğunu artırarak gözenek yapısını iyileştirir ve sonuçta basınç dayanımında ve dayanıklılıkta kayda değer artışlar sağlar (Jin, Zhang, Wu, Sha, 2022; Shilar ve diğerleri, 2022). Karbon nanotüp (CNT) ve grafen gibi karbon esaslı nanomalzemeler ise, mekanik performansı farklı bir boyuta taşır. Bu malzemeler, yüksek elastik modülleri ve mukavemetleri ile mükemmel birer takviye elemanıdır. Jeopolimer matrisi içinde homojen bir şekilde dağıtıldıklarında, çatlak ilerlemesini engelleyerek malzemenin çekme dayanımını ve tokluğunu önemli ölçüde artırır (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023). Öte yandan, nano-TiO₂ katkısı, fotokatalitik özellik kazandırarak jeopolimerleri kendi kendini temizleyen veya hava kirleticilerini ayrıştırabilen akıllı yapı malzemelerine dönüştürme potansiyeli taşımaktadır (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023).

3.3.2.Elyaf Takviyesi

Jeopolimerler, seramik benzeri yapıları nedeniyle nispeten gevrek bir davranış sergiler. Bu gevrekliğin üstesinden gelmek ve özellikle çekme ve eğilme dayanımlarını yükseltmek için elyaf takviyesi en etkili yöntemlerden biridir. Cam, bazalt, karbon ve polipropilen elyaflar bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam elyaflar, uygun maliyetleri ve iyi mekanik özellikleri ile öne çıkarken, bazalt elyaflar daha yüksek alkali dayanımı ve mukavemeti sunar. Karbon elyaflar ise en yüksek mukavemet ve rijitlik değerlerini sağlamaktadır. Ancak, maliyetleri daha yüksektir (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023). Bu elyaflar, jeopolimer matris içinde dağıtıldığında, matris-elyaf ara yüzeyinde oluşan kuvvetli adezyon bağı

sayesinde çatlak oluşumunu geciktirir ve çatlak ilerlediğinde enerjiyi sönümleyerek tok bir kırılma davranışı sağlar (Qin ve diğerleri 2023). Özellikle, çok ince polipropilen (PP) elyaflar, yangın durumunda bileşende oluşan buhar basıncını dışarı vererek patlamayı önleme kabiliyeti ile yangın dayanımını artırır. Elyaf takviyesinin en önemli katkısı, malzemenin gerilme-dayanım eğrisinin, gevrek bir malzemedeki gibi ani bir düşüş yerine, dayanım kaybı olmadan uzama gösteren bir davranışa dönüşmesini sağlamasıdır (Radebe, Madirisha, Ikotun, Dada, 2025).

3.3.3. Polimer/Jeopolimer Hibritleri

Organik ve inorganik fazların sinerjik birleşiminden oluşan polimer/jeopolimer hibritleri, her iki alanında da en iyi özelliklerini bir araya getirmeyi hedefler. Bu sistemlerde, epoksi, poliüretan veya akrilik gibi polimerler, jeopolimer matrisi ile karıştırılır. Bu hibritleşme, genellikle jeopolimerin silanol (Si-O-H) grupları ile polimerin fonksiyonel grupları arasında kovalent bağların oluşumuyla gerçekleşir. Oluşan organik-inorganik ağ yapısı, malzemeye olağanüstü bir tokluk ve esneklik kazandırır. Jeopolimer faz, yangın direnci ve yüksek sıcaklık kararlılığı sağlarken, polimer faz, çatlak direncini ve darbe dayanımını iyileştirir (Xiong, Guo, Zhang, 2023; Bai ve diğerleri, 2024). Termal analizler, bu hibrit malzemelerin, saf polimerlere kıyasla çok daha yüksek bir bozunma sıcaklığına sahip olduğunu göstermektedir. Bu, jeopolimerik iskeletin, polimer zincirlerine termal bir koruma kalkanı oluşturmamasından kaynaklanır. Bu tür hibrit kaplamalar ve kompozitler, yüksek performans gerektiren özel kaplama, yapıştırıcı ve onarım malzemesi uygulamaları için umut vaat etmektedir (Bai ve diğerleri, 2024).

3.3.4. Mineral Katkılar

Jeopolimerizasyon reaksiyonunun temel ürünü, $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (N-A-S-H) jeli olarak bilinen amorf bir fazdır. Ancak, sisteme kalsiyum (Ca) içeren katkılar, uçucu kül, yüksek fırın cürufu veya kireç gibi malzemeler eklendiğinde, reaksiyon ürünleri ve bunların morfolojisi önemli ölçüde değişir. Kalsiyum iyonları, reaksiyon ortamına girdiğinde, kalsiyum silikat hidrat (C-A-S-H) veya N-A-S-H ile C-A-S-H fazlarının bir karışımı oluşabilir (Wang, Y., Zhang, J. ve diğerleri, 2024). Bu C-A-S-H fazı, Portland

çimentosundakine benzer şekilde, erken yaş dayanım kazanımını hızlandırır ve genellikle daha yoğun bir mikro yapı oluşturur. N-A-S-H/C-A-S-H oranı, kullanılan hammadde ve aktivatörün kimyası ile doğrudan kontrol edilir (Razeghi Tehrani, Arjomand, Behbahaninia, Kargari, 2024). Yüksek kalsiyum içerikli sistemlerde C-A-S-H fazı baskın hale gelerek hızlı priz süresi ve yüksek erken dayanım sağlarken, düşük kalsiyumlu sistemler daha saf bir N-A-S-H jeli oluşturur ve bu da genellikle daha yüksek nihai dayanım ve asit direnci ile ilişkilendirilir. Bu nedenle, mineral katkılar, jeopolimerlerin reaktivitesini ve nihai faz bileşimini mühendislik gereksinimlerine göre dizayn etmek için kullanılan güçlü bir girdidir (Wang ve diğerleri, 2024; Razeghi Tehrani, Arjomand, Behbahaninia, Kargari, 2024).

3.3.5.Reolojik Davranış ve İşlenebilirlik Kontrolü

Jeopolimer harç ve betonların pratik uygulanabilirliği ile yapısal homojenliği, büyük ölçüde priz almamış haldeki reolojik davranışlarına, yani işlenebilirlik özelliklerine bağlıdır (Zhang, Sun, 2023). Jeopolimerizasyon reaksiyon ortamı, geleneksel Portland çimentosu sistemlerinden farklı olarak yüksek iyonik kuvvete ve güçlü alkali ortama ($\text{pH} > 13$) sahiptir. Bu ortam, aluminosilikat partiküllerinin yüzeyinde hızlı bir çözünme ve ilk jel oluşum aşamalarını tetikleyerek, karışımda genellikle yüksek viskozite, düşük çökme değeri ve zamanla artan reolojik sertleşme eğilimi göstermesine neden olur (Zhang, Sun, 2023). Bu durum, özellikle karmaşık kalıp sistemlerinde ve yoğun donatılı elemanlarda yerleştirme ve sıkıştırmayı önemli ölçüde zorlaştırabilir; ayrıca zayıf bir arayüz geçiş bölgesi (ITZ) oluşumuna yol açarak nihai ürünün mukavemetini ve genel dayanımını olumsuz etkileyebilir (Zhang, Sun, 2023).

Bu handikapların üstesinden gelmek için, Portland çimentosu betonlarında yaygın olarak kullanılan kimyasal katkılar, özellikle de süperplastikleştiriciler, jeopolimer sistemlerde de uyarlanmıştır. Ancak, bu adaptasyon yalnızca katkının eşdeğer şekilde yerleştirilmesi anlamına gelmez: geleneksel katkıların performansı, jeopolimer matrisinin kimyasal yapısı ve aktivasyon koşullarından doğrudan etkilenir (Anudeep ve diğerleri, 2024). Na-, Ca- veya NH_4 -esalı lignosülfonatlar, naftalin sülfonat (NSF) ve melamin sülfonat (MSF) gibi birinci ve ikinci nesil süperplastikleştiriciler, esas olarak elektrostatik itme mekanizmasıyla etki ederler. Yüksek alkalın ortamda

negatif yük kazanarak, partiküller arasında itici kuvvetler oluşturur ve aglomere olmuş jeopolimer öncül kümeleri ile uçucu kül / cüruf tanelerini dağıtırlar. Ancak, bu katkıların etkinliği sıklıkla sınırlıdır ve akma kaybına, yani işlenebilirlik süresinin kısa olması neden olabilirler (Anudeep ve diğerleri, 2024).

En güncel nesil poli karboksilat eter (PCE) esaslı süperplastikleştiriciler ise, sterik engelleme yoluyla daha gelişmiş bir etki mekanizması sunar. PCE molekülleri bir ana zincir ve genellikle poli etilen oksit gibi yan zincirlerden oluşur. Ana zincir partikül yüzeyine adsorbe olurken, su ile iyi karışan yan zincirler partiküller arasındaki boşluğa doğru uzanarak, partiküllerin birbirine yaklaşmasını fiziksel olarak engeller. Bu, daha güçlü ve uzun süreli bir dispersiyon sağlar (Zhang, Sun, 2023; Partschefeld, Tatal, Halmanseder, Schneider, Osburg, 2023). Farklı PCE yapıları değişken performans sergiler (Partschefeld, Tatal, Halmanseder, Schneider, Osburg, 2023).

Ancak, yüksek alkalın ortam ve özellikle 50-80 °C ısı buhar küresi sırasındaki yüksek sıcaklık koşulları, bu organik polimerler için ciddi bir bozunma riski oluşturur. Alkali hidroliz olarak adlandırılan bu süreçte, PCE'nin ester bağları veya diğer hassas fonksiyonel grupları kopabilir; bu da molekülün yapısal bütünlüğünü kaybederek dispersiyon kabiliyetini yitirmesine yol açabilir. Hatta kısmen bozunmuş PCE kalıntıları, jeopolimer ağına müdahale ederek beklenenden farklı olarak bir viskozite artışına veya hızlı pıhtılaşmaya sebep olabilir (Partschefeld, Tatal, Halmanseder, Schneider, Osburg, 2023; Kim, Choi, Oh, 2024). Mevcut araştırmalar, geleneksel PCE'lerin alkalın dayanımının jeopolimer sistemlerde hâlâ en büyük kısıtlayıcı faktörlerden biri olduğunu göstermektedir (Kim, Choi, Oh, 2024).

Bu nedenle, jeopolimer sistemler için yüksek alkali dayanımlı ve uyumlu yeni nesil süperplastikleştiricilerin geliştirilmesi, hem işlenebilirliği hem de mekanik performansı optimize etmek için önemli bir inceleme ve araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, daha stabil eter bağları içeren PCE'ler, siklik yapılar veya fosfonat grupları gibi alkali ortamda daha dayanıklı fonksiyonel grupların kullanımı üzerine yoğunlaşmaktadır (Partschefeld, Tatal, Halmanseder, Schneider, Osburg, 2023). Ayrıca, süperplastikleştiricilerin jeopolimer matrisi ile etkileşimini optimize etmek için tasarıma dayalı sentez yaklaşımı, bu alanın geleceğini şekillendirecek

umut vadeden proseslerden biri olarak kabul edilmektedir (Kim, Choi, Oh, 2024).

3.4.Ölçek Büyütme ve Endüstriyel Uygulama Teknikleri

Jeopolimer teknoloji, laboratuvar ortamında; yüksek mekanik dayanım, üstün kimyasal direnç ve düşük çevresel atık gibi performans parametreleriyle önemli bir potansiyel sergilemiştir. Ancak, bu potansiyelin endüstriyel ölçekte tekrarlanabilir, ekonomik ve güvenilir bir üretim sürecine dönüştürülmesi, önemsenmeyecek bir dizi mühendislik ve proses optimizasyonu sorununu beraberinde getirmektedir (Kadhim, Mankhi, Al-Bujasim, 2024).

Laboratuvar ölçeğindeki kesikli ve kontrollü reaksiyon koşullarından, sürekli veya yarı-sürekli endüstriyel bir üretim hattına geçiş, basit bir boyut skalası sorunu değildir. Bu geçiş, reaksiyon kinetiğinin ölçeklenmesi, ısı ve kütsel taşınım sınırlamalarının aşılması, partikül boyutu dağılımı ve karışım homojenliğinin makro ölçekte sağlanması gibi temel kimya mühendisliği prensiplerini devreye sokar (Ashfaq ve diğerleri, 2024).

Bu bölümün amacı, laboratuvar ölçeğinden endüstriyel üretime geçiş sürecinde ortaya çıkan bu operasyonel ve sistemik zorlukları sistematik bir şekilde tartışmaktır. Odak noktamız, yalnızca karşılaşılan problemler değil, aynı zamanda bu problemlere yönelik geliştirilen pratik mühendislik çözümleri ve endüstriyel uygulama teknikleridir. Bu kapsamda, ölçek büyütme kriterleri olarak tanımlanan ve prosesin temel fizikokimyasal davranışını tanımlayan parametreler ele alınacaktır (Ashfaq ve diğerleri, 2024; La Scalia, Saeli, Adelfio, Micale, 2021).

3.4.1.Pilot Ölçek Deneyimleri: Karıştırma Ekipmanları ve Homojenizasyon Teknikleri

Laboratuvar ölçeğindeki basit manyetik karıştırıcıların aksine, endüstriyel üretimde karıştırma işlemi, nihai ürünün mekanik dayanım ve genel direncini doğrudan belirleyen kritik bir operasyondur. Pilot tesis deneyimleri, geleneksel beton karıştırıcılarının jeopolimer reçeteleri için her zaman optimal olmadığını göstermiştir (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024; Mukhametkaliyev ve diğerleri, 2022).

- **Karıştırma Ekipmanları ve Sıralama:** Karıştırma sürecinin verimliliği, kullanılan ekipmanlar ve izlenen sıralama ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek viskoziteli alkali aktivasyon çözeltisi ile uçucu kül veya cüruf gibi katı malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılabilmesi için, yüksek kesme kuvveti uygulayabilen eksenel karıştırıcılar veya pan mikserlerin kullanılması önerilir. Ekipman seçimi kadar, karıştırma prosedürü de kritik bir öneme sahiptir. Erken pıhtılaşmayı önlemek ve işlenebilirlik süresini artırmak amacıyla, iki aşamalı karıştırma (katı bileşenlerin ön karışımını takiben aktivasyon çözeltisinin kademeli olarak ilavesi) veya alkali silikat çözeltisinin en son eklenmesi gibi yöntemler sıklıkla tercih edilmektedir (Matsimbe, Dinka, Olukanni, Musonda, 2022; Mukhametkaliyev ve diğerleri, 2022; Muthukrishnan, Ramakrishnan, Sanjayan, 2022).
- **Homojenizasyonun Önemi ve Zorlukları:** Jeopolimerizasyon, kimyasal bir çözünme ve yeniden çökelme süreci olduğundan, karışım içindeki her bir partikülün aktivasyon çözeltisi ile temasının maksimize edilmesi gerekir. Aksi takdirde, reaksiyona girmemiş hammadde adacıkları oluşarak ürünün mekanik dayanımını ve kimyasal kararlılığını düşürür (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024). Homojenizasyonu sağlamak için, yüksek hızlı karıştırma ile yeterli karıştırma süresinin doğru kombinasyonu gereklidir. Ancak, aşırı uzun karıştırma süreleri hava entrapmanına ve sıcaklık artışına neden olarak reaksiyonu hızlandırabilir. Bu nedenle, pilot ölçekte her bir formülasyon için hız, süre, sıcaklık gibi optimum karıştırma parametrelerinin belirlenmesi esastır (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024; Shi ve diğerleri, 2024; Wan ve diğerleri, 2025).

3.4.2. Kalıplama, Ekstrüzyon ve 3D Yazıcı Teknolojileri

Jeopolimerlerin makro yapısı, uygulanan şekillendirme tekniğine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir.

- **Kalıplama (Döküm):** Prekast eleman üretiminde en yaygın kullanılan yöntemdir. Jeopolimerin taze haldeki reolojik özellikleri,

kalıp tasarımını ve vibrasyon gereksinimini doğrudan etkiler. Geleneksel beton kalıpları kullanılabilse de, jeopolimerlerin yüksek alkali içeriği nedeniyle belirli polimer kalıp malzemeleriyle uyumluluk testleri yapılmalıdır (Ricciotti, Apicella, Perrotta, Aversa, 2023).

- **Ekstrüzyon:** Seramik ve plastik endüstrisinden adapte edilen bu yöntem, boru, kiriş ve kaplama paneline benzer sürekli kesitli profillerin üretimi için idealdir. Ekstrüzyon için jeopolimer hamurunun, şekil verdikten sonra kendi ağırlığını taşıyacak kadar ham mukavemete sahip olması gerekir. Bu, reolojik katkı maddeleri veya elyaf takviyeleri ile sağlanır. Ekstrüzyon, malzemenin anizotropik özellikler kazanmasına neden olabilir; bu da mekanik tasarımda dikkate alınması gereken bir parametredir (Ricciotti, Apicella, Perrotta, Aversa, 2023; Jaji, Babafemi, Van Zijl, 2025).
- **3D Yazıcı Teknolojileri:** Jeopolimerler, inşaatta dijital fabrikasyonun önünü açan 3D baskı uygulamaları için son derece uygundur. Başarılı bir baskı için, malzemenin yığılabilirlik ve püskürtülebilirlik dengesini sağlaması gerekir. Malzeme, nozülден rahatça püskürtülebilmeli, ancak katman üzerine yerleştikten sonra dağılmamalı ve üzerine gelen bir sonraki katmanın yükünü taşıyabilmelidir. Bu, genellikle güçlü bir tiksotropik davranış gerektirir. Reolojik modifiye ediciler ve nano-kil gibi tiksotropik ajanlar, bu dengenin sağlanmasında kilit rol oynar. Ayrıca, katmanlar arası bağlanma mukavemeti, 3D baskılı jeopolimer yapıların en kritik performans göstergelerinden biridir (Jaji, Babafemi, Van Zijl, 2025; Barve, Bahrami, Shah, 2023).

3.4.3.Enerji Verimliliği ve Maliyet Analizleri

Jeopolimerlerin çevresel sürdürülebilirlik iddiası, ancak kapsamlı bir Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ve doğru maliyet hesabı ile desteklenebilir.

- **Enerji Verimliliği:** Portland çimentosunun klinkerleşme süreci ile kıyaslandığında, jeopolimer üretimi genellikle daha düşük bir proses sıcaklığına sahiptir ve bu da teorik olarak büyük bir enerji avantajı sağlar. Ancak, bu avantaj, hammadde kurutma, öğütme gibi ön işlemleri ve özellikle alkali aktivatörlerin üretimindeki yüksek enerji

girdisi ile kısmen dengelenir. Bu nedenle, enerji verimliliği optimizasyonu, yerel atık hammaddelerin kullanımı, düşük sıcaklıkta kür ve konsantre aktivatörlerin verimli kullanımı üzerine odaklanmalıdır (Martínez, Miller, 2025; Ünsal, 2025).

- **Maliyet Analizleri:** Jeopolimerlerin ekonomik fizibilitesi, büyük ölçüde hammadde lojistiğine ve aktivatör maliyetlerine bağlıdır. Uçucu kül veya cüruf gibi atık malzemelerin nakliye maliyeti, bu malzemelerin ücretsiz olması durumunda dahi toplam maliyette önemli bir paya sahip olabilir. Sodyum silikat çözeltisi, Portland çimentosuna kıyasla en büyük maliyet farkını oluşturur. Maliyetleri düşürmek için, alternatif silika kaynakları olan silis dumanı, cam tozu kullanılarak aktivatör modülünün optimize edilmesi veya atık esaslı aktivatörlerin geliştirilmesi yönünde araştırmalar devam etmektedir (Martínez, Miller, 2025; Kolade, Ikotun, Oyejobi, Aderinto, Madirisha, 2025).

3.4.4.Sürekli Üretim Sistemleri ve Proses Otomasyonu

Seri üretimin ve kalite tutarlılığının sağlanması, sürekli üretim hatları ve proses otomasyonu ile mümkündür.

- **Sürekli Üretim:** Kesikli üretimden sürekli üretime geçiş, verimliliği büyük ölçüde artırır. Bu, birbirine bağlı birim operasyonlardan oluşan entegre bir hat gerektirir. Sürekli bir karıştırıcıdan çıkan taze jeopolimer, doğrudan kalıplama veya ekstrüzyon ünitesine yönlendirilir (Hutyra, Ba'ńkosz, Tyliszcak, 2024).
- **Proses Otomasyonu:** Kimyasal bileşim ve reaksiyon kinetiğindeki küçük değişimlerin bile nihai ürünü etkilediği jeopolimer sistemlerde otomasyon hayati öneme sahiptir. Otomasyon sistemi; hammadde besleme oranlarını, karıştırma parametrelerini, kür sıcaklığını ve süresini gerçek zamanlı olarak kontrol eder ve izler. Proses Analiz Teknolojisi (PAT) araçları, priz almamış karışımın reolojik ve kimyasal özelliklerini anlık olarak ölçerek proses kontrolüne geri bildirim sağlar. Bu, üretimde tutarlılığı garanti altına almanın en etkili yoludur (Mahmoodi, Siad, Lachemi, Şahmaran, 2025).

3.4.5.Endüstriyel Standartlar, Kalite Kontrol ve Sertifikasyon Gereklilikleri

Jeopolimerlerin yapı malzemesi olarak pazarda kabul görmesi, uluslararası kabul görmüş standartlara ve sertifikalara bağlıdır. Bu alandaki çalışmalar hızla ilerlemektedir.

- **Standartlar:** Hâlihazırda jeopolimer beton için kapsamlı, evrensel bir standart bulunmamakla birlikte, birçok ülke kendi ulusal standartlarını veya geçici kılavuzlarını yayınlamıştır. Ayrıca, uçucu kül esaslı jeopolimerler için ASTM C618 standardında genişletmeler yapılmıştır (Kriven ve diğerleri, 2025; Ricciotti, Frettoloso, Franchino, Pisacane, Aversa, 2025).
- **Kalite Kontrol:** Endüstriyel ölçekte, kalite kontrol sadece nihai ürün testi ile sınırlı kalmamalı, tüm üretim hattını kapsayan bir İstatistiksel Proses Kontrolü (SPC) sistemine dayandırılmalıdır. Giriş hammaddelerinin kimyasal ve fiziksel analizi, prizlenmemiş jeopolimerin işlenebilirlik testleri ve sertleşmiş numunelerde mekanik dayanım, porozite, su emme ve kimyasal dayanıklılık testleri rutin olarak yapılmalıdır (Allahverdi, Vafaei, Maghsoodloorad, 2017).
- **Sertifikasyon:** Ürünlerin yapısal uygulamalarda kullanılabilmesi için CE İşareti veya yerel bina kodlarına uygunluk sertifikası gibi belgeleri alması gerekir. Bu sertifikalar, ürünün performansının bağımsız kuruluşlar tarafından onaylandığını gösterir ve mühendisler, mimarlar ve müteahhitler nezdinde güven oluşturur (Kriven ve diğerleri, 2025).

3.5.Priz Süresi Kontrolü

Jeopolimerlerin sentezi, esasen amorf bir aluminosilikat ağının polikondenzasyon reaksiyonu ile oluşan üç boyutlu yapıların inşası sürecidir. Bu karmaşık kimyasal dönüşümün pratikteki en kritik göstergelerinden biri, şekillendirilmiş karışımın akışkanlığını kaybederek rijit bir yapı kazanmaya başladığı priz süresidir (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024). Priz süresi kontrolü, yalnızca üretim sürecinin planlanabilirliği için değil, aynı zamanda nihai ürünün mekanik dayanımı, dayanıklılığı ve mikro yapısal

homojenliği üzerinde etkili bir rol oynadığı için jeopolimer teknolojisinin temel taşlarından birini oluşturur (Wang, T., Rao, F., ve diğerleri, 2024). Sürecin optimizasyonu, aktive olmuş alkali çözelti ile katı uçucu kül, slag veya diğer pozzolanik malzemeler arasında gerçekleşen reaksiyonların kinetiğinin hassas bir şekilde yönetilmesine bağlıdır (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024).

Priz süresi üzerinde etkili parametreler çok boyutludur ve bu parametreler yakın bir etkileşim içindedir. Bunların başında, aktivasyon çözeltisinin konsantrasyonu (özellikle M_2O/SiO_2 ve SiO_2/Al_2O_3 mol oranları), alkalilik seviyesi (pH) ve kullanılan alkali kaynağının türü (sodyum veya potasyum hidroksit/silikat) gelir (Poojalakshmi, Nagarajan, Sudhakumar, Thomas, 2025). Yüksek konsantrasyonlu çözeltiler genellikle reaksiyon hızını artırarak prizi hızlandırma eğilimindeyken, optimum seviyenin üzerindeki aşırı alkalilik, gereğinden fazla hızlı bir reaksiyona ve kontrolsüz bir prizlenmeye yol açabilir (Ukritnukun, Koshy, Rawal, Castel, Sorrell, 2020). Aynı şekilde, hammaddenin kimyasal ve mineralojik kompozisyonu, özellikle reaktif silis ve alümina içeriği, kalsiyum oranı ve partikül boyut dağılımı, çözünme ve polimerizasyon hızlarını doğrudan etkiler (Djobo, Stephan, 2021). Örneğin, yüksek kalsiyum içeren malzemeler daha hızlı bir priz reaksiyonu sergilerken, saf metakaolin esaslı sistemler daha yavaş bir priz sürecine sahip olabilir (Poojalakshmi, Nagarajan, Sudhakumar, Thomas, 2025).

Karışım tasarımının yanı sıra, kür koşulları da priz dinamiğinde kritik bir rol oynar. Ortam sıcaklığındaki artış, reaksiyon kinetiğini önemli ölçüde hızlandırarak priz süresini kısaltır (Wang, T., Rao, F., ve diğerleri, 2024). Bu nedenle, özellikle sıcak iklimlerde veya masif dökümlerde açığa çıkan ekzotermik reaksiyon ısısı, priz süresinin kontrol altına alınmasını zorlaştırabilir (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024). Süreci yönetmek amacıyla, endüstriyel uygulamalarda kimyasal katkı maddelerinin kullanımı yaygın bir stratejidir (Djobo, Stephan, 2021). Reaksiyonu geciktirici olarak boratlar, şekerler veya bazı organik asit tuzları kullanılabilirken, prizi hızlandırmak için kalsiyum alüminatlar (CaO) veya lityum bileşikleri gibi maddeler etkili olmaktadır. Bu katkılar, çözelti içindeki iyonların çözünürlüğünü veya polikondenzasyon reaksiyonunun spesifik aşamalarını

modifiye ederek davranışı değiştirir (Ukritnukun, Koshy, Rawal, Castel, Sorrell, 2020).

BÖLÜM 4

JEOPOLİMERLERİN MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

GİRİŞ

Jeopolimerlerin mühendislik uygulamalarında tercih edilmesini sağlayan temel unsur, bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikler bakımından önemli üstünlükler sunmasıdır. Jeopolimerlerin dayanım davranışı, N-A-S-H ve C-A-S-H gibi amorf jel fazlarının nano-yapısal düzenlenmesine, Si/Al oranı, aktivatör türü, molarite ve kür koşulları gibi parametrelerle yakından ilişkilidir. Bu bölümde, basınç ve eğilme dayanımı, gözeneklilik-yoğunluk ilişkisi, geçirgenlik özellikleri ve bunların dayanıklılık performansına etkileri sistematik biçimde ele alınmaktadır.

Jeopolimer matrisinin kompakt yapısı, düşük kapiler su emme ve düşük gözenek bağlantılılığı sayesinde su geçirimsizliği ve iyon difüzyon katsayıları Portland çimentosuna kıyasla birkaç mertebe daha düşüktür. Böylece donma-çözülme, tuz kristallenmesi, klor difüzyonu ve sülfat etkisi gibi uzun dönem bozunma mekanizmaları karşısında daha kararlı bir davranış ortaya çıkar. Kalsiyum içeriği sınırlı olduğu için asit ve sülfat etkilerinde PC betonunda görülen genişleyici reaksiyon ürünleri oluşmaz; bu da yapısal bütünlüğün korunmasına katkı sağlar.

Yüksek sıcaklık performansı jeopolimerlerin en ayırt edici özelliklerinden biridir. Termal bozunma davranışı Portland çimentosu sistemlerinden farklı olarak, 800–1000 °C'ye kadar yapının büyük ölçüde korunmasıyla karakterizedir. Bu nedenle yangın dayanımı, refrakter özellikler ve termal şok direnci bakımından jeopolimerler ileri uygulamalar için önemli bir potansiyele sahiptir. Buna ek olarak uzun dönem dayanım, mikroyapısal kararlılık ve sürdürülebilirlik göstergeleri incelenmektedir. Jeopolimerlerde polimerizasyonun zaman içinde yavaşça devam etmesi, dayanımın yıllar içinde stabilize olmasını veya artmasını sağlayabilir. Düşük CO₂ emisyonu, daha az enerji gereksinimi ve atık esaslı hammaddelerin kullanımı ise bu malzemeleri çevresel açıdan güçlü bir alternatif haline getirir.

Bu bölüm, tüm bu özellikleri bütüncül bir perspektifle değerlendirerek jeopolimerlerin mühendislik performansını belirleyen temel fiziksel ve mekanik parametrelerin kapsamlı bir çerçevesini sunmaktadır.

4.1.Basınç ve Eğilme Dayanımı

Jeopolimerlerin, Portland çimentosuna (PC) alternatif bir yapı malzemesi olarak kabul görmesindeki en temel dayanak, sergiledikleri üstün mekanik performanstır. Bu performans, hem daha hızlı priz alma ve dayanım kazanma süreçlerinde hem de ulaştıkları yüksek nihai dayanım değerlerinde kendini gösterir (Castillo ve diğerleri, 2021). Malzemenin bu karakteristik özellikleri, temel olarak, amorf yapıdaki alumino-silikat ağının (N-A-S-H veya C-A-S-H) nano düzeydeki üç boyutlu ve oldukça organize yapısından kaynaklanmaktadır (Lv, Wang, Han, Li, Peng, 2023).

Jeopolimerizasyon reaksiyonu, başlangıç malzemelerindeki alüminyum (Al^{3+}) ve silisyum (Si^{4+}) oksitlerin alkali çözeltilerde çözünmesi, ardından bu çözülmüş türlerin yeniden düzenlenmesi ve su çıkışıyla sonuçlanan bir süreçle ilerler. Bu sürecin nihai ürünü, $Si - O - Al - O - Si$ oksit köprüleriyle oluşturulmuş, uzun ve dayanıklı bir polimerik ağıdır. Bu ağın topolojik düzenliliği ve bağ enerjisinin yüksekliği, mekanik dayanımın ana belirleyicisidir (Kumar, Kinuthia, Adeleke, 2025).

Portland çimentosunun hidrasyon ürünü olan ve kısmen amorf, tabakalı bir yapı sergileyen kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazının aksine, jeopolimerlerdeki sodyum-alümino-silikat hidrat (N-A-S-H) fazı, çok daha yoğun, homojen ve düşük poroziteli bir mikro yapı oluşturur. Bu kompakt yapı, yük transferini daha homojen bir şekilde dağıtarak mikro çatlak oluşumunu ve ilerlemesini sınırlandırır. Böylece, jeopolimerler özellikle erken dönemle daha yüksek dayanım değerlerine ulaşırlar (Stel'makh ve diğerleri, 2025).

Isıl kür değerinin altında aktive edilen uçucu kül veya metakaolin esaslı jeopolimer sistemlerde, 24 saat gibi kısa sürelerde 25–40 MPa, 7 gün sonunda ise 50–70 MPa seviyelerinde basınç dayanımının elde edilmesi mümkündür. Bu özellik, onları prefabrik eleman üretimi, acil onarım gerektiren yapılar, yüksek erken dayanım isteyen harçlar ve ısıya dayanıklı komponentler için son derece cazip kılmaktadır (Liu, Shi, Zhang, Li, 2023).

Jeopolimerlerin eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu da dikkat çekici düzeydedir. Özellikle organik veya inorganik liflerle takviye edildiklerinde, kırılma tokluklarının geleneksel çimento sistemlerine kıyasla 2-3 kat arttığı gözlemlenmiştir. Bu davranış, $Si - O - Al$ köprülerinin yüksek bağ enerjisine

ve mikro çatlak uçlarındaki gerilme yığılmalarını etkin bir şekilde dağıtabilen sürekli ağ yapısına bağlanmaktadır (Wang ve diğerleri, 2023).

4.1.1. Kimyasal Bileşim ve Si/Al Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi

Jeopolimerlerin mekanik performansını ve mikroyapısal gelişimini şekillendiren en kritik parametrelerden biri, hammaddedeki Silisyum (Si) ve Alüminyum (Al) elementlerinin molar oranıdır (Si/Al). Bu oran, oluşan jeopolimer ağının kimyasal bağ türünü, yoğunluğunu, çapraz bağlanma derecesini ve dolayısıyla makro ölçekteki dayanımını doğrudan kontrol eder (Davidovits, 1991).

Düşük Si/Al Oranları ($\approx 1-1.5$): Düşük Si/Al oranlarında, sistemdeki $[\text{AlO}_4]^{5-}$ tetrahedronlarının sayısı fazladır ve her bir negatif yüklü tetrahedron, dört $[\text{SiO}_4]^{4-}$ birimiyle çevrelenerek yüksek bir negatif yük yoğunluğu oluşturur. Oluşan yük dengesizliğini nötralize etmek için sistemde yüksek miktarda alkali katyon (Na^+ , K^+) bulunması gerekir. Bu durum, reaksiyon kinetiğini hızlandırarak erken yaşlarda dayanım sağlar. Literatür çalışmalarında, 7 günde 40 MPa ve üzeri yüksek dayanım değerleri elde edildiği görülmektedir (Ozer, Soyer-Uzun, 2015). Ancak, ağ yapısında iyonik bağ karakterinin baskın olması ve fazla alkali içeriğin sebep olduğu yapısal gevşemeler nedeniyle, uzun vadeli dayanım sabitlenebilir veya hafif bir düşüş gösterebilir. Bu aralıkta oluşan yapılar genellikle psödosit ($[\text{Na}, \text{K}]-\text{AlSi}_2\text{O}_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) gibi kristalimsi fazlarla karakterize edilir (Van Jaarsveld, Van Deventer, Lorenzen, 1997).

Orta (Optimum) Si/Al Oranları ($\approx 2-3$): Orta Si/Al oranlarında, literatürde maksimum mekanik dayanımın elde edildiği optimum bölge olarak tanımlanır (Wong, 2022). Si/Al oranının yaklaşık 2 olduğu durumlarda oluşan sialat-sialate ($[\text{Na}, \text{K}](\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-)$) ağları, kovalent bağ karakterinin yüksek, iyonik dengesizliklerin ise minimize edildiği ideal bir yapı sunar (Wong, 2022). Bu denge, yüksek bir polimerizasyon derecesi, düşük gözeneklilik ve mükemmel bir bağ sürekliliği ile sonuçlanır. Isıl kür altında aktive edilen metakaolin veya cüruf esaslı jeopolimerlerde, 28 günlük basınç dayanımı 70 - 100 MPa seviyelerine ulaşabilir. Eğilme dayanımı ise genelde 6 - 12 MPa aralığında değişmektedir (Wong, 2022).

Yüksek Si/Al Oranları (≥ 3): Yüksek Si/Al oranlı sistemlerde silika içeriğinin fazla olması, başlangıçtaki çözünme ve yeniden düzenlenme aşamalarının kinetiğini yavaşlatır. Ancak, uygun alkali aktivasyon sağlandığında, bağ enerjisi çok yüksek olan Si-O-Si bağlarının hakim olduğu bir ağ yapısı teşekkül eder. Bu nedenle, reaksiyon başlangıcı yavaş olsa da, uzun vadede dayanım artışı devam eder ve 100–120 MPa gibi çok yüksek değerler gözlemlenebilir (Khan, Iqbal, Soliyeva, Alid, Elboughdiri, 2025). Bununla birlikte, Si/Al oranının 4'ün üzerine çıkması durumunda, aşırı miktardaki reaktif olmayan serbest SiO₂ jelleri veya kristal kuvars kalıntıları gibi silika fazları bağ sürekliliğini bozarak mikro çatlaklar için inisiyasyon noktaları oluşturabilir ve dayanım düşmesine sebebiyet verebilirler (Davidovits, 2020).

Spektroskopik Bulgular ve Yapısal İlişkiler: Kimyasal bileşimde görülen değişimler, spektroskopik yöntemlerle net bir şekilde takip edilebilir. FTIR analizlerinde, düşük Si/Al oranlarında yaklaşık 950-970 cm⁻¹ de gözlenen T-O-T (T: Si veya Al) esneme titreşim piki, Si/Al oranı arttıkça yaklaşık 1000-1050 cm⁻¹ bölgesine doğru kayar. Bu kayma, ağ yapısındaki Si-O-Si bağlarının oranının arttığının ve polimerizasyon derecesinin yükseldiğinin güçlü bir kanıtıdır. Benzer şekilde, ²⁹Si NMR spektrumlarındaki Q⁴(mAl) (m=0-4) birimlerinin göreceli yoğunlukları, mekanik dayanımla doğrudan ilişkilidir. Optimum dayanım genellikle, yüksek oranda Q⁴(2Al) ve Q⁴(1Al) birimlerinin bulunduğu, yani ağın hem Al ile çapraz bağlanmış hem de yüksek bağ enerjili Si-O-Si bölgeleri içerdiği kompozisyonlarda elde edilir (Xu, Van Deventer, 2000).

Dayanım Gelişiminin Modellenmesi: Si/Al oranının dayanım gelişimi üzerindeki etkisi matematiksel modellerle de ifade edilebilir (Davidovits, 1991).. İlk birkaç gün olaarak tanımlanan erken yaşlarda, dayanım artışı genellikle logaritmik bir eğilim gösterir: $\sigma_c(t) = \sigma_0 + k_1 \ln(t)$ (Davidovits, 1991).

Burada;

$\sigma_c(t)$: t zamanındaki basınç dayanımı,

σ_0 : başlangıç dayanımı,

k_1 : alkali aktivasyon şiddeti ve Si/Al oranına bağlı bir hız sabitidir.

Uzun vadede ise, reaksiyonların difüzyon kontrollü hale gelmesiyle dayanım artışı bir asimptota yaklaşır ve bu davranış üstel bir fonksiyonla

modellenebilir:

$$\sigma_c(t) = \sigma_{\infty} (1 - e^{-(k_2 t)}) \text{ (Davidovits, 1991).}$$

Burada;

σ_{∞} : teorik nihai dayanım,

k_2 : Si/Al oranı ve kür koşullarına bağlı ikinci bir hız sabitidir.

Yüksek Si/Al oranlı sistemlerde, erken yaş hız sabiti (k_1) küçük olmasına rağmen, teorik nihai dayanım (σ_{∞}) çok yüksek değerlere ulaşabilir (Davidovits, 1991).

4.1.2. Alkali Aktivatörün Kimyasal Yapısı ve Konsantrasyonunun Sistem Davranışına Etkisi

Jeopolimerizasyon reaksiyonlarında alkali aktivatör, yalnızca başlatıcı bir katalizör olmanın ötesinde, reaksiyon stokiyo metrisinin temel bir bileşeni ve nihai ürünün kimyasal, mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin başlıca mimarı konumundadır (Castillo ve diğerleri, 2021). Aktivatörün kimyasal türü, molar konsantrasyonu, silika modülü ($\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$, M: Na veya K) ve kullanılan katyonun (Na^+ veya K^+) iyonik özellikleri; çözeltinin pH değerini, aluminosilikat kaynak malzemenin çözünme kinetiğini, ara jel fazlarının oluşum mekanizmasını, polikondenzasyon derecesini ve dolayısıyla malzemenin makro ölçekli performansını doğrudan şekillendirir (Kolade, Ikotun, Oyejobi, 2025).

Aktivatör Türünün Mekanizma ve Performans Üzerindeki Etkileri

Endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3)'tır. Her biri jeopolimerizasyon sürecine farklı mekanizmalarla katkıda bulunur:

- **Sodyum Hidroksit (NaOH):** Güçlü bir baz olarak, aluminosilikat yapıdaki Si-O-Si ve Al-O-Si kovalent bağlarının hidrolizini hızlandırarak $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ve $[\text{AlO}_4]^{5-}$ tetrahedral birimlerinin çözeltiye geçişini sağlar (Hosan, Haque, Shaikh, 2016). Ancak, tek başına kullanıldığında sisteme ek silika sağlamadığı için, oluşan geçici jel fazlarının Si/Al oranı nispeten düşük kalır. Bu durum, polimerizasyon derecesi sınırlı, daha gözenekli ve mikro çatlaklara eğilimli bir N-A-S-H ağ yapısı ile sonuçlanır (Alves, Leklou, de Barros, 2020). Mekanik performans açısından, NaOH ile aktive edilen sistemlerin eğilme dayanımları, sodyum silikat kullanılan

karışımlara kıyasla tipik olarak %10–15 daha düşük değerler sergiler (Efe, Öz, Bayrak, Kaplan, Aydın, 2024).

- **Sodyum Silikat (Na_2SiO_3 , Su Camı):** Yapısında bulunan çözünür silika (SiO_2) sayesinde, hem güçlü bir alkali ortam sağlar hem de polikondenzasyon aşaması için gerekli olan silikat monomerlerini sisteme doğrudan kazandırır. Bu ikili fonksiyon, daha homojen, yoğun ve yüksek derecede polimerize olmuş bir N-A-S-H jel yapısının oluşumuna katkıda bulunur. Sodyum silikat çözeltisinin silika modülü ($M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı), sistemin reolojisi ve nihai özellikleri üzerinde belirleyicidir (Castillo ve diğerleri, 2021). Genellikle 1.5-2.5 aralığındaki modül değerleri, optimum işlenebilirlik, reaksiyon kinetiği ve dayanım dengesini temin eder (Efe, Öz, Bayrak, Kaplan, Aydın, 2024). $M_s < 1.5$ olduğunda, aşırı alkali içerik gözenekliliği artırır; $M_s > 2.5$ olduğunda ise, çözeltinin aşırı viskoz hale gelmesi karıştırma ve yerleştirme zorluklarına ve düzensiz bir jel oluşumuna yol açabilir (Ketana, Reddy, Rao, Shrihari, 2021).
- **Potasyum Esaslı Aktivatörler (KOH , K_2SiO_3):** Sodyum esaslı eşdeğerlerine kıyasla daha büyük iyonik yarıçapa sahip olan K^+ iyonlarını içerir. Bu fiziksel fark, K^+ iyonlarının daha az miktarda koordinasyon suyu tutmasına ve jeopolimer ağındaki boşluklarda farklı bir paketlenme davranışı sergilemesine neden olur (Gonçalves, Lana, Sales, Aguilar, 2022). Bunun sonucunda, potasyumlu sistemlerde kuruma büzülmesi önemli ölçüde azalır, mikro çatlak oluşumu minimize edilir ve bu da malzemenin tokluk ve darbe dayanımında gözle görülür bir iyileşme sağlar (Gonçalves, Lana, Sales, Aguilar, 2022). Ayrıca, potasyum esaslı aktivatörlerin yüksek sıcaklık kür koşullarında daha etkin bir polimerizasyon sağlamaktadır (Hosan, Haque, Shaikh, 2016). Bununla birlikte, bu sistemlerin genellikle daha yüksek olan maliyeti, endüstriyel ölçekte uygulanabilirlikleri söz konusu olduğunda ekonomik bir optimizasyon gerektirir (Esparham, Moradikhou, Avanaki, 2020).

Aktivatör Molaritesinin Reaksiyon Kinetiği ve Mikroyapı Üzerindeki Kritik Rolü: Alkali aktivatör çözeltisinin molaritesi (OH^- iyon konsantrasyonu), aluminosilikat kaynağın çözünme hızını ve

polikondenzasyonun termodinamik dengesini kontrol eden en hassas parametrelerden biridir (Hu ve diğerleri, 2025). Molaritenin etkisi doğrusal olmayıp, optimum bir aralıkta maksimuma ulaşan bir eğilim gösterir:

- **Düşük Molarite Aralığı (< 8M):** Yetersiz OH^- iyon konsantrasyonu, aluminosilikat çözünmesini yavaşlatır ve priz süresini uzatır. Geçici jel fazlarının oluşumu zayıf kalır, bu da düşük erken yaş dayanımı ve yüksek porozite ile sonuçlanır (Shilar ve diğerleri, 2022).
- **Optimum Molarite Aralığı (10–12M):** Bu aralık, birçok uçucu kül ve metakaolin sistemi için ideal dengeyi temsil eder. Yeterli çözünme hızı, kontrollü bir polikondenzasyon ve yoğun, düşük poroziteli bir mikroyapı sağlanır. Reaksiyon homojen bir şekilde ilerler ve yüksek mekanik dayanım değerlerine ulaşılır (Bashar, Alengaram, Jumaat, Islam, 2014).
- **Yüksek Molarite Aralığı (> 14M):** Aşırı yüksek OH^- konsantrasyonu, reaksiyonu aşırı hızlandırarak homojen olmayan, düzensiz bir jel oluşumuna neden olur. Hızlı reaksiyon, işlenebilirliği düşürür, lokal ısınmalara yol açar ve aşırı serbest alkali varlığı, hem gözenekliliği artırır hem de yüzeyde beyaz lekeler şeklinde kendini gösteren effloresans (tuz kusması) problemine sebep olur (Karaaslan, Yener, 2021).

Endüstriyel Optimizasyon ve Sürdürülebilir Yaklaşımlar:

Jeopolimerlerin endüstriyel ölçekte üretimi için, aktivatör parametrelerinin hammadde türüne ve sıcaklık veya süre gibi kür rejimine bağlı olarak entegre bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir (Heshmati, Sheikh, Hadi, 2025). Bu duruma örnek olarak, metakaolin esaslı sistemlerde 12M NaOH ve $\text{Ms}=2.0$ değerine sahip sodyum silikatın kombinasyonu, 60 MPa üzerinde basınç dayanımı ve minimum su geçirgenliği sağlarken; işlenebilirliğin daha kritik olduğu uçucu kül sistemlerinde 8–10M gibi daha düşük molariteler tercih edilebilir (Bashar, Alengaram, Jumaat, Islam, 2014).

Son dönemde, sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği odaklı olarak, hibrid aktivatör sistemleri üzerine yoğunlaşmaktadır. $\text{NaOH} + \text{K}_2\text{SiO}_3$ karışımları veya Na_2CO_3 gibi daha zayıf alkalilerin düşük konsantrasyonlarda kullanıldığı sistemler, hem yüksek molarite kaynaklı çevresel ve iş güvenliği

risklerini azaltmakta hem de reaksiyon kinetiğini daha kontrollü bir seviyede tutabilmektedir (Shilar ve diğerleri, 2022). Bu tür yaklaşımlar, jeopolimer teknolojisinin endüstriyel benimsenmesi önündeki engelleri kaldırmada önemli bir potansiyele sahiptir (Hu ve diğerleri, 2025).

4.1.3.Kür Koşullarının Optimizasyonu ve Malzeme Özelliklerine Zamana Bağlı Etkileri

Jeopolimerizasyon, termal aktivasyonla hızlandırılan, Arrhenius davranışı sergileyen karmaşık bir heterojen reaksiyonlar dizisidir (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024). Bu süreçte kür koşulları sıcaklık, süre ve nem, malzemenin mikroyapısal organizasyonu, por ağ yapısı ve nihai mekanik performansı üzerinde belirleyici bir role sahiptir Castillo ve diğerleri, 2021). Sıcaklık artışının reaksiyon hızını katlanarak artırmasına karşın, aşırı termal enerji kontrolsüz reaksiyon kinetiğine ve mikroyapısal kusurlara yol açabilmektedir (A., Lopes, S., Lopes, Pinto, 2023).

Kür Sıcaklığının Reaksiyon Kinetiği ve Mikroyapı Üzerindeki Etkisi: Aluminosilikat kaynak malzemelerin çözünme kinetiği ile polikondenzasyon reaksiyonlarının hızı, uygulanan kür sıcaklığıyla doğrudan ilişkilidir (Cui ve diğerleri, 2023). Sıcaklık optimizasyonu, sadece reaksiyonun tamamlanma süresini değil, aynı zamanda oluşan jeopolimer ağının morfolojisini de etkiler (Heshmati, Sheikh, Hadi, 2025).

- **Optimum Sıcaklık Aralığı (60–80°C):** Metakaolin ve uçucu kül esaslı sistemler için bu aralık, aluminosilikat çözünmesi ile N-A-S-H jel fazının oluşum hızı arasında ideal dengeyi sağlar (Seidenstuecker ve diğerleri, 2019). Bu dengeli kinetik, homojen ve kompakt bir mikroyapının gelişimine olanak tanıyarak yüksek mekanik dayanım ve düşük porozite değerleri elde edilmesini mümkün kılar (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024).
- **Yüksek Sıcaklık Rejimi (>90°C):** Bu sıcaklıklarda, matris içindeki serbest suyun buhar basıncı, henüz yeterli mekanik mukavemete ulaşmamış olan jel yapısını zorlamaya başlar (Castillo ve diğerleri, 2021). Kapiler boşluklardaki suyun ani buharlaşması, mikro çatlak oluşumuna, iç gerilmelere ve heterojen sertleşmiş bölgelerin ortaya çıkmasına neden olur. Bu durum, nihai dayanımda geri dönüşü

olmayan kayıplarla sonuçlanabilir (A., Lopes, S., Lopes, Pinto, 2023).

- **Düşük Sıcaklık Rejimi (30–40°C):** Düşük sıcaklıklarda reaksiyon kinetiği yavaş olmasına rağmen, daha kontrollü ilerleyen bir polimerizasyon süreci gözlemlenir (Cui ve diğerleri, 2023). Bu kontrollü süreç, daha düzenli ve sürekli bir ağ yapısının teşekkül etmesine katkıda bulunur. 7-14 gün gibi uzun süreli düşük sıcaklık kürü, kısa süreli yüksek sıcaklık kürüne kıyasla benzer veya daha üstün mekanik özellikler sağlayabilmektedir (Heshmati, Sheikh, Hadi, 2025).

Optimum kür sıcaklığının seçimi, kullanılan alkali aktivatörün kimyasal yapısına da bağlıdır. NaOH gibi güçlü bazlarla aktive edilen sistemlerde daha yüksek sıcaklık gerekebilirken, sodyum silikat içeren karışımlar düşük sıcaklıklarda dahi etkin bir şekilde reaksiyona girebilmektedir (Seidenstuecker ve diğerleri, 2019).

Kür Süresinin Reaksiyon Derecesi Üzerindeki Etkisi ve Olgunlaşma Süreci: Jeopolimerizasyon, çözünme, polikondenzasyon ve jel olgunlaşması olmak üzere birbirini takip eden aşamalardan oluşur (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024). Kür süresi, bu aşamaların her birinin tamamlanma derecesini belirler (Castillo ve diğerleri, 2021).

- **İlk Isıl Aktivasyon (24-48 Saat):** Bu süre, reaksiyonun %80-90 oranlarında tamamlanması için yeterlidir (Cui ve diğerleri, 2023). Bu dönemde, çözünen aluminosilikat türleri hızla polikondenze olarak ana N-A-S-H ağ yapısını oluşturur ve malzeme temel mekanik dayanımının büyük bölümünü kazanır (A., Lopes, S., Lopes, Pinto, 2023).
- **Uzun Vadeli Yaşlandırma (Aging):** Isıl kürün sona ermesinden sonra dahi, jeopolimerizasyon reaksiyonu oda sıcaklığında aylar boyunca yavaş bir kinetikle devam eder (Heshmati, Sheikh, Hadi, 2025). Bu uzun süreli olgunlaşma sürecinde, başlangıçta reaksiyona girmemiş taneciklerin kademeli olarak çözünmesi ve mikroyapıdaki boşlukların kısmen doldurulması gerçekleşir ve genellikle %5-10 seviyelerinde ek bir dayanım artışı ile sonuçlanır (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024).

- **Mikroyapısal İyileşme:** Uzun süreli kürleme, sistemdeki suyun yeniden dağılımını ve fazla aktivatörün dengelenmesini sağlar (Seidenstuecker ve diğerleri, 2019). 28 gün ve sonrasında yapılan incelemeler, kapiler boşluk oranında azalma ve genel yoğunlukta artış olduğunu göstermektedir (Castillo ve diğerleri, 2021).

Nem Kontrolünün Polimerizasyon ve Yapı Bütünlüğü Üzerindeki

Kritik Rolü: Jeopolimer sistemlerde nem kontrolü, Portland çimentosu sistemlerine kıyasla çok daha hayati bir öneme sahiptir (A., Lopes, S., Lopes, Pinto, 2023). Nem, iyonik difüzyon için bir taşıyıcı ortam sağlarken, aynı zamanda kontrolsüz buharlaşma durumunda büzülme çatlaklarına da sebep olabilir (Cui ve diğerleri, 2023).

- **Yüksek Bağlı Nem Koşulları (>%95):** Bu koşullar, yüzeyden su kaybını minimize ederek büzülme çatlakları oluşumunu engeller (Heshmati, Sheikh, Hadi, 2025). Aynı zamanda, reaktif iyonların difüzyonunu kolaylaştırarak polimerizasyon reaksiyonunun homojen bir şekilde ve tam olarak gerçekleşmesini destekler (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024).
- **Düşük Nemli Ortamlar:** Özellikle ince kesitli elemanlarda, düşük nem hızlı bir yüzey kurumasına ve kabuklaşma etkisine yol açar (Castillo ve diğerleri, 2021). Bu durumda, yüzeyde yoğun ve geçirimsiz bir jel tabakası oluşurken, iç kısımlarda reaksiyon eksik kalır ve heterojen bir mikroyapı gelişir (A., Lopes, S., Lopes, Pinto, 2023).
- **Kontrollü Nem Uygulamaları:** Buhar kür odaları veya izole kür kalıpları gibi kapalı sistemler, ideal nem koşullarının sürekliliğini sağlamak için endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Seidenstuecker ve diğerleri, 2019). Bazı çalışmalar, nemin kademeli olarak uzaklaştırıldığı yarı kapalı sistemlerde, polikondenzasyonun daha kontrollü ilerlemesi nedeniyle daha yüksek nihai dayanımlar elde edilebileceğini öne sürmektedir (Cui ve diğerleri, 2023).

Endüstriyel Ölçekte Kür Optimizasyon Stratejileri: Laboratuvar koşullarında standart ısıl kür uygulamaları pratik olsa da, endüstriyel üretimde enerji verimliliği ve üretim hızı gibi ek kısıtlar devreye girer (Castillo ve diğerleri, 2021). Bu bağlamda geliştirilen yaklaşımlar şunlardır:

- **Ortam Sıcaklığında Sertleşen Sistemler:** Yüksek reaktiviteye sahip metakaolin veya yüksek kalsiyum içerikli cüruf kullanılarak, ısı kūr gerektirmeyen ve enerji tüketimini düşüren formūlasyonlar geliştirilmiştir (A., Lopes, S., Lopes, Pinto, 2023).
- **Kademeli Kūrleme:** Önce düşük ($\approx 40^{\circ}\text{C}$), ardından orta ($\approx 70^{\circ}\text{C}$) sıcaklık basamaklarını içeren bu yöntem, termal şok etkisini ve iç gerilmeleri azaltarak daha homojen ve kusursuz bir mikroyapı elde edilmesine olanak tanır (Siyal, Mohamed, Shamsuddin, Ridzuan, 2024).

Mikroyapısal Evrim ve Yaşlanma Süreçlerinin Spektroskopik İzlenmesi: Kūr sürecinin ilerlemesi ve malzemenin yaşı ile birlikte N-A-S-H jel fazında sürekli bir yoğunlaşma ve olgunlaşma gözlemlenir (Cui ve diğērleri, 2023). FTIR spektroskopisinde, T-O-T (T=Si, Al) esneme bantlarındaki kaymalar ve NMR analizlerinde daha az bağılı silikat bağılı olan Q^3 birimlerinden $Q^4(\text{mAl})$, yüksek oranda çapraz bağılı silikat birimlerine doğru olan dönüşüm, polimerizasyon derecesindeki artışın güçlü nedenlerindendir (Heshmati, Sheikh, Hadi, 2025). Bu mikroyapısal olgunlaşma, malzemenin mekanik dayanımının yanı sıra, kimyasal dayanıklılığını, boyutsal kararlılığını ve uzun hizmet ömrü performansını da doğrudan iyileştirici etki göstermektedir (Castillo ve diğērleri, 2021).

4.1.4. Agrega ve Katkı Malzemelerinin Kompozit Davranış Üzerindeki Etkileri

Jeopolimer kompozitlerin mühendislik performansı, sadece bağlayıcı N-A-S-H veya C-A-S-H jel fazının özellikleriyle değil, aynı zamanda agregamatri ara yüzey etkileşimleri ve katkı malzemelerinin sağladığı mikroyapısal sinerji ile belirlenmektedir. Agreganın mineralojik yapısı, tane boyutu dağılımı, yüzey morfolojisi ve katkı malzemelerinin kimyasal reaktivitesi kompozitin mekanik dayanımı, boyutsal kararlılığı ve dayanıklılık performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (T. U., Kumar, M. V., Kumar, Salunkhe, Cep, Nasr, 2024).

Arayüzey Geçiş Bölgesi ve Kimyasal Bağlanma Mekanizmaları:

- Jeopolimer sistemlerde Arayüzey Geçiş Bölgesi (ITZ), geleneksel Portland çimentosu sistemlerinden niteliksel olarak farklılık göstermektedir. Portland çimentosunda ITZ, yüksek poroziteli ve

kalsiyum hidroksit kristallerinin yoğunlaştığı zayıf bir bölge iken; jeopolimer sistemlerde yüksek alkali ortam, agrega yüzeyindeki silika ve alümina fazlarının kısmen çözünmesine olanak sağlar (Chelluri, Hossiney, Chandra, Bekoe, Tia, 2025). Bu kısmi çözünme, matris ile agrega arasında kovalent karakterli Si-O-Si ve Si-O-Al kimyasal köprülerinin oluşumunu tetikler. Bu mekanizmanın sonucunda:

- ITZ bölgesi daha yoğun, kompakt ve mikroyapısal süreksizliklerden arındırılmış bir yapı kazanır,
- Matris-agrega arasındaki mekanik aderans önemli ölçüde artar,
- Çatlak ilerlemesi agregaların etrafından değil, doğrudan içlerinden geçecek şekilde davranış değiştirir (Lang ve diğerleri, 2025).

Bu kimyasal bağlanma mekanizması, jeopolimer betonların yüksek çekme ve eğilme dayanımı, düşük geçirgenlik ve donma-çözülme dayanımı gibi üstün özelliklerinin temelini oluşturmaktadır (Khasawneh, 2025).

Agrega Türü ve Mineralojik Özelliklerin Sistem Performansına Etkisi: Agreganın mineralojik bileşimi, jeopolimer matris ile etkileşim derecesini belirleyerek kompozit performansını doğrudan etkiler (Capasso ve diğerleri, 2025).

- **Silisce Zengin Agregalar (Bazalt, Granit):** Yüksek alkali ortamda yüzeyde kısmi çözünme göstererek güçlü kimyasal bağlar oluşturur. Bu agregalar, yüksek mekanik dayanım ve aşınma direnci gerektiren uygulamalar için uygundur (Zhou ve diğerleri, 2025).
- **Kalsiyum Karbonat İçeren Agregalar (Kireçtaşı):** Kalsiyum iyonu varlığı, ITZ bölgesinde lokal C-A-S-H fazı oluşumunu teşvik eder. Ancak karbonat yapısının yüksek pH'ta sınırlı çözünürlüğü, kimyasal bağlanma potansiyelini nispeten kısıtlar. (Alanazi, 2022).
- **Hafif Agregalar (Genleştirilmiş Kil, Perlit):** Yüksek gözeneklilik ve yüzey alanı ile düşük yoğunluklu kompozitler üretmeye olanak sağlarlar. Ancak yüksek su emme kapasiteleri nedeniyle karışım suyu dengesinin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir (Bhavani Siram, Sathyan,2022).

Agreganın tane boyutu dağılımı ise kompozitin paketleme yoğunluğu, işlenebilirlik ve termal iletkenlik gibi özelliklerini etkileyen kritik bir parametredir. İyi derecelendirilmiş agrega karışımları, daha homojen bir jel

dağılımı ve yüksek yoğunluklu mikroyapı oluşumuna katkı sağlar (Maaty, Ghazy, Eldmarny, 2025).

Katkı Malzemelerinin Mikroyapısal Etkileşim Mekanizmaları

Jeopolimer matrisin özellikleri, çeşitli katkı malzemeleri ile kimyasal ve fiziksel mekanizmalar üzerinden modifiye edilebilmektedir (Azimi, Toufigh, 2023).

- **Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (GGBS):** %10-30 oranlarındaki ilavesi, sisteme kalsiyum iyonları (Ca^{2+}) kazandırarak hibrit bir jel yapısı oluşturur (Gaddafi, 2025).

Klasik N-A-S-H jeli yanında C-A-S-H fazlarının oluşumu:

- Erken yaş dayanımında %30-40 seviyelerinde artış sağlar,
- Oda sıcaklığında kürlenmeyi mümkün kılar,
- Termal küre gereksinimini azaltır,
- Mikroyapısal poroziteyi düşürür (Gaddafi, 2025).

Ayrıca GGBS, pH stabilizasyonu sağlayarak iyonik difüzyonu sınırlandırır ve kimyasal dayanıklılığı artırır (Gaddafi, 2025).

- **Mikrosilika (Silika Dumanı):** Sub-mikron boyutları ($<0.1 \mu m$) ve yüksek amorf silika içeriği ile hem fiziksel dolgu hem de kimyasal reaksiyon etkisi gösterir. Reaktif kısmı, sistemin Si/Al oranını yükselterek daha yüksek polimerizasyon dereceli N-A-S-H jeli oluşumuna katkıda bulunur. Fiziksel dolgu etkisi ise kapiler boşlukları doldurarak geçirgenliği azaltır ve yoğunluk sağlar (Vanitha ve diğerleri, 2024).
- **Uçucu Kül (Düşük Kalsiyumlu):** Jeopolimer sistemlerin temel bileşenlerinden olup, agrega veya bağlayıcı kısmi ikamesi olarak kullanılabilir. Cam fazındaki aluminosilikat yapı, ısı kütür koşullarında çözünerek Si-O-Al ağının gelişimini destekler. Geç reaksiyon göstermesine rağmen yüksek nihai dayanım değerleri sağlar (Khater, Gharieb, 2024).
- **Nano Katkılar (Nano-SiO₂, Nano-Al₂O₃):** Nano boyutlu parçacıklar, nükleasyon merkezleri oluşturarak jel oluşum kinetiğini hızlandırır. Özellikle nano-silika, matris-agrega ara yüzeyinde kimyasal bağ oluşumunu destekleyerek ITZ'nin yoğunluğunu artırır.

Ayrıca mikro çatlak ucu blokajı sağlayarak tokluk-dayanım dengesini iyileştirir (Tao, Xiangqian, Changsheng, Chiyu, 2025).

Hibrid Katkı Sistemleri ve Endüstriyel Optimizasyon

Modern jeopolimer kompozit tasarımında, çok bileşenli katkı sistemleri ile sinerjik etkilerden yararlanılmaktadır (Šimonová ve diğerleri, 2024). Öne çıkan kombinasyonlar:

- **%70 Uçucu Kül + %30 GGBS:** Oda sıcaklığında reaksiyon gösterebilen, yüksek erken dayanımlı sistemler sağlar (Gaddafi, 2025).
- **Uçucu Kül + Mikrosilika + Nano-SiO₂:** Üstün yoğunluk ve kimyasal dayanım sunan kompozitler geliştirilmesine olanak tanır (Raj ve arkadaşları, 2023).
- **Kalsiyum İçeren Agregat + GGBS:** ITZ bölgesinde lokal C-A-S-H fazı oluşumunu artırarak agregat-matris aderansını güçlendirir (Artyk ve arkadaşları, 2024).

Bu hibrid yaklaşımlar, mekanik dayanımın yanı sıra termal genleşme uyumu, donma-çözülme direnci ve karbonatlaşma dayanımı gibi uzun ömür parametrelerini de iyileştirmektedir (Shilar ve diğerleri, 2022).

Mikroyapı-Mekanik Performans İlişkisi ve Karakterizasyon

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizleri, katkılı jeopolimer sistemlerde ITZ kalınlığının 1-5 µm seviyelerine indiğini ve bu bölgenin kimyasal olarak bağlanmış yoğun bir yapı kazandığını göstermektedir (Chiranjeevi, Abraham, Rath, Praveenkumar, 2023). Bu mikroyapısal iyileşmelerin mekanik performansa yansımaları:

- Basınç dayanımında %20-50 seviyelerinde artış,
- Çekme ve eğilme dayanımında belirgin iyileşme,
- Su ve iyon geçirgenliğinde önemli azalma,
- Donma-çözülme dayanımında kayda değer artış olarak görülmektedir (Balapanov, Montayev, Aygun, Uysal, 2024).

Bu kapsamlı performans iyileştirmeleri, jeopolimer kompozitleri geleneksel çimento esaslı malzemelere alternatif olarak öne çıkarmakta ve uzun hizmet ömrü gerektiren yapısal uygulamalar için cazip bir seçenek haline getirmektedir (Q. Han ve diğerleri, 2022).

4.1.5. Lif Takviyeli Jeopolimer Kompozitlerde Mekanik Davranış ve Tokluk Mekanizmaları

Jeopolimer matrisler, seramik malzemelerde karakteristik olan gevrek kırılma davranışı sergilemektedir (Ranjbar, Zhang, 2020). Bu doğal gevrekliğin yol açtığı ani enerji salınımı, yapısal uygulamalarda sünek davranış gereksinimi ile çelişmekte ve malzemenin kullanım alanını kısıtlamaktadır. Lif takviyesi, bu sorunu gidermek ve kompozitin tokluk ile deformasyon kapasitesini artırmak amacıyla uygulanan en etkili yöntemlerden biridir (Qin ve diğerleri 2023). Bu yöntemin temel işlevi, çatlak ilerlemesi sırasında enerji sönümleyen çoklu mekanizmaları devreye sokmaktır (Sama, Blanco, 2021). Lif köprüleme, çatlak saptırma, lif çekilmesi ve arayüzey sürtünmesi gibi mekanizmalar, tek eksenli yük aktarımını çok eksenli hale getirerek kırılma sürecini kademeli ve kontrol edilebilir bir davranışa dönüştürür (Ranjbar, Zhang, 2020).

Lif Takviye Mekanizmaları ve Enerji Sönümleme Süreçleri

Jeopolimer-lif kompozitlerinde mekanik performans iyileşmesi, sadece liflerin kendi mukavemetinden değil, aynı zamanda lif-matris ara yüzey etkileşiminin niteliğinden kaynaklanmaktadır (Qin ve diğerleri 2023). Bu etkileşim dört temel mekanizma üzerinden gerçekleşir:

- **Çatlak Saptırma:** Lifler, ilerleyen çatlak cephesi ile karşılaştığında, çatlakın doğrusal ilerleme yolunu değiştirerek daha uzun ve dolaylı bir yol izlemesine neden olur. Bu durum, kırılma yüzey alanını artırarak birim hacimde tüketilen enerji miktarını yükseltir (Sama, Blanco, 2021).
- **Köprüleme Etkisi:** Çatlak oluşumu sonrasında lifler, iki çatlak yüzeyini birbirine bağlayarak yük taşıma kapasitesini sürdürür. Bu mekanizma, çatlak oluşmasına rağmen taşıma kapasitesinde ani düşüşlerin önlenmesinde kritik rol oynar (Qin ve diğerleri 2023).
- **Lif Çekilmesi:** Liflerin tamamen kopmak yerine matris içinden sıyrılarak çıkması sürecidir. Bu süreçte lif-yüzey sürtünmesi ile önemli miktarda enerji dissipe edilir ve sünek davranış karakteristiği kazanılır (Sama, Blanco, 2021).
- **Sürtünme ve Ankraj:** Lif yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal aderans, yük aktarım verimliliğini doğrudan etkiler. Pürüzlü yüzeyler

mekanik ankraj sağlarken, kimyasal bağlanma ise arayüzey mukavemetini artırır (Ranjbar, Zhang, 2020).

Bu mekanizmaların sinerjik etkisi, malzemenin kırılma tokluğunda belirgin artışa yol açar; çatlak ilerleme hızı yavaşlar, çekme ve eğilme dayanımı yükselir ve artık mukavemet korunur (Qin ve diğerleri 2023).

Lif Türleri, Özellikleri ve Uygulama Alanları

• Çelik Lifler:

- 200 GPa civarındaki yüksek elastisite modülü ve 1000-2000 MPa aralığındaki çekme dayanımı ile en etkili takviye elemanlarından.
- Alkali ortamda oluşan pasivasyon tabakası sayesinde jeopolimer matris ile kimyasal uyum sağlarlar.
- %1-2 hacimsel oranda kullanıldığında, eğilme dayanımında %40-60, toklukta ise %200'e varan artışlar sağlarlar.
- Darbe dayanımını geleneksel betona kıyasla 10-15 kat artırabilirler.
- Yüksek dozda (>%2) kullanımı işlenebilirlik sorunları ve lif topraklanmasına sebep olma eğilimindedir (Sama, Blanco, 2021).

• Bazalt Lifler:

- Doğal bazalt kayacının eritilmesiyle üretildiklerinden, yüksek sıcaklık ($\geq 600^{\circ}\text{C}$) ve alkali ortamlara karşı üstün dayanım gösterirler.
- Çekme dayanımları 2500-4000 MPa aralığında olup, yoğunlukları ($\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$) düşüktür.
- Cam liflere kıyasla alkali direnci yüksek, karbon liflere kıyasla ise maliyetleri düşüktür.
- Çatlak genişliği kontrolü ve donma-çözülme dayanıklılığı sağlama konusunda etkilidirler (Qin ve diğerleri 2023).

• Polipropilen (PP) Lifler:

- Özellikle plastik büzülme çatlaklarının kontrolü amacıyla yaygın olarak kullanılırlar.
- Alkali ortama dayanıklı, su emmeyen ve düşük yoğunluklu yapıları sayesinde homojen dağılım gösterirler.

- Mekanik dayanım katkıları sınırlı olmakla birlikte, darbe dayanımı ve çatlak kontrolü açısından önemli faydalar sağlarlar (Ranjbar, Zhang, 2020).

- **Cam ve Karbon Lifler:**

- E-cam lifleri yüksek çekme dayanımına sahip olmalarına rağmen, alkali ortamda dayanımları zamanla azalır. Bu nedenle alkali dirençli cam liflerin kullanımı tercih edilir.
- Karbon lifler ise 4000-6000 MPa gibi çok yüksek çekme dayanımı ve mükemmel kimyasal kararlılık sunarlar. Yüksek maliyetleri nedeniyle havacılık, savunma ve nükleer atık immobilizasyonu gibi özel uygulamalarda kullanılırlar (Sama, Blanco, 2021).

Lif-Matris Arayüzey Etkileşimleri ve Mikromekanik Bağlanma

Jeopolimer matrisin yüksek pH değeri ($\approx 13-14$), lif-matris arayüzeyinde hem kimyasal hem de fiziksel etkileşimleri belirler (Qin ve diğerleri 2023).

- Çelik liflerde, yüzey oksit tabakası mekanik ankrajı güçlendirir (Ranjbar, Zhang, 2020).
- Bazalt ve cam liflerde, Si-O-Si kovalent bağları aracılığıyla kimyasal bağlanma gerçekleşir (Sama, Blanco, 2021).
- Nano-silika ile modifiye edilmiş lif yüzeylerinde ise bağlanma etkinliği daha da artar (Qin ve diğerleri 2023).

SEM analizleri, lif çevresinde yoğun, çatlak içermeyen N-A-S-H jel halkalarının oluştuğunu göstermektedir (Ranjbar, Zhang, 2020). Bu halkalar, çatlak ucu sönmemesine ve yük dağılımının homojenleşmesine katkıda bulunur (Sama, Blanco, 2021).

Lif Oranı, Yönlenme ve Dağılımının Mekanik Performansa Etkisi

Lif hacim oranının artışıyla birlikte tokluk ve çatlak kontrolü iyileşmekle birlikte, genellikle %2-2.5 hacim oranından sonra işlenebilirlik önemli ölçüde azalır ve homojen dağılım sağlanamaz (Qin ve diğerleri 2023).

- **%0.5-1.0 hacim oranları:** Erken yaş çatlak kontrolü için uygundur (Qin ve diğerleri 2023).
- **%1.0-2.0 hacim oranları:** Eğilme dayanımı, darbe direnci ve tokluk artışı için optimum aralıktır (Sama, Blanco, 2021).

Liflerin yönlenme durumu da mekanik performansı doğrudan etkiler. Kalıp geometrisi, yerleştirme yöntemi ve karıştırma tekniği, liflerin yük doğrultusuna paralel hizalanma derecesini belirler (Qin ve diğerleri 2023). Yük doğrultusuna paralel yönlenmiş lifler, mekanik performansı maksimum düzeye çıkarır (Ranjbar, Zhang, 2020).

Termal ve Çevresel Dayanıklılık Üzerine Etkiler

Lif takviyesi, mekanik performansın yanı sıra termal ve çevresel dayanıklılığı da iyileştirir (Sama, Blanco, 2021):

- Bazalt ve karbon lifler, 600-800°C sıcaklıklara kadar termal kararlılıklarını koruyabilirler (Qin ve diğerleri 2023).
- Lif takviyesi, termal şoklar sırasında çatlak oluşumunu ve yayılımını engelleyerek yangın dayanımını artırır.
- Donma-çözülme ve sülfat etkisi gibi çevresel bozulma mekanizmalarına karşı mikroyapısal bütünlüğün korunmasına katkı sağlar (Sama, Blanco, 2021).

Lif takviyeli Jeopolimer Kompozitlerde Tokluk-Dayanım Optimizasyonu

Lif takviyeli jeopolimerler, Portland çimentosu esaslı fiber takviyeli betonlara kıyasla daha güçlü bir matris-lif etkileşimi sergiler (Qin ve diğerleri 2023). Bu durum, jeopolimer jellerin lif yüzeyleriyle kimyasal olarak bağ kurabilmesinden ve Arayüzey Geçiş Bölgesi'nin (ITZ) daha kompakt ve homojen bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Ranjbar, Zhang, 2020).

Bu üstün etkileşimin sonucu olarak:

- Eğilme dayanımında $\geq$ %50 artış (Sama, Blanco, 2021).
- Darbe dayanımında Portland çimentosu betonuna kıyasla 10-15 kat iyileşme (Qin ve diğerleri 2023).
- Tokluk indeksinde 2-4 kat artış (Ranjbar, Zhang, 2020).

- Çekme dayanımında %30-40 seviyelerinde yükselme gözlemlenebilmektedir (Sama, Blanco, 2021).

Bu olağanüstü özellikler, lif takviyeli jeopolimer kompozitleri; yüksek performanslı prefabrik yapı elemanları, darbe dayanımı gerektiren savunma yapıları, termal yalıtımlı kompozit paneller ve agresif kimyasal ortamlara dayanıklı kaplama sistemleri için ideal malzeme haline getirmektedir (Qin ve diğerleri 2023).

4.1.6.Basınç-Eğilme Dayanımı İlişkisi ve Kırılma Mekanizması

Jeopolimer malzemelerin mekanik davranışını anlamak için basınç dayanımı (f_c) ile eğilme/çekme dayanımı (f_{ct}) arasındaki ilişkinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır (Ranjbar, Zhang, 2020). Bu ilişki, geleneksel Portland çimentosu (PC) sistemlerinden niteliksel olarak farklılık göstermekte olup, bu farklılığın temelinde jeopolimerlerin amorf-yarı kristalin aluminosilikat jel yapısı (N-A-S-H), düşük porozite, yoğun arayüzey geçiş bölgesi (ITZ) ve yüksek bağ enerjili Si-O-Al köprüleri bulunmaktadır (Qin ve diğerleri 2023).

Basınç ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Kantitatif İlişki

Portland çimentosu esaslı betonlarda basınç ve çekme dayanımı arasındaki ilişki genellikle:

$$f_{ct} = 0.62 \sqrt{f_c} \text{ (Ranjbar, Zhang, 2020).}$$

şeklinde ampirik bir bağıntı ile ifade edilmektedir (Ranjbar, Zhang, 2020). Bu ilişki, çimento hamurunun gözenekli ve heterojen mikroyapısı nedeniyle çekme dayanımının basınç dayanımına kıyasla düşük kalma sebebini vurgulamaktadır.

Jeopolimer sistemlerde ise, mikroyapının daha homojen olması ve çatlak başlatıcı kritik boşlukların daha az bulunması nedeniyle bu oran belirgin şekilde değişmektedir (Fahim ve diğerleri, 2025). Deneysel çalışmalar, jeopolimerler için aşağıdaki ilişkinin geçerli olduğunu göstermektedir:

$$f_{ct} = (0.8 - 1.0) \sqrt{f_c} \text{ (Qin ve diğerleri 2023).}$$

Bu kantitatif fark, jeopolimerlerin aynı basınç dayanımı değerine sahip PC betonlarına kıyasla %25-40 daha yüksek eğilme/çekme dayanımı sergilediğini ortaya koymaktadır (Qin ve diğerleri 2023).

Mikroyapısal Kökenler ve Çatlak İnisiyasyon Mekanizmaları

Jeopolimerlerde çatlak başlangıcı, PC sistemlerdeki gibi zayıf ITZ bölgelerinde değil, jel matrisinin içyapısındaki mikroboşluklarda meydana gelme eğilimindedir (Bayrak, Gümüş 2024).

Portland çimentosunda ITZ, Ca(OH)_2 kristallerinin yoğunlaşması ve yüksek porozite nedeniyle zayıf bir ara tabaka oluştururken; jeopolimer sistemlerde yüksek alkali ortam, agrega yüzeyindeki Si-O-Si bağlarını aktive ederek ITZ'yi kimyasal olarak güçlendirmektedir (Qin ve diğerleri 2023).

Bu durum, çatlak inisiyasyonu için gerekli olan kritik çekme gerilmesi (σ_{cr}) değerinin artmasına yol açar. Böylece, yük altındaki deformasyon daha kontrollü ilerlemekte ve çatlak yayılımı gecikmektedir (Bayrak, Gümüş 2024).

Kırılma Mekanik Parametreleri ve Malzeme Direnci

Jeopolimerlerin kırılma davranışı, Lineer Elastik Kırılma Mekanik (LEFM) prensipleri çerçevesinde incelenebilmektedir (Fahim ve diğerleri, 2025). Bu kapsamda kritik gerilme yoğunluk faktörü (K_{IC}), malzemenin çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği direncin temel göstergesidir (Ranjbar, Zhang, 2020).

Deneysel veriler, jeopolimerler için K_{IC} değerlerinin:

$$K_{IC} = 0.5 - 1.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \text{ (Qin ve diğerleri 2023).}$$

aralığında bulunduğunu göstermektedir (Qin ve diğerleri 2023). Bu değer, PC betonunun tipik aralığı olan $0.2-0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ nin yaklaşık iki katı olup, jeopolimer matrisin çatlak ilerlemesine karşı daha dirençli olduğunu kanıtlamaktadır (Fahim ve diğerleri, 2025). Bu üstün performans, jeopolimer jellerdeki yüksek bağ enerjisine (Si-O-Al bağları: 370-420 kJ/mol) ve mikro düzeydeki yoğun çapraz bağlanmış amorf ağ yapısına bağlanmaktadır (Bayrak, Gümüş 2024).

Kırılma Enerjisi (G_F) ve Tokluk Davranış Karakteristiği

Kırılma enerjisi (G_F), malzemenin çatlak oluşumu ve ilerlemesi sırasında sönümlediği toplam enerjiyi temsil etmektedir. Jeopolimerlerde G_F

değerleri tipik olarak 40-100 N/m aralığındadır; bu, PC betonuna kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek bir değere karşılık gelmektedir (Qin ve diğerleri 2023).

Bu yüksek kırılma enerjisinin pratik sonuçları şunlardır:

- Çatlak ilerlemesi boyunca enerji dağılımının daha homojen olmasıdır (Fahim ve diğerleri, 2025).
- Ani kırılmalar yerine kademeli yük düşüşlerinin gözlemlenmesi dir (Fahim ve diğerleri, 2025).
- Özellikle yüksek eğilme yükleri altında daha sünek bir davranış sergilemesidir (Ranjbar, Zhang, 2020).

Lif takviyesi ile birlikte, G_F değerleri 200-400 N/m seviyelerine ulaşabilmekte ve malzeme tok davranış sergilemektedir (Bayrak, Gümüş 2024).

Gerilme-Deformasyon Davranışı ve Kırılma Modları

Jeopolimerlerin karakteristik gerilme-deformasyon eğrileri, PC betonuna kıyasla daha uzun bir post-peak (tepe noktası sonrası) bölgeye sahiptir (Fahim ve diğerleri, 2025). Bu davranış, çatlak oluşumundan sonra dahi matrisin belirli bir seviyede yük taşıma kapasitesini koruyabildiğini göstermektedir (Qin ve diğerleri 2023).

Çatlak ucu çevresinde gözlemlenen:

- Jel yeniden yapılanması
- Mikro kayma bantları oluşumu
- İkincil bağların oluşumu

gibi mekanizmalar, çatlak yayılım hızını yavaşlatmakta ve kırılma sürecini enerji dissiplasyonu açısından daha verimli hale getirmektedir (Ranjbar, Zhang, 2020).

Mühendislik Uygulamaları Açısından Önemi

Jeopolimerlerin daha yüksek f_{ct}/f_c oranı, mühendislik uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır (Bayrak, Gümüş 2024). Bu kapsamda:

- Kiriş, panel ve döşeme gibi eğilmeye çalışan elemanlarda donatı ihtiyacı azalmakta, böylece daha ekonomik ve daha hafif tasarımlar mümkün hale gelmektedir.

- Kırılma sonrası yük taşıma kapasitesinin belirli ölçüde korunması, yapısal elemanların ani ve gevrek bir şekilde göçmesini engelleyerek güvenliği artırmaktadır.
- Darbe ve yorulma dayanımında kayda değer artış, dinamik yük etkilerinin yoğun olduğu uygulamalarda uzun süreli performansı iyileştirmektedir.
- Yüksek sıcaklık veya kimyasal etkilere maruz ortamlarda çatlak kontrolünün kolaylaşması, hem dayanıklılığı artırmakta hem de servis ömrünü uzatmaktadır.

Bu nedenlerle, jeopolimer sistemler sadece yüksek basınç dayanımı ile değil, aynı zamanda yüksek eğilme/çekme dayanım oranı sayesinde yüksek performanslı beton (HPC) alternatifi olarak değerlendirilmektedir (Qin ve diğerleri 2023).

Lif Takviyesinin Kırılma Mekanik Parametrelerine Etkisi

Lif takviyesi, jeopolimer kompozitlerin kırılma davranışını temelden değiştirmektedir (Fahim ve diğerleri, 2025). Bu kapsamda liflerin sisteme eklenmesiyle:

- Kırılma davranışı gevrek karakterden sünek davranışa doğru evrilmekte, böylece malzemenin ani ve kırılğan bir şekilde göçmesi engellenmektedir (Ranjbar, Zhang, 2020).
- Lif-matris ara yüzeyinde enerji sönümlenme mekanizmaları devreye girmekte, bu da uygulanan yüklerin daha kontrollü bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır (Fahim ve diğerleri, 2025).
- K_{IC} değerleri 1.0–1.8 MPa·m^{1/2} aralığına kadar yükselmekte, malzemenin çatlak ilerlemesine karşı direnci belirgin şekilde artmaktadır (Qin ve diğerleri 2023).
- G_F değerleri 3–5 kat artarak, malzemenin çatlak kontrolü ve kırılma tokluğu kapasitesi önemli ölçüde iyileşmektedir (Fahim ve diğerleri, 2025).

Bu hibrit sistemlerde, çatlak ilerleme yönü sapmakta, mikroçatlaklar birleşmeden önce enerji dağılımı gerçekleşmekte ve makro düzeyde yüksek tokluk elde edilmektedir (Fahim ve diğerleri, 2025).

Kırılma Mekanikliği Perspektifinden Jeopolimerler

Jeopolimerler, kırılma mekanikliği açısından klasik PC betonlarına kıyasla bir dizi üstün özellik ortaya koymaktadır. Bu kapsamda:

- Daha yüksek çekme/eğilme dayanım oranı göstermektedirler (Qin ve diğerleri 2023).
- K_{IC} ve G_F değerlerinin daha yüksek olması, çatlak ilerlemesine karşı direncin belirgin şekilde artmasına katkı sağlamaktadır (Ranjbar, Zhang, 2020).
- Çatlak oluşumunun daha homojen bir şekilde dağılması, yapısal davranışın daha kontrollü ilerlemesine imkân tanımaktadır (Fahim ve diğerleri, 2025).
- Enerji sönmüleme kapasitesinin üstün olması, malzemenin darbe ve dinamik yüklere karşı performansını iyileştirmektedir (Bayrak, Gümüş 2024).

Bu nitelikleri sayesinde jeopolimerler, yarı gevrek, yarı sünük malzeme sınıfında değerlendirilebilmekte ve yüksek dayanımlı, dayanıklı ve hasar toleranslı yapısal elemanların tasarımında yeni ve güçlü bir malzeme grubu olarak öne çıkmaktadır (Qin ve diğerleri 2023).

4.2.Yoğunluk, Gözeneklilik ve Geçirgenlik İlişkileri

Jeopolimer malzemelerin mekanik dayanımı, dayanıklılık performansı ve uzun vadeli servis ömrü; yoğunluk (ρ), toplam gözeneklilik (ϕ) ve geçirgenlik (k) gibi içyapısal parametreler arasındaki karşılıklı etkileşim tarafından belirlenmektedir (Aziz ve diğerleri, 2023). Bu üç temel parametre, jeopolimerlerin mikroyapısal organizasyonu ile makro ölçekli mühendislik davranışları arasında işlevsel bir bağ kurmakta olup malzemenin:

- Yoğunluk değeri, matrisin kompaktlık derecesini ve bağ yapısının bütünlüğünü ortaya koymaktadır (Aziz ve diğerleri, 2023).
- Gözeneklilik, içyapıdaki boşluk hacmini ve su ya da iyon taşınım yollarının sürekliliğini belirlemektedir (Aziz ve diğerleri, 2023).
- Geçirgenlik, dış etkenlerin (su, gaz, agresif iyonlar) malzeme içerisine nüfuz etme hızını tanımlayarak dayanıklılık açısından kritik bir gösterge niteliği taşımaktadır (Aziz ve diğerleri, 2023).

- Dolayısıyla bu parametrelerin entegre biçimde kontrolü ve optimizasyonu, jeopolimer sistemlerin dayanıklılık mühendisliği kapsamında stratejik önem taşımaktadır (Aziz ve diğerleri, 2023).

Bu nedenle, söz konusu parametrelerin entegre bir şekilde kontrolü ve optimizasyonu, jeopolimer sistemlerin dayanıklılık mühendisliği açısından stratejik öneme sahiptir (Aziz ve diğerleri, 2023).

4.2.1.Yoğunluğu Etkileyen Temel Faktörler ve Mikroyapısal İlişkiler

Jeopolimer malzemelerde yoğunluk, sadece agrega ve bağlayıcı fazların fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olmayıp, aynı zamanda jeopolimerizasyon reaksiyonunun ilerleme derecesinin ve mikroyapısal olgunluğunun da hassas bir göstergesidir (Yang, Li, He, Liao, 2025). Tamamen reaksiyona girmiş, düşük gözenekli bir N-A-S-H jel fazı, teorik olarak 2.2-2.4 g/cm³ yoğunluk değerine sahiptir. Pratik uygulamalarda ise, kompozit malzemenin kuru birim hacim ağırlığı (ρ_{dry}), agrega yoğunluğu, reaksiyon ürünlerinin homojenlik derecesi ve artık boşluk miktarına bağlı olarak 2.0-2.3 g/cm³ aralığında değişkenlik göstermektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025).

Hammaddelerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Hammadde bileşimi ve reaktivitesi, nihai yoğunluk değerini belirleyen en temel parametreler arasında yer almaktadır (Yang, Li, He, Liao, 2025):

- **Metakaolin Esaslı Sistemler:** Tabakalı yapıları ve yüksek reaktiviteye bağlı olarak homojen bir jel oluşturmalarına rağmen, partiküller arası temasın sınırlı olması nedeniyle nispeten düşük yoğunluk değerleri (~1900-2100 kg/m³) sergileyebilmektedirler (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Uçucu Kül (FA) Esaslı Sistemler:** Küresel partikül morfolojileri sayesinde taneler arası paketleme verimliliği yüksektir. Bu durum, yoğunlukta 100-200 kg/m³ mertebesinde bir artış sağlayabilmektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (GGBS) Katkılı Sistemler:** Sisteme kazandırılan Ca²⁺ iyonları, jel yapısının kompaktlığını artırmaktadır. Oluşan hibrit N-C-A-S-H jelleri, 2.4-2.6 g/cm³e varan

daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaşabilmektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025).

Ayrıca, hammaddedeki amorf faz oranının artması, çözünme kinetiğini hızlandırmakta ve polimerik ağın sürekliliğini geliştirerek daha yüksek hacimsel yoğunluk değerleri elde edilmesine katkıda bulunmaktadır (Yang, Li, He, Liao, 2025).

Su/Katı (W/S) Oranının Kritik Rolü

Jeopolimer sistemlerde W/S oranı, sadece karışımın reolojik özelliklerini ve işlenebilirliğini değil, aynı zamanda mikroyapısal kompaktlığı da doğrudan etkilemektedir (Dathe, Overmann, Koenig, Dehn, 2024). Deneysel çalışmalar, W/S oranındaki her 0.05 birimlik artışın, birim hacim ağırlığında yaklaşık 50-80 kg/m³ mertebesinde bir azalmaya yol açtığını ortaya koymaktadır. Bu düşüşün temel nedeni, karışımdaki fazla suyun reaksiyona katılmadan buharlaşması sonucu kapiler boşlukların ve toplam porozitenin artmasıdır (Dathe, Overmann, Koenig, Dehn, 2024).

- **Düşük W/S Oranı (0.25–0.30):** Yüksek yoğunluk ve düşük porozite sağlanmasına karşın, işlenebilirlik sınırlıdır (Dathe, Overmann, Koenig, Dehn, 2024).
- **Yüksek W/S Oranı (>0.35):** İşlenebilirlikte artış gözlenmekle birlikte, mikroyapısal boşluklarda ciddi bir artış meydana gelir (Dathe, Overmann, Koenig, Dehn, 2024).
- **Optimum Aralık:** Sistem bileşimine bağlı olmakla birlikte, genellikle 0.28-0.32 aralığı optimum yoğunluk-işlenebilirlik dengesinin sağlandığı bölge olarak kabul edilmektedir (Dathe, Overmann, Koenig, Dehn, 2024).

Aktivatör Kimyasının Yoğunluk Üzerindeki Etkileri

Alkali aktivatör çözeltisinin kimyasal yapısı, hem reaksiyonun iyonik ortamını hem de oluşan jel fazının yoğunluk karakteristiğini belirlemektedir (Teker Ercan, Cwirzen, Habermehl-Cwirzen, 2023):

- **Sodyum Hidroksit (NaOH):** Güçlü bir çözücü etkisine sahip olmasına rağmen, ek silika kaynağı sağlamadığı için daha açık ve gevşek bir jel ağı oluşumuna neden olmaktadır. Sonuç olarak, yoğunluk değerleri nispeten düşük (1.9–2.0 g/cm³), porozite ise

yüksek seyretmektedir (Teker Ercan, Cwirzen, Habermehl-Cwirzen, 2023).

- **Sodyum Silikat (Na_2SiO_3):** Yapısındaki çözünür silika, polimerik ağın doluluk oranını artırarak yoğunluğu $2.2\text{--}2.3 \text{ g/cm}^3$ seviyelerine yükseltebilmektedir. Ancak, çözeltinin yüksek viskozitesi karışım homojenliğini olumsuz etkileyebileceğinden, dengeli bir $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ($M_s = 1.5\text{--}2.5$) önerilmektedir (Teker Ercan, Cwirzen, Habermehl-Cwirzen, 2023).
- **Potasyum Esaslı Aktivatörler (KOH , K_2SiO_3):** Daha büyük iyonik yarıçapa sahip K^+ iyonları, jel yapısı içinde daha gevşek bir koordinasyona neden olmaktadır. Bu durum yoğunlukta hafif bir azalmaya ($1.9\text{--}2.1 \text{ g/cm}^3$) yol açsa da, kuruma büzülmesini azaltarak hacimsel kararlılığı iyileştirmektedir (Teker Ercan, Cwirzen, Habermehl-Cwirzen, 2023).

Katkı Malzemelerinin Mikro Dolgu ve Reaktif Etkileri

Sisteme ilave edilen mikrosilika, nano- SiO_2 , GGBS veya uçucu kül gibi katkı malzemeleri, hem fiziksel dolgu hem de kimyasal reaksiyon mekanizmaları üzerinden yoğunluk değerlerini etkilemektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025):

- **Mikrosilika:** Sub-mikron boyutları sayesinde boşlukları doldurarak efektif yoğunluğu artırmaktadır (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Nano- SiO_2 :** Jel ağ yapısını rafine ederek lokal yoğunluk değerlerini yükseltmektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **GGBS:** Kalsiyum zengini hibrit jel fazlarının oluşumunu teşvik ederek bulk yoğunluğu artırmaktadır (Yang, Li, He, Liao, 2025).

Bu katkı maddelerinin kullanımı, yoğunluk artışına paralel olarak gözeneklilik ve geçirgenlikte azalma sağlamak ve tipik olarak mekanik dayanımda %10–20 seviyelerinde iyileşme gözlemlenmektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025).

Kür Rejiminin Yoğunluk Gelişimine Etkisi

Kür sıcaklığı ve süresi, jel oluşum kinetiği ve boşluk doluluk derecesini etkileyerek yoğunluğun zamanla değişim profilini belirlemektedir (Abousnina, Aljuaydi, Benabed, Almabrok, Vimonsatit, 2025):

- **Isıl Kür (60–80°C):** Yoğunluk artışı açısından optimum koşulları sağlamaktadır (Abousnina, Aljuaydi, Benabed, Almabrok, Vimonsatit, 2025).
- **Oda Sıcaklığı Kürü:** Reaksiyon daha yavaş ilerlemekle birlikte, daha homojen bir mikroyapı oluşumuna katkıda bulunmaktadır (Abousnina, Aljuaydi, Benabed, Almabrok, Vimonsatit, 2025).
- **Uzun Süreli Olgunlaşma (≥ 28 gün):** Devam eden polimerizasyon reaksiyonları nedeniyle yoğunlukta %2–3 mertebesinde ek bir artışa yol açabilmektedir (Abousnina, Aljuaydi, Benabed, Almabrok, Vimonsatit, 2025).

Ölçüm Metodolojileri ve Mühendislik Perspektifi

Yoğunluk karakterizasyonu, Arşimet prensibi, Helyum piknometresi veya Civa porozimetresi gibi standart test yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu ölçümlerin mikroyapısal analiz teknikleri ile birlikte değerlendirilmesi, reaksiyonun tamamlanma derecesi, gözenek morfolojisi ve mekanik performans potansiyeli hakkında kıymetli bilgiler sunmaktadır (Rosas-Casarez ve diğerleri, 2025).

Mühendislik perspektifinden bakıldığında, yüksek yoğunluk değerleri:

- Yüksek mekanik dayanım (f_c) (Aziz ve diğerleri, 2023),
- Düşük su ve iyon geçirgenliği (Aziz ve diğerleri, 2023),
- Gelişmiş donma-çözülme direnci ve kimyasal dayanıklılık (Aziz ve diğerleri, 2023).

anlamına gelmektedir. Bu nedenle, yoğunluk parametresi sadece basit bir fiziksel özellik olmayıp, jeopolimer malzemelerin performans kimliğini ve servis ömrü potansiyelini değerlendirmede kullanılan temel bir gösterge konumundadır (Aziz ve diğerleri, 2023).

4.2.2. Gözenek Yapısının Oluşum Mekanizmaları ve Morfolojik Sınıflandırılması

Jeopolimer malzemelerin mühendislik performansı, bünyelerinde bulunan gözenek yapısının hacimsel dağılımı, boyut aralığı, geometrik morfolojisi ve bağlantılilik derecesi ile doğrudan ilişkilidir (Chen ve diğerleri, 2025). Gözenek ağının oluşumu, jeopolimerizasyon sürecindeki çözünme, jel oluşumu, polikondenzasyon, suyun yeniden dağılımı ve buharlaşma gibi temel

fiziko-kimyasal süreçlerin kompleks etkileşiminin bir sonucudur. Bu içyapısal ağ, malzemenin hem mekanik dayanım karakteristiğini hem de çevresel etkenlere karşı gösterdiği direnci belirleyen en kritik parametrelerden biridir (Wong, 2022; Chen ve diğerleri, 2025).

Gözenek Oluşum Mekanizmaları ve Etki Eden Parametreler

Gözenek yapısının morfolojik gelişimi; reaksiyon kinetiği, su/katı oranı, aktivatör kimyası ve kür rejimi gibi temel değişkenler tarafından kontrol edilmektedir (Wong, 2022):

- **Su/Katı Oranı Etkisi:** Düşük su/katı oranları, çözünme reaksiyonları için sınırlı sıvı fazı sağlamasına rağmen, kapiler boşluk oluşumunu minimize ederek daha kompakt bir mikroyapı gelişimine katkıda bulunur (Wong, 2022; Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Aktivatör Konsantrasyonu:** Yüksek molariteli alkali çözeltiler, hızlı jel oluşumuna yol açarak makro gözeneklerin erken dönemde kapanmasını sağlar. Bununla birlikte, aşırı Na^+ iyonu konsantrasyonu, jel fazının yeniden düzenlenme kapasitesini sınırlayarak mikro gözenek sürekliliğini artırabilmektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Kür Koşulları:** Isıl kür uygulamaları sırasında, özellikle 80°C 'yi aşan sıcaklıklarda suyun hızlı buharlaşması, bağlantılı kapiler gözenek ağının genişlemesine ve mikro çatlak inisiyasyonuna neden olabilmektedir (Wong, 2022).

Gözeneklerin Boyutsal Sınıflandırılması ve Karakteristik Özellikleri

Gözenek yapısı, oluşum mekanizmaları ve boyut aralıkları dikkate alınarak üç temel kategoride sınıflandırılabilir (Yang, Li, He, Liao, 2025; Chen ve diğerleri, 2025);

Jel Gözenekleri (< 10 nm)

N-A-S-H veya C-A-S-H jel fazının üç boyutlu amorf ağ yapısı içinde bulunan moleküler ve atomik ölçekli boşluklardır (Yang, Li, He, Liao, 2025; Chen ve diğerleri, 2025).

- **İşlevsel Etkileri:** Donma-çözülme çevrimleri sırasında, suyun genleşmesi sonucu oluşan hidrostatik basıncın absorbe edilmesine

katkıda bulunarak mikroyapısal stabilite sağlarlar (Yang, Li, He, Liao, 2025; Chen ve diğerleri, 2025).

- **Hidrolojik Davranış:** Gözenek içi nem içeriğine bağlı olarak jel yapısında meydana gelen hacimsel değişimler, malzemenin büzülme ve şişme karakteristiğini doğrudan etkiler (Yang, Li, He, Liao, 2025; Chen ve diğerleri, 2025).
- **Karakterizasyon Yöntemleri:** Azot adsorpsiyon/desorpsiyon izotermi (BET/BJH yöntemleri) veya Helyum piknometresi ile kantitatif olarak belirlenebilmektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025; Chen ve diğerleri, 2025).

Kapiler Gözenekler (10 nm – 10 µm)

Reaksiyon sürecinde tamamen çözünmeyen tanecikler arasındaki boşlukların ve fazla karışım suyunun buharlaşması sonucu oluşan gözeneklerdir (Yang, Li, He, Liao, 2025).

- **Taşınım Süreçlerine Etkisi:** Malzemenin geçirgenlik karakteristiğini belirleyerek iyonik difüzyon, su emilimi ve karbonatlaşma kinetiği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Bağlantılılık Durumu:** Kapiler gözeneklerin birbirine bağlı olma derecesi, klorür iyonu penetrasyonu veya sülfat saldırısı gibi dayanıklılık problemleri açısından kritik önem taşımaktadır (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Kontrol Stratejileri:** Düşük W/S oranı, nano boyutlu katkılar ve optimize edilmiş ısıtma rejimleri, bu gözenek sınıfının hacimsel oranını azaltarak geçirgenliği düşürmektedir (Yang, Li, He, Liao, 2025).

Hava Boşlukları (> 10 µm)

Genellikle karışım işlemi sırasında hapsolan hava kabarcıklarından veya yetersiz konsolidasyondan kaynaklanan makro ölçekli boşluklardır (Chen ve diğerleri, 2025).

- **Kontrollü Hava Sürüklenme:** Özellikle soğuk iklim uygulamalarında, donma çözülme direncini artırmak amacıyla kontrollü olarak ayırık hava boşlukları oluşturulabilmektedir. İdeal

aralık 200-500 μm çapında ve düzgün dağılıma sahip boşluklardır (Chen ve diğerleri, 2025).

- **Olumsuz Etkiler:** Aşırı miktarda veya birbirine bağlı büyük boşluklar, yoğunluk kaybına ve mekanik dayanımda önemli düşüşlere neden olmaktadır (Chen ve diğerleri, 2025).
- **Kontrol Yöntemleri:** Polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcılar ve uygun vibrasyon uygulamaları ile minimize edilebilmektedir (Chen ve diğerleri, 2025).

Gözenek Yapısının Kantitatif Karakterizasyon Yöntemleri

Gözenek morfolojisini ve dağılımını nicel olarak belirlemek için çeşitli analitik teknikler kullanılmaktadır:

- **Cıva İntrüzyon Porozimetresi (MIP):** 3 nm – 100 μm aralığındaki gözenek boyutu dağılımını yüksek çözünürlükte tespit edebilen en yaygın kullanılan yöntemdir (Wong, 2022; Chen ve diğerleri, 2025).
- **BET Yüzey Alanı Analizi:** Mikro gözenek hacmini ve jel fazının spesifik yüzey alanını belirleyerek iç yapı yoğunluğu hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır.
- **SEM Görüntüleme:** Kapiler boşlukların morfolojik yapısını, bağlantılılık durumunu ve agrega-matris arayüzeyini doğrudan gözlemlene imkanı sunmaktadır (Wong, 2022; Chen ve diğerleri, 2025).
- **X-ışını Mikro Bilgisayarlı Tomografi:** Üç boyutlu gözenek ağı modellemesi yaparak geçirgenlik ve taşınım özelliklerinin tahmin edilmesine olanak tanımaktadır (Wong, 2022; Chen ve diğerleri, 2025).

Gözenek Mekanik Performans İlişkisi ve Dayanıklılık Etkileri

Gözeneklilik ile mekanik dayanım arasında ters bir korelasyon bulunmaktadır. Toplam gözeneklilikteki %1'lik bir artış, basınç dayanımında ortalama %3-5 mertebesinde bir azalmaya neden olabilmektedir (Wong, 2022). Ayrıca:

- **Bağlantılı Gözenek Ağı:** Su geçirgenliğini ve agresif iyonların taşınım hızını önemli ölçüde artırmaktadır (Yang, Li, He, Liao, 2025).

- **Kapalı Gözenek Yapısı:** Isıl yalıtım performansını iyileştirmekte ve donma çözülme dayanımına katkıda bulunmaktadır (Yang, Li, He, Liao, 2025).

Bu nedenle, jeopolimer malzeme tasarımındaki temel hedef, sadece toplam gözenekliliği azaltmak değil, aynı zamanda bağlantısız ve mikro boyutlu gözeneklerin hakim olduğu kontrollü bir iç yapı oluşturmaktır. Bu yaklaşım, hem yüksek mekanik performans hem de üstün dayanıklılık karakteristiği sergileyen jeopolimer kompozitlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Wong, 2022; Chen ve diğerleri, 2025).

4.2.3. Gözenek Yapısının Karakterizasyonu: Cıva Porozimetresi, BET ve SEM Analiz Yöntemleri

Jeopolimer malzemelerin gözenek yapısının kapsamlı karakterizasyonu, malzemenin mekanik dayanım, geçirgenlik, boyutsal stabilite, donma-çözülme direnci ve uzun vadeli performans davranışı gibi kritik özelliklerinin anlaşılması açısından temel öneme sahiptir (Chen ve diğerleri, 2025). Gözenek boyutu dağılımı, morfolojisi ve bağlantılılık durumunu belirlemek için kullanılan analitik yöntemler, farklı fiziksel prensiplere dayanmakta ve her biri spesifik gözenek boyut aralıklarında optimum duyarlılık sergilemektedir. Bu nedenle, jeopolimerlerin gözenek yapısının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi için Cıva Porozimetresi (MIP), BET Azot Adsorpsiyonu ve SEM görüntüleme tekniklerinin bütünleşik olarak kullanılması önerilmektedir (Aziz ve diğerleri, 2023).

Cıva Porozimetresi (MIP – Mercury Intrusion Porosimetry)

Çalışma Prensibi: Cıva, yüksek yüzey gerilimi (~485 mN/m) nedeniyle katı yüzeylerde ıslatıcı olmayan ve kapiler gözeneklere kendiliğinden nüfuz edemeyen bir sıvıdır. Cıva porozimetresinde, numune üzerine kademeli olarak artan basınç uygulanarak cıvanın gözeneklere zorla intrüzyonu sağlanır (Aziz ve diğerleri, 2023). Bu süreçte gözenek yarıçapı ile uygulanan basınç arasındaki ilişki Washburn denklemi ile tanımlanmaktadır:

$$r = - (2\gamma \cos\theta) / P$$
 (Aziz ve diğerleri, 2023; Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).

Burada:

r: Gözenek yarıçapı (m)

γ : Cıva yüzey gerilimi (N/m)

θ : Cıva-katı temas açısı ($^{\circ}$)

P: Uygulanan hidrostatik basınç (Pa)

Ölçüm Kapasitesi ve Aralığı: Yaklaşık 3.6 nm ile 400 μ m aralığındaki gözenek boyutu dağılımını yüksek doğrulukla belirleyebilmektedir (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019). Özellikle kapiler ve makro gözeneklerin karakterizasyonunda etkilidir.

Avantajları:

- Geniş ölçüm aralığı sayesinde çoklu gözenek sınıflarının tek bir analizle belirlenmesine olanak tanır (Aziz ve diğerleri, 2023; Chen ve diğerleri, 2025).
- Toplam gözeneklilik, ortalama gözenek çapı, kümülatif gözenek hacmi gibi kantitatif parametreleri doğrudan sağlar (Aziz ve diğerleri, 2023; Chen ve diğerleri, 2025).
- Gözenek boyutu dağılım eğrileri ile jeopolimer matrisinin kompaktlık derecesi hakkında hacimsel bilgi sunar (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).

Sınırlamaları:

- **Mürekkap Hakkası Etkisi:** Dar boğazlı geniş gözeneklerin, dar boğaz çapına karşılık gelen basınçta ölçülmesi nedeniyle yanıltıcı sonuçlara yol açabilmektedir (Aziz ve diğerleri, 2023).
- **Yapısal Hasar Riski:** Ölçüm sırasında uygulanan yüksek basınçlar mikroyapıda geri dönüşümsüz hasar ve mikro çatlak oluşumuna neden olabilmektedir (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).
- **Jel Gözenekleri Sınırlaması:** <10 nm altındaki jel gözeneklerinin karakterizasyonunda yetersiz kalmaktadır (Chen ve diğerleri, 2025).
- **Numune Kaybı:** Analiz sonrası numune genellikle kullanılamaz hale gelmektedir (Chen ve diğerleri, 2025).

Jeopolimer Sistemlerde Özel Hususlar: Yüksek sodyum iyonu içeriği ve amorf N-A-S-H jel yapısı, cıva ile etkileşerek temas açısında değişikliklere neden olabilmektedir. Bu nedenle, jeopolimer analizlerinde temas açısı

parametresinin (tipik olarak 130° – 140° aralığı) dikkatle kalibre edilmesi gerekmektedir (Aziz ve diğerleri, 2023).

BET Yöntemi (Brunauer-Emmett-Teller) - Azot Adsorpsiyonu/Desorpsiyonu

Çalışma Prensipleri: Katı numune yüzeyine, sıvı azot sıcaklığında, kontrollü relatif basınç (P/P_0) aralığında azot gazı adsorbe edilmekte ve desorbe edilmektedir. Adsorbe edilen gaz miktarının relatif basınca karşı grafiklendiği izoterm eğrileri, BET teorisi kullanılarak değerlendirilmekte ve gözenek parametreleri hesaplanmaktadır (Chen ve diğerleri, 2025; Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).

Ölçüm Kapasitesi ve Aralığı: 0.3 nm ile 300 nm aralığındaki mikro ve mezo gözeneklerin karakterizasyonunda yüksek hassasiyet sergilemektedir. Özellikle jel gözeneklerinin analizi için ideal bir yöntemdir (Aziz ve diğerleri, 2023; Chen ve diğerleri, 2025).

Sağladığı Kantitatif Parametreler (Aziz ve diğerleri, 2023; Chen ve diğerleri, 2025).

- Spesifik yüzey alanı (m^2/g)
- Toplam gözenek hacmi (cm^3/g)
- Ortalama gözenek çapı (nm)
- Gözenek boyutu dağılımı

Avantajları:

- Jeopolimer jellerindeki moleküler ve nano ölçekli gözenek yapısını en doğru şekilde yansıtan yöntemdir (Aziz ve diğerleri, 2023).
- Tahribatsız test imkanı sunmaktadır (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).
- MIP analiz sonuçlarını tamamlayıcı niteliktedir (Chen ve diğerleri, 2025).
- IUPAC sınıflandırmasına dayalı gözenek morfolojisi (silindirik, yarık, küresel vb.) hakkında bilgi sağlar (Chen ve diğerleri, 2025).

Dezavantajları:

- Ölçüm süresi oldukça uzundur (6-8 saat) (Aziz ve diğerleri, 2023).

- Sadece yüzeye açık gözenekleri tespit edebilmekte, kapalı gözenekleri belirleyememektedir (Chen ve diğerleri, 2025).
- Numune yüzeyindeki nem veya karbonatlaşma ürünleri ölçüm doğruluğunu etkileyebilmektedir (Aziz ve diğerleri, 2023).

Jeopolimer Sistemlerde Uygulama: Yüksek silika içerikli sistemlerde ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı >2.0) spesifik yüzey alanı genellikle $30\text{-}80\text{ m}^2/\text{g}$ aralığında ölçülmekte olup, bu değer Portland çimentosu sistemlerine kıyasla 2-3 kat daha yüksektir (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).

SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve Görüntü Analizi

Çalışma Prensibi: Yüksek vakum altında numune yüzeyine odaklanmış yüksek enerjili bir elektron demeti gönderilir; yüzeyden saçılan sekonder elektronların dedektör tarafından toplanmasıyla nanometre çözünürlüğünde görüntüler elde edilir (Aziz ve diğerleri, 2023; Chen ve diğerleri, 2025).

Analiz Kapasitesi:

- 2 boyutlu mikroyapı morfolojisinin nanometre ölçeğinde yüksek çözünürlükle görüntülenmesi (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).
- Gözenek geometrisinin, dağılımının ve bağlantılılık özelliklerinin kalitatif olarak değerlendirilmesi (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).
- Görüntü işleme yazılımları (ImageJ, MATLAB) aracılığıyla yüzdesel gözenek alanı ile şekil faktörlerinin kantitatif olarak belirlenmesi (Aziz ve diğerleri, 2023).

Avantajları:

- Mikroyapıyı doğrudan görselleştirme imkanı sunar (Chen ve diğerleri, 2025).
- N-A-S-H jelinin homojenlik derecesi, ITZ yoğunluğu ve mikro çatlak varlığı gibi kalitatif bilgiler sağlar (Aziz ve diğerleri, 2023).
- EDS ile entegre kullanıldığında, gözenek çevresindeki kimyasal kompozisyonun belirlenebilir (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019).

Dezavantajları:

- Sadece iki boyutlu kesit bilgisi sağlaması, hacimsel gözenek yapısı hakkında sınırlı bilgi vermesi (Aziz ve diğerleri, 2023).
- Numune hazırlama sürecinde (vakum, metal kaplama) yapısal deformasyon riski (Chen ve diğerleri, 2025).
- Görüntü analizinin operatör bağımlılığı ve subjektif değerlendirme riski (Aziz ve diğerleri, 2023).

Jeopolimer Sistemlerde Uygulama:

SEM analizleri, gözenek morfolojisinin yanı sıra reaksiyon ürünü jellerin yapısal karakteristiği hakkında da değerli bilgiler sunmaktadır (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019). Örneğin:

- Yüksek sodyum silikat içerikli sistemlerde yoğun, pürüzsüz jel dokusu (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019),
- Düşük molariteli NaOH sistemlerinde mikro çatlaklı, gevşek yapılar (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019),
- Optimize edilmiş karışımlarda homojen, kompakt ve sürekli jel ağı (Gunasekara, Dirgantara, Law, Setunge, 2019),

Bu üç analitik yöntemin sinerjik kullanımı, jeopolimer malzemelerin gözenek yapısının nano ölçekten makro ölçeğe kadar kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesine ve malzeme performansı ile gözenek parametreleri arasındaki ilişkilerin aydınlatılmasına olanak sağlamaktadır (Aziz ve diğerleri, 2023; Chen ve diğerleri, 2025).

4.2.4.Geçirgenlik ve Su Emilim Karakteristiği: Mekanizmalar ve Dayanıklılık İlişkileri

Jeopolimer malzemelerin geçirgenlik ve su emilim davranışları, mikroyapısal organizasyonunun yoğunluk derecesi, gözenek bağlantınlılığı ve N-A-S-H jel fazının kimyasal doğası tarafından belirlenmektedir. Bu parametreler, malzemenin dayanıklılık performansı üzerinde doğrudan etkili olmakta ve özellikle klorür iyonu difüzyonu, karbonatlaşma, sülfat saldırısı ve donma çözülme dayanımı gibi kritik dayanıklılık göstergeleriyle yakından ilişkilidir (Aziz ve diğerleri, 2023; Chen ve diğerleri, 2025).

Geçirgenlik Kavramı ve Mikroyapısal Temeller

Geçirgenlik (k), malzemenin sıvı ve gaz taşınımına karşı gösterdiği direncin kantitatif bir ölçüsüdür. Jeopolimerlerde bu parametre, toplam gözenek hacminden ziyade gözeneklerin bağlantılılık derecesine bağlıdır. Jeopolimer sistemlerde gözenek yapısının çoğunlukla kapalı veya kısmen bağlantılı olması nedeniyle, toplam porozite değeri yüksek olsa bile efektif geçirgenlik oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır (Aziz ve diğerleri, 2023; Yang, Li, He, Liao, 2025).

Jeopolimerler için karakteristik geçirgenlik katsayısı:

$k = 10^{-12} - 10^{-14}$ m/s (Yang, Li, He, Liao, 2025; Zhang ve diğerleri, 2021).

Karşılaştırma amacıyla, yüksek performanslı Portland çimentosu betonlarında bu değer genellikle $10^{-11} - 10^{-13}$ m/s aralığındadır. Jeopolimerlerin sergilediği bu düşük geçirgenlik değerleri, beton yapıların servis ömrü tahmin modellerinde kritik öneme sahip olup, 50-100 yıl gibi uzun servis ömrü hedeflerini destekleyecek seviyelerdir (Yang, Li, He, Liao, 2025; Zhang ve diğerleri, 2021).

Gözenek bağlantılılığının minimize edilmesi, sıvı akışının Darcy rejiminde gerçekleşmesini zorlaştırmaktadır (Yang, Li, He, Liao, 2025; Zhang ve diğerleri, 2021). Bu fiziksel davranış, Darcy Yasası ile matematiksel olarak ifade edilmektedir:

$Q = k.A.\Delta P / (\mu.L)$ (Yang, Li, He, Liao, 2025; Zhang ve diğerleri, 2021).

Burada:

Q: Akış debisi (m³/s)

k: Geçirgenlik katsayısı (m/s)

A: Kesit alanı (m²)

ΔP : Basınç farkı (Pa)

μ : Sıvı viskozitesi (Pa•s)

L: Numune kalınlığı (m)

Gözenek Morfolojisi-Geçirgenlik İlişkisi ve Tahmin Modelleri

Gözenek yapısı ile geçirgenlik arasındaki kantitatif ilişki, Katz-Thompson modeli ile kurulabilmektedir (Azimi, Toufigh, 2023; Chen ve diğerleri, 2025). Bu model, civa porozimetresi (MIP) verilerinden türetilen

kritik gözenek boyutu ve bağlantılı gözenek hacmi parametrelerini kullanmaktadır:

$$k = (1/226) \cdot (r_c^2 / \phi) \cdot \sigma_e \text{ (Azimi, Toufigh, 2023; Chen ve diğerleri, 2025).}$$

Burada:

r_c : Kritik gözenek yarıçapı (m)

ϕ : Toplam porozite

σ_e : Elektriksel iletkenlik

Jeopolimerlerde, düşük gözenek bağlantılılığı nedeniyle kritik gözenek yarıçapı (r_c) küçük ve elektriksel iletkenlik (σ_e) düşük değerler sergilemekte, bu durum modelden elde edilen geçirgenlik değerlerinin Portland çimentosu sistemlerine kıyasla 1-2 kat daha düşük olmasına neden olmaktadır (Azimi, Toufigh, 2023).

Alternatif bir yaklaşım olan Archie denklemi ise şu formda ifade edilmektedir:

$$k \propto \phi^n \text{ (Zhang ve diğerleri, 202; Alahmari, Abdalla, Rihan, 2023).}$$

Burada n gözenek bağlantılılık faktörünü temsil etmekte olup, jeopolimerlerde genellikle 3-4, Portland çimentosu betonlarında ise 2-2.5 aralığında değerler almaktadır. Bu fark, jeopolimerlerin daha izole bir gözenek yapısına sahip olduğunu göstermektedir (Zhang ve diğerleri, 202; Alahmari, Abdalla, Rihan, 2023).

Su Emilim Davranışı ve Kapiler Emme Karakteristiği

Su emilim davranışı, genellikle kapiler yükselme testleri ile karakterize edilmekte ve malzemenin yüzeyden suyu absorbe etme kapasitesi ve hızı hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu özellik, hem estetik bozulmalar hem de iyon taşınım mekanizmaları açısından büyük önem taşımaktadır (Azimi, Toufigh, 2023; Aziz ve diğerleri, 2023).

Jeopolimer sistemlerde kapiler su emme katsayısı (S):

$$S = 0.05 - 0.15 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{h} \text{ (Yang, Li, He, Liao, 2025; Alahmari, Abdalla, Rihan, 2023).}$$

Portland çimentosu betonlarında bu değer genellikle 0.10 - 0.30 $\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{h}$ aralığında olup, jeopolimerler yaklaşık %40-60 daha düşük kapiler su emme eğilimi sergilemektedir. Bu düşük S değeri, jeopolimerlerin bağlantısız gözenek ağı ve yoğun jel fazının doğrudan bir sonucudur (Yang, Li, He, Liao, 2025; Alahmari, Abdalla, Rihan, 2023).

Kür koşullarının da su emilim karakteristiği üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. 60-80°C aralığındaki ısıl kür uygulamaları, suyun erken buharlaşmasını önleyerek daha az bağlantılı gözenek yapısı oluşumuna katkıda bulunmakta ve S değerini düşürmektedir (Aziz ve diğerleri, 2023; Papa, Landi, Miccio, Medri, 2022).

Geçirgenlik-Dayanıklılık İlişkisi ve Performans Göstergeleri

Düşük geçirgenlik değerleri, iyon difüzyonu ve kimyasal saldırılara karşı yüksek direnç anlamına gelmektedir:

- **Klorür İyonu Difüzyon Katsayısı (D_{cl}):**
Jeopolimerler: 10^{-12} - 10^{-13} m²/s (Papa, Landi, Miccio, Medri, 2022; Liang, Ji, 2021).
Portland çimentosu betonları: $\sim 10^{-11}$ m²/s (Papa, Landi, Miccio, Medri, 2022; Liang, Ji, 2021).
- **Sülfat Dayanımı:** Düşük kalsiyum içeriği nedeniyle etrenjit oluşumu sınırlı kalmakta, düşük geçirgenlik ise iyon geçiş hızını yavaşlatmaktadır (Papa, Landi, Miccio, Medri, 2022; Liang, Ji, 2021).
- **Karbonatlaşma:** Porozite düşük olmasına rağmen, alkali rezervin sınırlı olması nedeniyle karbonatlaşma hızı Portland çimentosu sistemlerine kıyasla eşit veya hafif yüksek olabilmektedir. Bu durum, temel olarak geçirgenlikten ziyade kimyasal tamponlama kapasitesi ile ilişkilidir (Papa, Landi, Miccio, Medri, 2022; Liang, Ji, 2021).

4.2.5. Gözeneklilik Dayanım Dayanıklılık İlişkisi

Jeopolimer malzemelerin makro ölçekli mekanik ve dayanıklılık özellikleri, iç mikroyapıdaki gözenek karakteristiği ile doğrudan ilişkilidir. Gözeneklilik (ϕ), yalnızca boşluk hacminin bir göstergesi değil, aynı zamanda boşlukların boyut dağılımı, morfolojisi ve bağlantılilik derecesinin de bir fonksiyonudur. Portland çimentosu sistemleri için geliştirilen Thomas C. Powers modeli ($\sigma \propto (1-\phi)^3$), dayanım ile toplam gözeneklilik arasında ters kübik bir ilişki kurarak genel bir çerçeve sunar; ancak bu yaklaşım, jeopolimerlerin daha homojen ve yoğun ağ yapısı nedeniyle sınırlı geçerliliğe sahiptir (Chen ve diğerleri, 2025). Jeopolimerlerde, mekanik dayanım ve uzun

vadeli dayanıklılık üzerinde belirleyici olan parametre toplam gözeneklilik değil, yaklaşık 100 nm'nin altındaki kritik gözenek fraksiyonunun oranıdır. Bu küçük gözenekler, agresif iyonların (Cl^- , SO_4^{2-} vb.) taşınımını sınırlayarak hem kimyasal dayanıklılığı artırmakta hem de kırılma tokluğunu desteklemektedir (Zhang, Ma, Hu, Wang, Zhang, 2022).

Kritik gözenekler, mikroyapısal düzeyde enerji sönümleme merkezleri gibi davranır. Bu gözeneklerde yüzey gerilimi etkileri baskın hale geldiği için kapiler akış yerine difüzyon kontrollü taşınım gerçekleşir; böylece iyonik geçirgenlik ciddi ölçüde azalır. Cıva Porozimetresi (MIP) ve BET azot adsorpsiyonu testleriyle belirlenen bu kritik gözenek oranı, dayanım ve dayanıklılık korelasyon analizlerinde temel parametre olarak kullanılmaktadır (Wan, Cui, Jin, Gao, 2023).

Jeopolimerlerde gözeneklilik ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, üstel karakterdedir ve

$$\sigma_c = \sigma_0 \cdot \exp(-k \cdot \phi)$$

denklemleriyle tanımlanır. Burada;

σ_0 teorik sıfır gözeneklilik dayanımını,

k ise malzeme sabitini temsil eder.

Jeopolimerlerde $k \approx 6-8$ aralığında olup, Portland çimentosuna göre daha yüksek bir hassasiyet göstermektedir (Chen ve diğerleri, 2025). Bu fark, mikroyapının daha sıkı bağlanmış ve bağlantısız gözeneklerden oluşmasından kaynaklanır. Deneysel veriler, gözeneklilikteki %5'lik azalışın dayanımda yaklaşık %20 artışa karşılık geldiğini göstermektedir (Zhang, Ma, Hu, Wang, Zhang, 2022). Özellikle 50-200 nm aralığındaki gözeneklerin artışı mekanik dayanımda belirgin düşüşe yol açarken, < 50 nm mikro gözeneklerin varlığı kırılma enerjisini ve sünekliği olumlu yönde etkiler (Wan, Cui, Jin, Gao, 2023).

Gözenek yapısı yalnızca mekanik değil, aynı zamanda çevresel dayanıklılık üzerinde de belirleyici bir rol oynar. İyon difüzyon süreçleri Nernst-Planck denklemiyle tanımlanabilir ve efektif difüzyon katsayısı gözeneklilik, yapı katsayısı ve tortuoosite faktörüne bağlıdır.

$$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot \varepsilon \cdot \delta / \tau^2$$

Jeopolimerlerde tortuoositenin yüksek olması, iyonların izlediği yolları uzatır ve D_{eff} değerlerini Portland çimentosu betonuna kıyasla 1-2 merteye düşürür (tipik olarak 10^{-13} - 10^{-12} m²/s) (Yang, Li, He, Liao, 2025). Bu düşük

difüzyon hızı, klorür ve sülfat iyonlarına karşı yüksek direnç sağlamaktadır. Ayrıca, Gibbs–Thomson denklemi, küçük gözeneklerdeki suyun donma sıcaklığının azaldığını göstermekte; bu da jeopolimerlerin donma çözülme çevrimlerine karşı olağanüstü dayanıklılık sergilemesini açıklamaktadır (Duzy, Choiniska, Hager, Amiri, Claverie, 2022).

Mikroyapı makro davranış ilişkisinin anlaşılması için çok ölçekli deneysel teknikler kullanılmaktadır. MIP, BET ve SEM analizleri gözenek boyutu dağılımını ve bağlantılılık durumunu ortaya koyarken; X ışını mikro BT ve FIB SEM gibi ileri görüntüleme yöntemleri, gözenek ağının üç boyutlu sürekliliğini incelemektedir. Elde edilen veriler, sayısal modelleme ve yapay zekâ tabanlı tahmin sistemlerinde girdi olarak kullanılmakta, böylece gözeneklilik parametrelerinden mekanik dayanım veya difüzyon katsayısı gibi mühendislik çıktıları yüksek doğrulukla ön görülebilmektedir (Zhang ve diğerleri, 2021).

Mühendislik tasarımı açısından, optimum gözeneklilik aralıkları uygulama türüne göre değişmektedir. Yapısal jeopolimerlerde toplam gözeneklilik %12-18 aralığında tutulduğunda 50-80 MPa basınç dayanımı elde edilmekte; dayanıklılık odaklı sistemlerde ise %8 - 14 aralığında gözeneklilik, klorür difüzyon katsayısını $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 'in altına düşürmektedir (Chen ve diğerleri, 2025). Hafif jeopolimer uygulamalarında ise %25 - 35 gözeneklilik, düşük yoğunluk ve ısı yalıtımı avantajı sunar. Bu hedef değerlere ulaşmak için hammadde ve proses parametreleri optimize edilmektedir: metakaolin esaslı sistemler homojen gözenek dağılımı, uçucu kül esaslı sistemler düşük porozite sağlar; $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 1.5 - 2.0 aralığında tutulması kritik gözenek fraksiyonunu maksimize eder; 60 - 75 °C'de 24 ila 48 saatlik ısı kuru ise optimum kompaktlık ve dayanıklılık dengesini oluşturur. Nano silika ve mikro silika katkıları da bu yapıyı rafine ederek hem dayanım hem de geçirgenlik performansını geliştirir (Chen ve diğerleri, 2025).

Bu doğrultuda, jeopolimerlerde gözeneklilik yalnızca mikroyapısal bir parametre değil, malzemenin uzun ömürlü performansını tanımlayan bütüncül bir gösterge olarak öne çıkmaktadır. Toplam gözenek hacmini azaltmak yerine, bağlantısız ve mikro boyutlu gözeneklerin yoğun olduğu kontrollü bir içyapı elde etmek; yüksek dayanım, düşük geçirgenlik ve üstün çevresel direnç kombinasyonunu mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, jeopolimer

sistemlerini hem yapısal hem de dayanıklılık gereksinimi yüksek mühendislik uygulamaları için sürdürülebilir bir alternatif haline getirmektedir (Zhang, Ma, Hu, Wang, Zhang, 2022).

4.2.6 Karbonatlaşma ve Klor İyonu Difüzyonuna Etkiler

Jeopolimer bağlayıcıların karbonatlaşma davranışı, geleneksel Portland çimentosu sistemlerinden belirgin şekilde farklıdır (Chen ve diğerleri, 2025). Çünkü Portland çimentosu sistemlerinde kalsiyum hidroksitin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) çözünmesi ve ardından karbonat oluşumu karbondioksit etkisiyle gerçekleşirken, jeopolimerlerde kalsiyum açısından daha fakir bağlayıcı yapılar hakimdir (Lama, Duarte, Silva, Brito, 2023; Zhang, Long, Liu, Li, Long, 2020). Dolayısıyla karbonatlaşma süreci, esas olarak sistemde bulunan alkali katyonların (Na^+ , K^+) karbonatlara dönüşmesine odaklanır ve buna bağlı olarak pH’da bir düşüş meydana gelebilir (Chen ve diğerleri, 2025). Bununla birlikte, jeopolimer sistemlerinin başlangıçta sahip olduğu yüksek alkalinite, çelik donatının pasif durumda kalmasını büyük ölçüde sürdürebilmektedir (Chen ve diğerleri, 2025). Yoğun mikroyapı ve çapraz bağlanmış N-A-S-H jel florasının varlığı, klorür iyonlarının adsorpsiyonuna ve dolayısıyla difüzyonunun sınırlandırılmasına katkıda bulunur. Bu etki, jeopolimerlerde klorür iyonu difüzyon katsayılarının Portland çimentosu betonlarına kıyasla bir miktar daha düşük olmasını sağlamaktadır (Zhang, Ma, Hu, Wang, Zhang, 2022; Wan, Cui, Jin, Gao, 2023).

Karbonatlaşma süreci ise gözenek yapısı, aktivatör kimyası ve kür koşullarıyla yakından ilişkilidir. Alkali katyonların karbonatlaşması sonucunda oluşan Na_2CO_3 (Sodyum karbonat) veya K_2CO_3 (Potasyum karbonat) gibi tuzlar, gözenek sisteminde kristalize olabilir ve boşluklardan ziyade gözeneklerin tıkanmasına/yeniden yapılanmasına yol açabilir (Chen ve diğerleri, 2025). Bu durum hem gözenekliliğin azalmasına hem de bağlantılı gözenek yollarının kısmen kapanmasına katkı sağlar; bu sayede hem mekanik dayanım hem de dayanıklılık potansiyeli artabilir (Chen ve diğerleri, 2025). Bu mekanizma, özellikle uzun vadeli deniz suyu ya da klorür içeren ortamlarda jeopolimerlerin avantajını desteklemektedir (Chen ve diğerleri, 2025).

Bir bütün olarak değerlendirildiğinde, jeopolimer sistemler için karbonatlaşma ve klorür difüzyonu ilişkisi madde kaybı yönünden değil, daha

çok mikro yapısal yeniden yapılanma ve iyon taşınımının sınırlandırılması yoluyla dayanıklılığa katkıda bulunur. Bu yönüyle, jeopolimerlerin tasarımında karbonatlaşma bir bozulma parametresi olarak değil, kontrollü bir mikroyapı iyileşme süreci olarak da değerlendirilebilir (Zhang, Long, Liu, Li, Long, 2020; Zhao ve diğerleri, 2024).

4.3.Dayanıklılık: Donma Çözülme, Asit ve Sülfat Etkileri

Jeopolimerler, Portland çimentosuna kıyasla donma çözülme, asit ve sülfat gibi yıpratıcı çevresel etkilere karşı çok daha dayanıklıdır. Kapalı ve ince gözenekli mikroyapıları, donma sırasında oluşan hidrolik basınçları azaltarak çatlama ve yüzey bozulmalarını önler (Lingyu, Dongpo, Jianing, Hongguang, 2021). Düşük kalsiyum içeriğine sahip amorf aluminosilikat yapıları, asit ve sülfat iyonlarının neden olduğu kimyasal saldırılara karşı da üstün direnç sağlar. Bu özellikler, jeopolimerleri hem zorlu iklim koşullarında hem de kimyasal açıdan agresif ortamlarda uzun ömürlü, sürdürülebilir ve güvenilir bir bağlayıcı alternatifi haline getirmektedir (Lingyu, Dongpo, Jianing, Hongguang, 2021).

4.3.1.Donma Çözülme Çevrimlerinde Mikro Yapı Değişimleri

Donma çözülme hasarının temel mekanizması, donan suyun oluşturduğu hidrolik ve osmotik basınçların mikroyapı üzerinde yarattığı gerilmelerle ilişkilidir. Bu bağlamda Powers'ın doygunluk derecesi teorisi jeopolimer sistemleri için de geçerliliğini korur. Jeopolimerlerin düşük kapiler su alma kapasitesi, bu malzemeleri doğal olarak daha dayanıklı kılar (Alahmari, Abdalla, Rihaan, 2023; Hamsashree, Pandit, Prashanth, Katpady, 2024). Hava sürükleyici katkıların kullanılmasıyla oluşan ayrık hava boşlukları iç basınçları absorbe ederek dayanıklılığı daha da artırır. SEM bulguları, PC esaslı sistemlerde yaygın olarak gözlenen mikro çatlak ağının, hava sürükleyici katkıli jeopolimerlerde ortaya çıkmadığını açıkça göstermektedir (Alahmari, Abdalla, Rihaan, 2023; Hamsashree, Pandit, Prashanth, Katpady, 2024).

4.3.2.Tuz Çözeltileri ve Buzlanma Etkisi Altında Davranış

Tuzlar suyun donma noktasını düşürür ancak çözünmüş iyonların neden olduğu osmotik basınç daha karmaşık bir bozunmaya yol açar.

Jeopolimerlerin düşük geçirgenliği, tuz çözeltilerinin içeri nüfuz hızını sınırlandırarak yüzey pullanması ve ağırlık kaybını minimize eder (Lingyu, Dongpo, Jianing, Hongguang, 2021). Yapılan çalışmalar, tekrarlı donma çözülme çevrimlerinde jeopolimerlerin %20-30 daha az kütle kaybı sergilediğini göstermektedir (Liu, Zhao, Yu, Cao, 2022).

4.3.3.Asidik Ortamlarda Kimyasal Stabilité

Asit direnci, matriste bulunan kalsiyum miktarı ile ters orantılı olup, düşük CaO içerikli jeopolimerler bu nedenle en yüksek kimyasal dayanımı sergiler (Lama, Duarte, Silva, Brito, 2023). Asidik ortamlardaki bozulma mekanizması özellikle H_2SO_4 (Sülfirik asit) çözeltilisinde daha karmaşık bir süreç izler; N-A-S-H ağının protonlanmasıyla başlayan bu süreç, çözünerek ortama geçen iyonların SO_4^{2-} ile reaksiyona girerek genişletici etrenjit veya mirabilit fazlarını oluşturmasıyla ilerler (Lama, Duarte, Silva, Brito, 2023; Zhao ve diğerleri, 2024). Buna karşılık HCl (Hidroklorik asit) ve HNO_3 (Nitrik asit) gibi diğer mineral asitlerde bozulma mekanizması daha çok çözünür tuzların oluşumu, yüzeydeki pH dengesinin bozulması ve bunun devamında yapısal bütünlüğün zayıflaması üzerinden gelişir (Zhao ve diğerleri, 2024).

4.3.4.Sülfat Etkisi ve Genleşme Mekanizmaları

PC'deki sülfat bozunmasının ana nedeni olan alüminat fazlarının etrenjite dönüşümü, kalsiyum içeriği düşük jeopolimerlerde gerçekleşmez (Bhirud, Sangle, Vaidya, Patare, 2023). Hibrit sistemlerde (GGBS'li) oluşan C-A-S-H, PC'deki C-S-H'den farklı olarak daha düşük Ca/Si oranına sahiptir ve bu durum onu sülfatlara karşı daha dirençli kılar (Zhao ve diğerleri, 2024). Uzun dönem saha gözlemleri, ölçülebilir bir genleşme veya dayanım kaybı göstermemektedir (Bhirud, Sangle, Vaidya, Patare, 2023).

4.3.5.Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) Açısından Değerlendirme

Jeopolimer matrisi yüksek alkali konsantrasyonuna sahip olduğundan, agregadan salınan reaktif silikanın çözünmesi Portland çimentosunda (PC) gözlenen kadar şiddetli bir iç basınç oluşturmaz (Liu, Zhao, Yu, Cao, 2022;

Bhirud, Sangle, Vaidya, Patore, 2023). Bu bağlamda jeopolimer fazı, reaktif silika taneciklerini çevreleyerek zararlı ASR jelinin gelişimini sınırlar ve jelin genişleyici karakterinin ortaya çıkmasını büyük ölçüde engeller. Bu nedenle, ASTM C1260/C1567 hızlandırılmış genleşme testlerinde elde edilen deformasyon değerleri kabul edilebilir limitlerin altında kalmakta, jeopolimerlerin ASR açısından daha kararlı bir davranış sergilediği doğrulanmaktadır (Alahmari, Abdalla, Rihan, 2023).

4.3.6.Deniz Ortamı Koşullarında Performans

Düşük klor iyonu difüzyonu, yüksek sülfat direnci ve iyi donma çözülme performansının oluşturduğu sinerjik etki, jeopolimerleri deniz yapıları ve kıyı mühendisliği uygulamaları için ideal bir aday konumuna getirir (Zhao ve diğerleri, 2024). Bu dayanıklılık avantajı, paslanmaz çelik donatı ile birlikte kullanıldığında daha da belirgin hale gelmekte ve jeopolimer beton yapıların hizmet ömrü, geleneksel betonlara kıyasla katlanarak artmaktadır (Bhirud, Sangle, Vaidya, Patore, 2023).

4.3.7.Deneysel Dayanıklılık Testleri ve Standart Yöntemler

Jeopolimer betonların dayanıklılık performansını nicel olarak belirlemek ve elde edilen sonuçları geleneksel Portland çimentosu esaslı betonlarla karşılaştırmak amacıyla, farklı bozulma mekanizmalarını simüle eden bir dizi standart deneysel yöntem uygulanmaktadır (Singh, Ishwarya, Gupta, Bhattacharya, 2015; Fernández-Jiménez, García-Lodeiro, Palomo, 2007). Bu yöntemler, malzemenin çevresel etkiler altındaki davranışını ortaya koymak ve uzun vadeli performans öngörülerini değerlendirmek açısından kritik önem taşır. Uygulanan başlıca standartlar şu şekildedir:

- **Donma Çözülme Dayanımı:** ASTM C666 ve TS EN 12390-9 standartları kapsamında, numunelerdeki kütle kaybı, dinamik elastisite modülü değişimi ve yüzey hasarı gözlemleri değerlendirilir (Lama, Duarte, Silva, Brito, 2023).
- **Sülfat Direnci:** ASTM C1012 yöntemiyle, numunelerin Na_2SO_4 (Sodyum sülfat) veya MgSO_4 (Magnezyum sülfat) çözeltilerinde zamana bağlı genleşme miktarı ölçülerek sülfat kaynaklı bozulma eğilimi belirlenir (Lama, Duarte, Silva, Brito, 2023).

- **Asit Direnci:** ASTM C267 standardına göre, belirli konsantrasyonlardaki asit çözeltilerine maruz bırakılan numunelerde ağırlık kaybı ve basınç dayanımı kaybı izlenir (Lama, Duarte, Silva, Brito, 2023).
- **Klorür Difüzyonu:** ASTM C1556, doğrudan difüzyon testi veya NT BUILD 492, hızlı klorür göç testi kullanılarak klorür iyonlarının malzeme içerisindeki taşınım hızı belirlenir ve potansiyel donatı korozyonu riski değerlendirilir (Lama, Duarte, Silva, Brito, 2023).
- **Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR):** ASTM C1260 ve C1567 hızlandırılmış mortar çubuk testleri ile reaktif agregalar kullanıldığında oluşabilecek genleşme miktarı ölçülerek ASR'ya karşı duyarlılık belirlenir (Lama, Duarte, Silva, Brito, 2023).

Bu test yöntemleri, jeopolimer betonların çevresel etkiler altındaki dayanıklılık profilini bütüncül bir şekilde ortaya koyarak, farklı kullanım senaryoları için performans doğrulamasını sağlamaktadır.

4.4.Yangın ve Yüksek Sıcaklık Performansı

Jeopolimerler, yüksek sıcaklık ve yangın koşullarında Portland çimentosuna (PC) kıyasla üstün performans gösterir. PC betonları 400–600 °C'de bağlayıcı fazlarını kaybederken, jeopolimerler yoğun ve amorf silikat alüminat ağ yapıları sayesinde 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bile yapısal bütünlüklerini büyük ölçüde korurlar (Liu, Hu, Du, Nematollahi, Shi, 2024). Düşük ısı iletkenlikleri ve buhar basıncına karşı dirençleri, patlayıcı kopmaları engeller. Bu özellikleriyle jeopolimerler, yangına dayanıklı kaplamalar, tünel kaplamaları, fırın astarları ve endüstriyel yalıtım gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için güçlü ve sürdürülebilir bir alternatiftir (Liu, Hu, Du, Nematollahi, Shi, 2024; Mohamed ve arkadaşları, 2025).

4.4.1.Jeopolimer Matrisinin Termal Bozunma Mekanizmaları

Portland çimentosu bağlayıcılarda yaklaşık 100-400 °C arasında kimyasal olarak bağlı suyun kaybı ve C-S-H jeli yapısının bozulması gözlenir (Tayeh, Zeyad, Agwa, Amin, 2021; Dandachy, Hassoun, El-Mir, Khatib, 2024). Buna karşılık jeopolimer bağlayıcılarda, yaklaşık 100 °C civarında fiziksel olarak tutulmuş suyun buharlaşmasından sonra ana N-A-S-H veya C-A-S-H ağ yapısı yaklaşık 800 °C'a kadar yapısal bütünlüğünü koruyabilir

(Liu, Hu, Du, Nematollahi, Shi, 2024; Zhang ve diğerleri, 2025). Bu sıcaklıktan sonra amorf fazın nepheline veya albite gibi kristal fazlara dönüşmesi ve buna bağlı olarak büzülme ve yoğunluk artışı meydana gelebilir (Mohamed ve arkadaşları, 2025; Sahu, Kumar, Pratap, Gogineni, Sembeta, 2025).

4.4.2.200-1000 °C Arası Mekanik Özellik Değişimleri

Jeopolimer sistemlerde 200–400 °C aralığı, mikroyapısal yeniden düzenlenmenin nispeten olumlu etkiler yarattığı bir bölge olarak tanımlanmaktadır. Bu sıcaklıklarda, bağlı olmayan serbest su ve gözeneklerde hapsolmuş fiziksel suyun uzaklaşmasıyla matris daha kompakt bir hale gelir; buna bağlı olarak bazı kompozitlerde mukavemet sınırlı da olsa artış gözlemlenmektedir (Liu, Hu, Du, Nematollahi, Shi, 2024; Mohamed ve arkadaşları, 2025). Sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında ise jeopolimerlerin önemli bir kısmı başlangıç basınç dayanımlarının yaklaşık %50–70'ini koruyabilmekte, bu durum N-A-S-H benzeri jel fazlarının nispeten kararlı yapısını sürdürmesiyle ilişkilendirilmektedir (Dandachy, Hassoun, El-Mir, Khatib, 2024; Zhang ve diğerleri, 2025). Bununla birlikte, 800 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda termal davranış belirgin biçimde değişmektedir. Bu aşamada sinterleme, camlaşma ve kısmi erime gibi yüksek sıcaklık süreçleri devreye girerek hem mikroyapısal bütünlüğü bozmakta hem de hızlı dayanım kaybına neden olmaktadır (Tayeh, Zeyad, Agwa, Amin, 2021; Sahu, Kumar, Pratap, Gogineni, Sembeta, 2025).

4.4.3.Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Sonuçları

TGA sonuçları, jeopolimer sistemlerde toplam kütle kaybının büyük ölçüde 30–200 °C aralığında gerçekleştiğini göstermektedir. Bu kayıp, esas olarak fiziksel olarak bağlı suyun ve gözeneklerdeki serbest nemin uzaklaşmasından kaynaklanmakta olup, Portland çimento sistemlerine kıyasla daha düşük seviyede gerçekleşmesi jeopolimer matrisinin daha kararlı hidrotasyon dış su yapısına sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Mohamed ve arkadaşları, 2025; Zhang ve diğerleri, 2025). DSC analizleri de bu bulgularla uyumludur. Portland çimentosunda Ca(OH)_2 'nin yaklaşık 450 °C'de gerçekleşen karakteristik dehidroksilasyonuna karşılık gelen belirgin

endotermik pik jeopolimerlerde gözlenmez. Bu piklerin yokluğu, jeopolimerlerin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gibi ısıya duyarlı hidrat fazlar içermediğini ve dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda daha üstün bir termal kararlılık sergilediğini göstermektedir (Liu, Hu, Du, Nematollahi, Shi, 2024; Dandachy, Hassoun, El-Mir, Khatib, 2024).

4.4.4.Yüksek Sıcaklık Sonrası Mikro Yapı

X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları, jeopolimer matrislerde yüksek sıcaklık öncesinde tipik olarak geniş bir amorf halonun baskın olduğunu göstermektedir. Ancak sıcaklık 800 - 1000 °C aralığına ulaştığında bu amorf yapı giderek kristalleşmekte ve literatürde sıkça rapor edildiği üzere nepheline ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ve albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) gibi sodyum - alüminosilikat kristal fazlarına ait keskin kırınım pikleri ortaya çıkmaktadır (Mohamed ve arkadaşları, 2025; Sahu, Kumar, Pratap, Gogineni, Sembeta, 2025). Bu dönüşüm, yüksek sıcaklığın jeopolimer ağında faz ayrışması ve yeniden düzenlenme süreçlerini tetiklediğini göstermektedir.

SEM incelemeleri de bu mikroyapısal değişimleri destekler niteliktedir. 800°C sonrasında matris içerisinde mikro çatlak oluşumu, gözenek genişlemesi ve yer yer boşluk konsantrasyonlarında artış gözlenmesine karşın, jeopolimerlerin bütünsel yapısı Portland çimentoda yüksek sıcaklıkla görülen pulverizasyon benzeri ciddi parçalanma davranışını tipik olarak sergilemez (Tayeh, Zeyad, Agwa, Amin, 2021; Dandachy, Hassoun, El-Mir, Khatib, 2024). Bu durum, jeopolimerlerin yüksek sıcaklık altında nispeten daha dayanıklı bir bağ yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

FTIR analizleri ise kimyasal bağ düzeyindeki değişimleri ortaya koymaktadır. Si-O-T (T = Si veya Al) gerilme titreşimlerine karşılık gelen 950–1050 cm^{-1} bölgesindeki bant kaymaları, yüksek sıcaklık etkisiyle ağ yapısında meydana gelen yeniden düzenlemeleri, dehidrosilasyonu ve kısmi repolimerizasyon süreçlerini işaret etmektedir (Liu, Hu, Du, Nematollahi, Shi, 2024; Zhang ve diğerleri, 2025).

4.4.5.Refrakter ve Yangına Dayanıklı Yapı Uygulamaları

Jeopolimerlerin yüksek sıcaklık stabilitesi, düşük termal iletkenliği, minimum duman gaz emisyonu ve ısıya bağlı yapısal bozulmalara karşı gösterdiği direnç, onları refrakter ve yangına dayanıklı birçok uygulamada

öne çıkan bir malzeme sınıfı haline getirmektedir (Mohamed ve arkadaşları, 2025; Sahu, Kumar, Pratap, Gogineni, Sembeta, 2025). Bu özellikler sayesinde jeopolimer esaslı sistemler; yangın perdeleri, termal yalıtım panelleri, yüksek fırın ve endüstriyel reaktör astarları, yangına dayanıklı koruyucu kaplamalar ile yüksek sıcaklık yüklerine maruz kalan uçak pisti üst yapıları gibi kritik alanlarda etkin şekilde kullanılmaktadır (Mohamed ve arkadaşları, 2025; Sahu, Kumar, Pratap, Gogineni, Sembeta, 2025). Bu kullanımlar, jeopolimerlerin hem yapısal bütünlüğünü koruyabilen hem de termal şoklara karşı dayanım sergileyen kompozitler üretmeye elverişli mikro yapısal karakterinden kaynaklanmaktadır.

4.4.6. Termal Şok ve Isı İletkenliği Davranışı

Jeopolimerler, yaklaşık $0.2\text{--}0.5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ aralığında değişen düşük ısı iletkenlik katsayıları ve nispeten düşük ısıl genleşme değerleri sayesinde, ani sıcaklık değişimlerine karşı yüksek direnç gösteren malzemeler arasında yer almaktadır. Düşük ısıl iletkenlik, sıcaklığın malzeme içinde hızlı yayılmasını engelleyerek termal gerilmelerin kontrollü bir şekilde dağılmasını sağlar; düşük genleşme katsayısı ise ani ısıl şoklarda oluşabilecek çatlak gelişimini sınırlar. Bu iki özellik birlikte değerlendirildiğinde, jeopolimerlerin hem hızlı sıcaklık yükselmeleri sırasında hem de yangın sonrasında soğuma evrelerinde yapısal bütünlüğünü daha iyi koruyan ve termal şok hasarına karşı daha kararlı davranış sergileyen sistemler olduğu literatürde sıkça vurgulanmaktadır (Dandachy, Hassoun, El-Mir, Khatib, 2024; Sahu, Kumar, Pratap, Gogineni, Sembeta, 2025).

4.5. Uzun Dönem Dayanım ve Sürdürülebilirlik

Jeopolimer betonların performansının değerlendirilmesinde yalnızca erken yaş dayanımı değil, aynı zamanda uzun dönem mekanik kararlılıkları ile çevresel etkilerinin bütüncül olarak analiz edilmesi kritik önem taşır. Bu kapsamda, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ve ekonomik analizler gibi sistematik yöntemler kullanılarak jeopolimerlerin düşük karbon ayak izi, enerji verimliliği ve atık esaslı üretim potansiyeli gibi ekolojik üstünlükleri, maliyet etkinliği ile birlikte ele alınmaktadır (Amran ve diğerleri, 2021; Ramesh, Muthramu, Rebekha, 2025). Böylece jeopolimerlerin sürdürülebilir

yapı malzemeleri arasındaki konumu, hem çevresel hem de ekonomik boyutlarıyla uzun vadeli bir perspektiften değerlendirilmiş olur.

4.5.1.Zamanla Mekanik Özelliklerde Değişim (1-5 Yıl Arası İzleme Çalışmaları)

Uzun dönemli laboratuvar ve saha izleme çalışmaları, doğru formüle edilmiş jeopolimer betonların mekanik performansının yıllar içinde ya arttığını ya da istikrarlı biçimde korunduğunu ortaya koymaktadır. Bu zamanla gerçekleşen dayanım kazanımı, polimerizasyon reaksiyonunun düşük hızda da olsa uzun süre devam etmesine ve mikroyapıda başlangıçta bulunan mikrokusurların kısmen iyileşmesine bağlanmaktadır. Böylece jeopolimer matrisi, 1-5 yıllık süreçte daha yoğun, daha bütünlük ve daha stabil bir yapı karakteri kazanabilmektedir (Wong, 2022, Zhao ve diğerleri, 2024).

4.5.2.Mikroyapı Kararlılığı ve Faz Dönüşümleri

Jeopolimer sistemlerde zamanla, özellikle çevresel nem ve sıcaklık dalgalanmalarının etkisi altında, N-A-S-H jel yapısı içerisinde zeolit benzeri ikincil kristal fazların oluşma eğilimi ortaya çıkabilmektedir. Bu faz dönüşümleri, bir yandan jel matrisindeki gözenekliliğin artmasına yol açabilirken, diğer yandan daha termodinamik olarak kararlı bir mikroyapı oluşturarak malzemenin uzun dönem dayanıklılığını artırabilmektedir. Bu çift yönlü etkinin derecesi; kullanılan alüminosilikat kaynağı, aktivatör bileşimi ve uygulanan kür rejimi gibi parametrelere güçlü biçimde bağlıdır (Alahmari, Abdalla, Rihan, 2023; Zhao ve diğerleri, 2024).

4.5.3.Karbonatlaşma ve Yaşlanma Etkileri

Karbonatlaşma, Portland çimentosu esaslı sistemlerde mukavemet kaybına yol açabilen bir süreçken, jeopolimerlerde genellikle farklı bir etki mekanizması sergiler. Jeopolimer matrisinde karbonat iyonlarının yüzeyde sertleşme oluşturmaları ve karbonat tuzlarının gözenekleri kısmen doldurarak geçirgenliği azaltması mümkündür. Bu durum, özellikle uzun vadeli dayanıklılık açısından olumlu bir etki yaratabilmektedir. Yaşlanma olgusu ise jeopolimer malzemelerin fiziksel özelliklerinde zaman içinde meydana gelen değişimleri ifade eder ve çoğu durumda mikroyapısal iyileşme ve matrisin

daha kararlı hâle gelmesi nedeniyle olumlu yönde ilerleyebilir (Ramesh, Muthramu, Rebekha, 2025; Gökçe, 2024).

4.5.4.Çevresel Etkiler Altında Performans

Jeopolimerler, çevresel etkilere karşı genel olarak yüksek kararlılık gösteren malzemelerdir. UV radyasyonu, organik bağlayıcılarda görülen fotodegradasyon mekanizmalarını tetiklemediğinden, jeopolimer yapı üzerinde belirgin bir bozulmaya yol açmaz. Nemli ortamlarda ise matris, yapısal suyu yeniden adsorbe ederek düşük hızdaki polimerizasyon süreçlerini sürdürebilir ve mikroyapısal iyileşmeyi destekleyebilir. Ayrıca, yüksek CO₂ konsantrasyonuna sahip atmosferlerde özellikle kalsiyum içermeyen jeopolimer sistemlerinde karbonatlaşmaya bağlı ciddi bir bozunma eğilimi gözlenmemekte, malzemenin kimyasal kararlılığı büyük ölçüde korunmaktadır (Amran ve diğerleri, 2021; Tushar, Bhuiyan, Abunada, Lemckert, Giustozzi, 2025).

4.5.5. Geri Dönüştürülmüş Agregalarla Üretilen

Jeopolimerlerin Uzun Dönem Davranışı

Atık beton, cam, seramik veya tuğla kırıkları gibi geri dönüştürülmüş agregalar, jeopolimer bağlayıcı ile iyi uyum sağlayan bir kompozit yapı oluşturabilir. Bu tür karışımlarda elde edilen mekanik dayanım ve dayanıklılık değerleri, çoğu zaman doğal agrega kullanılan jeopolimerlere oldukça yakın seviyelerde gerçekleşmektedir. Ayrıca bu performansın uzun vadede büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Dolayısıyla geri dönüştürülmüş agrega kullanımı, hem döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sağlamakta hem de kaynak verimliliğini artırarak sürdürülebilir üretim açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Wong, 2022, Cong, Du, Gao, Chen, 2024).

4.5.6.Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) sonuçları, özellikle uçucu kül temelli jeopolimerlerin, Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında %40–80 oranında daha düşük CO₂ emisyonu ve %50–60'a varan ölçüde daha az enerji tüketimiyle üretilbildiğini ortaya koymaktadır. Jeopolimer üretimindeki temel emisyon kaynağı çoğunlukla alkali aktivatörlerin imalatıdır. Bu

nedenle, daha düşük aktivatör dozajı gerektiren karışımların geliştirilmesi veya endüstriyel atık alkalilerin değerlendirilmesi gibi stratejiler, sistemin çevresel etkisini azaltmaya yönelik güncel araştırma alanlarını oluşturmaktadır (Ramesh, Muthramu, Rebekha, 2025).

4.5.7.Ekonomik ve Çevresel Performansın Karşılaştırılması

Günümüzde jeopolimer betonların birim hacim maliyeti, alkali aktivatörlerin yüksek maliyeti nedeniyle genellikle Portland çimentosundan yüksektir. Ancak atık yan ürünlerin kullanımı, daha uzun yapı ömrü, daha az bakım gereksinimi, karbon vergisi gibi çevresel düzenlemeler ve bertaraf maliyetlerindeki düşüş gibi faktörler dikkate alındığında, yaşam döngüsü maliyeti açısından jeopolimerler önemli bir rekabet avantajına sahiptir. Gelecekte aktivatör maliyetlerindeki düşüş ve karbon fiyatlandırma mekanizmalarının yaygınlaşması ile bu avantajın daha da artması beklenmektedir (Gökçe, 2024; Cong, Du, Gao, Chen, 2024).

BÖLÜM 5

FONKSİYONEL KATKILAR VE GELİŞMİŞ JEOPOLİMER KOMPOZİTLER

GİRİŞ

Jeopolimer malzemelerin geleneksel özellikleri, özellikle kırılganlık, sınırlı çekme dayanımı ve fonksiyonel performans eksiklikleri, modern mühendislik uygulamalarının taleplerini karşılamak için çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle jeopolimer matrislerin nanomalzemeler, fiber takviyeler ve köpük oluşturma teknikleriyle geliştirilmesi, malzeme biliminin en hızlı ilerleyen alanlarından biri haline gelmiştir. Bu bölüm, jeopolimerlerin yalnızca mekanik dayanımını artırmakla kalmayıp aynı zamanda elektriksel, termal, akustik ve yapısal fonksiyonellikler kazandıran gelişmiş kompozit sistemlerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır.

CNT, grafen, SiC, Si₃N₄, nano-silika ve nano-alümina gibi nanomalzeme katkıları jeopolimer matrisinin hem kimyasal reaksiyon kinetiğini hem de mikroyapısal organizasyonunu kökten değiştirmektedir. Bu katkıları, çatlak sapması, fiber köprüleme, arayüzey bağ güçlendirme ve mikroyapısal yoğunlaştırma gibi mekanizmalar yoluyla malzemenin dayanım, tokluk, geçirgenlik, termal iletkenlik ve elektriksel davranışını dramatik biçimde iyileştirir.

Fiber takviyesi ise jeopolimer kompozitlerin kırılğan doğasını önemli ölçüde dönüştüren bir başka ana stratejidir. Karbon, bazalt, cam, PVA ve PP fiberler; çekme ve eğilme dayanımını artıran, çatlak ilerlemesini kontrol eden ve yüksek sıcaklık altında boyutsal kararlılık sağlayan takviye sistemleri sunar. Fiber-matris arayüzey mühendisliği, bu kompozitlerin performansını belirleyen en kritik unsurlardan biridir.

Hafif ve köpük jeopolimerler, düşük yoğunlukları, ısı-ses yalıtım özellikleri ve yüksek yangın dayanımları sayesinde yapı mühendisliği, ısı yalıtımı, akustik kontrol ve geoteknik dolgular gibi alanlarda önemli avantajlar sağlar. Köpükleme mekanizmaları, gözenek morfolojisi ve yapı özellikleri ilişkileri, bu malzemelerin tasarımında temel rol oynar.

Bu bölüm genel olarak, jeopolimer matrisinin fonksiyonel, mekanik ve çok amaçlı performansını artırmaya yönelik ileri katkı stratejilerinin bilimsel temelini sunarak, yeni nesil jeopolimer kompozitlerin tasarımına dair kapsamlı bir çerçeve oluşturmayı amaçlamaktadır.

5.1.Nanomalzemeler ile Takviye

Jeopolimerler, doğası gereği kırılğan bir malzemedir (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023). Nanoteknoloji, jeopolimerlerin bu temel dezavantajını gidermek ve onlara yeni fonksiyonel özellikler kazandırmak için devrim niteliğinde bir yaklaşım sunmaktadır. Nano boyutundaki katkı maddeleri, yüksek spesifik yüzey alanları ve yüzey enerjileri sayesinde jeopolimer matrisi ile olağanüstü bir etkileşime girer (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023). Bu etkileşim, yalnızca mekanik mukavemeti ve tokluğu artırmakla kalmaz, aynı zamanda matrisin yoğunluğunu arttırarak geçirgenliği azaltır ve termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik, aşınma direnci gibi istenen fonksiyonel özellikleri kazandırır (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023). Nanomalzeme takviyesinin etkinliği, esas olarak partiküllerin jeopolimer matrisi içinde homojen bir şekilde dağılmasına ve partikül matris ara yüzeyinde güçlü bir kimyasal bağ oluşumuna bağlıdır (Kishore ve diğerleri, 2023).

5.1.1.Karbon Esaslı Nanomalzemeler: CNT'ler ve Grafen

Karbon nanotüpler (CNT'ler) ve grafen, karbon atomlarının sırasıyla silindirik tüp formunda ve iki boyutlu tek katmanlı petek örgüsünde dizildiği, günümüz malzeme biliminde en yüksek performanslı nano malzemeler arasında yer almaktadır. Bu malzemeler; 100 GPa'nın üzerinde teorik çekme mukavemeti, 1 TPa'ya yakın elastik modülü, son derece yüksek termal iletkenlik ve belirgin elektriksel iletkenlik gibi olağanüstü intrinsik özellikler göstermektedir (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023). Söz konusu özellikler, CNT veya grafen takviyesinin jeopolimer matrisine entegre edilmesiyle kompozitin mekanik, termal ve elektriksel performansına doğrudan katkı sağlayarak malzemenin genel dayanım ve fonksiyonelliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Tay, Norkhairunnisa, 2021).

5.1.1.1.Mekanik Performansın İyileştirilmesi ve Tokluk Artışı

CNT'ler ve grafen, jeopolimer matrisi için ideal nano ölçekli takviye elemanlarıdır. Mekanik iyileştirme, fiber köprüleme ve fiber sıyırma olmak üzere iki temel faktöre dayanır. Kırılma tokluğunu artırmada en etkili mekanizma, bir çatlağın ilerlerken bir karbon nanotüp veya grafen tabakası ile karşılaşması durumunda çatlağın uç kısmında enerjisinin dağılmasıdır (Tay, Norkhairunnisa, 2021). CNT'ler, çatlak ucu etrafında köprü kurarak enerjiyi emer ve çatlağın daha fazla ilerlemesini engeller. Benzer şekilde, bir grafen tabakası, çatlağın yönünü değiştirmesine veya dallanmasına neden olarak ilerlemesi için gereken enerjiyi önemli ölçüde artırır (Tay, Norkhairunnisa, 2021). Fiber sıyırma mekanizmasında ise, matristen çekilen CNT'ler veya grafen tabakaları, sürtünme yoluyla önemli miktarda enerji dissipasyonu sağlar. Bu mekanizmaların verimliliği, nanomalzeme ile jeopolimer matrisi arasındaki arayüzey bağının gücüne doğrudan bağlıdır (Raj ve arkadaşları, 2023). Grafen oksit (GO), karboksil, hidroksil, epoksi gibi yüzeyindeki oksijen içeren fonksiyonel gruplar sayesinde jeopolimerin silikat ve alüminat oligomerleri ile kimyasal olarak etkileşime girerek güçlü bir kovalent bağ oluşturabilir (Raj ve arkadaşları, 2023; Tay, Norkhairunnisa, 2021). CNT'ler için ise, aglomerasyonu önlemek ve arayüzey bağlanmasını iyileştirmek amacıyla asitle muamele gibi yüzey fonksiyonelleştirme yöntemleri sıklıkla kullanılır. Genellikle, ağırlıkça %0.5 ila %1.5 gibi düşük oranlarda CNT veya grafen katkısı bile, jeopolimer kompozitin basınç ve çekme mukavemetinde %40'a varan artışlar sağlayabilmektedir (Raj ve arkadaşları, 2023; Tay, Norkhairunnisa, 2021).

5.1.1.2.Fonksiyonel Özelliklerin Kazandırılması: Elektriksel ve Termal İletkenlik

Jeopolimerler, doğal yapıları gereği elektriksel yalıtkandır. Ancak, CNT veya grafen gibi yüksek iletkenlikli nanomalzemelerin eklenmesi, bu durumu kökten değiştirebilir. Bu nanomalzemeler, belirli bir hacimsel oranın üzerine çıkıldığında, jeopolimer matrisi içinde sürekli bir üç boyutlu iletken ağ oluşturur (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024). Bu ağ, elektronların malzeme boyunca iletilmesine izin vererek kompozite elektriksel iletkenlik kazandırır. Elde edilen iletken jeopolimer kompozitler,

yapısal malzemenin aynı zamanda Elektromanyetik Girişim (EMI) kalkını olarak hizmet edebildiği havacılık ve uzay, otomotiv ve elektronik endüstrileri için büyük önem taşır (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024). Termal iletkenlik açısından, jeopolimer matrisinin düşük olan termal iletkenliği, karbon nanomalzemelerin eklenmesiyle önemli ölçüde artar. Bu, kompozitin ısıyı daha verimli bir şekilde dağılmasını sağlayarak, yangına dayanıklı uygulamalarda veya termal yönetimin kritik olduğu yüksek sıcaklık ortamlarında termal şok direncini artırır ve termal gerilmelerden kaynaklanan mikro çatlak oluşum riskini azaltır (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023; Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024).

5.1.1.3.Dağılım ve Arayüzey Mühendisliğinin Kritik Rolü

Karbon esaslı nanomalzemelerin jeopolimerlerdeki en büyük zorluklarından biri, yüksek yüzey enerjileri ve van der Waals kuvvetleri nedeniyle aglomere olma ve topaklanma eğilimidir. Bu topaklar, kompozit içinde zayıf noktalar oluşturur; mekanik özellikleri iyileştirmek bir yana, zayıf arayüzey bağı nedeniyle mukavemeti düşürebilir ve kompozitin elektriksel iletkenliğinin düşmesine sebep verme eğiliminde olacaktır (Raj ve arkadaşları, 2023). Bu nedenle, dağıtım ve arayüzey optimizasyonu, yüksek performanslı kompozitlerin üretilmesinde hayati öneme sahiptir. Dağıtımı iyileştirmek için ultrasonikasyon, yüksek kesme hızlı karıştırma ve süper akışkanlaştırıcıların kullanımı gibi fiziksel yöntemler yaygın olarak kullanılır (Kishore ve diğerleri, 2023). Kimyasal olarak, grafen oksitin (GO) kontrollü bir şekilde indirgenmesiyle elde edilen indirgenmiş grafen oksit (RGO), yüzey kimyasını ve dolayısıyla jeopolimer prekürsör çözeltisi ile etkileşimini ayarlamak için etkili bir stratejidir (Raj ve arkadaşları, 2023). CNT'ler için, asit muamelesi gibi yöntemlerle nanotüp yüzeyine karboksilik asit grupları eklenerek, bu grupların jeopolimer matrisinin silanol (Si-OH) grupları ile kondensasyon reaksiyonuna girmesi teşvik edilir. Bu kimyasal bağlanma, partikülün matristen sıyrılması için gereken enerjiyi önemli ölçüde artırarak mekanik özelliklerde ve dayanıklılıkta büyük bir iyileşme sağlar (Raj ve arkadaşları, 2023).

5.1.2.Seramik Nanomalzemeler: SiC ve Si₃N₄

Silisyum Karbür (SiC) ve Silisyum Nitrür (Si₃N₄), üstün mekanik özellikleri, yüksek termal kararlılıkları ve mükemmel kimyasal kararlılıkları ile öne çıkan ileri teknoloji seramik nanomalzemelerdir (Al-Buriahı, Alomayrah, Alsaıari, TEHÇİ, Çalışkan, 2025; Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024). Jeopolimer matrisine entegre edildiklerinde, bu nanopartiküller, kompozitin özellikle yüksek sıcaklık ve aşınmaya dayanıklı uygulamalardaki performansını kökten iyileştirir. Karbon esaslı nanomalzemelerin aksine, SiC ve Si₃N₄ elektriksel olarak yalıtkan veya yarı iletken olma eğilimindedir, bu da onları yüksek sıcaklıkta elektriksel stabilite gerektiren durumlar için ideal kılar (Al-Buriahı, Alzahrani, Yılmaz, Çalışkan, Olarino, 2025; Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024). Takviye mekanizmaları, partikülün nano ölçekli boyutunun sağladığı mikroyapısal yoğunlaştırma ve arayüzey etkileşimlerine dayanır (Echeweozo ve diğerleri, 2024; Rathee ve diğerleri, 2025). Seramik nanopartiküllerin jeopolimerlere eklenmesinin birincil katkısı, mekanik özelliklerde gözlemlenen çok yönlü iyileşmedir. Bu iyileşme birkaç temel mekanizma ile sağlanır (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024). Bunlar;

Mikroyapısal Yoğunlaşma ve Sertlik Artışı: SiC ve Si₃N₄ nanopartikülleri, genellikle 50-150 nanometre aralığında olup, jeopolimer jelinin kürlenmesi ve polikondenzasyonu sırasında boşlukları doldurarak matrisi fiziksel olarak yoğunlaştırır (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024). Bu dolgu etkisi, matrisin gözenekliliğini azaltır ve mikro çatlak oluşumunu sınırlandırır. Böylece, kompozitin sertliği ve basınç dayanımında önemli artışlar kaydedilir. SiC nanopartiküllerinin ekstrem sertliği, kompozitin aşınma direncini doğrudan artırarak onu zemin kaplamaları ve aşınmaya maruz kalan yüzeyler için üstün bir aday haline getirir (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024).

Kırılma Tokluğunun Geliştirilmesi: Jeopolimerlerin en büyük zayıflığı olan kırılgenlik, seramik nanopartiküllerle etkili bir şekilde azaltılabilir. Bu süreç, çatlak sapması ve çatlak kısırtma mekanizmalarıyla işler (Rathee ve diğerleri, 2025). İlerleyen bir mikro çatlak, sahip olduğu yüksek elastik modül ve mukavemet ile çok daha sert bir bariyer görevi gören

bir SiC veya Si₃N₄ partikülüne rastladığında, çatlak ucu partikülün etrafında dönmek veya onu kırmak zorunda kalır (Rathee ve diğerleri, 2025). Bu sapma, çatlağın ilerlemesi için gereken enerji yolu uzatılarak enerjisinin dissipasyonuna yol açar. Ayrıca, nanopartiküller matris içinde sıkıca bağlandığında, çatlağın açılmasını fiziksel olarak kısıtlayarak kısırtma etkisi yaratır. Bu kombinasyon, jeopolimer kompozitin darbe dayanımını ve kırılma enerjisini belirgin şekilde artırır (Rathee ve diğerleri, 2025).

Yüksek Sıcaklık Performansı ve Termal Kararlılık

Jeopolimerlerin doğal refrakter özellikleri, seramik nanomalzemelerle takviye edildiğinde daha da güçlenir. Bu sinerjik etki, kompoziti aşırı termal ortamlar için vazgeçilmez kılar (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024).

Termal Bozunmaya Karşı Direnç: SiC ve Si₃N₄, sırasıyla 2700°C ve 1900°C civarında çok yüksek bozunma sıcaklıklarına sahiptir (Al-Buriahi, Alomayrah, Alsaiani, TEHÇİ, Çalışkan, 2025). Jeopolimer matrisi, genellikle 800-1000°C civarında dehidroksilasyon ve faz dönüşümleri nedeniyle yapısal bozulma belirtileri göstermeye başlar. Ancak, bu nanopartiküller, matrisin amorf yapısının kristalleşmesini ve büzülme çatlaklarının oluşumunu geciktirerek bir iskelet görevi görür (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024). Özellikle SiC, yüksek sıcaklıklarda yüzeyinde oksitlenerek ince bir silika (SiO₂) tabakası oluşturur. Bu tabaka, jeopolimerin silikat ağı ile uyumlu bir şekilde etkileşime girerek arayüzeyi güçlendirir ve termal şok direncini artırır (Rathee ve diğerleri, 2025).

Termal Genleşme ve Termal Şok Direnci: Jeopolimer matrisi ile seramik nanopartiküllerin termal genleşme katsayıları (CTE) arasında bir uyumsuzluk olmasına rağmen, bu durum nano ölçekte avantaja dönüştürülebilir. Partiküller, termal döngüler sırasında matris içinde oluşan termal gerilmeleri dağıtarak konsantrasyonunu azaltır. Bu, mikro çatlak oluşumunun engellenmesine ve kompozitin ani sıcaklık değişimlerine karşı direncinin artmasına yardımcı olur (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024; Rathee ve diğerleri, 2025).

Arayüzey Etkileşimleri ve Dağılım Zorlukları

Karbon nanomalzemelerde olduğu gibi, SiC ve Si₃N₄ takviyesinin başarısı da dağılımın homojenliğine ve arayüzey bağlanmasının gücüne bağlıdır.

Arayüzey Kimyası: SiC ve Si₃N₄ partiküllerinin yüzeyi, doğal olarak oksitlenmiş ince bir amorf silika tabakası ile kaplıdır. Bu silika tabakası, jeopolimer matrisinin silikat oligomerleri ile güçlü siloksan (Si-O-Si) bağları oluşturabilir (Rathee ve diğerleri, 2025). Bu kimyasal uyumluluk, partikül ile matris arasında sağlam bir arayüzey oluşturarak yük transferini verimli kılar ve partikülün sıyrılma yerine kırılmasına neden olur; bu da daha güçlü bir bağ gösterir (Alvarado, Baykara, Riofrio, Cornejo, Merchan-Merchan, 2024).

Dağılım Stratejileri: Bu nanopartiküller de aglomerasyon eğilimlidir. Dağılımı iyileştirmek için mekanik yöntemler ve kimyasal yöntemler kullanılır. Partikül yüzeyine surfaktanlar veya silan bağlayıcı ajanlar adsorbe edilerek, partikül yüzey enerjisi düşürülür ve jeopolimer prekürsör çözeltisi içindeki ıslanabilirliği ve dağılabilirliği artırılır. Homojen bir dağılım, her bir nanopartikülün bir takviye noktası olarak etkin bir şekilde çalışmasını sağlayarak kompozitin genel performansını maksimize eder (Kishore ve diğerleri, 2023; Rathee ve diğerleri, 2025).

5.1.3.Nano-Silika (nSiO₂) ve Nano-Alümina (nAl₂O₃)

Nano silika (nSiO₂) ve nano-alümina (nAl₂O₃), jeopolimer kompozitlerin performansını iyileştirmede en yaygın kullanılan ve ekonomik açıdan uygun nanomalzemeler arasında yer alır (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021; Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzebaree, 2022). Bu malzemeler, yüksek reaktiviteye sahip olmaları ve jeopolimerizasyon reaksiyonunun temel kimyasıyla doğrudan etkileşime girmeleri nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Karbon esaslı veya seramik nanomalzemelerden farklı olarak, nSiO₂ ve nAl₂O₃ sadece fiziksel takviye sağlamakla kalmaz, aynı zamanda jeopolimer matrisinin oluşum reaksiyonlarını katalize ederek ve mikroyapıyı yoğunlaştırarak malzemenin temel özelliklerini kökten değiştirir (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021; Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzebaree, 2022).

Jeopolimerizasyon Reaksiyonuna Katalitik Etkileri ve Mikroyapısal Gelişim

Bu nanopartiküllerin en belirgin etkisi, jeopolimerizasyon kinetiği ve nihai ağ yapısı üzerindedir. Her bir nanopartikül, etkin bir reaksiyon noktası görevi görerek matrisin homojenleşme sürecini hızlandırır (Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzeebaree, 2022).

Nano-Silikanın ($nSiO_2$) Dolgu ve Puzolanik Rolü: $nSiO_2$ partikülleri, aşırı derecede yüksek spesifik yüzey alanına sahiptir ve yüzeyleri reaktif silanol (Si-OH) gruplarıyla kaplıdır (Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzeebaree, 2022). Jeopolimer karışımına eklendiklerinde, bu partiküller alkali çözelti içinde hızla çözünerek jeopolimer reaksiyonu için gerekli olan silikat anyonlarının (SiO_4^{4-}) konsantrasyonunu artırır. Bu durum, reaksiyonun başlangıç aşamalarını hızlandırarak daha erken bir katılaşmaya yol açar (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021). Ayrıca, çözünmeyen $nSiO_2$ partikülleri, jeopolimer jelinin oluşumu sırasında çekirdeklenme bölgeleri olarak işlev görür ve böylece daha ince ve homojen bir mikroyapının oluşmasını sağlar. Bu puzolanik benzeri aktivite, özellikle uçucu kül gibi silis oranı düşük olan prekürsörlerle kullanıldığında çok belirgindir. $nSiO_2$, jeopolimer ağının oluşumuna doğrudan katılarak zincir uzunluklarını artırır ve daha polimerik, daha az poroz bir yapı oluşturur (Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzeebaree, 2022).

Nano-Alüminanın (nAl_2O_3) Arayüzey Kimyası ve Reaksiyon Dengesi: nAl_2O_3 'nün katkısı daha çok kimyasal denge üzerinedir. Jeopolimerizasyon, uygun bir Si/Al oranı gerektirir. nAl_2O_3 partikülleri, yüzeylerindeki alüminat grupları ile çözeltiye alüminyum iyonları sağlayarak bu dengeyi etkiler. Bu durum, özellikle yüksek silika içerikli prekürsörler kullanıldığında, ağ oluşumunda kritik bir rol oynayan Al-O-Si bağlarının miktarını artırır (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021). Ayrıca, nAl_2O_3 partikülleri, jeopolimer matrisi ile kimyasal olarak bağlandığında arayüzeyde güçlü bir geçiş bölgesi oluşturur. Bu bölge, matrisin geri kalanına kıyasla daha yoğun ve amorf bir yapıya sahiptir, bu da por geçirgenliğini azaltır ve iyon taşınımını sınırlandırarak kimyasal dayanıklılığı artırır (Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzeebaree, 2022).

Mekanik Özelliklerde ve Dayanıklılıkta Belirgin İyileşmeler

Reaksiyon kinetiği ve mikroyapı üzerindeki bu derin etkiler, nihai kompozitin mekanik performansına doğrudan yansır (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021).

Yoğunluk Artışı ve Porozite Azalması: $nSiO_2$ ve nAl_2O_3 'nün en önemli katkılarından biri, dolgu etkisi ile jeopolimer matrisinin fiziksel olarak yoğunlaşmasını sağlamasıdır. Geleneksel jeopolimerlerde bulunan kılcal ve jel porları, bu nanopartiküller tarafından doldurulur. Bu, toplam porozite ve ortalama gözenek boyutunda belirgin bir azalmaya yol açar (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021). Gözenek yapısının iyileştirilmesi, basınç dayanımı ve elastik modülde doğrudan ve dramatik bir artış sağlar. Özellikle $nSiO_2$, jel porlarını doldurma konusunda son derece etkilidir ve %50'ye varan oranlarda basınç dayanımı artışları bildirilmiştir (Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzebaree, 2022).

Arayüzey Bağlanması ve Mikro Çatlak Kontrolü: Bu nanopartiküller, matris ile mükemmel bir kimyasal uyumluluk gösterir. $nSiO_2$, zaten silikat ağının bir parçasıdır, nAl_2O_3 ise kolayca bu ağa dahil olur. Bu durum, partikül matris ara yüzeyinde zayıf bir bölge oluşma riskini minimize eder. Ara yüzeydeki kimyasal bağlar, yükün nanopartiküller aracılığıyla verimli bir şekilde transfer edilmesine olanak tanır (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021). Ayrıca, sert nanopartiküller, termal veya mekanik yükleme altında oluşan mikro çatlakların ilerlemesini engelleyerek, çatlak ucu etrafında bir kısırtma stresi oluşturur ve çatlakın ilerlemesi için gereken enerjiyi artırır. Bu mekanizma, kompozitin kırılma tokluğunu ve darbe direncini önemli ölçüde iyileştirir (Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzebaree, 2022).

Dayanıklılık Özelliklerinin Geliştirilmesi

Yoğun ve düşük poroziteli bir mikroyapı, kompozitin çevresel saldırılara karşı direncini artırır.

Sülfat ve Asit Direnci: Geleneksel jeopolimerler bile Portland çimentosuna kıyasla iyi bir kimyasal dirence sahiptir, ancak nano katkıları bu direnci daha da üst seviyelere taşır (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021). $nSiO_2$ ve nAl_2O_3 ile yoğunlaştırılmış bir matris, sülfat iyonları veya asitler gibi zararlı ajanların içeri sızmasını ve yapısal bozulmaya neden

olmasını zorlaştıran daha dolambaçlı ve daha az bağlantılı bir gözenek ağı oluşturur (Rahmawati, Aprilia, Saidi, Aulia, Hadi, 2021).

Yüksek Sıcaklık Performansı: $n\text{Al}_2\text{O}_3$ özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında etkilidir. Yüksek sıcaklıklarda, jeopolimer matrisi yeniden kristalleşmeye ve büzülmeye başlar. $n\text{Al}_2\text{O}_3$ partikülleri, bu süreçte bir iç iskelet görevi görerek büzülmeyi kısıtlar ve yapısal bütünlüğün korunmasına yardımcı olur. Ayrıca, bu partiküller, yüksek sıcaklıkta mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) gibi daha kararlı kristal fazların oluşumunu teşvik edebilir, bu da kompozitin termal kararlılığını ve mukavemetini artırır (Dheyaaldin, Mosaberpanah, Alzebaree, 2022).

5.2.Fiber Takviyeli Jeopolimer Kompozitler

Fiber takviyesi, jeopolimerlerin en belirgin zayıflığı olan kırılma ve düşük çekme mukavemeti sorununu çözmek için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Sürekli veya süreksiz fiberler, jeopolimer matrisi içinde dağıtılarak, yük altında çatlak başlangıcını ve ilerlemesini kontrol eden bir mekanizma sağlar. Bu sayede, temel olarak basınç dayanımı yüksek olan jeopolimerler, üstün çekme ve eğilme dayanımına, artan tokluğa ve gelişmiş darbe direncine sahip kompozit malzemelere dönüşür. Fiber takviyesinin etkinliği, fiber tipine, en-boy oranına, hacimsel oranına, yönlenmesine ve en önemlisi fiber ile jeopolimer matrisi arasındaki arayüzey bağlanma kalitesine bağlıdır (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023).

5.2.1.Karbon Fiber Takviyeli Jeopolimerler

Karbon fiberler; yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek elastik modül, üstün yorulma direnci, mükemmel termal kararlılık ve kimyasal inertlik gibi özellikleri sayesinde jeopolimer kompozitler için oldukça etkili bir takviye malzemesidir. Karbon fiber takviyeli jeopolimer kompozitler, özellikle geleneksel polimer matrisli kompozitlerin kullanıldığı ancak daha yüksek sıcaklık, yangın dayanımı ve boyutsal kararlılık gerektiren ileri teknoloji uygulamalarında dikkat çekici bir potansiyel sunmaktadır (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023).

Mekanik Performans ve Takviye Mekanizmaları

Karbon fiber takviyesi, jeopolimer matrisinin mekanik davranışını temel olarak iki ana mekanizma üzerinden iyileştirir: fiber çekme ve fiber sıyırma. Fiber çekme, yük altında fiberlerin taşıyıcı eleman olarak davranarak gerilmeyi üstlenmesini ifade ederken; fiber sıyırma ise çatlak ilerlemesi sırasında fiber - matris arayüzünde gerçekleşen enerji tüketimiyle kompozite ilave tokluk kazandırır. Bu iki mekanizma birlikte çalışarak malzemenin dayanımını, sünekliğini ve kırılma direncini belirgin şekilde artırır (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023).

Çekme ve Eğilme Mukavemetinde Dramatik Artış: Karbon fiberler, 3000 ila 7000 MPa aralığındaki çok yüksek çekme mukavemetleri ile jeopolimer matrisine yük taşıma kapasitesi kazandırır. Matriste bir çatlak oluştuğunda ve bu çatlak bir fibere ulaştığında, fiber çatlağın iki yakasını birbirine bağlayarak köprü görevi görür. Bu fiber çekme mekanizması, çatlağın daha fazla açılmasına karşı koyar ve çekme yükünü fiberler aracılığıyla transfer eder. Böylece, kompozitin çekme ve eğilme mukavemetinde, saf jeopolimere kıyasla ciddi artışlar gözlemlenir (Buczkowska ve diğerleri, 2024).

Kırılma Tokluğu ve Enerji Sönümleme: Jeopolimerlerin kırılma kırılması, karbon fiber eklendiğinde tok bir davranışa dönüşür. Kırılma sürecinde, fiberler matristen koptuktan veya kırıldıktan sonra bile, matris içinden sıyrılarak çıkmaları gerekir (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023; Buczkowska ve diğerleri, 2024). Bu fiber sıyırma işlemi, fiber ile matris arasındaki sürtünmeden kaynaklanan önemli miktarda enerji dissipasyonuna neden olur. Böylece, malzemenin kırılması için gereken toplam enerjiyi, yani kırılma tokluğunu, büyük ölçüde artırır. Kırılma yüzeyinde görülen uzun fiber sıyırmaları, kompozitin yüksek tokluğunun bir göstergesidir (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023; Buczkowska ve diğerleri, 2024).

Arayüzey Etkileşimleri ve Optimizasyonu

Karbon fiber takviyesinin başarısı, fiber ile jeopolimer matrisi arasındaki ara yüzey bağlanma gücüne önemli derecede bağlıdır. İdeal sonucun elde edilmesi için ne çok zayıf ne de çok güçlü bir bağ oluşumundan kaçınılması gerekir (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023).

Optimum Bağlanma Gücü: Eğer arayüzey bağı çok zayıf olursa, fiberler yükü verimli bir şekilde transfer edemez ve matristen kolayca sıyrılır. Bu durum, mukavemet artışını sınırlandırır. Tam tersine, eğer bağ çok güçlü olursa, fiber kırılğan bir şekilde kopar ve sıyrılma meydana gelmez. Böylece, enerji sönümlleme kapasitesi azalarak kompozit daha kırılğan hale getirebilir. Bu nedenle, optimum bir bağlanma gücü, fiberin yükü verimli bir şekilde taşıyabildiği, ancak nihai kırılma aşamasında kontrollü bir şekilde sınırlanarak maksimum tokluk sağladığı ara durumdur (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023).

Yüzey Modifikasyon Yöntemleri: Karbon fiberlerin pürüzsüz ve inert yüzeyi, jeopolimerik matrisle kimyasal bağ oluşturmada sınırlıdır (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023). Bu uyumsuzluğu gidermek ve arayüzey bağlanmasını iyileştirmek için çeşitli yüzey modifikasyon teknikleri kullanılır:

- **Oksidasyon Tedavileri:** Fiberler nitrik asit gibi oksitleyici ajanlarla muamele edilerek yüzeylerine karboksilik, hidroksil gibi polar fonksiyonel gruplar eklenir. Bu gruplar, jeopolimer çözeltisindeki silanol (Si-OH) grupları ile hidrojen bağı veya kovalent bağ oluşturabilir (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023).
- **Silan Kaplama:** Amin veya epoksi fonksiyonlu silan kaplayıcılar, fiber yüzeyi ile jeopolimer matrisi arasında mükemmel bir kimyasal köprü oluşturur. Silanın bir ucu fiber yüzeyine bağlanırken, diğer ucu jeopolimer ağı ile reaksiyona girerek bağlanma gücünü önemli ölçüde artırır (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023).
- **Nanomalzeme Kaplamalar:** Karbon fiberlerin yüzeyine karbon nanotüp (CNT) veya grafen oksit gibi nanomalzemelerin büyütülmesi, arayüzey alanını ve mekanik kilitlemeyi artırarak bağlanma mukavemetini geliştirir (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023).

Termal Kararlılık ve Fonksiyonel Uygulamalar

Karbon fiber takviyeli jeopolimer kompozitler, yüksek sıcaklık ortamları için ideal bir kombinasyon sunar.

Yangın Direnci ve Yüksek Sıcaklık Performansı: Jeopolimer matrisi, organik polimer epoksi reçinelere kıyasla çok daha yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Karbon fiberler de inert bir atmosferde 2000°C'nin üzerinde bozulmadan kalabilir. Bu sinerji, kompozitin yangına karşı üstün direncini ve yüksek sıcaklık altında yapısal bütünlüğünü koruma yeteneğini garanti eder. Bu özellik, havacılık ve uzay, otomotiv ve yangına dayanıklı yapısal paneller gibi uygulamalarda büyük önem taşır.

Elektriksel İletkenlik ve Çoklu Fonksiyonellik: Karbon fiberler, jeopolimer matrisine elektriksel iletkenlik kazandırarak onu yalıtkan bir malzemeden iletken veya yarı iletken bir kompozite dönüştürür. Bu özellik, yapısal sıhhi izleme, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama ve kendinden ısıtmalı kompozitler gibi akıllı ve fonksiyonel uygulamaların önünü açar.

5.2.2. Bazalt ve Cam Fiber Takviyeli Jeopolimerler

Bazalt ve cam elyaf takviyeler, karbon elyafa kıyasla daha düşük maliyetleri, iyi mekanik özellikleri ve jeopolimer matrisi ile yüksek kimyasal uyumları nedeniyle yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleridir. Bu elyaflar, jeopolimer kompozitlere yüksek mukavemet, tokluk ve özellikle yüksek sıcaklık dayanımı kazandırarak geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılırlar. Her iki elyaf türü de inorganik yapıya sahip olduklarından, jeopolimerik matrisle güçlü bir kimyasal bağ oluşturabilirler (Yan ve diğerleri, 2025; Ertürkmen ve diğerleri, 2025).

Bazalt Elyafının Yapısal Özellikleri ve Üstünlükleri

Bazalt elyaflar, doğal bazalt kayacının yaklaşık 1500°C sıcaklıkta eritilip ince filamentler haline getirilmesiyle üretilir. Bu doğal kökenli üretim süreci, onları diğer elyaf türlerine kıyasla daha çevre dostu bir alternatif haline getirir (Ertürkmen ve diğerleri, 2025).

- **Mekanik Performans:** Bazalt elyaflar, cam elyafa kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti ve elastik modüle sahiptir. Yaklaşık 3000-4800 MPa aralığındaki çekme mukavemetleri ve 80-110 GPa aralığındaki elastik modülleri ile jeopolimer kompozitlere önemli bir mekanik dayanım kazandırır. Ayrıca, bazalt elyafın kopma uzaması cam elyafa göre daha yüksektir, bu da daha tok bir kırılma davranışı sergilemelerine olanak tanır (Yan ve diğerleri, 2025).

- **Termal ve Kimyasal Dayanım:** Bazalt elyaflar, -260°C ile 700°C arasındaki sıcaklıklarda kararlılığını koruyabilir. Cam elyafın aksine, yüksek sıcaklıkta erimez, sadece yumuşar. Bu özellik, bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek sıcaklık uygulamalarında daha uzun süreli performans göstermesini sağlar. Ayrıca, bazalt elyaflar aside ve alkali ortamlara karşı cam elyaftan daha yüksek direnç gösterir. Bu kimyasal stabilite, özellikle alkali bir matris olan jeopolimerlerle kullanımında büyük bir avantaj sağlar (Ertürkmen ve diğerleri, 2025).
- **Arayüzey Bağlanması:** Bazalt elyafın kimyasal bileşimi, jeopolimer matrisi ile yüksek düzeyde uyumludur. Elyaf yüzeyindeki silis ve metal oksitler, jeopolimerik ağ ile güçlü kimyasal bağlar (Si-O-Si ve Al-O-Si) oluşturabilir. Bu durum, elyaf ile matris arasında mükemmel bir yük transferi sağlayarak kompozitin mekanik performansını optimize eder (Yan ve diğerleri, 2025).

Cam Elyafların Özellikleri ve Performans Karakteristikleri

Cam elyaflar, silis kumunun yüksek sıcaklıkta eritilip ince lifler haline getirilmesiyle üretilen, en yaygın kullanılan takviye malzemelerinden biridir. Jeopolimer kompozitlerde genellikle E-camı (elektrik camı) ve AR-camı (alkali dirençli cam) kullanılır (Ertürkmen ve diğerleri, 2025).

- **E-Camı ve AR-Camının Karşılaştırılması:** E-camı, yüksek mukavemet ve düşük maliyet gibi avantajlara sahip olmasına rağmen, jeopolimer matrisi gibi yüksek alkali ortamlarda dayanım kaybına uğrayabilir. Buna karşılık, AR-camı, bileşimindeki zirkonyum oksit sayesinde alkali ortamlara karşı yüksek direnç gösterir. Bu nedenle, jeopolimer kompozitlerde uzun süreli dayanıklılık için AR-camı tercih edilir (Ertürkmen ve diğerleri, 2025).
- **Mekanik ve Fiziksel Özellikler:** Cam elyaflar, 2000-3500 MPa çekme mukavemeti ve 70-80 GPa elastik modül değerleriyle jeopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Özellikle kısa cam elyaflar, kompozitin darbe tokluğunu ve çatlak direncini belirgin şekilde artırır. Bununla birlikte, cam

elyafların bazalt elyafa kıyasla daha düşük elastik modülü ve 350-400°C gibi daha düşük üst sıcaklık limiti bulunur (Yan ve diğerleri, 2025; Ertürkmen ve diğerleri, 2025).

Kompozit Performansı ve Uygulama Alanları

Bazalt ve cam elyaflarla takviye edilmiş jeopolimer kompozitler, birçok endüstriyel alanda başarıyla kullanılmaktadır (Yan ve diğerleri, 2025).

- **Mekanik Performans Karşılaştırması:** Genel olarak, bazalt elyaflar, cam elyafa kıyasla jeopolimer kompozitlere daha yüksek çekme ve eğilme mukavemeti sağlar. Her iki elyaf türü de kompozitin tokluğunu ve çatlak direncini önemli ölçüde artırır. Elyaf matris ara yüzey bağlanması, her iki elyaf türünde de yüzey modifikasyonu ile daha da iyileştirilebilir (Yan ve diğerleri, 2025).
- **Termal Performans ve Yangın Direnci:** Bazalt elyaf takviyeli jeopolimer kompozitler, 800°C'ye kadar olan sıcaklıklarda mekanik özelliklerini büyük ölçüde koruyabilir. Cam elyaf takviyeli kompozitler ise 400-500°C'den sonra mukavemet kaybı görülmeye başlar. Bu nedenle, yüksek sıcaklık uygulamalarında bazalt elyaf daha üstün performans sergiler. Her iki kompozit türü de yangına karşı yüksek direnç gösterir ve alev geciktirici özellikleri ile öne çıkar (Ertürkmen ve diğerleri, 2025).
- **Dayanıklılık ve Çevresel Etkiler:** Bazalt elyaflar, nem, UV ışınları ve kimyasal maddelere karşı cam elyaftan daha yüksek direnç gösterir. Bu nedenle, agresif çevre koşullarında bazalt elyaf takviyeli kompozitler daha uzun ömürlüdür. Ayrıca, bazalt elyafın doğal hammaddelerden üretilmesi, onu cam elyafa kıyasla daha sürdürülebilir bir malzeme haline getirir (Yan ve diğerleri, 2025).

5.2.3. Polimerik Fiber Takviyeler

Polimerik fiber takviyeler, jeopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede, özellikle çekme mukavemeti ve darbe tokluğu konusunda, inorganik fiberlere alternatif veya tamamlayıcı bir yaklaşım sunar. Bu fiberler, esneklik, hafiflik ve kimyasal direnç gibi kendilerine özgü avantajlar getirir (Farhan, Johari, Demirboğa, Shihata, 2023; Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024). Ancak, organik yapıları ve genellikle daha düşük

ergime sıcaklıkları, jeopolimerin yüksek alkali ortamı ve potansiyel yüksek sıcaklık uygulamalarıyla olan uyumluluğu konusunda önemli mühendislik sorunları oluşturur (Qin ve diğerleri 2023).

Polypropilen (PP) Fiberler: Tokluk Artırıcı ve Çatlak Kontrolörü

PP fiberler, jeopolimer kompozitlerde en yaygın kullanılan sentetik polimer fiberlerden biridir. Mekanik mukavemetten ziyade, nihai ürünün tokluğunu ve dayanıklılığını artırmak amacıyla kullanılırlar (Farhan, Johari, Demirboğa, Shihata, 2023).

- **Takviye Mekanizması ve Performans:** PP fiberlerin temel işlevi, ikincil takviye olarak adlandırılan bir mekanizma ile çalışmalarıdır. Yüksek çekme mukavemetine sahip olmamalarına rağmen, yüksek uzama kapasiteleri vardır (Qin ve diğerleri 2023; Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024). Bu sayede, jeopolimer matrisi çatladığı anda, PP fiberler bu çatlakları birbirine bağlayarak fiber köprüleme etkisi gösterir. Çatlak açıldıkça fiberler gerilir ve büyük miktarda enerji yutarak kompozitin darbe tokluğunu ve kırılma enerjisini önemli düzeyde artırır (Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024). Bu özellik, rötre çatlaklarının kontrol altına alınmasında ve dinamik yüklere maruz kalan yapılarda son derece değerlidir (Qin ve diğerleri 2023; (Farhan, Johari, Demirboğa, Shihata, 2023).
- **Kimyasal ve Termal Uyum Sorunları:** PP fiberlerin en büyük dezavantajı, hidrofobik ve kimyasal olarak inert yapılarıdır. Bu, jeopolimerin yüksek alkali matrisi ile herhangi bir kimyasal bağ oluşturmadıkları anlamına gelir. Bağlanma tamamen zayıf mekanik kenetlenmeye dayanır (Srikrishna ve diğerleri, 2025). Ayrıca, ergime sıcaklıklarının yaklaşık 160°C civarında olması, yangın veya yüksek sıcaklık senaryolarında performanslarını tamamen kaybetmelerine neden olur. Bu koşullarda fiberler eriyerek kompozit içinde boşluklar oluşturur ve mukavemetin anlık olarak çökmesine sebep olabilir. Bu nedenle, yalnızca yüksek sıcaklık riskinin olmadığı, tokluk gerektiren uygulamalarda kullanılmaları uygundur (Farhan, Johari, Demirboğa, Shihata, 2023; Srikrishna ve diğerleri, 2025).

Polyvinil Alkol (PVA) Fiberler: Yüksek Performanslı Kimyasal Bağlanma

PVA fiberler, PP fiberlerin aksine, jeopolimer matrisi ile güçlü bir kimyasal etkileşim kurabilen yüksek performanslı polimerik fiberlerdir (Qin ve diğerleri 2023; Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024). Bu durum onları, hem mukavemet hem de tokluk artırımında daha verimli kılar.

- **Arayüzey Kimyası ve Mekanik Özellikler:** PVA zincirleri, hidroksil (-OH) gruplarıyla doludur. Bu gruplar, jeopolimer çözeltisindeki silanol (Si-OH) grupları ile yoğun bir şekilde hidrojen bağı kurabilir (Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024). Daha da önemlisi, kür sırasında bu hidroksil grupları, matrisin silikat ağı ile kovalent Si-O-C bağları oluşturabilir (Qin ve diğerleri 2023). Bu güçlü kimyasal bağlanma, fiber ile matris arasında olağanüstü bir arayüzey mukavemeti sağlar, bu da yükün fiberlere verimli bir şekilde aktarılmasına olanak tanır. Böylece, PVA fiber takviyeli jeopolimer kompozitler, hem yüksek bir çekme ve eğilme mukavemetine hem de fiber sıyırma mekanizmasıyla sağlanan üstün bir tokluğa sahip olur. Kırılma yüzeylerinde fiberlerin kopması, sıyırılmasından daha yaygındır, bu da bağlanmanın ne kadar güçlü olduğunun bir göstergesidir (Farhan, Johari, Demirboğa, Shihata, 2023).
- **Dayanıklılık ve Alkali Ortamda Kararlılık:** PVA fiberler, alkali ortamlarda PP'ye kıyasla çok daha karardır (Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024; Srikrishna ve diğerleri, 2025). Ancak, uzun süreli yüksek pH ve sıcaklık altında, reçineleşme adı verilen bir bozunma süreci yaşayabilirler. Bu süreçte, PVA zincirleri çapraz bağlanarak daha sert ve daha kırılğan hale gelir, bu da esnekliklerini ve tokluk katkılarını azaltabilir. Bu sorunu hafifletmek için, PVA fiberler genellikle alkali direnci artırmak amacıyla özel kaplamalarla üretilir. PP fiberlere kıyasla daha yüksek bir termal dayanıma sahip olsalar da, uzun süreli yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun değildir (Qin ve diğerleri 2023).

AR-Glass (Alkali Dirençli Cam) Fiberler: İnorganik Bir Çözüm

AR-Cam elyaf, teknik olarak bir polimerik fiber olmamasına rağmen, bu bağlamda ele alınmasının nedeni, polimerik matrisli kompozitlerde kullanılan standart E-camının aksine, yüksek alkali ortamlara dayanacak şekilde özel olarak formüle edilmiş olmasıdır. Bu, onu jeopolimerler için ideal bir inorganik takviye malzemesi yapar (Srikrishna ve diğerleri, 2025; Ryvolová, Svobodová, Bakalova, Voleský, 2021).

- **Alkali Direnç Mekanizması:** Standart E-camı, jeopolimerin yüksek pH'lı ortamında zamanla ağır hasar görür ve mukavemetini kaybeder. AR-Cam, bileşimine eklenen %10-20 oranındaki Zirkonya (ZrO_2) sayesinde bu saldırıya direnir. Zirkonya, cam ağı içinde stabil bir yapı oluşturarak, alkali iyonların cam ağını aşındırmasını ve çözmesini büyük ölçüde engeller (Srikrishna ve diğerleri, 2025; Ryvolová, Svobodová, Bakalova, Voleský, 2021). Bu, AR-Cam takviyeli kompozitlerin uzun vadeli dayanıklılığını garanti altına alan kritik bir özelliktir.
- **Mekanik Performans ve Uygulama Alanları:** AR-Cam fiberler, yüksek çekme mukavemeti ve elastik modül sunar. Bu özellikleriyle, kompozite hem mukavemet hem de sertlik kazandırır. PVA'da olduğu gibi, cam yüzeyindeki silanol grupları jeopolimer matrisi ile güçlü kimyasal Si-O-Si bağları oluşturur. AR-Cam takviyeli jeopolimer kompozitler, ince, eğilmez yapı elemanları, dış cephe kaplamaları ve hafif prekast paneller gibi, hem yüksek mukavemet hem de uzun ömür gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Termal dayanımları polimerik fiberlerden üstündür (Srikrishna ve diğerleri, 2025; Ryvolová, Svobodová, Bakalova, Voleský, 2021).

Sonuç ve Karşılaştırmalı Değerlendirme

Bu üç fiber tipi, jeopolimer kompozitlere farklı özellik katar ve farklı uygulama hedefleri için seçilir:

- **PP Fiberler:** Ekonomiktir ve temel amacı tokluğu ve çatlak kontrolünü artırmaktır. Yüksek sıcaklık ve kimyasal bağlanmanın

kritik olmadığı uygulamalarda kullanılır (Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024; Srikrishna ve diğerleri, 2025).

- **PVA Fiberler:** Yüksek performanslıdır, hem mukavemeti hem de tokluğu mükemmel bir dengeyle artırır. Güçlü kimyasal bağlanma isteyen, ancak sürekli çok yüksek sıcaklığa maruz kalmayacak uygulamalar için idealdir (Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024; Srikrishna ve diğerleri, 2025).
- **AR-Cam Fiberler:** Uzun vadeli dayanıklılık ve yüksek mukavemetin ön planda olduğu, yüksek alkali ortamla tam uyum gerektiren uygulamalarda birincil seçenektir. Polimerik fiberlere kıyasla daha yüksek bir termal stabilite sunar (Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024; Srikrishna ve diğerleri, 2025).

Seçim, uygulamanın gerektirdiği mekanik performans, dayanıklılık, termal direnç ve maliyet kriterlerine bağlı olarak yapılır (Zhang, Feng, Yuan, Hu, Yuan, 2024; Srikrishna ve diğerleri, 2025).

5.3.Hafif Jeopolimerler ve Köpük Jeopolimerler

Hafif jeopolimerler, geleneksel jeopolimerlere kıyasla çok daha düşük yoğunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmış malzemelerdir (Zhang ve diğerleri, 2021). Bu düşük yoğunluk, malzemeye bir dizi benzersiz özellik kazandırır: ısı ve ses iletimini önemli ölçüde azaltır, yangın dayanımını artırır ve taşıma ve inşaat maliyetlerini düşürür. Köpük jeopolimerler, hafif jeopolimerlerin en yaygın ve etkili şeklidir. İçlerinde kontrollü bir şekilde oluşturulmuş, birbirine bağlı veya kapalı hücre yapısına sahip bir gözenek ağı barındırırlar (Zhang ve diğerleri, 2021).

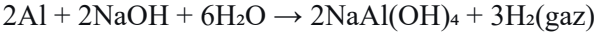
5.3.1.Köpük Oluşturma Mekanizmaları

Köpük jeopolimer üretiminin merkezinde, jeopolimer hamurunun veya çözeltisinin içinde istikrarlı bir gaz fazının oluşturulması ve bu gaz kabarcıklarının, jeopolimerizasyon reaksiyonu ilerleyip malzeme katılaşana kadar dağılmasını önleyecek şekilde sabitlenmesi yatar (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025). Bu süreç, temelde kimyasal, fiziksel ve fiziko kimyasal olmak üzere üç ana mekanizma ile gerçekleştirilir. Her bir mekanizma, farklı gözenek yapıları, boyut dağılımları ve nihai malzeme özellikleri üretir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

Kimyasal Köpük Oluşturma

Bu yöntem, köpürme reaksiyonunun, jeopolimerizasyon reaksiyonu ile aynı anda ve iç içe geçmiş bir şekilde ilerlemesine dayanır. Gaz, jeopolimer karışımına eklenen kimyasal ajanların reaksiyonu sonucu doğrudan matris içinde üretilir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

- **Metal ile Gaz Oluşumu:** Bu, en klasik ve yaygın kullanılan kimyasal köpük oluşturma yöntemidir. Toz halindeki saf alüminyum (Al), jeopolimerin pH > 13 olan yüksek alkali ortamı ile şu şekilde şiddetli bir reaksiyona girer:



(Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

Bu reaksiyon, hidrojen (H₂) gazı açığa çıkarır. Oluşan mikroskobik hidrojen kabarcıkları, viskoz jeopolimer hamuru içinde sıkışarak genişler ve gözenekleri oluşturur. Reaksiyonun hızı ve dolayısıyla köpük yapısı, Al tozunun inceliği, miktarı, alkali konsantrasyonu ve karışım sıcaklığı gibi parametrelerle hassas bir şekilde kontrol edilir. Çok ince tozlar hızlı, kontrolsüz bir gaz çıkışına neden olarak büyük ve birleşik gözenekler oluşturabilir. Daha kaba tozlar ise reaksiyonu yavaşlatarak daha küçük ve daha düzenli bir gözenek yapısı sağlar (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

- **Hidrojen Peroksit (H₂O₂) Ayrışması:** Bir diğer yaygın yöntem, hidrojen peroksitin jeopolimer karışımına eklenmesidir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025). Yüksek pH veya bir katalizör varlığında, H₂O₂ kararsız hale gelerek hızla ayrışır:



Bu reaksiyon, oksijen (O₂) gazı üretir. H₂O₂'nin ayrışma hızı, köpük yapısını belirler (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025). Hızlı ayrışma, büyük ve düzensiz gözeneklere yol açarken, kontrollü ve kademeli bir ayrışma, küçük ve homojen bir hücresel yapı oluşturur. H₂O₂ yöntemi, Al tozuna kıyasla genellikle daha düzgün yüzeyli ve küresel gözenekler üretme eğilimindedir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

Fiziksel (Mekanik) Köpük Oluşturma

Bu yöntemde gaz fazı, jeopolimer çözeltisinin dışarıdan mekanik olarak çırpılmasıyla içeri dahil edilir. Oluşturulan köpük daha sonra taze jeopolimer hamuru ile karıştırılır veya doğrudan kalıba dökülür (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

Yüzey Aktif Ajanların (Sürfaktanlar) Rolü: Fiziksel köpük oluşturma başarısı, büyük oranda surfaktanların kullanımına bağlıdır. Sürfaktan molekülleri, bir ucu hidrofilik, diğer ucu hidrofobik yapıya sahiptir. Çırpma işlemi sırasında, bu moleküller hava kabarcığı su ara yüzeyine yerleşerek, hidrofobik kuyruklar havaya, hidrofilik başlar ise jeopolimer çözeltisine dönecek şekilde oriente olur. Bu orientasyon, arayüzey gerilimini kritik seviyenin altına düşürerek, kabarcıkların oluşmasını kolaylaştırır ve birleşip büyümelerini engelleyerek köpük yapısını stabilize eder (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

Köpük Karakteristiğı ve İşlem Kontrolü: Bu yöntem, gözenek boyutu ve dağılımı üzerinde yüksek düzeyde kontrol sağlar. Çırpma hızı, süresi ve surfaktan tipi/konsantrasyonu, köpüğün hava içeriğini ve kabarcık boyutunu doğrudan belirler. Elde edilen köpük, ana jeopolimer hamuru ile karıştırılarak homojen bir dağılım sağlanır. Bu süreç, özellikle çok ince ve tekdüze kapalı hücreli yapılar üretmek için idealdir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

Fiziko Kimyasal Yöntemler

Bu kategori, fiziksel ve kimyasal prensipleri birleştiren veya malzemenin fiziksel durumundaki bir değişiklikten yararlanan yöntemleri içerir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

- **Replika (Şablon) Yöntemi:** Dolaylı bir yöntemdir. Gözenek yapısı, karışıma önceden eklenen, belirli bir boyuta ve şekle sahip hacimli dolgu maddeleri tarafından oluşturulur. Takviye yapılan malzemeler, jeopolimerizasyon ve kür işlemleri tamamlandıktan sonra, genellikle yüksek sıcaklıkta yakılarak veya çözücü ile uzaklaştırılarak gözenekler bırakır. Bu yöntem, gözenek geometrisi ve bağlantısı üzerinde çok hassas bir kontrol sağlar (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

- **Jelasyon ve Su Buharlaştırma Yöntemi:** Özel formülasyonlarla, jeopolimer karışımı yüksek su içeriği ile hazırlanır. Kür sırasında, jeopolimer önce bir jel haline gelir ve ardından kontrollü kurutma ile su buharlaştırılır. Buharlaşan suyun bıraktığı boşluklar, gözenekli yapıyı oluşturur. Bu yöntem, genellikle birbirine bağlı, açık gözenekli bir yapı üretir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

Köpük Stabilizasyonunun Kritik Önemi

Hangi mekanizma kullanılırsa kullanılsın, köpük jeopolimer üretimindeki en kritik aşama, oluşan köpük yapısının stabilizasyonudur. Gaz kabarcıkları, jeopolimer hamurunun viskozitesi ve yüzey gerilimi yeterince yüksek değilse, birleşerek büyüyebilir veya yüzeye çıkarak ayrışabilir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025). İdeal stabilizasyon, köpük oluşum hızı ile jeopolimerizasyon reaksiyonunun hızlanarak hamurun viskozitesini ve nihayetinde mukavemetini artırdığı katılaşma noktası senkronizasyonla sağlanır. Reaksiyon çok yavaş ise köpük çöker, çok hızlı ise köpük oluşumu için yeterli zaman kalmaz. Bu nedenle, aktivatör konsantrasyonu, silikat modülü, kür sıcaklığı ve katkı maddeleri gibi parametrelerin optimizasyonu, başarılı bir köpük jeopolimer üretimi için hayati öneme sahiptir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

5.3.2.Yapı-Hücre İlişkisi ve Özellikler

Köpük jeopolimerlerin nihai fiziksel, mekanik ve fonksiyonel özellikleri, tamamen sahip oldukları hücresel mikroyapı tarafından belirlenir. Bu yapı - özellik ilişkilerini anlamak, belirli bir uygulama için istenen performansı sağlayacak malzemeyi tasarlamamanın temelini oluşturur (Yang, Li, He, Liao, 2025). Gözenek yapısının morfolojisi, malzemenin yoğunluğu, mekanik davranışı, ısı ve ses iletimi ile akışkan geçirgenliği gibi tüm kritik özellikler üzerinde doğrudan ve derin bir etkiye sahiptir.

Hücresel Morfolojinin Temel Bileşenleri

Köpük jeopolimerlerin mikroyapısını tanımlayan ve sınıflandıran birkaç temel parametre bulunur:

- **Gözenek Boyutu ve Dağılımı:** Gözeneklerin ortalama çapı ve boyutlarının birbirine ne kadar yakınlığı kritik öneme sahiptir. Genel olarak, küçük ve tekdüze dağılıma sahip gözenekler, büyük ve geniş dağılımlı gözeneklere kıyasla daha yüksek mekanik mukavemet ve daha düşük ısı iletkenliği sağlar (Chen ve diğerleri, 2025). Küçük gözenekler, çatlak ilerlemesi için daha dolambaçlı bir yol oluşturur ve içeride hapsolmuş havanın konveksiyon yoluyla ısı transferini sınırlandırır (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).
- **Gözenek Şekli ve Hücre Duvarı Topolojisi:** Gözenekler genellikle küresel, poligonal veya uzamış şekillerde olabilir. Küresel ve kapalı hücreler, genellikle daha iyi mekanik özellikler ve su geçirmezlik sunar. Poligonal yapılar ise hücrelerin birbirine sıkıca paketlenmesi durumlarında oluşur ve hücre duvarlarının düzlemsel yapısı nedeniyle farklı bir deformasyon davranışı sergiler (Chen ve diğerleri, 2025). Hücre duvarlarının kalınlığı, düzgünlüğü ve bütünlüğü bir diğer hayati parametredir. İnce, kırık veya mikro çatlaklı hücre duvarları, mukavemeti ve ısı direnci ciddi şekilde düşürür (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Açık-Hücre/Kapalı-Hücre Oranı:** Bu, köpük jeopolimerlerin en temel sınıflandırma kriterlerinden biridir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).
 - **Kapalı-Hücre Yapı:** Her bir gözenekğin etrafı sürekli bir katı duvarla çevrilidir ve gözenekler birbirinden izoledir. Bu yapı, malzemenin içinden sıvı veya gaz akışını engeller, su emilimini minimize eder ve ısı iletimini büyük ölçüde azaltır. Mekanik olarak, kapalı hücreler basınç yüklerine karşı daha dayanıklıdır çünkü sıkıştırılan hava, ek bir yük taşıma bileşeni sağlar (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).
 - **Açık-Hücre Yapı:** Gözenekler birbirine bağlıdır ve katı iskelet sürekli bir ağ oluşturur. Bu yapı, ses enerjisinin sönümlenmesi, sıvı filtreleme veya katalist taşıyıcı olarak kullanım için idealdir. Ancak, ısı iletkenlikleri daha yüksek, mekanik mukavemetleri ise genellikle aynı yoğunluktaki

kapalı hücreli köpüklere kıyasla daha düşüktür (Chen ve diğerleri, 2025).

Yoğunluk-Mukavemet İlişkisi ve Mekanik Davranış

Köpük jeopolimerlerin mekanik özellikleri, öncelikle göreceli yoğunluklarına bağlıdır. Bu ilişki, Gibson-Ashby modeli gibi mekanik modellerle tanımlanır. Genel eğilim, yoğunluk arttıkça tüm mekanik özelliklerin de arttığı yönündedir. Ancak bu artış lineer değildir; yoğunluktaki küçük bir artış, mukavemette büyük bir sıçramaya neden olabilir (Yang, Li, He, Liao, 2025).

Mekanik davranış, hücre duvarlarının mukavemetine ve gözenek yapısına bağlı olarak farklılık gösterir:

- **Basınç Altında Davranış:** Düşük yoğunluklu köpüklerde, basınç uygulandığında ilk olarak en zayıf hücre duvarları burkulur veya kırılır. Stres - şekil değiştirme eğrisinde geniş bir plato bölgesi oluşur. Bölgede, küçük bir stres artışıyla malzeme büyük oranda sıkıştırılabilir çünkü hücreler kademeli olarak çöker. Bu özellik, enerji sönümleme uygulamaları için son derece değerlidir. Yoğunluk arttıkça bu plato bölgesi daralır ve malzeme daha rijit, daha katı benzeri bir davranış sergiler (Chen ve diğerleri, 2025).
- **Kırılma Mekanizması:** Köpüklerdeki çatlak ilerlemesi, katı malzemelerden farklıdır. Bir çatlak, hücre duvarlarını kırarak ve açarak ilerler. Açık hücreli yapılarda çatlak ilerlemesi nispeten daha kolayken, kapalı hücreli yapılarda ve küçük gözenekli yapılarda çatlağın ilerleyebileceği yol daha dolambaçlı olduğu için kırılma tokluğu daha yüksektir (Abdellatif, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).

Isı ve Ses İletim Mekanizmaları

Köpük jeopolimerlerin üstün yalıtım özellikleri, hücresel yapıları sayesinde ısı ve ses iletimini minimize etmelerinden kaynaklanır (Chen ve diğerleri, 2025).

- **Termal İletkenlik:** Bir köpükte ısı transferi dört yolla gerçekleşir:
1) Katı maddenin ısı iletimi (katı iletim) (Chen ve diğerleri, 2025).

- 2) Hücreler içindeki gazın ısı iletimi (gaz iletimi) (Chen ve diğerleri, 2025).
- 3) Gazın konveksiyonu (hava akımı) (Chen ve diğerleri, 2025).
- 4) Radyasyon (Chen ve diğerleri, 2025).
 - **Düşük Yoğunluk Etkisi:** Düşük yoğunluk, ısıyı ileten katı madde miktarının azaldığı anlamına gelir, bu da katı iletimini azaltır (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).
 - **Kapalı Hücre Yapısının Rolü:** Kapalı hücreler, gaz konveksiyonunu neredeyse tamamen engelleyerek en büyük ısı kaybı mekanizmalarından birini ortadan kaldırır. Ayrıca, hücreler içindeki havanın termal iletkenliği, katı jeopolimerden çok daha düşüktür (Chen ve diğerleri, 2025).
 - **Küçük Gözenek Avantajı:** Küçük gözenek boyutları, konveksiyonu daha da sınırlandırır. Bu nedenle, düşük yoğunluklu, küçük gözenekli, kapalı hücreli bir yapı, en düşük termal iletkenlik değerlerine ulaşmak için idealdir (Yang, Li, He, Liao, 2025).
- **Akustik Performans:** Açık-hücreli köpük jeopolimerler mükemmel ses yutuculardır. Ses dalgaları, birbirine bağlı gözenek ağına girdiğinde, hava ile katı hücre duvarları arasında sürtünmeye ve viskoz kayıplara uğrar. Bu süreçte ses enerjisi, ısı enerjisine dönüştürülerek sönmelenir. Gözenek boyutu, bağlantısı ve malzemenin gözenekliliği, hangi frekans bandının ne kadar etkili bir şekilde yutulacağını belirler (Chen ve diğerleri, 2025).

Diğer Fiziksel Özellikler

- **Su Emilimi:** Kapalı hücre yapı, suyun malzeme içine nüfuz etmesini fiziksel olarak engellediği için su emilimi çok düşüktür. Açık hücreli yapılarda ise su, kılcal etkiyle gözenekler içinde kolayca ilerleyebilir, bu da yalıtım performansını düşürür ve donma çözülme döngülerinde hasara yol açabilir (Abdellatief, Hassanien, Mortagi, Hamouda, 2025).
- **Yangın Direnci:** Jeopolimer matrisinin doğal refrakter özellikleri, köpük yapı sayesinde daha da belirgin hale gelir. Düşük termal iletkenlik, yangının malzeme içinde yayılmasını yavaşlatır. Isıl

kararlılık, yapısal bütünlüğün yüksek sıcaklıkta uzun süre korunmasını sağlar, bu da pasif yangın korumasında hayati öneme sahiptir (Yang, Li, He, Liao, 2025).

5.3.3.Uygulama Alanları

Hafif jeopolimerler ve köpük jeopolimerler, sahip oldukları benzersiz özellik kombinasyonu sayesinde geleneksel malzemelere kıyasla birçok üstünlük sunar. Bu malzemeler, yalnızca hafiflik ve yalıtım sağlamakla kalmaz, aynı zamanda jeopolimerik matrisin doğası gereği yüksek yangın dayanımı, kimyasal inertlik ve uzun ömürlülük gibi avantajlar da getirir (Sarazin ve diğerleri, 2021). Hafiflik, ısı-ses yalıtımı ve yangın güvenliği jeopolimerleri aşağıdaki kritik uygulama alanlarında vazgeçilmez kılar (Bazan ve diğerleri, 2024).

Hafif Dolgu Malzemeleri

Hafif dolgu malzemelerinin temel işlevi, yapısal yük taşımak değil, hacim doldurarak istenmeyen yükleri azaltmak, eğim oluşturmak veya zayıf zeminleri iyileştirmektir. Köpük jeopolimerler, bu alanda devrim yaratacak niteliktedir (Ekiz Barış, Tanaçan, 2022).

- **Hafifliğin Mühendislik Avantajları:** Kum, çakıl, beton gibi geleneksel dolgu malzemeleri çok ağırdır ve özellikle zayıf zeminler üzerinde veya mevcut yapıların üzerine ek inşaatla önemli oturmalara ve stabilite problemlerine neden olur. Çok düşük birim ağırlığına sahip köpük jeopolimerler, zemine bindirilen yükü %70-80 oranında azaltabilir (Song ve diğerleri, 2024). Bu, viyadük yaklaşım dolgularında, köprü arka dolgularında ve heyelanlı zeminlerin iyileştirilmesinde son derece değerlidir. Önemli bir oturma yapmazlar, bu da inşaat sonrası bakım maliyetlerini düşürür (Ekiz Barış, Tanaçan, 2022).
- **Akıcılık ve Şekil Alma Kabiliyeti:** Özel olarak formüle edilmiş köpük jeopolimer şerbeti, kendi kendine yerleşen ve akıcı bir yapıya sahiptir. Bu sayede, en dar, ulaşılması zor veya karmaşık geometrilili dolgu alanlarını, hiçbir mekanik sıkıştırmaya ihtiyaç duymadan tamamen ve homojen bir şekilde doldurabilir. Döküldüğü kalıbın

veya mevcut yapının şeklini mükemmel bir şekilde alır, boşluk bırakmaz (Song ve diğerleri, 2024).

- **Yapısal Bütünlük ve Dayanıklılık:** Sıkıştırılmış granüler dolgular zamanla su infiltrasyonu nedeniyle oturabilir veya boşluklar oluşturabilir. Buna karşılık, kapalı hücreli köpük jeopolimerler suya ve donma çözülme döngülerine karşı dayanıklıdır, bozulmaz ve yapısal bütünlüğünü onlarca yıl korur (Ekiz Barış, Tanaçan, 2022). Ayrıca, sahip oldukları basınç dayanımı dolgu için yeterli olup, aynı zamanda üzerindeki yükleri emniyetle dağıtabilir (Bazan ve diğerleri, 2024).

Yangın Yalıtım Panelleri

Jeopolimer köpükler, organik esaslı yalıtım malzemelerinin aksine, A1 sınıfı yanmaz malzemelerdir. Bu onları, pasif yangın güvenliğinin hayati önem taşıdığı yapılarda birinci tercih haline getirir (Sarazin ve diğerleri, 2021).

- **Yüksek Termal Kararlılık ve Isıl Dayanım:** Jeopolimerik bağ, organik polimerik bağlardan çok daha yüksek sıcaklıklarda bozunur. Köpük jeopolimer paneller, 1000°C'yi aşan sıcaklıklara saatlerce maruz kalsalar dahi erimez, alev almaz veya toksik duman çıkarmazlar. Yalnızca yavaş bir ısı iletimi gösterirler. Bu özellik, yangının yayılmasını yavaşlatarak, can ve mal kurtarma ve yangına müdahale için paha biçilmez bir zaman kazandırır (Le ve diğerleri, 2022).
- **Düşük Isı İletkenliğin Kritik Rolü:** Malzemenin köpüksü yapısı, içinde hapsolmuş hava sayesinde çok düşük termal iletkenlik değerlerine ulaşır. Bu, hem enerji verimliliği için normal koşullarda etkili bir ısı yalıtımı sağlar, hem de yangın anında ısının yapısal elemanlara ulaşmasını geciktirir (Song ve diğerleri, 2024). Çeliğin taşıma kapasitesi 500°C civarında kritik şekilde düştüğü için, bir çelik kolonu kaplayan köpük jeopolimer panel, çeliğin bu kritik sıcaklığa ulaşma süresini önemli ölçüde uzatarak, yapının göçmesini önler (Bazan ve diğerleri, 2024).
- **Entegre Yapısal ve Yangın Yalıtımı:** Yüksek mukavemetli jeopolimer köpükler, aynı anda hem yük taşıyıcı hafif bir panel hem

de mükemmel bir yangın bariyeri olarak tasarlanabilir. Bu iki fonksiyonlu malzeme konsepti, inşaat süreçlerini basitleştirir ve maliyetleri düşürür (Le ve diğerleri, 2022).

Akustik İzolasyon

Ses kirliliği, modern şehir yaşamının önemli sorunlarındanıdır. Köpük jeopolimerler, hem ses yutma hem de ses yalıtımı açısından etkili çözümler sunar (Ekiz Barış, Tanaçan, 2022).

- **Ses Yutma:** Açık gözenekli köpük jeopolimerler, mükemmel bir ses yutucudur. Ses dalgaları, birbirine bağlı labirent gibi gözenek ağına girdiğinde, hava molekülleri ile gözenek duvarları arasında sürtünmeye uğrar. Bu sürtünme, ses enerjisini ısı enerjisine dönüştürerek etkili bir şekilde sönümler. Gözenek boyutu, bağlantısı ve malzeme kalınlığı ayarlanarak, istenen frekans aralığında maksimum ses yutma sağlanabilir. Konser salonları, stüdyolar, ofis bölmeleri ve gürültülü endüstriyel tesislerde akustik konforu artırmak için kaplama malzemesi olarak kullanılır (Song ve diğerleri, 2024).
- **Ses Yalıtımı:** Ses yalıtımı, bir yapı elemanının sesi ne kadar engellediği ile ilgilidir ve büyük ölçüde malzemenin kütlesine bağlıdır. Bu noktada, kapalı hücreli ve daha yüksek yoğunluklu köpük jeopolimerler devreye girer. Bu kompozit paneller, hafif olmalarına rağmen beton veya tuğlaya kıyasla daha düşük olsa da, geleneksel yalıtım malzemelerinden daha iyi bir kütle ve rijitlik sunar. Özellikle hava kaynaklı seslerin iletilmesini azaltmada etkilidirler. Duvarlara veya döşemelere uygulanarak, bina içi odalar arasındaki ses geçişini sınırlandırmak için kullanılabilirler (Le ve diğerleri, 2022).
- **Yangın Güvenliği ile Kombinasyon:** Ses yalıtımı için kullanılan birçok geleneksel malzeme yanıcı olabilir veya toksik duman çıkarabilir. Köpük jeopolimer, aynı anda hem üst düzey yangın güvenliği hem de etkili akustik performans sunan nadir malzemelerden biridir. Bu, tüneller, metro istasyonları, hastaneler ve yüksek güvenlik gerektiren binalar gibi her iki özelliğin de kritik olduğu yerlerde büyük bir avantajdır (Bazan ve diğerleri, 2024).

5.4. İzolasyon Malzemesi Olarak Kullanımı

Jeopolimerler, geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla sunduğu üstün performans özellikleri nedeniyle, hem termal hem de akustik izolasyon alanında giderek daha fazla dikkat çeken bir malzeme grubudur (Song ve diğerleri, 2024). Yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal inertlik, boyutsal kararlılık ve çevre dostu bileşimi, onları inşaat, endüstri ve enerji sektörlerinde vazgeçilmez kılan temel avantajlardır (Le ve diğerleri, 2022).

5.4.1. Termal İzolasyon Özellikleri

Bir malzemenin termal izolasyon kabiliyeti, esas olarak düşük termal iletkenlik değeri ile karakterize edilir. Jeopolimerler ve özellikle köpük jeopolimerler, karmaşık ve çok bileşenli bir yapıya sahip oldukları için termal iletkenlikleri, içyapıları tarafından kontrol edilen çeşitli ısı transfer mekanizmalarının bir bileşkesidir (Zhang, Provis, Reid, Wanga, 2015). Bu malzemelerde ısı transferi; katı iletim, gaz iletimi, konveksiyon ve radyasyon olmak üzere dört temel mekanizma ile gerçekleşir (Song ve diğerleri, 2024).

Düşük Termal İletkenlik Değerleri ve Altında Yatan Mekanizmalar

Jeopolimer köpükler, 0.04 W/mK ile 0.08 W/mK aralığında son derece düşük termal iletkenlik değerlerine ulaşabilir. Bu değer, geleneksel betonun çok altında olup, poliüretan veya genleştirilmiş polistiren (EPS) gibi organik köpüklerle rekabet edebilecek düzeydedir (Przybek, Łach, 2024). Bu performans, aşağıdaki faktörlerin sinerjistik etkisiyle sağlanır:

- **Katı İletimin Minimizasyonu:** Isı, katı faz boyunca titreşimler yoluyla iletilir. Köpük jeopolimerlerde katı faz, gözenekli yapı nedeniyle süreksizdir ve toplam hacmin %10-30 gibi çok küçük bir kısmını oluşturur. Bu da, ısının iletilmesi için sürekli ve kesintisiz bir katı yol bulmasını zorlaştırarak katı iletim mekanizmasını büyük ölçüde baskılar. Düşük yoğunluk, doğrudan düşük katı iletim anlamına gelir (Zhang, Provis, Reid, Wanga, 2015).
- **Gaz İletiminin Kontrolü:** Kapalı gözeneklerin içinde hapsedilmiş hava veya diğer gazlar, ısıyı katı jeopolimerden çok daha düşük bir verimlilikle iletir. Havanın termal iletkenliği oda sıcaklığında yaklaşık 0.026 W/mK'dir. Bu, köpüğün genel ısı direncinin ana

kaynağıdır. Gaz iletimi, gözenek boyutu küçüldükçe daha da azalma eğilimindedir, çünkü gaz molekülleri ile gözenek duvarı arasındaki çarpışmalar artar ve enerji transferi verimsizleşir (Przybek, Łach, 2024).

- **Konveksiyonun Engellenmesi:** Köpük içindeki hava hareketi, ısı transferini hızlandıran önemli bir mekanizmadır. Kapalı hücreli bir yapı, gözenekler arası hava sirkülasyonunu fiziksel olarak engelleyerek bu ısı transfer yolunu neredeyse tamamen ortadan kaldırır. Bu nedenle, kapalı hücre oranı ne kadar yüksekse, konvektif ısı kaybı o kadar düşük olur ve yalıtım performansı o kadar iyileşir (Le ve diğerleri, 2022).
- **Radyasyonun Sınırlandırılması:** Yüksek sıcaklıklarda, ısı radyasyon önemli bir ısı transfer mekanizması haline gelir. Radyatif ısı transferi, malzemenin içinden geçen infrared dalgalar şeklinde gerçekleşir. Köpük jeopolimerlerde, çok sayıda gözenek duvarı, bu infrared dalgalar için birer saçılma merkezi görevi görerek radyasyonun malzeme içindeki yolunu uzatır ve etkinliğini azaltır. İnce ve çok sayıda hücre duvarı, radyatif ısı transferini minimize etmede daha etkilidir (Song ve diğerleri, 2024).

Yüksek Sıcaklık Dayanımı ve Termal Kararlılık

Jeopolimerlerin organik köpüklerden en radikal farkı, termal performanslarını yüksek sıcaklıklarda da koruyabilmeleridir (Le ve diğerleri, 2022).

- **Yapısal Bütünlüğün Korunması:** Poliüretan veya EPS gibi malzemeler 100-200°C civarında erir, yumuşar veya bozunur, bu da yalıtım özelliklerini ve yapısal bütünlüğünü anında kaybetmelerine neden olur. Buna karşılık, jeopolimerler amorf, inorganik bir ağ yapısına sahiptir ve 1000°C'yi aşan sıcaklıklara kadar erimez veya alev almaz. Bu, yangın durumunda dahi yalıtım özelliğini ve mekanik stabilitesini sürdürebildiği anlamına gelir (Kepniak, Zabawski, Prochoń, 2024).
- **Termal İletkenlikteki Değişim:** Oda sıcaklığında, organik köpükler biraz daha düşük termal iletkenlik gösterebilir. Ancak, sıcaklık

artıkça jeopolimer köpüklerin avantajı belirginleşir. Yüksek sıcaklıklarda, kapalı gözeneklerdeki gaz basıncı artar ve radyasyon önem kazanır, ancak jeopolimer matrisinin bozulmaması, malzemenin göçmesini engeller. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta jeopolimer matrisinde meydana gelen sinterleme ve faz dönüşümleri, bazen gözenek yapısını daha da stabilize ederek uzun süreli yüksek sıcaklık performansını destekler (Zhang, Provis, Reid, Wanga, 2015).

Termal Genleşme Uyumu ve Uygulama Avantajı

Jeopolimerlerin termal genleşme katsayısı, beton ve çelik gibi geleneksel yapı malzemelerine oldukça yakındır. Bu uyum, sıcaklık dalgalanmaları olduğunda, jeopolimer yalıtım malzemesi ile alt tabakası arasında önemli bir gerilim oluşmasını engeller (Przybek, Łach, 2024). Bu da, kaplama ve yalıtım sistemlerinde çatlak oluşumu veya tabakaların ayrılması riskini azaltarak, uzun ömürlü ve güvenilir bir performans garantisi sağlar (Song ve diğerleri, 2024).

5.4.2.Akustik İzolasyon Özellikleri

Jeopolimerler, özellikle köpük ve gözenekli formlarıyla, ses enerjisini kontrol etmede iki temel mekanizma üzerinden etkili bir performans sergiler: ses yutma ve ses yalıtımı (Zhang, Provis, Reid, Wanga, 2015). Bu malzemelerin akustik davranışı, büyük ölçüde gözenek morfolojisi (açık/kapalı hücre, gözenek boyutu, bağlantısallık), yoğunluk ve malzeme kalınlığı gibi parametrelere bağlıdır (Kepniak, Zabawski, Prochoń, 2024).

Ses Yutma (Akustik Absorpsiyon) Mekanizmaları

Ses yutma, bir malzemenin ses enerjisini ısı enerjisine dönüştürme yeteneğidir. Bu, esas olarak birbirine bağlı, açık gözenekli yapıya sahip jeopolimerlerde etkili bir şekilde gerçekleşir (Przybek, Łach, 2024). Süreç üç ana mekanizma ile işler:

- **Viskoz Kayıplar:** Ses dalgası malzemenin açık gözeneklerine nüfuz ettiğinde, gözeneklerdeki hava molekülleri, dar kanallar boyunca titreşimsel hareket yapmak zorunda kalır. Bu hareket, havanın viskozitesi nedeniyle dirençle karşılaşır ve ses enerjisinin bir kısmı

sürtünme yoluyla ısıya dönüşerek dissipe olur. Gözenek ne kadar dar ve dolambaçlı ise, hava hareketinin hız gradyanı o kadar yüksek olur ve viskoz kayıplar o kadar artar (Przybek, Łach, 2024).

- **Termal İletim Kayıpları:** Ses dalgası, gözenek içindeki havada bir basınç ve dolayısıyla sıcaklık dalgalanması yaratır. Sesin sıkıştığı fazda hava ısınır, genişlediği fazda soğur. Açık gözenekli jeopolimerin büyük iç yüzey alanı, bu ısının hızla katı iskelete iletilmesini ve havaya geri dönmeden dağılmasını sağlar. Bu ısı alışverişi de ses enerjisinin bir kısmını tüketir (Przybek, Łach, 2024).
- **Gözenek Rezonansı:** Belirli bir kalınlık ve gözenek yapısına sahip malzemeler, belirli bir frekansta rezonansa girerek o frekanstaki ses enerjisini çok yüksek verimlilikle yutabilir. Gözenek boyutu ve malzeme kalınlığı optimize edilerek, yutulması istenen baskın frekans aralığı hedeflenebilir (Przybek, Łach, 2024).

Bu mekanizmalar sayesinde, özellikle 500 Hz ve üzeri gibi orta ve yüksek frekanslı seslerde çok etkili ses yutucular olarak çalışırlar. Ses yutma katsayısı (α), 0 (tam yansıma) ile 1 (tam yutma) arasında değişir ve açık hücreli jeopolimer köpükler, yüksek frekanslarda 0.8-0.9 gibi oldukça yüksek ses yutma katsayılarına ulaşabilir (Przybek, Łach, 2024).

Ses Yalıtımı Performansı

Ses yalıtımı, bir malzemenin bir taraftan diğer tarafa ses iletimini ne derece engellediği ile ilgilidir ve genellikle Desibel (dB) cinsinden ifade edilen Ses Azaltma İndeksi (R) ile ölçülür. Bu performans, büyük ölçüde Kütle Kanununa tabidir: birim alandaki kütle (yüzey yoğunluğu) arttıkça ses yalıtımı da artar (Le ve diğerleri, 2022).

- **Kütle ve Rijitliğin Rolü:** Jeopolimerler, geleneksel beton veya tuğlaya kıyasla daha düşük bir kütleyle sahip olsalar da, özellikle daha yüksek yoğunluklu kapalı hücreli formülasyonlarıyla, hafif yapı bölmelerinde ve asma tavan sistemlerinde etkili bir ses yalıtımı sağlayabilir. Malzemenin rijitliği de önemlidir; çok rijit bir panel, ses enerjisini daha verimli iletebilir. Jeopolimerlerin gözenekli yapısı, bu rijitliği optimize ederek hem yeterli mekanik dayanımı

hem de iyi bir ses yalıtımını aynı anda sunabilir (Le ve diğerleri, 2022).

- **Kompozit Sistemlerdeki Katkısı:** Jeopolimerler genellikle tek başına değil, kompozit bir panelin içinde veya çok katmanlı duvar sistemlerinde bir bileşen olarak kullanılır. Bu tür sistemlerde, farklı yoğunluk ve esneklikteki katmanların kombinasyonu, sesin iletimini daha da zorlaştırarak toplam ses yalıtım performansını artırır. Jeopolimer katman, hem kütlesi hem de sönümlleme özelliği ile bu sisteme katkıda bulunur (Le ve diğerleri, 2022).

5.4.3.Endüstriyel Uygulamalar

Jeopolimerlerin üstün termal ve akustik özellikleri, onları çok çeşitli zorlu endüstriyel ortamlar ve geleneksel inşaat uygulamaları için değerli kılar (Bakharev, 2004).

Enerji Santralleri

Enerji santralleri, yüksek sıcaklık, aşındırıcı ortamlar ve yüksek düzeyde gürültü gibi bir dizi zorlu koşulu bir arada barındırır (Bakharev, 2004). Jeopolimer kaplamalar ve köpükler burada çok yönlü bir rol oynar:

- **Türbin ve Kazan İzolasyonu:** Buhar türbinleri, kazanlar ve buhar hatları 500°C'nin üzerinde sıcaklıklara çıkabilir. Jeopolimer esaslı pasif yangın koruma kaplamaları ve özel yüksek sıcaklık köpükleri, bu ekipmanları sararak enerji kaybını minimize eder ve çalışan güvenliğini sağlar. Geleneksel organik yalıtım malzemelerinin aksine, sıcak buhar sızıntısı gibi bir durumda erimez veya toksik gaz çıkarmaz (Kong, Sanjayan, 2010).
- **Baca Gazı Kanalı Kaplamaları:** Baca gazları, korozyona neden olan kükürt oksitler ve diğer aşındırıcı bileşenler içerir. Jeopolimerlerin asit direnci, baca gazı kanallarının, elektrostatik çöktürücülerin ve baca iç yüzeylerinin aşınmaya karşı korunmasında kullanılmalarına olanak tanır (Bakharev, 2004).
- **Akustik Gürültü Kontrolü:** Santral içindeki pompalar, fanlar, türbinler ve jeneratörler yüksek düzeyde gürültü üretir. Açık gözenekli jeopolimer paneller, bu gürültüyü absorbe etmek ve

çalışma ortamının akustik konforunu iyileştirmek için kullanılabilir (Singh, Ishwarya, Gupta, Bhattacharyya, 2015).

Yüksek Fırın ve Refrakter Endüstrisi

Demir çelik, çimento ve cam endüstrileri, 1000°C'yi aşan sürekli çalışma sıcaklıklarına sahiptir. Jeopolimerler, geleneksel refrakter tuğlalara ek veya alternatif olarak bu alanda devrim yaratma potansiyeline sahiptir (Kong, Sanjayan, 2010).

- **Hafif Refrakter Dolgu ve İzolasyon:** Yüksek fırın, döner fırın ve ısıtma fırınlarının dış cephesi ile iç refrakter astarı arasına dökülen hafif jeopolimer köpükler, mükemmel bir ısı yalıtım tabakası oluşturur. Bu, enerji verimliliğini artırırken, fırının dış yüzey sıcaklığını düşürerek çalışma güvenliğini iyileştirir (Bakharev, 2004).
- **Monolitik Refrakter Kaplamalar:** Jeopolimer harçlar, düzensiz şekilli fırın bölgelerini veya refrakter tuğlalar arasındaki derzleri doldurmak için monolitik bir refrakter malzeme olarak kullanılabilir. Hızlı priz almaları ve yüksek erken mukavemetleri, onarım ve bakım süreçlerini hızlandırır (Kong, Sanjayan, 2010).
- **Termal Şok Direnci:** Jeopolimerlerin amorf yapısı, ani sıcaklık değişimlerine (termal şok) karşı birçok kristal yapıli refrakter malzemeden daha iyi bir direnç gösterebilir, bu da servis ömrünü uzatır (Bakharev, 2004).

Bina Yalıtımı

Jeopolimerler, konut ve ticari binalarda enerji verimliliği, yangın güvenliği ve konforu aynı anda hedefleyen bütünleşik çözümler sunar (Singh, Ishwarya, Gupta, Bhattacharyya, 2015).

- **Dış Cephe Yalıtım Sistemleri:** Hafif jeopolimer levhalar, bina dış cephelerinde ısı yalıtım amacıyla kullanılabilir. Yanmaz olmaları, poliüretan veya EPS levhalı sistemlerdeki yangın yayılma riskini ortadan kaldırarak çok daha güvenli bir bina kabuğu oluşturur (Bakharev, 2004).
- **Çatı ve Döşeme Şapları:** Hafif, akıcı köpük jeopolimer, eğimli çatılarda eğim şapı olarak veya döşemelerde hafif dolgu ve yalıtım

tabakası olarak dökülebilir. Bu uygulama, yapıya ek yük getirmez, mükemmel ısı ve ses yalıtımı sağlar (Singh, Ishwarya, Gupta, Bhattacharyya, 2015).

- **Yangın Bariyerleri ve Kaçış Yolları:** Kolon, giriş ve taşıyıcı duvarların yangına dayanım süresini artırmak için jeopolimerik yangın kaplamaları ve panelleri kullanılır. Ayrıca, yangın kaçış koridorları ve merdiven boşlukları gibi kritik alanlarda, hem yangına dayanımlı hem de akustik konfor sağlayan kaplama malzemesi olarak tercih edilirler (Kong, Sanjayan, 2010).

5.5.İnce Film ve Kaplama Olarak Jeopolimerler

Jeopolimerler, sadece hacimsel yapı malzemesi olarak değil, aynı zamanda ince film ve kaplama formunda da geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Sıvı prekürsör formülasyonlarının çeşitli substratlar üzerine kaplanabilirliği, onları metal koruma, refrakter uygulamalar ve fonksiyonel yüzeyler için son derece çok yönlü kılar (Davidovits, 2017).

5.5.1.Kaplama Yöntemleri

Jeopolimer kaplamaların performansı, yalnızca kimyasal bileşimle değil, aynı zamanda uygulama yöntemiyle de belirlenir. Her bir yöntem, farklı kalınlık, homojenlik ve uygulama verimliliği sağlar (Provis, 2014).

- **Sol-Jel Yöntemi:** Bu yöntem, özellikle nanometre veya birkaç mikron boyutundaki homojen ve pürüzsüz filmler oluşturmak için idealdir. Süreç, jeopolimer prekürsörlerinin bir çözücü içinde kararlı bir kolloidal sol çözelti halinde hazırlanmasıyla başlar. Bu sol, döndürme kaplama veya daldırma çekme gibi tekniklerle substrat üzerine uygulanır (Duxson ve diğerleri, 2007). Döndürme kaplamada, substrat yüksek hızda döndürülerek fazla sol atılır ve ince, uniform bir tabaka elde edilir. Ardından, çözücünün buharlaşması ve nemli kürlenme ile sol, jel fazına ve nihayetinde amorf jeopolimer ağına dönüşür. Bu yöntem, mükemmel yüzey kaplama ve optik şeffaflık gerektiren, mikroelettronik veya hassas optik bileşenler gibi ileri teknoloji uygulamalarında kullanım potansiyeli taşır (Duxson ve diğerleri, 2007).

- **Daldırma Kaplama:** Bu yöntem, göreceli olarak basit ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Substrat, hazırlanan jeopolimer solüsyonuna (sol veya daha viskoz bir süspansiyon) daldırılır, belirli bir süre bekletilir ve ardından kontrollü ve sabit bir hızla çekilir. Substratın çekilme hızı, kaplama kalınlığını doğrudan belirler; daha yüksek hızlar daha kalın filmler oluşturur (Huseiena, Mirzaa, Ismaila, Ghoshalc, Husseina, 2017). Çekme işleminin ardından, daldırma kaplamada olduğu gibi bir jelleşme ve kürlenme süreci izlenir. Bu yöntem, karmaşık geometrili parçaların tek seferde ve her yüzeyini kaplamak için son derece uygundur. Kaplama kalınlığı kontrolü, döndürme kaplamaya kıyasla daha az hassas olsa da, endüstriyel ölçekte uygulama kolaylığı sağlar (Huseiena, Mirzaa, Ismaila, Ghoshalc, Husseina, 2017).
- **Püskürtme:** Püskürtme yöntemi, bina cepheleri, tanklar, gemi gövdesi gibi büyük yüzey alanlarına hızlı ve verimli bir şekilde kaplama uygulamak için en uygun yöntemdir (Wong, 2022). Jeopolimer süspansiyonu, bir nozul aracılığıyla yüksek basınçlı hava veya sıvı itici gaz eşliğinde ince bir sis halinde substrat yüzeyine püskürtülür. Nozul tipi, basınç ve püskürtme mesafesi, kaplamanın kalınlık dağılımını ve yüzey pürüzlülüğünü kontrol eder. Bu yöntemde, genellikle daha yüksek viskoziteli ve hızlı reaksiyon kinetiğine sahip formülasyonlar tercih edilir, böylece püskürtülen damlacıklar yüzeyde hemen yayılır ve birleşerek sürekli bir film oluşturur, akamaz veya sarkma yapmaz. Endüstriyel bakım onarım ve büyük ölçekli koruma projelerinde vazgeçilmez bir yöntemdir (Wong, 2022).

5.5.2.Korozyon Önleyici Kaplamalar

Metaller, özellikle çelik ve alüminyum, oksijen ve suyun varlığında korozyona karşı savunmasızdır. Jeopolimer kaplamalar, bu konvansiyonel organik boyalara ve epoksi kaplamalara güçlü bir alternatif oluşturur (Bakharev, 2004).

- **Bariyer Etkisi:** Jeopolimer kaplamalar, metal yüzey üzerinde yoğun, amorf ve gözeneksiz bir film oluşturur. Bu film, oksijen, su

buharı ve klorür iyonları gibi korozyonu hızlandıran elektrolitlerin metal yüzeyine ulaşmasını fiziksel olarak engelleyerek bir bariyer görevi görür. Yüksek yapısal yoğunlukları, bu bariyer özelliğinin uzun süreli etkinliğinin temelidir (Adak, Sarka, Mandal, 2014).

- **Kimyasal Pasivasyon:** Jeopolimer kaplamalar sadece fiziksel bir bariyer değildir; aynı zamanda yüksek pH'lı yapıları sayesinde kimyasal olarak da koruma sağlarlar. Kaplama uygulandığında, yüksek alkali ortam, metal yüzeyinde ince, yoğun ve kendini onaran bir metal oksit/hidroksit tabakasının yani pasif tabaka oluşumunu teşvik eder. Bu tabaka, metalin daha fazla korozyona uğramasını önler. Özellikle çelik için, jeopolimer kaplama altında kararlı bir demir oksit tabakası oluşur (Echeweozo ve diğerleri, 2024).
- **Üstün Kimyasal Direnç:** Jeopolimerik ağ, sülfatlar, asitler ve tuzlara karşı Portland çimentosu ve birçok organik polimerden daha dayanıklıdır. Bu, kaplamaları, deniz suyu, endüstriyel atık sular, asit yağmuru ve kimyasal tesisler gibi agresif ortamlarda kullanım için son derece uygun kılar. Aşınmaya dayanıklı olmaları, fiziksel aşınmanın da kaplama bütünlüğünü bozmasını engeller (Wu, Li, Chen, Shi, Ghiassi,2024).

5.5.3.Refrakter ve Ateşe Dayanıklı Kaplamalar

Jeopolimerlerin en belirgin avantajlarından biri, organik kaplamaların aksine, yüksek sıcaklıklarda bozulmamaları ve hatta yapısal mukavemetlerini koruyabilmeleri dir (Kong, Sanjayan, 2010).

- **Yüksek Termal Kararlılık:** Amorf siliko-alüminat yapıları, 1000-1200°C gibi sıcaklıklara kadar kristalize olmadan kalabilir ve erimez. Bu sıcaklık aralığında, yapısal suyu uzaklaştırırlar ve daha kompakt, seramik-benzeri bir yapıya dönüşerek mukavemetlerini sürdürürler. Bu, onları fırınlar, egzoz sistemleri, yangın kapıları ve endüstriyel bacalar için ideal bir kaplama malzemesi yapar (Kong, Sanjayan, 2010).
- **Isıl Genleşme Uyumu:** Jeopolimer kaplamaların termal genleşme katsayısı, çelik ve birçok refrakter malzeme ile uyumludur. Bu, ısıtma ve soğutma döngüleri sırasında kaplama ile substrat arasında

oluşacak termal gerilmelerin minimize edilmesi anlamına gelir. Sonuç olarak, kaplamada çatlak oluşumu, kabarma veya tabakalanma riski azalır ve kaplamanın servis ömrü uzar (Bakharev, 2004).

- **Yangın Koruması ve Ateş Direnci:** Jeopolimer kaplamalar, yapısal çelik ve ahşap için mükemmel bir yangın geciktirici kaplama olarak işlev görür. Yangın anında, organik kaplamalar yanarak veya eriyerek korumayı kaybederken, jeopolimer kaplama ısıyı yalıtan seramik benzeri bir tabaka olarak kalır. Bu tabaka, altındaki malzemenin sıcaklığının yükselmesini geciktirir. Çelik için, yumuşama sıcaklığına ulaşma süresini uzatarak, yapının göçme riskini azaltır ve can güvenliği için kritik olan tahliye süresini artırır. Bu özellikleriyle, pasif yangın korumasında çevre dostu ve etkili bir çözüm sunarlar (Bakharev, 2004).

5.6.Hibrit Organik İnorganik Sistemler

Jeopolimerlerin fonksiyonelliğini ve uygulama alanını daha da genişletmek için geliştirilen en yenilikçi yaklaşımlardan biri, organik ve inorganik bileşenleri moleküler veya nanoseviyede birleştiren hibrit sistemlerin tasarlanmasıdır (Xiong, Guo, Zhang, 2023). Bu sistemler, her iki dünyanın da en iyi özelliklerini jeopolimerlerin mekanik mukavemeti, termal kararlılığı ve kimyasal direnci ile polimerlerin esnekliği, tokluğu ve işlenebilirliğini tek bir malzemede birleştirme potansiyeli taşır. Bu sinerji, tamamen yeni ve akıllı malzeme özelliklerinin ortaya çıkmasına olanak tanır (Bai ve diğerleri, 2024).

5.6.1.Polimer Jeopolimer Hibritleri

Bu hibritler, jeopolimerik inorganik ağ ile organik polimer zincirlerinin kimyasal veya fiziksel olarak iç içe geçmesiyle oluşur. İki bileşen arasındaki etkileşimin doğası, nihai malzemenin özelliklerini belirler (Guo, Lv, Liu, Wang, 2022).

- **Fiziksel Karışımlar:** En basit yaklaşım, suda dağılabilir veya emülsiyeye edilebilir organik polimerlerin (PVA, lateks, selüloz eterleri) prizlenmemiş jeopolimer hamuru ile mekanik olarak

karıştırılmasıdır. Burada, organik polimer genellikle bir katkı maddesi veya modifiye edici olarak işlev görür. Örneğin, PVA zincirleri, jeopolimer matrisi içinde dağılarak çatlak ilerlemesine karşı bir enerji sönmüleme mekanizması sağlar ve kompozitin tokluğunu ve darbe direncini önemli ölçüde artırır. Lateks partikülleri ise suya karşı direnci iyileştirir ve jeopolimerin nispeten kırılğan yapısına belirli bir esneklik kazandırır. Ancak, bu fiziksel etkileşimler bazen yetersiz kalabilir ve iki faz arasında ayrılmaya yol açabilir (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023).

- **Kimyasal Ağ Oluşturma (Kovalent Bağlanma):** Daha gelişmiş ve üstün performanslı hibritler, organik ve inorganik fazlar arasında kovalent kimyasal bağların oluşturulmasıyla elde edilir. Bu, genellikle bağlayıcı moleküllerin kullanılmasıyla sağlanır. En yaygın kullanılan ajanlar silan kuplaj ajanlarıdır (Raj ve arkadaşları, 2023). Bu moleküllerin bir ucu jeopolimerin silikat ağı ile reaksiyona girerken, diğer ucu organik polimer zinciri ile kimyasal olarak etkileşime girer. Oluşan güçlü arayüzey bağı, yük transferini maksimize eder ve faz ayrışmasını önler. Bu güçlü arayüzey bağları sayesinde, sistem tek bir homojen faz gibi davranan nanokompozit bir yapı kazanır ve hem yüksek mukavemet hem de olağanüstü tokluk sergiler. Epoksi veya akrilik reçineler ile oluşturulan bu tür kimyasal hibritler, su geçirimsiz, kimyasal dayanıklı ve yüksek yapışma mukavemetine sahip kaplamalar için idealdir (Raj ve arkadaşları, 2023).

5.6.2. Geçiş Metali Oksit Katkıları (TiO_2 , ZnO) ile Fonksiyonellik Kazandırma

Jeopolimer matrisi, fonksiyonel nanopartiküller için mükemmel bir taşıyıcı görevi görür (Cheah, Tan, Ramli, 2021). Titanyum dioksit (TiO_2) ve Çinko oksit (ZnO) gibi geçiş metali oksitlerin nanopartiküller halinde jeopolimere dahil edilmesi, malzemeye tamamen yeni ve akıllı özellikler kazandırır (Li, Shan, Wang, Lian, Zhou, 2022).

- **Fotokatalitik Özellik ve Kendini Temizleme:** TiO_2 , UV ışığına maruz kaldığında güçlü bir fotokatalist görevi görür UV fotonları, TiO_2 'nin valans bandındaki elektronları iletim bandına uyararak bir elektron (e^-) ve bir pozitif delik (h^+) çifti oluşturur (Li ve arkadaşları, 2023). Yük taşıyıcıları, jeopolimer yüzeyindeki su ve oksijen molekülleri ile reaksiyona girerek yüksek derecede reaktif hidroksil radikaller ($\bullet\text{OH}$) ve süperoksit anyonları ($\bullet\text{O}_2^-$) üretir. Bu radikaller, yüzeye temas eden organik kirleticileri basit ve zararsız moleküllere kadar parçalayabilir. Bu durum, jeopolimer kaplamalara kendini temizleme ve hava temizleme özelliği kazandırır. Cephe kaplamalarında, yapıların dış etkenlerle kirlenmesi azalır ve çevresel kirleticilerin giderilmesine katkıda bulunulur (Ser, Žuvela, Wong, 2020).
- **UV Dayanımı ve Antibakteriyel Etki:** Hem TiO_2 hem de ZnO , UV ışınlarını güçlü bir şekilde soğurur (Sharanu, Kompa, Pal, Rao, 2023). Bu, jeopolimer kaplamayı ve altındaki substratı UV ışınımının neden olduğu bozunmadan korur. Ayrıca, fotokatalitik süreçte üretilen reaktif oksijen türleri, bakteri, virüs ve küf hücrelerinin zarlarına saldırarak onları parçalar. Bu, hijyenin kritik olduğu hastane yüzeyleri, gıda işleme tesisleri ve halka açık tuvaletler gibi yerlerde kendini dezenfekte eden yüzeylerin oluşturulmasını sağlar (Cheah, Tan, Ramli, 2021).

5.6.3.İleri Fonksiyonel Uygulamalar: Sensörler, İletken Boyalar, Biyo uyumlu Kaplamalar

Hibrit sistemler, jeopolimerleri geleneksel inşaat malzemesi rolünün çok ötesine taşır (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023).

Sensörler: İletken polimerler veya karbon nanomalzemeler ile modifiye edilmiş jeopolimerler, elektriksel iletkenliğe sahip kompozitler oluşturur. Bu kompozitlerin elektriksel direnci, çevrelerindeki gazlar, nem veya pH değişimine duyarlı hale getirilebilir. Örneğin, amonyak gazına maruz kalan bir jeopolimer kompozit sensörün direnci değişir ve bu değişim ölçülerek gaz konsantrasyonu tespit edilebilir. Jeopolimer matrisin gözenekli yapısı, gaz moleküllerinin sensör bölgesine kolayca difüzyonuna izin verir (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023).

- **İletken Boyalar ve Kaplamalar:** Aynı iletken kompozitler, statik elektriğin dağıtılması veya zayıf elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlaması gereken yüzeyler için iletken boyalar ve kaplamalar olarak kullanılabilir. Jeopolimer matris, iletken dolgulara kıyasla üstün korozyon ve ısı direnci sağlar, böylece iletkenliği zorlu ortamlarda dahi korunabilen dayanıklı kaplamalar elde edilir (Drabczyk, Kudłacik-Kramarczyk, Korniejenko, Figiela, Furtos, 2023).
- **Biyo-uyumlu Kaplamalar:** Jeopolimerlerin bileşimi kontrol edilerek biyo uyumlu hale getirilebilir. Özellikle silisyum ve kalsiyum açısından zengin formülasyonlar, insan vücudunda yeni kemik dokusunun büyümesini teşvik eden bir yüzey oluşturabilir. Bu tür hibrit jeopolimer kaplamalar, biyomedikal implantların yüzeyine uygulandığında, implantın kemikle bütünleşmesini hızlandırabilir. Ayrıca, bu kaplamalara kontrollü ilaç salım özelliği de kazandırılabilir; gözenekli yapıya yüklenen antibiyotik veya büyüme faktörleri, implant bölgesinde zamanla salınarak iyileşme sürecini destekler ve enfeksiyon riskini azaltır (Xiong, Guo, Zhang, 2023).

5.7.Fonksiyonel Özelliklerin İyileştirilmesi

Jeopolimerlerin temel matris özellikleri, çeşitli katkı maddeleri ve mühendislik stratejileri ile hedeflenen yönde modifiye edilebilir. Bu sayede, yalnızca yapısal bir malzeme olmanın ötesine geçerek, belirli fonksiyonel gereksinimleri karşılayan ileri teknoloji ürünleri haline gelirler (Ellis, McDowell, Zhou, 2014).

5.7.1.Termal Kararlılık ve Genleşme

Jeopolimerler, doğası gereği geleneksel organik polimerlerden çok daha yüksek bir termal kararlılığa sahiptir. Ancak, bu kararlılık bileşime, mikroyapıya ve üretim parametrelerine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir ve daha da iyileştirilebilir (Kong, Sanjayan, 2010).

Termal Kararlılığın İyileştirilmesi:

- **Kimyasal Bileşimin Optimizasyonu (Si/Al Oranı):** Jeopolimer ağının termal kararlılığı üzerinde en kritik faktör, silisyum (Si) ve alüminyum (Al) atomlarının oranıdır (Duxson ve diğerleri, 2007). Genel olarak, daha yüksek bir Si/Al oranı, daha yüksek bir termal kararlılık sağlar. Bunun nedeni, ağ içindeki siloksan bağlarının, alüminat bağlarına kıyasla daha yüksek bir bağ enerjisine ve ısıl kararlılığa sahip olmasıdır. Yüksek Si/Al oranlı jeopolimerler, 1000-1200°C gibi sıcaklıklara kadar amorf yapılarını koruyabilir ve daha yüksek bir sıcaklıkta leucite, mulit veya kristobalit gibi kararlı kristal fazlara dönüşür. Bu kristalleşme, malzemede yoğunluk değişimlerine ve çatlak oluşumuna neden olabileceğinden, uygulamanın gerektirdiği sıcaklık aralığında amorf kalması istenen jeopolimerler için Si/Al oranı dikkatle ayarlanmalıdır (Duxson ve diğerleri, 2007).
- **Dolgu Malzemelerinin ve Takviyelerin Rolü:** Termal kararlılığı artırmanın bir diğer yolu, yüksek sıcaklıkta kararlı fazlar oluşturan veya bir iskelet görevi gören dolgu malzemeleri kullanmaktır (Li, Sun, Li, 2010).
 - **Alümina (Al_2O_3):** Alümina tozları veya agrega olarak kullanıldığında, yüksek sıcaklıklarda jeopolimer matrisi ile reaksiyona girerek kararlı mulit ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) fazının oluşumunu teşvik eder. Mulit, yüksek erime noktası, iyi termal şok direnci ve yüksek mukavemeti ile bilinen bir seramiktir. Bu dönüşüm, kompozitin yüksek sıcaklıktaki mekanik mukavemetini ve boyutsal kararlılığını artırır (Li, Sun, Li, 2010).
 - **Refrakter Agregalar:** Kırma ateş tuğlası, mulit veya silisyum karbür (SiC) gibi refrakter agregalar, jeopolimer bağlayıcı ile birlikte kullanılarak monolitik refrakterler üretilir. Bu agregalar, yüksek sıcaklıkta bir iskelet oluşturarak, jeopolimer bağlayıcının yumuşama veya erime eğilimini fiziksel olarak kısıtlar ve kompozitin yüksek sıcaklıkta şeklini korumasını sağlar (Yan, Kou, Yang, Shu, Lu, 2022).

Termal Genleşme Katsayısının (CTE) Kontrolü:

Malzemenin ısıtıldığında veya soğutulduğunda ne kadar genleşip büzüleceği, termal uyum ve termal şok direnci açısından kritik öneme sahiptir (Zink, Vipperman, Schaefer, 2010).

- **Matris ve Agrega Uyum:** Jeopolimer bağlayıcının CTE'si, kullanılan agreganın CTE'sine yakın olmalıdır. Önemli bir fark olduğunda, termal döngüler sırasında agrega ile bağlayıcı arayüzeyinde yüksek termal gerilmeler oluşur ve bu da mikro çatlaklara ve nihayetinde malzemenin bozulmasına yol açar. Örneğin, kuvars agregası yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun değildir, çünkü 573°C'de ani bir faz dönüşümü geçirerek hacimsel olarak genişler ve matristen ayrılır. Bunun yerine, mulit veya alümina gibi düşük ve kararlı CTE'ye sahip refrakter agregalar tercih edilir (Zink, Vipperman, Schaefer, 2010).
- **CTE'yi Düşürme Stratejileri:** Bazı uygulamalarda (örneğin, seramik veya metal kaplamalar, hassas cihazlar, jeopolimerin CTE'sini düşürmek gerekebilir. Bu, genellikle negatif bir termal genleşme katsayısına sahip malzemelerin eklenmesiyle sağlanır. Örneğin, önceden sentezlenmiş mulit veya lityum alüminyum silikat (LAS) gibi özel seramik tozlar, kompozite dahil edildiğinde, jeopolimer matrisinin pozitif genleşmesini kısmen dengeleyerek toplam CTE'yi düşürebilir. Bu, malzemenin termal şok direncini önemli ölçüde artırır (Zink, Vipperman, Schaefer, 2010).

5.7.2.Elektriksel İletkenlik ve Dielektrik Özellikler

Saf jeopolimerler, iyonik iletkenlik mekanizmasına bağlı olarak düşük seviyede bir elektriksel iletkenliğe sahip olsalar da, esas olarak elektriksel yalıtıkandırılar. Ancak, iletken katkı maddeleri ile modifiye edilerek, yalıtıktan iletkenliğe kadar geniş bir yelpazede özellikler kazandırılabilir (Duxson ve diğerleri, 2007).

Elektriksel İletkenlik Kazandırma:

İletken Dolgu Maddeleri ve Percolation Eşiği: Jeopolimer matrisine karbon nanotüp (CNT), grafen, karbon siyahı veya iletken karbon lifleri gibi malzemeler eklendiğinde, bu partiküller matris içinde rastgele dağılan bir ağ

oluşturur. Belirli bir kritik hacimsel konsantrasyona ulaşıldığında, bu partiküller sürekli bir iletken yol oluşturur ve kompozitin elektriksel direnci birdenbire birkaç kat düşer. Bu eşik değeri, dolgu malzemesinin şekline, en boy oranına ve dağılımına bağlıdır. Yüksek en boy oranına sahip CNT'ler ve grafen, düşük konsantrasyonlarda bile sürekli bir ağ oluşturabildikleri için son derece verimli iletkenleştiricilerdir (Adak, Sarka, Mandal, 2014).

- **Uygulama Alanları:**

- **Elektromanyetik Girişim (EMI) Kalkanlama:** Elektronik cihazların birbirlerinin sinyallerine yaptığı istenmeyen girişimleri engellemek için iletken jeopolimer kompozitler kullanılabilir. Bu kompozitlerden yapılan muhafazalar veya kaplamalar, dışarıdan gelen elektromanyetik dalgaları yansıtır ve soğurarak cihazı korur. Jeopolimer matrisin yangın dayanımı ve kimyasal stabilitesi, bu uygulamayı askeri ve havacılık elektroniği gibi zorlu alanlar için cazip kılar (Guo, Lv, Liu, Wang, 2022).
- **Kendinden Isıtmalı Kompozitler:** İletken bir jeopolimer kompozite bir elektrik akımı uygulandığında, malzemenin direncinden dolayı Joule ısınması meydana gelir. Bu prensiple çalışan kendinden ısıtmalı zeminler veya boru sistemleri, buz çözme veya ortam ısıtma amacıyla geliştirilebilir (Kong, Sanjayan, 2010).

Dielektrik Özelliklerin Mühendisliği:

Dielektrik malzemeler, bir elektrik alanı içinde polarize olabilen ve enerji depolayabilen malzemelerdir. Jeopolimerlerin dielektrik sabiti ve dielektrik kaybı, kompozisyon ve frekansa bağlı olarak değişir (Walkley, Provis, 2019).

- **Gözenekliliğin Etkisi:** Jeopolimerler içindeki hava boşlukları yani gözenekler, düşük bir dielektrik sabitine sahiptir. Bu nedenle, gözenekliliği yüksek olan hafif köpük jeopolimerler, düşük bir dielektrik sabiti sergiler. Bu özellik, onları yüksek frekanslı devre kartları gibi düşük dielektrik sabiti gerektiren elektronik uygulamalarda potansiyel bir alt tabaka malzemesi haline getirir (Chiranjeevi, Abraham, Rath, Praveenkumar, 2023).

- **Dielektrik Özelliklerin İyileştirilmesi:** Yüksek dielektrik sabitine sahip uygulamalar için, jeopolimer matrisine TiO_2 , BaTiO_3 gibi yüksek dielektrik sabitine sahip seramik nanopartiküller eklenebilir. Bu partiküller, kompozitin genel dielektrik sabitini artırır. Bu tür jeopolimer seramik nanokompozitler, yüksek sıcaklık ve çevresel koşullarda kararlılık gerektiren gömülü kapasitörler ve diğer pasif elektronik bileşenler için umut vaat etmektedir. Dielektrik kaybın minimize edilmesi için ise, malzemenin iyonik iletkenliğini azaltacak şekilde kompozisyon optimizasyonu ve su içeriğinin kontrolü gereklidir (Chiranjeevi, Abraham, Rath, Praveenkumar, 2023).

BÖLÜM 6

ÇEVRESEL VE ENERJİ BOYUTU

GİRİŞ

Jeopolimerlerin geliştirilmesindeki temel itici güçlerden biri, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha düşük çevresel etkiye sahip olma potansiyelidir (Duxson, Provis, Lukey, Van Deventer, 2007). Bu bölüm, jeopolimerlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel performansını, özellikle de karbon ayak izini ve sürdürülebilirlik boyutunu derinlemesine incelemektedir. Bir malzemenin gerçekten yeşil olup olmadığını anlamak, tüm üretim süreçlerinin kapsamlı bir analizini gerektirir (Scrivener, John, Gartner, 2018).

6.1.Jeopolimerlerin Karbon Ayak İzi ve Sürdürülebilirlik Analizi

Jeopolimerlerin çevresel performansını değerlendirmek, karmaşık ve çok değişkenli bir süreçtir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011). Bu değerlendirme, Yaşam Döngüsü metodolojisi ile mümkündür. Bu analiz, hammadde eldesinden üretime, nakliyeden kullanım ömrü sonuna kadar tüm aşamaları kapsar (Martínez, Miller, 2025).

6.1.1.Geleneksel Çimentoyla Karşılaştırmalı Karbon Ayak İzi

Portland çimentosu üretimi, küresel insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumludur (Scrivener, John, Gartner, 2018). Bu yüksek emisyonun iki ana kaynağı vardır:

Kalsinasyon: Hammaddeleri (kireçtaşı, CaCO₃) klinkere (CaO) dönüştürmek için gereken yaklaşık 1450°C'lik fırın sıcaklığında meydana gelen kimyasal reaksiyon:



Bu proses emisyonu, PC üretimindeki toplam CO₂'nin yaklaşık %60'ını oluşturur (Scrivener, John, Gartner, 2018).

Yakıt: Fırını bu yüksek sıcaklığa getirmek ve tutmak için kullanılan fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan enerji emisyonu, toplamın yaklaşık %40'ını oluşturur (Scrivener, John, Gartner, 2018).

Jeopolimerler ise temel bağlayıcı olarak klinker kullanmaz. Bunun yerine, endüstriyel yan ürünler olan uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi malzemeleri alkali bir çözelti ile aktive eder. Bu temel fark, emisyon profilinde büyük bir değişikliğe yol açar. Genel LCA çalışmaları, uçucu kül esaslı jeopolimerlerin, geleneksel PC betonuna kıyasla %40 ile %80 arasında daha düşük bir küresel ısınma potansiyeline (Global Warming Potential - GWP) sahip olabileceğini göstermektedir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011). Ancak bu azalma, özellikle alkali aktivatörlerin üretiminden kaynaklanan emisyonlar nedeniyle her zaman %100 değildir (Turner, Collins, 2013).

6.1.2. Hammaddelerin Üretim ve Taşınma Aşamalarında Emisyonlar

Jeopolimerlerin çevresel faydası, büyük ölçüde kullanılan hammaddelerin atık statüsüne bağlıdır (Turner, Collins, 2013).

- **Prekürsörler (Uçucu Kül/Cüruf):** Bu malzemelerin atık olarak kabul edilmesi durumunda, genellikle onlara atfedilen çevresel yük sıfır veya çok düşük kabul edilir. Bu, jeopolimerin karbon ayak izini ciddi bir şekilde düşürür. Ancak, bu malzemelerin kaynaklarından, jeopolimer üretim tesisine nakliyesi önemli bir emisyon kaynağı olabilir. Bu nedenle, yerel kaynak kullanımı çok önemlidir (Turner, Collins, 2013).
- **Alkali Aktivatörler (Sodyum Silikat/Sodyum Hidroksit):** Jeopolimerlerin gizli karbon ayak izi genellikle bu kimyasalların üretiminden gelir (Davidovits, 2020).
 - **Sodyum Hidroksit (NaOH):** Genellikle enerji yoğun bir proses olan klor-alkali elektrolizi ile üretilir ve bu süreçte önemli miktarda CO₂ salınımına neden olur (Davidovits, 2020).
 - **Sodyum Silikat (Su Camı):** Yüksek fırınlarda kuvars kumu ve soda külünün eritilmesiyle üretilir, bu da yüksek enerji tüketimi ve dolayısıyla yüksek emisyon anlamına gelir (Davidovits, 2020).

Aktivatörlerin üretimi, bir jeopolimer karışımının toplam karbon ayak izinin %50'sinden fazlasını oluşturabilir. Bu, jeopolimerlerin sürdürülebilirliğini değerlendirirken en kritik zorluklardan biridir (Davidovits, 2020).

6.1.3. Alkali Aktivasyon Sürecinde Enerji ve CO₂ Dengelemesi

Jeopolimerizasyon reaksiyonunun, Portland çimentosunun klinkerleşme sürecine kıyasla çok daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi, üretim aşamasında önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlar. Ancak bu avantaj, alkali aktivatörlerin üretimi sırasında tüketilen enerji ve ortaya çıkan CO₂ emisyonlarıyla birlikte değerlendirilmelidir (Chaunsali, Ardeshirilajimi, Mondal, 2018). Dolayısıyla net çevresel kazanç; kullanılan aktivatörün türüne, konsantrasyonuna ve uygulanan kür koşullarına bağlı olarak değişir. Özellikle düşük konsantrasyonlu aktivatör kullanımı ve oda sıcaklığında kür, hem enerji yükünü minimize eder hem de çevresel açıdan en olumlu profilin elde edilmesini sağlar (Chaunsali, Ardeshirilajimi, Mondal, 2018).

6.1.4. Karbon Ayak İzinin Azaltılması için Stratejiler

Jeopolimerlerin çevresel performansını iyileştirmek için birkaç aktif araştırma yolu bulunmaktadır (Habert, d'Espinose de Lacaillerie, Roussel, 2011):

- **Yeşil Aktivatörler:** Yüksek emisyonlu sentetik NaOH ve sodyum silikat yerine, alternatif alkali kaynaklar araştırılmaktadır. Bunlar arasında, pirinç kabuğu külü, bitki külleri gibi tarımsal atıklardan elde edilen potasyum esaslı aktivatörler veya endüstriyel atık suların geri kazanılması yoluyla üretilen aktivatörler yer almaktadır. Bu yeşil aktivatörler, yaşam döngüsü emisyonlarını daha da düşürme potansiyeline sahiptir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Yerel Kaynak Kullanımı ve Atık Yönetimi:** Uçucu kül ve cürufun nakliye mesafesini en aza indirmek, ulaşımdan kaynaklanan emisyonları azaltır (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011). Ayrıca, jeopolimer teknolojisi, geleneksel olarak depolama alanlarına gönderilen bu endüstriyel yan ürünleri değerlendirerek döngüsel ekonomiye katkıda bulunur (Davidovits, 2020).

- **Aktivatör Verimliliği:** Sodyum silikat modülü gibi kimyasal parametrelerin optimize edilmesi, aktivatör kullanımını minimize ederken performansta herhangi bir kayıp yaşanmamasını, hatta bazı durumlarda ilave iyileşmeler sağlanmasını mümkün kılar. Böylece, azaltılmış aktivatör tüketimi doğrudan daha düşük emisyonu döndürür (Davidovits, 2020).
- **Alternatif Prekürsörler:** Kaolenin benzeri ısı işlem gerektirmeden doğal olarak oluşan kil esaslı malzemelerin, jeopolimer üretiminde kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Kaolenin kalsine edilmesiyle elde edilen metakaolen enerji gerektiren bir süreç olsa da, bu işlem yine de Portland çimentosu üretimindeki klinkerleşme aşamasına kıyasla daha düşük enerji tüketir. Ayrıca metakaolen ve çeşitli endüstriyel atıkların, maden atıkları gibi malzemelerin kullanımı, uçucu kül arzındaki düzensizliklere karşı önemli bir alternatif oluşturmaktadır (Davidovits, 2020).

6.1.5.Sürdürülebilirlik Endeksleri ve Çevresel Performans Değerlendirmesi

Bir jeopolimer sisteminin sürdürülebilirliğini yalnızca karbon ayak izi üzerinden değerlendirmek yetersizdir; çevresel performansın doğru biçimde ortaya konabilmesi için enerji tüketimi, hammadde verimliliği, kaynak sürdürülebilirliği ve uzun dönem dayanıklılık gibi diğer kritik parametrelerin de bütüncül olarak analiz edilmesi gerekmektedir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011):

- **Birincil Enerji Tüketimi (CED):** Malzemenin yaşam döngüsü boyunca fosil, nükleer ve yenilenebilir kaynaklardan tüketilen toplam enerji miktarını ifade eder. (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Asidifikasyon Potansiyeli:** SO_x ve NO_x gibi hava emisyonlarının atmosferde asit yağmurlarına katkı sağlama eğilimini tanımlar (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Ötrofikasyon Potansiyeli:** Su ekosistemlerinde besin maddesi yükünün artmasına ve buna bağlı alg çoğalmasına neden olma

potansiyelini belirtir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).

- **Su Tüketimi:** Üretim ve işleme aşamalarında harcanan toplam su miktarını kapsar (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Doğal Kaynak Tüketimi:** Yenilenemez ham maddelerin kullanım düzeyini ve kaynak tükenmesine olan etkisini değerlendirir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Atık Üretimi:** Malzemenin üretimi, kullanımı ve hizmet ömrü sonunda ortaya çıkan toplam atık miktarını ifade eder (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Dayanıklılık ve Uzun Ömür:** Jeopolimerlerin PC esaslı betonlara kıyasla genellikle daha yüksek kimyasal ve termal dayanım göstermesi, yapıların hizmet ömrünü uzatır. Bu uzun ömür, bakım, onarım ve yenileme ihtiyacını azaltarak yaşam döngüsü boyunca çevresel etkiyi düşürür (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).

Jeopolimerler, geleneksel çimentoya kıyasla önemli ölçüde daha düşük bir karbon ayak izi sunma potansiyeline sahiptir. Ancak, bu potansiyelin gerçeğe dönüşmesi, aktivatör kaynaklı emisyonların dikkatli yönetilmesine, yerel ve atık esaslı hammaddelerin kullanılmasına ve süreçlerin optimize edilmesine bağlıdır. Kapsamlı bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, jeopolimerlerin gerçek çevresel maliyetlerini ve faydalarını anlamak, böylece daha sürdürülebilir bir inşaat sektörüne doğru bilinçli bir geçiş yapmak için vazgeçilmez bir araçtır (Davidovits, 2020).

6.2. Atık Tabanlı Jeopolimerler

Jeopolimer teknolojisinin en önemli sürdürülebilirlik avantajlarından biri, normalde bertaraf edilen veya düşük katma değerli alanlarda kullanılan çok çeşitli endüstriyel ve tarımsal atıkların yüksek performanslı bir bağlayıcı faza dönüştürülebilmesidir. Bu yaklaşım, atığın yeniden işlevlendirilerek hammaddeye dönüşmesini sağlayarak hem doğal kaynak tüketimini azaltır hem de atık bertarafı ve depolama problemlerini önemli ölçüde hafifletir. Böylece jeopolimer üretimi, döngüsel ekonomi prensiplerine doğrudan

katkıda bulunan yenilikçi bir malzeme dönüşüm sürecine dönüşmektedir (Qaidi, Tayeh, Ahmed, Emad, 2022).

6.2.1.Uçucu Kül, Cüruf, Metakaolin ve Diğer Endüstriyel Yan Ürünler

Atık tabanlı jeopolimer sistemlerinin temelini, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve benzeri endüstriyel yan ürünler oluşturur. Bu malzemelerin her biri, sahip oldukları özgün kimyasal bileşim ve fiziksel karakteristikler sayesinde jeopolimerizasyon süreçlerinde farklı katkılar sağlar (Alterary, Marei, 2021).

Uçucu Kül: Kömürlü termik santrallerde oluşan ve silisyum dioksit (SiO_2) ile alüminyum oksit (Al_2O_3) bakımından zengin bir yan üründür. Sınıf F uçucu kül, düşük kalsiyum içeriği ve yüksek amorf faz oranı sayesinde klasik jeopolimer sentezi için en uygun prekürsörlerden biridir. Alkali aktivasyonla hızlı bir şekilde çözünebilen amorf yapısı, yüksek reaktivite sağlar (Alterary, Marei, 2021). Sınıf C uçucu kül ise yüksek kalsiyum içeriği nedeniyle hem jeopolimerizasyon hem de kısmi hidratasyon mekanizmalarıyla katılır; böylece hibrit özellikler sergileyen bir bağlayıcı sistem oluşturur. Uçucu külün tipik küresel partikül morfolojisi, filizlenmemiş jeopolimer harçlarının işlenebilirliğini artıran önemli bir avantaj sunar (Alterary, Marei, 2021).

Yüksek Fırın Cürufu: Demir çelik üretiminin önemli bir yan ürünü olan yüksek fırın cürufu, yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği ile karakterizedir. Bu özellik, uçucu kül esaslı sistemlere kıyasla daha hızlı priz alımı ve yüksek erken yaş dayanımı elde edilmesine imkân tanır. Cüruf esaslı jeopolimerlerde oluşan bağlayıcı faz, genellikle C-A-S-H (Kalsiyum-Alüminyum-Silikat-Hidrat) ve N-A-S-H (Sodyum-Alüminyum-Silikat-Hidrat) jellerinin birlikte bulunduğu hibrit bir yapıdadır; bu da malzemenin mekanik performansını ve kimyasal dayanımını önemli ölçüde artırır (Ben Haha, Le Saout, Winnefeld, Lothenbach, 2011).

Metakaolin: Kaolin mineralinin 600–800 °C aralığında kalsine edilmesiyle elde edilen metakaolin, bir atık malzeme olmasa da yüksek kimyasal saflığı, tutarlı bileşimi ve üstün reaktivitesi nedeniyle jeopolimer araştırmalarında genellikle referans bir prekürsör olarak kullanılır. İnce partikül boyutu ve yüksek alümina içeriği, metakaolini özellikle yüksek

mukavemetli, yoğun ve ince yapılı jeopolimer kompozitlerinin üretimi için ideal hâle getirir. Uçucu kül gibi diğer endüstriyel atıklarla birlikte kullanıldığında ise reaktivite işlenebilirlik dengesinin optimize edilmesine olanak tanır (San Nicolas, Cyr, Escadeillas, 2013).

Diğer Endüstriyel Yan Ürünler: Atık cam tozu, çeşitli metalurjik cüruf türleri, maden atıkları ve seramik endüstrisi atıkları gibi pek çok silis ve alümina bakımından zengin yan ürün de jeopolimerizasyon için uygun kaynaklardır. Bu tür malzemelerin değerlendirilmesi, hem bölgesel atık yönetimi açısından avantaj sağlar hem de farklı uygulamalara yönelik özel jeopolimer formülasyonları geliştirilmesine imkân tanıyarak teknolojinin kullanım alanını genişletir (Qaidi, Tayeh, Ahmed, Emad, 2022).

6.2.2. Tarımsal Atıkların Kullanımı

Tarımsal faaliyetler, dünya çapında büyük miktarda biyokütle atığı üretir. Bu atıkların yakılması veya doğada bırakılması çevresel sorunlara yol açar. Jeopolimerler, bu atıkları değerlendirmek için iki temel yol sunar (Gomes, Mayes, Rogerson, Stewart, Burke, 2016):

Pirinç Kabağı Külü: Pirinç kabuklarının kontrollü yakılmasıyla elde edilen RHA, %85-95 oranında amorf silis içeriğiyle son derece değerli bir puzolanik malzemedir (Gomes, Mayes, Rogerson, Stewart, Burke, 2016). Yüksek spesifik yüzey alanı ve reaktivitesi, onu jeopolimer matrisi için mükemmel bir silis kaynağı yapar (Kuijpersa ve diğerleri, 2005). RHA katkısı, jeopolimerin mekanik mukavemetini, termal kararlılığını ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırabilir. Ayrıca, RHA'nın gözenekli yapısı hafif jeopolimer köpüklerin üretiminde de kullanılabilir (Kuijpersa ve diğerleri, 2005).

Diğer Tarımsal Atık Külleri: Zeytin atığı, buğday samanı külü ve diğer birçok bitkisel atık külü, değişen oranlarda silis ve potasyum içerir. Potasyum içeriği, bu küllerin doğal bir alkali kaynak olarak potansiyelini artırabilir. Bu malzemeler, genellikle ana prekürsör olarak değil, kısmi ikame malzemesi veya reaktivite artırıcı katkı olarak kullanılır (Zhang ve diğerleri, 2023).

Kül Haline Getirilmemiş Lifli Atıklar: Şeker kamışı posası, hindistan cevizi lifi, bambu lifi gibi lifli tarımsal atıklar, jeopolimer kompozitlere doğal elyaf takviyesi olarak eklenebilir. Bu lifler, kompozitin tokluğunu ve çatlak

direncini artırırken, tamamen doğal ve biyobozunur bir takviye seçeneği sunar (Alves, Labrincha, Novais, 2023).

6.2.3. Atıkların Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerinin Jeopolimerizasyon Üzerindeki Etkisi

Jeopolimerizasyon süreci, kullanılan her bir atık türünün kendine özgü kimyasal bileşimi, fiziksel yapısı ve reaktivitesi tarafından belirlenir. Bu nedenle, atıkların temel karakteristikleri hem reaksiyon kinetiğini hem de ortaya çıkan jeopolimer matrisinin mikro yapısal ve mekanik performansını doğrudan etkiler.

- **Kimyasal Bileşim (Si/Al, Si/Ca, Safsızlıklar):** Atığın içerdiği silisyum (Si), alüminyum (Al) ve kalsiyum (Ca) miktarları, oluşacak jeopolimer ağının yapısını belirleyen en kritik parametrelerdir.
 - Yüksek Ca içeriği, reaksiyon hızını artırarak erken yaş dayanımının hızla gelişmesine katkı sağlar.
 - Yüksek Si içeriği, daha yoğun ve kararlı bir yapı oluşturmakla birlikte, mukavemetin daha yavaş gelişmesine neden olur.

Bunlara ek olarak, karbon kalıntıları, sülfür bileşikleri ve diğer safsızlık türleri, alkali aktivasyonun etkinliğini azaltarak reaksiyon kinetiğini olumsuz etkileyebilir ve uzun vadeli dayanıklılık problemlerine yol açabilir (Deb, Nath, Sarker, 2014).

- **Amorflik Derecesi ve Reaktivite:** Jeopolimerizasyon reaksiyonu esas olarak amorf fazların alkali ortamda çözünmesi ve yeniden polikondensasyonu ile ilerler.
 - Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yüksek sıcaklık proseslerinden geçmiş atıklar genellikle yüksek amorflik derecesine sahiptir; bu da onları son derece reaktif kılar ve hızlı jeopolimerizasyonu destekler.
 - Maden atıkları gibi kristalin fazı baskın olan malzemelerde ise reaktivite düşüktür; bu nedenle öğütme gibi fiziksel ön işlemlerle özgül yüzeyin artırılması gerekebilir (Puertas, Fernandez-Jimenez, 2003).

- **Parçacık Boyutu Dağılımı ve Morfoloji:** Jeopolimerizasyon reaksiyonu esas olarak amorf fazların alkali ortamda çözünmesi ve yeniden polikondensasyonu ile ilerler.
 - Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yüksek sıcaklık proseslerinden geçmiş atıklar genellikle yüksek amorflik derecesine sahiptir; bu da onları son derece reaktif kılar ve hızlı jeopolimerizasyonu destekler.
 - Maden atıkları gibi kristalin fazı baskın olan malzemelerde ise reaktivite düşüktür; bu nedenle öğütme gibi fiziksel ön işlemlerle özgül yüzeyin artırılması gerekebilir (Puertas, Fernandez-Jimenez, 2003).

6.2.4 Atık Yönetimi Perspektifinden Döngüsel Ekonomi Yaklaşımı

Jeopolimer teknolojisi, geleneksel doğrusal ekonomi modelinden uzaklaşarak, malzemelerin tekrar kullanıldığı, kaynakların sistem içinde mümkün olan en uzun süre tutulduğu döngüsel ekonomi anlayışının güçlü bir uygulama örneğini sunar (Martínez, Miller, 2025). Bu yaklaşım, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de endüstriyel verimlilik açısından önemli kazanımlar sağlar.

- **Atığın Hammaddeye Dönüşümü:** Jeopolimerizasyon süreci, endüstriyel atıkları bertaraf edilmesi gereken bir yük olmaktan çıkarp, ekonomik değeri olan reaktif hammadde niteliğine dönüştürür. Böylece hem atık yönetim maliyetleri düşer hem de yeni gelir kaynakları oluşur (Martínez, Miller, 2025).
- **Doğal Kaynakların Korunması:** Atık tabanlı prekürsörlerin kullanılması, kil ve kireçtaşı gibi doğal hammaddelerin çıkarılmasına olan ihtiyacı azaltır. Bu durum, hem doğal kaynak tükenmesini yavaşlatır hem de madencilik faaliyetlerinin neden olduğu ekosistem bozulmalarını minimize eder (Ünsal, 2025).
- **Enerji Verimliliği:** Klinker üretiminde gerekli olan enerji yoğun yüksek sıcaklık kalsinasyon aşaması, jeopolimer üretiminde yer almaz. Bu nedenle atık esaslı prekürsörlerin kullanımı: Önemli

ölçüde enerji tasarrufu sağlar. Çimento üretimine kıyasla CO₂ emisyonlarını ciddi şekilde azaltır (Ünsal, 2025).

- **Yerel Ekonomilerin Güçlendirilmesi:** Jeopolimer üretim tesislerinin termik santral, çimento fabrikası veya demir-çelik tesisleri gibi büyük endüstriyel atık kaynaklarının yakınında konumlandırılması birçok avantaj sağlar. Bu avantajlar;
 - Yerel atık stoklarını değerlendirir (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024).
 - Nakliye giderlerinin ve taşıma kaynaklı emisyonları azaltır (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024).
 - Yeni iş alanları oluşturur (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024).
 - Bölgesel kalkınmayı destekler (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024).

6.2.5. Atık Kaynaklı Jeopolimerlerin Çevresel Risk Analizi

Endüstriyel atıkların kullanımı, bu atıklarda potansiyel olarak bulunabilen kurşun, krom, arsenik, kadmiyum gibi ağır metallerin varlığı nedeniyle çevresel risk endişelerini de beraberinde getirir. Bu noktada jeopolimerizasyonun en önemli avantajlarından biri devreye girer (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024).

- **Tutunum Mekanizmaları:** Yüksek alkali ortamda oluşan amorf jeopolimer ağı, son derece gözeneksiz ve yoğun bir yapıdır. Bu yapı, ağır metal iyonlarını fiziksel olarak hapseder. Daha da önemlisi, bu iyonlar jeopolimer ağı içinde kimyasal olarak bağlanabilir veya kalsiyum silikat hidratlar gibi yeni oluşan fazların yapısına katılabilir. Bazı ağır metal iyonları, çözünmez hidroksitler veya karbonatlar halinde çöktürülerek etkisiz hale getirilir (Van Jaarsveld, Van Deventer, Lorenzen, 1997).
- **Sızıntı Testleri:** Atık esaslı jeopolimerlerin çevresel güvenliğini değerlendirmek için TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) veya EN 12457 gibi standart sızıntı testleri uygulanır (Van Jaarsveld, Van Deventer, Lorenzen, 1997). Yapılan çok sayıda çalışma, iyi tasarlanmış bir jeopolimer matrisinin, orijinal atığa

kıyasla ağır metal sızıntısını %90 seviyelerine varan çok büyük oranlarda azalttığını göstermektedir. Jeopolimerler, bu özellikleriyle sadece yapı malzemesi değil, aynı zamanda tehlikeli atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi için de etkili bir katılaştırma/stabilizasyon aracı olarak kullanılabilir (Van Jaarsveld, Van Deventer, Lorenzen, 1997).

Atık tabanlı jeopolimerler, atık yönetimi, kaynak verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi birbiriyle bağlantılı küresel sorunlara entegre bir çözüm sunar. Farklı atık türlerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin derinlemesine anlaşılması, bu malzemelerden yüksek kaliteli ve çevresel açıdan güvenli jeopolimerler üretmenin anahtarıdır. Bu yaklaşım, inşaat sektörünü daha döngüsel ve sürdürülebilir bir geleceğe taşıma potansiyelini büyük ölçüde barındırmaktadır (Martínez, Miller, 2025).

6.3. Yaşam Döngüsü Analizi (LCA)

Jeopolimerlerin gerçekten ne kadar çevreci olduğunu nesnel olarak ortaya koymak için en güvenilir yol, Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) yöntemidir. Bu yaklaşım, bir malzemenin çevresel performansını yalnızca üretim aşamasıyla sınırlı tutmaz; hammadde temini, işlem görme, kullanım süreci ve bertaraf gibi tüm aşamaları birlikte değerlendirir (Martínez, Miller, 2025).

Jeopolimerler genellikle düşük karbon ayak izine sahip alternatif bağlayıcılar olarak tanımlansa da, bu iddianın doğrulanması ve farklı jeopolimer formülasyonlarının çevresel etkilerinin karşılaştırılması ancak kapsamlı bir LCA çalışmasıyla mümkündür. Bu bölümde, LCA'nın temel mantığı ve jeopolimer malzemelere ne şekilde uygulanabileceği açıklanmaktadır.

6.3.1.LCA Kavramı ve Jeopolimer Malzemelere Uygulanabilirliği

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), bir ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca oluşan çevresel etkileri sistematik olarak inceleyen bilimsel bir metodolojidir. ISO 14040 - 14044 standartlarıyla tanımlanan bu yöntem, dört ana aşamadan oluşur (Tasiopoulou, Katsourinis, Giannopoulos, Founti, 2023):

- 1) Amaç ve Kapsamın Tanımlanması,
- 2) Envanter Analizi (LCI),
- 3) Etki Değerlendirmesi (LCIA),
- 4) Yorumlama

Bu metodoloji, jeopolimer malzemeler için uygulandığında özellikle Portland çimentosuyla karşılaştırmalı analizlerde güçlü bir değerlendirme çerçevesi sağlar (Ünsal, 2025). LCA'nın temel amacı, jeopolimerlerin gerçekten daha düşük çevresel yüke sahip olup olmadığını belirlemek ve bu avantajın yaşam döngüsünün hangi aşamalarında ortaya çıktığını somut verilerle göstermektir (Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022).

Ayrıca LCA, jeopolimer bileşimindeki değişkenlerin çevresel performansa etkilerini analiz etmek için önemli bir optimizasyon aracıdır. Böylece farklı jeopolimer karışımlarının sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılması ve proses tasarımının iyileştirilmesi mümkün hale gelir (Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022).

6.3.2.Fonksiyonel Birim ve Sistem Sınırlarının Belirlenmesi

LCA'nın temelini, karşılaştırmaların adil olmasını sağlayan fonksiyonel birim oluşturur (Martínez, Miller, 2025). İnşaat malzemeleri için bu genellikle 1 metreküp basınç dayanımı 40 MPa olan beton şeklindedir. Sadece 1 ton bağlayıcı karşılaştırması yanıltıcı olabilir, çünkü jeopolimer ve PC betonlarının farklı yoğunluk ve dayanımları olabilir. Aynı işlevi gören birim hacimdeki malzeme karşılaştırılmalıdır (Ünsal, 2025).

Sistem sınırları ise analize dahil edilecek süreçleri tanımlar. Jeopolimerler için genellikle hammadde çıkışından üretim aşamasına kadar yaklaşımı benimsenir ve aşağıdaki aşamaları kapsar (Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022):

- **Hammadde Eldesi:** Uçucu kül/cürufun termik santralden veya çelik fabrikasından alınması, aktivatörlerin (NaOH , Na_2SiO_3) üretimi, agrega ve su temini (Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022).
- **Nakliye:** Tüm hammaddelerin üretim tesisine taşınması (Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022).
- **Üretim:** Karıştırma, yerleştirme ve kür işlemleri.

Kullanım ömrü ve bertaraf aşamaları ise daha karmaşık olduğu için genellikle bu temel analizin dışında bırakılır, ancak dayanıklılık

farkları bu aşamalarda da önemli etki yapabilir (La Scalia, Saeli, Adelfio, Micale, 2021).

6.3.3. Envanter Analizi: Girdi-Çıktı Parametrelerinin Hesaplanması

Envanter analizi, LCA sürecinin en kapsamlı ve yoğun veri aşamasını oluşturur. Bu aşamada, seçilen fonksiyonel birim için kullanılan tüm girdiler ile ortaya çıkan tüm çıktılar niceliksel olarak belirlenir ve sistematik biçimde listelenir (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024).

- **Girdiler:**
 - **Malzeme Girdileri:** 1 m³ jeopolimer beton üretimi için gerekli uçucu kül veya cüruf miktarı (kg), kullanılan NaOH ve Na₂SiO₃ aktivatörlerinin miktarları (kg), agrega (kg) ve su tüketimi (kg) bu kapsamda değerlendirilir.
 - **Enerji Girdileri:** Karıştırma işlemi için elektrik tüketimi (kWh), ısıl kür aşaması için gerekli ısı enerjisi (MJ) ve hammaddelerin taşınması sırasında kullanılan dizel yakıt miktarı (litre) önemli enerji girdileridir.
- **Çıktılar:**
 - **Ürün:** Sistemin temel çıktısı olan 1 m³ jeopolimer beton.
 - **Atmosferik Emisyonlar:** CO₂, SO_x, NO_x ve PM gibi sera gazları ve hava kirleticileri; özellikle aktivatör üretimi ve lojistik süreçler sırasında oluşur (Abbas, Abdelzاهر, Shehata, Tantawy, 2024).

Bu aşamada kullanılan tüm veriler, literatürden, endüstriyel ölçekli veri tabanlarından veya LCA simülasyon yazılımlarından elde edilir. Özellikle alkali aktivatörlerin üretim süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar, jeopolimer temelli LCA çalışmalarında en kritik belirleyici parametrelerden biri olarak kabul edilir (Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022).

6.3.4. Etki Değerlendirmesi

Envanter analizi aşamasında elde edilen tüm girdiler ve emisyon verileri, çevresel etki kategorilerine dönüştürülerek değerlendirilir. Jeopolimer

sistemleri için en kritik etki kategorileri aşağıdaki şekilde öne çıkar (Bernard, Rentsch, Kuhn, Habert, Lura, 2024):

- **Küresel Isınma Potansiyeli (KIP):** Genellikle kg CO₂ eşdeğeri cinsinden ifade edilir. Bu, en çok odaklanılan kategoridir. PC betonuna kıyasla, atık prekürsörler sayesinde jeopolimer betonun KIP'inde %40-80'e varan azalmalar rapor edilmiştir. Ancak, bu azalma, yüksek enerjili aktivatörlerin payı nedeniyle kısmen dengelenebilir (Bernard, Rentsch, Kuhn, Habert, Lura, 2024).
- **Birincil Enerji Tüketimi (BET):** MJ cinsinden ölçülür. Klinker üretiminin olmaması, jeopolimerlerin fosil yakıt tüketiminde büyük bir avantaj sağlar. Ancak, aktivatör üretimindeki enerji ihtiyacı bu avantajı azaltır (Pu, Ouyang, 2023).
- **Asidifikasyon Potansiyeli:** SO₂ eşdeğeri olarak değerlendirilir. Bu kategori, çoğunlukla aktivatör üretimi ve nakliye süreçlerinden kaynaklanan SO_x emisyonları tarafından belirlenir (Pu, Ouyang, 2023).
- **Su Tüketimi:** Litre cinsinden ifade edilen su ayak izi, karışım suyu ihtiyacı ile aktivatör üretim süreçlerinde kullanılan su miktarına bağlıdır (Hopson, Fowler, 2022).
- **Diğer Etki Kategorileri:** İnsan sağlığı toksisitesi, ötrofikasyon potansiyeli gibi ek kategoriler de sistem sınırlarına bağlı olarak analiz kapsamına dahil edilebilir (Hopson, Fowler, 2022).

6.3.5. Duyarlılık ve Senaryo Analizleri

LCA çalışmaları, kullanılan veri setlerinin belirsizliklerinden ve yapılan varsayımlardan önemli ölçüde etkilenir. Bu nedenle, sonuçların güvenilirliğini değerlendirmek ve kritik parametreleri belirlemek amacıyla duyarlılık ve senaryo analizlerinin yapılması büyük önem taşır (Tayebani, Said, Memari, 2023).

- **Duyarlılık Analizi:** Bu analiz türü, girdi parametrelerinin nihai çevresel etkiler üzerinde en belirleyici role sahip olduğunu ortaya koyar. Elde edilen sonuçlar, çevresel iyileştirme çalışmalarının hangi aşamalara odaklanması gerektiğini gösterir. Örneğin, aktivatör verimliliğinin artırılması veya taşımacılıktan kaynaklanan

emisyolların azaltılması, duyarlılık analizleriyle netleşebilir (Tayebani, Said, Memari, 2023).

- **Senaryo Analizi:** Senaryo analizinde, sistem farklı varsayımlar altında yeniden modellenerek sonuçların hangi koşullarda nasıl değiştiği incelenir. Jeopolimerler için yaygın senaryo türleri şunlardır:
 - **Aktivatör Kaynağı:** Geleneksel sodyum silikat yerine, atık kaynaklı yeşil aktivatörlerin kullanılması (Bernard, Rentsch, Kuhn, Habert, Lura, 2024).
 - **Nakliye Mesafesi:** Uçucu külün 50 km yerine 500 km taşınması gibi farklı lojistik koşullarının değerlendirilmesi (Pu, Ouyang, 2023).
 - **Enerji Karışımı:** Üretim süreçlerinde şebeke elektriği yerine %100 yenilenebilir enerji kullanımının etkisinin analiz edilmesi (Hopson, Fowler, 2022).
 - **Atık Tahsisi:** Uçucu külün atık mı yoksa yan ürün mü olarak sınıflandırıldığı farklı metodolojik seçeneklerin sonuçlar üzerindeki etkisinin incelenmesi (Tayebani, Said, Memari, 2023).

Bu analizler, jeopolimer sistemlerinin çevresel performansına ilişkin belirsizlikleri azaltır, karar vericilere daha sağlam ve karşılaştırılabilir sonuçlar sunar.

6.3.6. Jeopolimer–Portland Çimento LCA Karşılaştırması

Kapsamlı bir yaşam döngüsü analizi (LCA), jeopolimer beton ile Portland çimentosu (PC) esaslı betonun çevresel performans farklarını net bir şekilde ortaya koyar (Martínez, Miller, 2025).

- **Jeopolimerin Avantajları:**
- **Klinkerleşmenin Olmaması:** Proses deki kalsinasyondan kaynaklanan CO₂ emisyonu büyük ölçüde ortadan kalkar (Martínez, Miller, 2025).
- **Atık Değerlendirme:** Uçucu kül/cürufun atık olarak değerlendirilmesi, bu malzemelere çok düşük veya sıfır çevresel yük atfedilmesini sağlar (Martínez, Miller, 2025).

- **Daha Düşük İşlem Sıcaklığı:** Jeopolimerin oda sıcaklığında kürlenmesi, PC'nin 1450 °C de klinkerleştirme sıcaklığına kıyasla çok daha az enerji gerektirir (Martínez, Miller, 2025).
- **Jeopolimerin Zorlukları/Dezavantajları** (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011):
- **Aktivatör Yükü:** NaOH ve Na₂SiO₃ gibi kimyasal aktivatörlerin üretimi yüksek enerji gerektirir ve önemli sera gazı emisyonlarına yol açar. Bu nedenle aktivatör üretimi, jeopolimerlerin toplam çevresel etkisindeki en kritik zayıf noktadır (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Nakliye:** Prekürsör atıkların veya aktivatörlerin üretim ve kullanım noktaları arasındaki uzun mesafeler, nakliye kaynaklı emisyonları artırabilir. Bu durum özellikle bölgesel kaynak bulunmayan yerlerde belirginleşir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
- **Hammadde Değişkenliği:** Uçucu külün kimyasal bileşimindeki bölgesel ve proses kaynaklı farklılıklar, jeopolimer performansında değişkenliğe neden olabilir. Bu değişkenlik, fonksiyonel birim bazındaki çevresel etkilerin de değişmesine yol açabilir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).

Mevcut LCA çalışmalarının büyük çoğunluğu; yerel atık kaynaklarıyla üretilen, düşük aktivatör içerikli ve optimize edilmiş jeopolimer betonların, geleneksel PC betonuna göre belirgin şekilde daha düşük küresel ısınma potansiyeli sunduğunu göstermektedir (Ünsal, 2025). Bununla birlikte, asidifikasyon gibi diğer etki kategorilerinde bu avantaj daha sınırlı olabilir veya aktivatör kaynaklı emisyonlar nedeniyle tersine dönebilir. Bu nedenle jeopolimerlerin yeşil olarak değerlendirilmesi koşulsuz değildir. Nihai çevresel performans; kullanılan malzemelerin türü, enerji karışımı, üretim teknolojisi ve lojistik gibi faktörlere sıkı sıkıya bağlıdır. LCA yaklaşımı, bu karmaşık etkileşimleri anlamak ve jeopolimerlerin gerçekten sürdürülebilir bir alternatif haline gelmesini sağlamak için kritik öneme sahiptir (Provis, 2018).

6.4.Enerji Verimliliği ve Çevresel Avantajlar

Jeopolimerlerin sürdürülebilirlik potansiyeli yalnızca düşük karbon ayak iziyle sınırlı değildir; aynı zamanda enerji verimliliği ve yaşam döngüsü boyunca sunduğu çok yönlü çevresel avantajlar da bu potansiyelin ayrılmaz bir parçasıdır (Kriven ve diğerleri, 2025).

6.4.1.Üretim Sürecinde Enerji Tüketim Analizi

Jeopolimer üretimi ile Portland çimentosu (PC) üretiminin enerji profilleri karşılaştırıldığında, aradaki temel farkın ısı enerji yoğunluğu olduğu açıkça görülür (Martínez, Miller, 2025).

- **Portland Çimentosu:** PC üretimindeki enerji tüketiminin büyük kısmı, hammaddeleri yaklaşık 1450°C'ye kadar ısıtan döner fırınlardan kaynaklanır. Bu klinkerleştirme işlemi, 1 ton klinker başına yaklaşık 3-6 GJ arasında değişen büyük miktarda ısı enerji gerektirir. Bu, PC üretiminin toplam birincil enerji tüketiminin %80-90'ını oluşturur. Geri kalanı ise hammadde öğütme, nakliye vb. için kullanılan elektrik enerjisidir (Martínez, Miller, 2025).
- **Jeopolimer:** Jeopolimer üretiminde klinkerleştirme aşaması yoktur. Enerji tüketimi başlıca dört kaynaktan gelir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011):
 - **Aktivatör Üretimi:** Sodyum silikat ve sodyum hidroksitin üretimi enerji yoğunudur ve jeopolimerin toplam enerji yükünün önemli bir bölümünü oluşturabilir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
 - **Prekürsör Hazırlama:** Uçucu kül genellikle doğrudan kullanılabilirken, cüruf veya metakaolin gibi malzemelerin öğütülmesi ek elektrik enerjisi gerektirebilir. Metakaolin üretimi için kaolenin kalsinasyonu yaklaşık 700°C da enerji tüketir, ancak bu PC klinkerine kıyasla çok daha düşük bir sıcaklık ve enerji girdisidir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).
 - **Kürleme İşlemi:** Oda sıcaklığında kür, enerji gerektirmez. Ancak genellikle 60-80°C de hızlandırılmış bir kür için uygulanan ısı işlem, ek ısı enerji tüketimine neden olur (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).

- **Karıştırma:** Jeopolimer karışımlarının genellikle daha yüksek viskoziteye sahip olması, PC betonuna göre biraz daha fazla elektrik enerjisi gerektirebilir (McLellan, Williams, Lay, Van Riessen, Corder, 2011).

Klinkerleşme aşamasının tamamen ortadan kalkması, jeopolimerlere PC'ye kıyasla çok büyük bir ısıl enerji avantajı sağlar. Özellikle oda sıcaklığında kürlenene ve düşük aktivatör içeriği kullanılan formülasyonlarda jeopolimerlerin toplam birincil enerji tüketimi, PC'ye göre belirgin biçimde daha düşük seviyelerde gerçekleşmektedir (Ünsal, 2025).

6.4.2.Düşük Sıcaklıkta Kütleme ve Enerji Kazanımı Yaklaşımları

Jeopolimerizasyon reaksiyonu, polikondenzasyon adı verilen ve düşük sıcaklıklarda gerçekleşen bir reaksiyondur (Ukritnukun ve diğerleri, 2021; Dong, Gao, Li, Wang, 2025). Bu temel özellik, enerji verimliliği için önemli fırsatlar sunar.

- **Oda Sıcaklığında Kür:** Birçok jeopolimer sistemi, özellikle uçucu kül ve cüruf esaslı olanlar, enzimatik reaksiyonlar gibi oda sıcaklığında tamamen reaksiyona girerek yüksek mukavemet geliştirebilir. Bu, üretim sırasında ısıtma için sıfır enerji girdisi anlamına gelir ve enerji verimliliğini maksimize eder (Ukritnukun ve diğerleri, 2021).
- **Atık Isı Entegrasyonu:** Isıl işlem gerektiren durumlarda bile, bu işlem 60-90°C aralığında, PC klinkerleştirmesinden çok daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu, endüstriyel tesislerde atık olarak açığa çıkan düşük sıcaklıktaki atık ısınının, jeopolimer prekast elemanlarının kürlenmesi için doğrudan kullanılabileceği anlamına gelir. Bu sinerji, enerji geri kazanımı yoluyla üretim enerji girdisini neredeyse sıfıra indirebilir (Dong, Gao, Li, Wang, 2025).

6.4.3. Isıl ve Kimyasal Dayanımın Enerji Korunumuna Katkısı

Jeopolimerlerin enerji avantajı sadece üretim aşamasıyla sınırlı değildir. Kullanım ömrü boyunca gösterdikleri performans, dolaylı olarak enerji tasarrufu sağlar (Haily ve diğerleri, 2023).

- **Üstün Isı Yalıtımı:** Hafif köpük jeopolimerler, çok düşük termal iletkenlik değerlerine (0.04 - 0.08 W/mK) sahiptir. Binalarda bu malzemelerin kullanılması, ısıtma ve soğutma için gereken enerji ihtiyacını önemli ölçüde azaltarak, binanın işletme enerjisi tasarrufuna katkıda bulunur (Zhanga, Yuana, Lic, Zhanga, Xiea, 2023).
- **Yüksek Refrakterlik:** Jeopolimerlerin 1000°C'yi aşan sıcaklıklara dayanabilmesi, onları endüstriyel fırınlar ve yüksek sıcaklık tesisleri için ideal bir yalıtım malzemesi yapar. Geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla çok daha uzun ömürlü ve etkilidirler, bu da bu tesislerin enerji verimliliğini artırır ve sık değiştirme ihtiyacını ortadan kaldırır (Sayyedana, Enayati, Nahvi, Taghipour, 2022).
- **Kimyasal Direnç ve Uzun Ömür:** Asit, sülfat ve klorür gibi agresif kimyasallara karşı yüksek dirençleri, jeopolimer yapıların kimyasal tesisler, atık su arıtma tesisleri ve deniz yapılarında çok daha uzun bir hizmet ömrüne sahip olmasını sağlar. Malzemenin daha az sıklıkla değiştirilmesi veya onarılması gerektiği anlamına gelir, bu da yaşam döngüsü boyunca üretim ve nakliyeden kaynaklanan enerji tüketimini ve çevresel etkiyi azaltır (Haily ve diğerleri, 2023).

6.4.4. Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu

Jeopolimer üretim sürecinin yüksek sıcaklık gerektirmeden gerçekleştirilebilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla bütünleşik bir üretim modeli kurmak için önemli fırsatlar sunar (Martínez, Miller, 2025).

- **Güneş Enerjili Isıl Kür:** Prekast jeopolimer eleman üretim tesislerinin çatılarına kurulacak güneş kolektörleri veya düzlemsel güneş panelleri, kürleme için gereken 60-80°C'lik sıcak suyu veya havayı doğrudan ve sıfır emisyonla sağlayabilir. Bu, üretim sürecini büyük ölçüde karbon nötr hale getirir (Ünsal, 2025).

- **Rüzgar veya Güneş Elektrikliği ile Çalışan Karıştırma:** Karıştırma, pompalama ve diğer elektrikle çalışan ekipmanların enerji ihtiyacı, rüzgâr türbinleri veya fotovoltaik panellerden sağlanan yenilenebilir elektrikle karşılanabilir. Bu yaklaşım, jeopolimer üretim süreçlerinin fosil yakıt bağımlılığını büyük ölçüde azaltır ve enerji sürdürülebilirliğini artırır (Rabie, Irshidat, Al-Nuaimi, 2022).

6.4.5. Jeopolimerlerin Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemlerindeki Rolü

Jeopolimerlerin çevresel açıdan üstün özellikleri, onları uluslararası yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde önemli kazanımları sağlayabilecek değerli bir malzeme haline getirir (Martínez, Miller, 2025).

- **LEED (Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik):** Jeopolimerlerin uçucu kül ve cüruf gibi yüksek oranda endüstriyel yan ürün içermesi, Atık Malzeme Kullanımı ve Geri Dönüştürülmüş İçerik kredileri açısından güçlü bir avantaj sunar (Ünsal, 2025).
 - **Yerel Öncelikli Malzemeler:** Yerel atık kaynakları kullanılarak üretildiklerinde, nakliye emisyonlarını azaltarak bu krediyi almayı kolaylaştırırlar (Ricciotti, Frettoloso, Franchino, Pisacane, Aversa, 2025).
 - **Bina Yaşam Döngüsü Etki Azaltımı:** Düşük karbon ayak izi ve düşük birincil enerji tüketimi, binanın yaşam döngüsü performansını iyileştirerek ilgili LEED kredi kategorisine doğrudan katkı sağlar (Ricciotti, Frettoloso, Franchino, Pisacane, Aversa, 2025).
- **BREEAM (Bina Araştırma Kuruluşu Çevresel Değerlendirme Yöntemi):**
 - **Malzeme (MAT 01) Kriteri:** BREEAM, malzemelerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirir. Jeopolimerlerin düşük küresel ısınma potansiyeli (KIP) ve düşük birincil enerji tüketimi, bu kategoride yüksek puan almalarına olanak tanır (Ricciotti, Frettoloso, Franchino, Pisacane, Aversa, 2025).

- **Atık Yönetimi:** Atık malzemelerin değerlendirilmesi, atık yönetimi kategorilerinde olumlu değerlendirilir.
- **Dayanıklılık ve Uzun Ömür:** Jeopolimerlerin uzun servis ömrü ve düşük bakım ihtiyacı, yapının sürdürülebilir kullanım performansını artırarak dolaylı şekilde BREEAM puanlarına katkı sağlar (Ricciotti, Frettoloso, Franchino, Pisacane, Aversa, 2025).

Jeopolimerler; düşük karbon ayak izi, yüksek dayanıklılık, atık malzeme değerlendirme potansiyeli ve düşük enerji gereksinimi gibi özellikleri sayesinde yalnızca üretim aşamasında değil, kullanım ömrü boyunca kapsamlı bir çevresel fayda sağlar. Bu nitelikler, jeopolimerleri sürdürülebilir inşaatın önemli yapı taşlarından biri haline getirir ve LEED ile BREEAM gibi yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde önemli katkılar sağlayarak çevresel hedeflere ulaşmada kritik bir rol üstlenmelerini mümkün kılar (Martínez, Miller, 2025; Ünsal, 2025; Ricciotti, Frettoloso, Franchino, Pisacane, Aversa, 2025).

BÖLÜM 7

JEOPOLİMERLERİN UYGULAMA ALANLARI

GİRİŞ

Jeopolimerler, yalnızca çevresel açıdan düşük etkileriyle değil, aynı zamanda mühendislik performansını üst seviyeye taşıyan çok yönlü özellikleriyle, modern yapı sektöründe hızla yükselen yenilikçi bir malzeme sınıfı haline gelmiştir. Geleneksel bağlayıcı sistemlere alternatif olmanın ötesinde; dayanıklılık, uzun ömür, ısı ve kimyasal kararlılık gibi yüksek performans gerektiren alanlarda sundukları avantajlar sayesinde mimari, altyapı ve endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmektedir (Kumar, Deoliya, 2022).

7.1.İnşaat ve Yapı Malzemeleri

Jeopolimerler, geleneksel bağlayıcıların ötesine geçerek hem yapısal performansı artıran hem de sürdürülebilirliği merkeze alan yeni nesil inşaat malzemeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sayesinde beton, prefabrik elemanlar ve kaplama sistemleri gibi çok çeşitli yapı bileşenlerinde geniş bir kullanım potansiyeli sunarlar (Kumar, Deoliya, 2022).

7.1.1.Yapısal Beton ve Prefabrik Elemanlarda Kullanım

Jeopolimer beton, geleneksel Portland çimentosu (PC) betonuna kıyasla bir dizi avantaj sunarak yapısal uygulamalar için son derece uygun hale gelir (Fatourehchi, Zarghami, 2020).

- **Mekanik Performans:** Jeopolimer betonun en dikkat çeken özelliklerinden biri yüksek erken dayanım kapasitesidir. Uygun tasarlanan karışımlarla 24 saat içinde 20 ila 30 MPa basınç dayanımına ulaşabilmekte ve bu durum kalıp dönüşüm sürelerini ciddi ölçüde kısaltmaktadır. Nihai basınç dayanımları ise çoğu zaman 50, 100 MPa aralığına, hatta özel formülasyonlarla daha yüksek değerlere çıkabilmektedir. Ayrıca, yüksek elastik modül ve iyi çekme dayanımı da jeopolimer betonun yapısal performansını destekleyen önemli özelliklerdir (Zhang, Huang, Ma, Yuan, Nener, 2021).

- **Prefabrikasyon Uygunluğu:** Jeopolimer beton, özellikle erken yaş dayanımının hızla gelişmesi ve şekil kararlılığının yüksek olması sayesinde prefabrik üretim hatlarının gerektirdiği hızlı döngü sürelerine son derece uyum sağlar (Wang, Li, Cheng, Zhong, Ma, 2021). Geleneksel PC esaslı sistemlere kıyasla daha kısa sürede kalıptan çıkabilmesi, üretim bantlarında ciddi zaman kazancı oluşturur. Bu özellik, tekrarlı üretim yapılan kiriş, kolon, panel, kaldırım elemanı ve cephe modülleri gibi standart prefabrik ürünlerde verimliliği artıran temel faktörlerden biridir (Wang, Li, Cheng, Zhong, Ma, 2021). Jeopolimer sistemlerinin oda sıcaklığında dahi yeterli mukavemet kazanabilmesi, düşük enerjili kür rejimlerinin uygulanmasına olanak tanır. Gerekğinde kullanılan ılımlı ısıl kür (60–80 °C), homojen mikroyapı gelişimini hızlandırırken, geleneksel buhar kür odalarına bağımlılığı büyük ölçüde azaltır. Bu durum yalnızca enerji maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda prefabrik tesislerde altyapı gereksinimlerini sadeleştirerek yatırım maliyetini de azaltır (Wang, Li, Cheng, Zhong, Ma, 2021).
- **Büzülme ve Sünme:** İyi optimize edilmiş jeopolimer beton karışımları, PC betonuna kıyasla genellikle daha düşük kuruma büzülmesi ve daha düşük deformasyonu eğilimi gösterir. Bu avantaj, özellikle öngerilmeli beton elemanlar ile büyük açıklıklı köprüler, yüksek katlı yapılar ve sünekliğin kritik olduğu mühendislik uygulamaları için büyük önem taşır. Daha düşük deformasyon eğilimi, hem yapısal güvenlik hem de uzun vadeli servis performansı açısından jeopolimerlere önemli bir üstünlük kazandırır (Zhang, Huang, Ma, Yuan, Nener, 2021).

7.1.2.Yüksek Dayanımlı ve Uzun Ömürlü Yol Kaplamaları

Jeopolimerler, ağır trafik yükleri ile zorlu çevresel koşulların birlikte etkili olduğu altyapı uygulamalarında, geleneksel Portland çimentolu betona kıyasla daha uzun ömürlü ve yüksek performanslı yol kaplamaları üretme potansiyeline sahiptir. Bu üstünlük, hem mekanik dayanım parametrelerinden hem de mikroyapısal kararlılıktan kaynaklanmaktadır (Chelluri, Hossiney, Chandra, Bekoe, Tia, 2025).

- **Aşınma ve Yorulma Direnci:** Jeopolimer bağlayıcıların sert ve yoğun mikroyapısı, yüksek basınç ve çekme dayanımı ile birleşerek aşınma direncini belirgin şekilde artırır. Özellikle ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu otoyollar, liman rıhtımları ve endüstriyel zeminlerde, yüzeyin aşınma kaynaklı bozulmalara karşı gösterdiği direnç kaplama ömrünü önemli ölçüde uzatmaktadır. Ayrıca, tekrarlı yüklemeler altında sergiledikleri iyi yorulma performansı, dinamik yüklere maruz kalan altyapı uygulamaları için önemli bir avantaj sunar (Khasawneh, 2025).
- **Donma Çözülme ve Kimyasal Direnç:** Jeopolimerlerin düşük gözenekliliğe sahip yoğun yapısı, su ve agresif iyonların malzeme içerisine nüfuz etmesini zorlaştırır. Bu özellik, donma çözülme döngülerinde meydana gelen iç basınç kaynaklı hasar riskini azaltırken, buz çözücü kimyasallara karşı da genellikle daha iyi bir dayanım sağlar. Böylece, soğuk iklim bölgelerinde görülen donma çözülme kaynaklı hasarın minimize edilmesi ve uzun süreli yüzey dayanıklılığı mümkün olur (Khasawneh, 2025).

7.1.3. Jeopolimer Harçlar ve Yapıştırıcı Sistemler

Jeopolimer teknolojisi, sadece beton ve büyük ölçekli yapı elemanlarında değil, aynı zamanda ince bağlayıcı tabakaları gerektiren harç ve yapıştırıcı uygulamalarında da etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu tür sistemlerde aranan yüksek dayanım, kimyasal direnç ve boyutsal kararlılık gibi özellikler, jeopolimer bağlayıcıların doğal olarak sağladığı avantajlarla uyumludur (Hosan, Haque, Shaikh, 2016).

- **Tamir Harçları:** Yüksek erken dayanım, düşük büzülme, iyi yapışma mukavemeti ve üstün kimyasal direnç, jeopolimer harçları yapıların onarım ve güçlendirilmesi için mükemmel bir seçenek haline getirir. Özellikle kimyasal saldırıya uğramış yapıların tamirinde ve hızlı müdahale gerektiren acil onarımlarda tercih edilirler (Huseiena, Mirzaa, Ismaila, Ghoshalc, Husseina, 2017).
- **Yapıştırıcılar ve Enjeksiyon Groutları:** Jeopolimer esaslı yapıştırıcılar, dış mekan karolarının yapıştırılması veya beton elemanların birleşimlerinde kullanılabilir. Ayrıca, özellikle kaya

çivileri ve ankrajlar için kullanılan enjeksiyon groutları olarak da formüle edilebilirler. Hızlı mukavemet kazanımı ve kimyasal stabilite, bu uygulamalarda kritik öneme sahiptir (Xiong, Guo, Zhang, 2023).

7.1.4. Asidik ve Sülfatlı Ortamlara Dayanıklı Yapı Elemanları

Jeopolimerlerin kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gibi kimyasallara karşı zayıf olan fazları içermemesi, onları asit ve sülfat saldırısına karşı son derece dayanıklı kılar (Bakharev, 2004).

- **Asit Direnci:** PC betonu, asitlerle reaksiyona girerek bozulan kalsiyum esaslı fazlar içerir. Jeopolimerlerin ana fazı olan N-A-S-H jeli ise asitlere karşı çok daha inerttir. Bu durum, atık su arıtma tesisleri, kimya endüstrisi tesisleri, maden drenajı yapıları ve asidik yağmurun yoğun olduğu bölgelerdeki yapılar için ideal bir malzeme olduğu anlamına gelir (Bakharev, 2004).
- **Sülfat Direnci:** PC betonunda sülfat iyonları, alüminat fazları ile genişmeye neden olan etrenjit gibi bileşikler oluşturur. Kalsiyum alüminat içeriği düşük olan jeopolimerler, sülfat saldırısına karşı olağanüstü bir direnç sergiler. Böylece, deniz yapıları, sülfatlı zeminler ve endüstriyel atık depolama alanları gibi ortamlarda kullanım için son derece uygundur (Bakharev, 2004).

7.1.5. Betonarme Uygulamalarda Çelik ile Uyumluluk ve Bağ Dayanımı

Bir betonarme malzeme olarak kabul edilebilmesi için, jeopolimer betonun içindeki çelik donatıyı korozyondan etkin bir şekilde koruyabilmesi ve onunla yüksek bir bağ dayanımı sağlaması gerekir (Cui ve diğerleri, 2023).

- **Pasifasyon ve Korozyon Koruması:** Betonarmenin korozyon koruması, betonun yüksek alkali ortamının çelik yüzeyinde koruyucu bir pasif oksit tabakası oluşturmaya dayanır. Jeopolimerler de genellikle 11-13 arasında yüksek bir pH'ya sahiptir ve bu da çelik donatıda etkili bir pasifasyon tabakasının oluşmasını sağlar. Yoğun ve düşük geçirgenlikteki mikroyapıları, klorür iyonları ve karbondioksit gibi korozyonu tetikleyen ajanların

donatıya ulaşmasını zorlaştırarak ek bir koruma sağlar (Alanazi, 2022).

- **Bağ Dayanımı:** Yapılan araştırmalar, jeopolimer beton ile çelik donatı arasındaki bağ dayanımının, mukavemeti eşdeğer PC betonuna kıyasla genellikle eşdeğer veya daha yüksek olduğunu göstermektedir. Pürüzlü yüzeyli nervürlü donatı ile jeopolimer matris arasında mükemmel bir mekanik kenetlenme oluşur. Böylece, yüklerin betondan çeliğe verimli bir şekilde aktarılmasını sağlayarak betonarme elemanların güvenli bir şekilde çalışmasına olanak tanır. Bu, jeopolimer beton, temeller, kirişler, kolonlar ve diğer betonarme yapı elemanlarında güvenle kullanılma potansiyelini destekler (Lang ve diğerleri, 2025).

7.2.Yüksek Sıcaklık ve Yangın Dayanımlı Malzemeler

Jeopolimerlerin amorf, inorganik siliko alüminat ağ yapısı, onları organik polimerlere ve hatta geleneksel Portland çimentosuna kıyasla üstün bir termal kararlılık ve yangın direnci sergilemelerini sağlar. Bu özellik, onları aşırı sıcaklık ortamları ve yangın güvenliğinin kritik olduğu uygulamalar için vazgeçilmez kılar (Kong, Sanjayan, 2010).

7.2.1.Termal Kararlılık ve Yüksek Sıcaklık Davranışı

Jeopolimerlerin yüksek sıcaklık performansı, kademeli bir dönüşüm süreci ile karakterize edilir (Duxson, Lukey, ,Van Deventer, 2007).

- **Dehidratasyon (100-300°C):** 100–300 °C aralığında jeopolimer yapıdan önce fiziksel olarak bağlı, ardından sınırlı miktarda kimyasal bağlı su uzaklaşır. İyi tasarlanmış jeopolimer matrisleri, su kaybının yol açtığı hacimsel değişim ve çatlak oluşumu riskini en aza indirecek kadar kararlı bir ağ yapısı sunar. Mekanik dayanım genellikle korunur; hatta suyun ayrılmasıyla matris yoğunlaştığı için hafif bir artış dahi gözlemlenebilir (Hosan, Haque, Shaikh, 2016).
- **Dehidroksilasyon ve Yapısal Yoğunlaşma (300-800°C):** Daha yüksek sıcaklıklarda, silanol (Si-OH) gruplarından su ayrılarak ek siloksan (Si-O-Si) bağları oluşur. Süreç, jeopolimer ağını daha da güçlendirir ve yoğunlaştırır. Bu sıcaklık aralığında, Portland

çimentosu betonu mukavemetinin büyük kısmını kaybederken, birçok jeopolimer kompozit orijinal oda sıcaklığı mukavemetinin önemli bir bölümünü koruyabilir (Hosan, Haque, Shaikh, 2016).

- **Sinterleme ve Faz Dönüşümü (800-1200°C ve Üzeri):** Yaklaşık 800°C'den itibaren, amorf jeopolimer ağı yeniden düzenlenmeye ve kararlı kristal fazlara dönüşmeye başlar. Bu sinterleme süreci, malzemeyi daha kompakt hale getirir ve seramik benzeri özellikler kazandırır. Bu sayede, yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde koruyarak çok yüksek sıcaklıklara dayanabilir (Davidovits, 1991).

7.2.2. Isı Yalıtım Özellikleri ve Termal Genleşme Analizi

Jeopolimer sistemlerin yüksek sıcaklık performansını belirleyen temel parametreler arasında ısı iletim davranışı ve termal genleşme karakteristikleri önemli bir yer tutar. Bu iki özellik, malzemenin enerji etkin yalıtım uygulamalarındaki başarısını ve tekrarlı ısıl döngülere karşı yapısal bütünlüğünü doğrudan etkiler (Davidovits, 1991; Kong, Sanjayan, 2010). Termal iletkenliğin gözenek yapısı ve bağlanma mekanizmalarıyla ilişkisi, ayrıca termal genleşme katsayısının sıcaklık kaynaklı gerilmeleri yönetmedeki rolü, jeopolimerlerin ileri mühendislik uygulamalarında tercih edilme nedenlerini oluşturan kritik parametrelerdir. Bu bağlamda, jeopolimerlerin termal davranışının detaylı analizi, hem malzeme seçimi hem de tasarım kriterleri açısından büyük önem taşır (Davidovits, 1991; Kong, Sanjayan, 2010).

- **Isı Yalıtımı:** Özellikle köpük jeopolimer formları, düşük termal iletkenlik değerleri (0.04 – 0.10 W/mK) sergiler. Bu, hem enerji verimliliği sağlayan bir yalıtım malzemesi olarak hem de yüksek sıcaklık uygulamalarında ısı akışını geciktiren bir bariyer olarak kullanılmalarını sağlar. Gözenekli yapı, ısı transferini engelleyerek altındaki yapıyı korur (Davidovits, 1991).
- **Termal Genleşme:** Jeopolimerlerin termal genleşme katsayısı (CTE), bileşime bağlı olarak değişmekle birlikte, genellikle geleneksel seramikler ve refrakter tuğlalarla uyumludur. Bu, ısıtma ve soğutma döngüleri sırasında kaplama ile alt tabaka arasında oluşacak termal gerilmelerin ve dolayısıyla çatlak oluşumu riskinin

düşük olduğu anlamına gelir. Kontrollü bir CTE, termal şok direnci için de hayati öneme sahiptir (Kong, Sanjayan, 2010).

7.2.3. Yangın Direnci ve Duman Emisyonu Performansı

Jeopolimer malzemeler, yangın güvenliği açısından değerlendirildiğinde geleneksel bağlayıcılara kıyasla belirgin üstünlükler gösteren inorganik bir matris yapısına sahiptir. Organik bileşen içermemeleri, yüksek sıcaklıklarda erime veya alev alma eğiliminin son derece düşük olması ve termal bozunma sırasında toksik gaz üretmemeleri, bu malzemeleri yangına dayanıklı yapı sistemlerinde son derece güvenilir bir seçenek haline getirir (Kong, Sanjayan, 2010).

- **Yanmazlık ve Yapısal Bütünlük:** Jeopolimerler A1 sınıfı yanmaz malzemelerdir. Yangın anında erimez, alev almaz veya damlama yapmazlar. Saatlerce süren 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalsalar dahi, yapısal bir eleman olarak yük taşıma kapasitelerinin önemli bir kısmını koruyabilirler. Bu, PC betonunun yangın altında patlama ve ağır hasar riskine kıyasla çok önemli bir avantajdır (Kong, Sanjayan, 2010).
- **Düşük Isı İletimi ve Isıl Geçirgenlik:** Yangın durumunda, jeopolimer beton veya kaplama, ısıнын altındaki yapısal elemanlara iletilmesini yavaşlatır. Bu gecikme, çeliğin taşıma kapasitesini kaybettiği kritik sıcaklığa ulaşma süresini uzatarak, yapının göçmesini geciktirir ve can kurtarma ile yangına müdahale için paha biçilmez zaman kazandırır (Hosan, Haque, Shaikh, 2016).
- **Duman ve Toksik Gaz Emisyonu:** Organik polimer esaslı yalıtım ve kaplama malzemeleri yangında yoğun duman ve yüksek oranda toksik gaz üretir. Jeopolimerler ise inorganik yapıları gereği yanma ürünü oluşturmazlar. Yangın sırasında neredeyse sıfır duman ve toksik gaz emisyonu sergilerler, bu da hayatta kalma şansını önemli ölçüde artırır (Davidovits, 2017).

7.2.4. Refrakter Kaplamalar ve Paneller

Jeopolimer esaslı sistemler, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren kaplama ve panel uygulamalarında geleneksel refrakter malzemelere hem

çevresel avantajlar hem de güçlü performans özellikleri sunan yenilikçi bir alternatif olarak öne çıkar. İnorganik ve ısıl kararlı bağ yapıları sayesinde, ısıtma soğutma döngülerine karşı boyutsal kararlılığını koruyabilen jeopolimerler, refrakter kaplama teknolojilerinde sürdürülebilir ve güvenilir bir çözüm sağlamaktadır (Wu ve diğerleri, 2023).

- **Monolitik Refrakter Kaplamalar:** Jeopolimer harçlar, düzensiz şekilli fırınların, bacaların veya boru hatlarının astar olarak kaplanmasında kullanılabilir. Dökülebilir ve püskürtülebilir olmaları, karmaşık geometrilerde kolay uygulama imkanı sunar. Hızlı priz alır ve yüksek sıcaklık dayanımı gösterirler (Zhang, Wei, Shao, Qiao, 2022).
- **Hafif Refrakter Paneller:** Köpük jeopolimerlerden veya hafif agregalarla üretilen paneller, hem yalıtım hem de yüksek sıcaklık direnci gerektiren uygulamalar için idealdir. Endüstriyel fırınların dış cephe yalıtımında, enerji kaybını azaltmak ve yüzey sıcaklığını düşürmek için kullanılırlar (Zhang, Wei, Shao, Qiao, 2022).

7.2.5.Enerji Santralleri ve Endüstriyel Fırın Uygulamaları

Jeopolimerlerin yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal stabilitesi ve düşük termal iletkenlik gibi avantajları, onları enerji üretim tesisleri ile ağır sanayi süreçlerinde kullanılan fırın, yanma odası ve ısıtma ekipmanlarında çok yönlü ve güvenilir bir malzeme seçeneği haline getirir. Termal şoklara karşı gösterdikleri direnç ve agresif endüstriyel ortamlarda koruyucu bir bariyer oluşturabilme yetenekleri, bu sistemlerde uzun hizmet ömrü ve bakım maliyetlerinde azalma sağlamaktadır (Lee, Riessen, 2022).

- **Enerji Santralleri:** Termik santrallerde, buhar kazanları, türbin binaları ve baca iç yüzeyleri için yangına dayanıklı kaplama ve yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirler. Ayrıca, aşındırıcı baca gazlarına karşı korozyon direnci de bu uygulamalarda ek bir avantaj sağlar (Kong, Sanjayan, 2010).
- **Metalürji ve Cam Endüstrisi:** Yüksek fırınlar, döner çimento fırınları ve cam ergitme fırınlarında, geleneksel refrakter tuğlalar arasındaki derz dolgusu olarak veya bu fırınların ısı kaybını

azaltmak için ikincil bir yalıtım tabakası olarak hizmet ederler (Barbosa, MacKezie, 2003).

- **Petro-Kimya Tesisleri:** Petrokimya tesislerindeki fırınlar, reaktörler ve yüksek sıcaklıktaki boru hatları, yangın koruması ve ısı yalıtımı için jeopolimer kaplama ve panellerle korunabilir (Q. Han ve diğerleri, 2022).

Jeopolimerler, yalnızca yüksek sıcaklığa dayanmakla kalmayıp, aynı zamanda mükemmel bir ısı bariyeri görevi görerek ve yangın anında hayati güvenlik sağlayarak, gelişmiş refrakter ve yangına dayanıklı malzeme pazarında kendine sağlam bir yer edinmiştir. Bu uygulamalarda sunduğu uzun hizmet ömrü, düşük bakım ihtiyacı ve üstün güvenlik profili, onu geleceğin endüstriyel malzemelerinden biri yapmaktadır (Lee, Riessen, 2022).

7.3.Radyasyon Kalkanlama Malzemeleri

Jeopolimerler, yüksek yoğunluk, kimyasal stabilite ve üstün yapısal bütünlük gibi özelliklerinin bir araya gelmesiyle, geleneksel kurşun veya sıradan betona kıyasla daha verimli ve çok yönlü radyasyon kalkanlama malzemeleri olarak büyük potansiyel göstermektedir. Bu malzemeler, nükleer santrallerden tıbbi görüntüleme merkezlerine kadar geniş bir yelpazede hayati bir koruma işlevi görür (Al-Buriah, Alzahrani, Yılmaz, Çalışkan, Olariño, 2025).

7.3.1.Jeopolimerlerin Radyasyon Soğurma Mekanizması

Radyasyonun madde ile etkileşimi, radyasyonun türüne bağlıdır. Jeopolimerler, farklı mekanizmalarla her iki tür radyasyonu da etkili bir şekilde zayıflatabilir (Echeweozo ve diğerleri, 2024).

- **Gama Işınları ve X-Işınlara Karşı Koyma:** Bu yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar, malzemedan geçerken üç temel etkileşimle enerji kaybeder: Fotoelektrik etki, Compton saçılımı ve çift oluşumu. Bu etkileşimlerin verimliliği, malzemenin yüksek yoğunluğuna ve daha da önemlisi, yüksek atom numarasına (Yüksek-Z) sahip elementler içermesine bağlıdır. Saf jeopolimer matrisi (Si, Al, O, Na) orta düzeyde bir zayıflama sağlar. Ancak, yüksek atom numaralı elementler ile takviye edildiğinde, bu

etkileşim olasılıkları dramatik bir şekilde artar, dolayısıyla gama ve X-ışınlarını soğurma kapasiteleri de önemli ölçüde yükselir (Echeweozo ve diğerleri, 2024).

- **Nötronlara Karşı Koyma:** Nötronlar yüksüz oldukları için malzeme içinde derinlemesine nüfuz edebilir (Plando, Supnad, Maquiling, 2025). Nötron zayıflatması iki aşamalıdır:

1. **Yavaşlatma (Moderasyon):** Hızlı nötronlar, düşük atom numaralı hafif elementlerle elastik çarpışmalar yaparak enerjilerini kaybeder ve yavaş nötronlara dönüşür. Jeopolimerin yapısındaki kimyasal olarak bağlı su ve özel olarak eklenen bor bileşikler bu aşamada kritik rol oynar (Plando, Supnad, Maquiling, 2025).
2. **Yutulma (Absorpsiyon):** Yavaşlamış nötronlar, bor veya lityum gibi elementler tarafından yakalanır ve zararsız alfa parçacıkları gibi başka parçacıklara dönüşür (Al-Buriahi, Alomayrah, Alsaari, Tehçi, Çalışkan, 2025).

Jeopolimer matrisi, hem yüksek-Z hem de hafif elementleri aynı homojen yapı içinde barındırarak hem gama ışınlarına hem de nötronlara karşı ikili koruma sağlayan kompozit malzemelerin geliştirilmesine olanak tanır (Al-Buriahi, Alomayrah, Alsaari, Tehçi, Çalışkan, 2025).

7.3.2.Ağır Metal ve Barit Katkılı Jeopolimer Kompozitler

Jeopolimer matrisi, radyasyon zırhlama verimliliğini artırmak için çeşitli ağır agrega ve katkılarla güçlendirilebilir (Echeweozo, Alomairy, Alsaari, Al-Buriahi, 2024).

- **Barit (BaSO_4) Katkılı Kompozitler:** Barit, yüksek yoğunluğu (4.5 g/cm^3) ve yüksek atom numaralı baryum elementi içermesi nedeniyle doğal bir radyasyon kalkanıdır. Barit agregası ile üretilen jeopolimer betonlar, yüksek yoğunluğa ve mükemmel gama ışını zayıflatma özelliklerine sahip olur. Aynı koruma seviyesi için gereken duvar kalınlığını önemli ölçüde azaltabilir (Shi ve diğerleri, 2024).
- **Manyetit (Fe_3O_4) ve Hematit (Fe_2O_3) Katkılı Kompozitler:** Bu demir cevherleri, yüksek yoğunlukları ve demir içerikleri sayesinde

etkili ve ekonomik bir zırh malzemesi sunar. Manyetit katkılı jeopolimerler, barit kadar yüksek olmasa da iyi bir gama zayıflatma kapasitesi gösterir ve daha yaygın bulunurlar (Jozwiak-Niedzwiedzka ve diğerleri, 2025).

- **Kurşun Oksit (PbO) ve Kurşun Tozu Katkılı Kompozitler:** Kurşun, geleneksel olarak en etkili gama kalkanıdır. Kurşun oksit veya metalik kurşun tozu, jeopolimer matrisine entegre edilerek son derece yüksek yoğunluklu ve etkili kompozitler elde edilebilir. Ancak, kurşunun toksisitesi ve işlenme zorlukları pratik uygulamalarda bir sınırlama oluşturabilir (Jozwiak-Niedzwiedzka ve diğerleri, 2025).
- **Bor Katkıları:** Bor bileşikleri, jeopolimer karışımına eklenerek kompozitin nötron yutma kapasitesi büyük ölçüde artırılır. Bor, termal nötronları yakalama tesir kesiti çok yüksek olan bir elementtir (Echeweezo, Alomairy, Alsaiari, Al-Buriahi, 2024).

7.3.3. Nükleer Tesislerde Atık Depolama ve Koruma Sistemleri

Jeopolimerlerin radyasyon direnci ve kimyasal stabilitesi, onları nükleer atık yönetimi için ideal bir malzeme haline getirir (Van Jaarsveld, Van Deventer, Lorenzen, 1997).

- **Radyoaktif Atık İmmobilizasyonu:** Jeopolimerler, sıvı veya katı radyoaktif atıkları kendi yoğun ve amorf ağ yapıları içinde hapsederek sızıntıyı önleyebilir. Ağır metallerde olduğu gibi, radyoaktif iyonlar da jeopolimer matrisi içinde kimyasal olarak bağlanabilir veya fiziksel olarak hapsedilebilir. Bu sıkıştırma ve stabilize etme işlemi, atıkların güvenli bir şekilde depolanması veya nihai bertarafı için kritik öneme sahiptir (Echeweezo ve diğerleri, 2024).
- **Yapısal Kalkanlama Elemanları:** Nükleer reaktörlerin, atık depolama havuzlarının ve işleme tesislerinin duvar, zemin ve kaplamalarında barit veya manyetit katkılı yüksek performanslı jeopolimer betonlar kullanılabilir. Bu betonlar, çalışanları ve çevreyi

radyasyondan korunurken, aynı zamanda yapısal bir işlev de görür (Van Jaarsveld, Van Deventer, Lorenzen, 1997).

7.3.4. Medikal ve Endüstriyel Radyasyon Alanlarında Kullanım

Jeopolimer malzemeler, yüksek yoğunluklu yapıları ve ağır metal oksitlerle modifiye edilebilir bileşimleri sayesinde iyonlaştırıcı radyasyona karşı etkili bir kalkanlama kapasitesi sunar. Geleneksel kurşun esaslı koruyucu sistemlere çevre dostu ve uzun ömürlü bir alternatif oluşturan bu malzemeler, hem tıbbi görüntüleme ünitelerinde hem de endüstriyel radyasyon kaynaklarının bulunduğu tesislerde güvenli çalışma koşullarının sağlanmasına önemli katkı sağlar (Al-Buriah, Alzahrani, Yılmaz, Çalışkan, Olarino, 2025; Echeweozo ve diğerleri, 2024).

- **Tıbbi Tesisler:** Radyoloji bölümlerinde, X-ışını odalarında, BT (Bilgisayarlı Tomografi) tarayıcılarında ve radyoterapi ünitelerinde, kurşun levhalara alternatif olarak veya onlarla birlikte jeopolimer esaslı paneller ve prefabrik bloklar kullanılabilir. Bu malzemeler, kurşuna kıyasla daha çevre dostu, daha dayanıklı ve daha estetik bir çözüm sunar (Al-Buriah, Alzahrani, Yılmaz, Çalışkan, Olarino, 2025).
- **Endüstriyel Uygulamalar:** Radyografik muayene, gıda ışınlama tesisleri ve parçacık hızlandırıcılarda da radyasyon kalkanlaması gereklidir. Jeopolimer kaplamalar veya bloklar, bu tesislerde esnek ve etkili bir koruma sağlayabilir (Echeweozo ve diğerleri, 2024).

7.3.5. Radyasyon Dayanımı Mekanik Özellik İlişkisi

Bir kalkanlama malzemesinden sadece radyasyonu zayıflatması değil, aynı zamanda yapısal bütünlüğünü uzun süreler boyunca koruması beklenir (Echeweozo, Alomair, Alsaiari, Al-Buriah, 2024).

- **Radyasyonun Malzeme Üzerindeki Etkisi:** Yüksek dozlarda radyasyon, malzeme içinde atom yerinden oynamalarına ve mikroyapısal hasara neden olabilir. Bu, teorik olarak mekanik özelliklerde bir bozulmaya yol açabilir (Echeweozo ve diğerleri, 2024).

- **Jeopolimerlerin Radyasyon Direnci:** Yapılan araştırmalar, jeopolimerlerin amorf yapısının, kristal yapı malzemelere kıyasla radyasyon hasarına karşı daha dayanıklı olabileceğini göstermektedir. Radyasyon kaynaklı bozulma, jeopolimerlerde önemsiz düzeyde kalabilir. Ağır agrega katkıları, yoğunluğu ve zırlama yeteneğini artırırken, jeopolimer matrisin kendisi bu agrega tanelerini bir arada tutarak yapısal stabiliteyi sürdürür (Al-Buriahı, Alzahrani, Yılmaz, Çalışkan, Olarinoe, 2025).
- **Optimizasyon:** Malzeme formülasyonu, radyasyon zırlama verimliliği ile mekanik dayanım ve işlenebilirlik arasında bir denge gerektirir. Çok yüksek oranda ağır agrega kullanımı işlenebilirliği zorlaştırabilir veya büzülme çatlaklarına yol açabilir. Bu nedenle, agrega gradasyonu, aktivatör oranı ve kür rejimi, hem üstün bir kalkanlama performansı hem de uzun vadeli yapısal bütünlük sağlayacak şekilde optimize edilmelidir (Echeweozo, Alomairy, Alsaıari, Al-Buriahı, 2024).

Jeopolimerler, geleneksel malzemelerin ötesine geçen, yüksek performanslı, çok işlevli ve sürdürülebilir radyasyon kalkanlama çözümlerinin kapısını aralamaktadır. Hem nükleer enerji hem de tıp ve endüstri alanlarında, daha güvenli ve uzun ömürlü koruma sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanıyan bu malzemeler, geleceğin radyasyon güvenliği stratejilerinde kilit bir rol oynayacak potansiyele sahiptir (Echeweozo, Alomairy, Alsaıari, Al-Buriahı, 2024).

7.4. Enerji Depolama ve Elektriksel Uygulamalar

Jeopolimerler, geleneksel yapı malzemesi kimliklerinin çok ötesine geçerek, gözenekli yapıları ve ayarlanabilir kimyasal kompozisyonları sayesinde enerji depolama ve dönüşümü alanında yenilikçi bir platform sunmaktadır. Bu malzemeler, iyonik iletkenlik, yüksek termal kararlılık ve düşük maliyet gibi özellikleri ile geleceğin enerji teknolojilerinde rol oynama potansiyeline sahiptir (Rahjoo, Goracci, Martauz, Rojas, Dolado, 2022).

7.4.1.Elektriksel İletkenliğin Arttırılması ve İyonik Taşıma Mekanizmaları

Saf jeopolimerler, elektronik anlamda yalıtkandır, ancak iyonik olarak iletkenidir. Bu iletkenlik, alkali iyonların (Na^+ veya K^+) gözenekli amorf ağ içindeki hareketliliğine dayanır.

- **İyonik İletkenlik Mekanizması:** Jeopolimer matrisi, sentez sırasında kullanılan alkali aktivatörlerden (NaOH , KOH) kaynaklanan sodyum veya potasyum iyonlarını içerir. Bu iyonlar, yapıdaki negatif yüklü alüminat ($[\text{AlO}_4]^{5-}$) tetrahedralarını dengelemek için serbestçe hareket edebilen hareketli katyonlar olarak davranır. Bu iyonların, jeopolimerin gözenekli yapısı ve kanalları boyunca bir elektrik alanı etkisi altında hareket etmesi, malzemeye iyonik iletkenlik kazandırır. Potasyum esaslı jeopolimerler, genellikle daha büyük kanal boyutları oluşturduğu için sodyum esaslı olanlara kıyasla daha yüksek iyonik iletkenlik sergileyebilir (Cuia, Zhenga, Hana, Sua, Zhoub, 2008).
- **İletkenliğin Arttırılması:** İletkenliği optimize etmek için çeşitli stratejiler mevcuttur:
 - **Su İçeriğinin Kontrolü:** Yapıda bulunan su, iyonların taşınmasına yardımcı olan bir plastikleştirici ve iletim ortamı görevi görür. Kontrollü nem koşulları, iyonik iletkenliği önemli ölçüde artırabilir (Agustini, Triwiyono, Sulistyo, Suyitno, 2020).
 - **Karbon Esaslı İletken Dolgular:** Grafen, karbon nanotüp (CNT) veya karbon siyahı gibi malzemelerin eklenmesi, jeopolimer matrisi içinde bir elektronik iletken ağ oluşturur. Bu, malzemeye hem iyonik hem de elektronik iletkenlik kazandırarak süperkapasitör ve pil elektrotu uygulamaları için kritik bir özelliktir (J. Han ve diğerleri, 2023).
 - **İletken Polimerler:** Polianilin (PANI) veya Polipirrol (PPy) gibi iletken polimerlerle hibrit kompozitler oluşturulabilir. Bu polimerler, kendi elektronik iletkenliklerini getirirken, jeopolimer matris de mekanik destek ve termal stabilite sağlar (J. Han ve diğerleri, 2023).

7.4.2. Jeopolimer Tabanlı Katı Elektrolitler

Geleneksel lityum iyon pillerde kullanılan sıvı organik elektrolitler yanıcı ve sızıntı riski taşır. Jeopolimerler, bu sorunlara potansiyel bir çözüm olarak katı hal elektroliti olarak araştırılmaktadır (J. Han ve diğerleri, 2023; Ran, Wang, Zhang, 2024).

- **Avantajlar:** Jeopolimer bazlı katı elektrolitler yanıcı değildir, sızıntı yapmaz, yüksek termal ve kimyasal kararlılığa sahiptir ve düşük maliyetlidir. Amorf yapıları, lityum veya sodyum iyonlarının difüzyonu için uygun kanallar sağlayabilir (Ran, Wang, Zhang, 2024).
- **Sentez ve Uyumluluk:** Bu uygulama için, jeopolimerler genellikle lityum veya sodyum silikat çözeltileri kullanılarak sentezlenir, böylece taşınabilir Li^+ veya Na^+ iyonları matrisin bir parçası haline gelir. Ana zorluk, iyonik iletkenliği sıvı elektrolit seviyelerine çıkarmak ve elektrolit ile elektrotlar arasında düşük dirençli, stabil bir arayüzey oluşturmaktır (J. Han ve diğerleri, 2023; Ran, Wang, Zhang, 2024).

7.4.3. Süperkapasitör ve Pil Elektrotlarında Kullanım

Jeopolimerlerin gözenekli yapısı ve ayarlanabilir kimyası, onları enerji depolama cihazları için çekici bir elektrot malzemesi yapar (Jin, Zhang, Wu, Sha, 2022).

- **Süperkapasitör Elektrotları:** Süperkapasitörler, elektrot elektrolit arayüzeyinde iyonların fiziksel olarak toplanması veya yüzeyye yakın hızlı redoks reaksiyonları yoluyla enerji depolar (Raj ve arkadaşları, 2023). Köpük jeopolimerler gibi yüksek spesifik yüzey alanına sahip jeopolimerler veya iletken karbon malzemelerle kompozitleri, elektrot malzemesi olarak kullanılabilir. Jeopolimer matris, iletken dolguya mekanik destek sağlarken, kendi gözenekli yapısı da iyon depolama alanı oluşturur (Jin, Zhang, Wu, Sha, 2022).
- **Pil Elektrotları:** Jeopolimerler, lityum kükürt (Li-S) piller gibi sistemlerde geleneksel organik bağlayıcılara (PVDF) alternatif olarak kullanılabilir. Polisülfürlerin çözünmesini engelleyebilir ve

yüksek kükürt yüklemesine izin veren kararlı bir yapı sunabilir. Ayrıca, demir fosfat veya lityum mangan oksit gibi katot malzemeleri için inorganik bir bağlayıcı ve iletken katkı bir çerçeve olarak işlev görebilirler (Raj ve arkadaşları, 2023).

7.4.4. Termoelektrik ve Piezoelektrik Özellikler

Jeopolimerler, atık ısının veya mekanik titreşimlerin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi gibi fonksiyonlar için de araştırılmaktadır (Barzegar, Goracci, Martauz, Dolado, 2024; Lamuta, Candamano, Crea, Pagnotta, 2016).

- **Termoelektrik Etki:** Bir malzemenin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkından elektrik voltajı üretme yeteneğidir. Jeopolimerlerin termoelektrik verimliliği başlangıçta düşüktür. Ancak, yarı iletken metal oksit nanopartiküller (SnO_2 , ZnO) veya iletken polimerlerle kompozitler oluşturularak bu özellik iyileştirilebilir. Bu tür kompozitler, endüstriyel bacalar veya yüksek sıcaklıktaki yapılar gibi ortamlarda atık ısı geri kazanımı için kullanılabilir (Barzegar, Goracci, Martauz, Dolado, 2024).
- **Piezoelektrik Etki:** Mekanik basıncın elektrik yüküne dönüşmesidir. Saf jeopolimerler piezoelektrik değildir. Ancak, baryum titanat (BaTiO_3) veya kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi piezoelektrik seramik partiküllerle güçlendirilmiş kompozitler, basınç altında bir elektrik tepkisi oluşturabilir. Bu akıllı jeopolimer kompozitler, yapısal sağlık izleme (SHM) sistemlerinde, bir yapıya entegre edilerek o yapıdaki gerilmeleri veya çatlak oluşumunu tespit eden sensörler olarak kullanılabilir (Lamuta, Candamano, Crea, Pagnotta, 2016).

7.4.5. Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Sistemlerle Entegrasyon

Jeopolimerlerin enerji uygulamalarındaki rolü, doğrudan enerji depolamanın ötesinde, genel enerji verimliliğine de katkıda bulunur (Martínez, Miller, 2025).

- **Pasif Enerji Tasarrufu:** Jeopolimerlerin, özellikle köpük formlarının, mükemmel ısı yalıtım özellikleri, binaların ısıtma ve soğutma için gereken enerji ihtiyacını azaltır. Bu, enerji depolama ve yalıtımı aynı malzemede birleştiren çok işlevli yapı elemanlarının geliştirilmesine olanak tanır (Kriven ve diğerleri, 2025).
- **Yenilenebilir Enerji Altyapısı:** Jeopolimer beton, rüzgar türbini kuleleri veya güneş paneli destek yapıları gibi yenilenebilir enerji altyapılarında kullanılarak bu sistemlerin ömür boyu karbon ayak izini azaltabilir. Ayrıca, geliştirilmekte olan jeopolimer tabanlı süperkapasitör veya pil bileşenleri, rüzgar ve güneş enerjisinin aralıklı doğasını dengelemek için kullanılan enerji depolama sistemlerinin (ESS) bir parçası olabilir (Martínez, Miller, 2025).

Jeopolimerler, enerji depolama ve elektriksel uygulamalar alanında henüz başlangıç aşamasında olmasına rağmen, sunduğu benzersiz özellik kombinasyonu ile son derece umut vericidir. Bu malzemeler, gelecekte daha güvenli piller, dayanıklı süperkapasitörler, kendi kendini izleyen yapılar ve enerji verimli binaların geliştirilmesinde kilit bir rol oynayabilir, böylece sürdürülebilir bir enerji ekosistemine geçişe katkıda bulunabilir (Kriven ve diğerleri, 2025).

7.5.Uzay ve Havacılıkta Kullanım Potansiyeli

Uzay ve havacılık sektörü, malzemelerden beklenen performans kriterleri açısından en zorlu alanlardan biridir. Jeopolimerler, hafiflik, üstün termal kararlılık, yüksek mekanik mukavemet ve aşırı çevre koşullarına dayanım gibi bir dizi kritik özelliği bir arada sunarak, bu sektörde devrim yaratma potansiyeli taşımaktadır (Mendoza-Cachú, ve diğerleri, 2024). Dünya dışı inşaat için ise jeopolimer teknolojisi, geleceğin uzay misyonlarının en önemli enabler'larından biri olarak görülmektedir (Giannopoulou, Roberta, Sakkas, Petroud, Nicolaides, 2023).

7.5.1.Aşırı Ortam Koşullarında Mekanik ve Termal Performans

Uzay ve havacılık araçları, Dünya atmosferi içinde ve ötesinde inanılmaz streslere maruz kalır.

- **Termal Karmaşa ve Termal Şok:** Hipersonik araçlar, atmosfere giriş sırasında 1500°C'nin üzerinde sıcaklıklara maruz kalır. Roket egzoz nozulları ve fırlatma rampaları da aşırı ısınmaya maruz kalır. Jeopolimerler, 1000-1200°C sıcaklıklara kadar yapısal bütünlüklerini koruyabilirler. Organik kompozitlerin aksine erimez veya alev almazlar. Ayrıca, termal şoka karşı seramiklere kıyasla daha iyi bir direnç gösterebilirler çünkü amorf yapıları, termal genişmeden kaynaklanan gerilmeleri daha iyi dağıtabilir (Liu, Hu, Du, Nematollahi, Shi, 2024).
- **Mekanik Yükler ve Titreşim:** Fırlatma sırasındaki şiddetli titreşimler, aerodinamik yükler ve yapısal stresler, malzemelerin yorulma ömrünü ciddi şekilde zorlar. Yüksek dayanımlı jeopolimer kompozitler, bu dinamik yüklere karşı yüksek bir tokluk ve hasar toleransı sergiler. Karbon fiber takviyeli jeopolimerler, geleneksel epoksi matrisli kompozitlere kıyasla çok daha yüksek sıcaklıklarda çalışabildikleri için, hipersonik araçların öncü kenarları veya sürtünmeden ısınan yüzeyleri gibi sıcak yapılar için ideal bir adaydır (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Korniejenko, 2023).

7.5.2.Mikrometeorit ve Radyasyon Etkilerine Karşı Direnç

Alçak Dünya yörüngesinin (LEO) ötesindeki uzay ortamı, hem yüksek hızdaki partikül çarpmaları hem de yoğun radyasyon akısı nedeniyle malzemelerin dayanıklılığını zorlayan son derece agresif koşullar içerir. Bu nedenle yapısal bileşenlerde kullanılacak malzemelerin mikrometeorit darbelerine karşı enerji sönümleyebilmesi ve aynı zamanda kozmik radyasyona karşı etkili bir kalkanlama sağlayabilmesi kritik önem taşır (Lee, Riessen, 2022; Echeweezo, Alomairy, Alsaiani, Al-Buriahi, 2024).

- **Mikrometeorit ve Enkaz Çarpması:** Uzayda saniyede kilometrelerce hızla hareket eden küçük parçacıklar, uzay aracı yapıları için önemli bir risk oluşturur. Jeopolimer kompozitler, özellikle seramik plakalarla güçlendirilmiş kompozit zırhlar, bu yüksek enerjili çarpışmalar sırasında enerjiyi dağıtmak ve parçacığı parçalamak için etkili bir koruma sağlayabilir. Malzemenin kırılma

tokluğu ve elyaf takviyesi, çarpma sonrası delinmenin yayılmasını sınırlamada kritik öneme sahiptir (Lee, Riessen, 2022).

- **Radyasyon Zırhlama:** Uzay, yüksek enerjili kozmik radyasyon ve güneş parçacıkları ile doludur. Jeopolimer matrisine barit (BaSO_4) veya tungsten gibi yüksek yoğunluklu, yüksek atom numaralı agrega ve katkıları eklenerek, etkili bir gama ve X-ışını kalkanı oluşturulabilir. Ayrıca, lityum veya bor bileşiklerini içeren jeopolimerler, nötron radyasyonuna karşı da koruma sağlayabilir. Bu, uzay aracı kabinlerini veya hassas elektronikleri korumak için yapısal ve kalkanlama işlevlerini birleştiren çok işlevli malzemelerin geliştirilmesine olanak tanır (Echeweozo, Alomairy, Alsaiani, Al-Buriah, 2024; Al-Buriah, Yılmaz ve diğerleri, 2025).

7.5.3. Hafif ve Yüksek Dayanımlı Jeopolimer Kompozitler

Uzay mühendisliğinde hafiflik en önemli tasarım parametrelerinden biridir, çünkü fırlatma maliyetleri doğrudan kütle ile ilişkilidir (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Kornijenko, 2023).

- **Hafiflik-Mukavemet Dengesi:** Karbon fiber, bazalt fiber veya son teknoloji seramik elyaflarla takviye edilmiş jeopolimer kompozitler, olağanüstü bir mukavemet ağırlık oranı ve sertlik ağırlık oranı sergiler. Bu kompozitler, uçak kanatları, gövde panelleri, roket yük paylaşımları ve uydu yapıları gibi birincil yapısal elemanlar için uygun adaylardır (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Kornijenko, 2023).
- **Köpük Jeopolimer Çekirdekli Sandviç Paneller:** Uzay aracı yapılarında yaygın olarak kullanılan sandviç kompozitler için, jeopolimer köpükler hafif ve yangına dayanıklı bir çekirdek malzeme olarak hizmet edebilir. Bu köpükler, alüminyum honi petek yapıya kıyasla daha iyi bir yangın direnci ve ısı yalıtımı sunarken, yapısal rijitliği korurlar (Ružek, Dostayeva, Walter, Grab, Kornijenko, 2023).

7.5.4. Ay ve Mars Regolitinden Jeopolimer Üretimi

İnsanlığın uzayda kalıcı olarak yerleşmesinin önündeki en büyük engellerden biri, inşaat malzemelerinin Dünya'dan getirilmesinin inanılmaz maliyetidir. Jeopolimer teknolojisi, bu soruna radikal bir çözüm sunar (Zheng, Zhao, Sun, Dong, 2024).

- **In-situ Kaynak Kullanımı (ISRU):** Bu konsept, hedef gök cismindeki yerel kaynakları kullanmayı ifade eder. Ay ve Mars yüzeyini kaplayan regolit, jeopolimer sentezi için gerekli olan silisyum, alüminyum ve diğer metal oksitleri bol miktarda içerir (Yan, Kawasaki, 2025).
- **Süreç:** Toplanan regolit, bir öğütücüde ince toz haline getirilir. Daha sonra, Dünya'dan getirilecek nispeten hafif bir kargo olan alkali aktivatörler ile karıştırılarak bir jeopolimer hamuru oluşturulur. Bu hamur, 3D yazıcılar veya kalıplar kullanılarak, astronot barınakları, iniş pistleri, yollar ve depolama yapıları gibi yapısal elemanlara dönüştürülebilir (Chen, Wang, Li, Zhou, 2024).
- **Avantajlar:** Bu yaklaşım, Dünya'dan ağır yapı malzemeleri taşıma ihtiyacını büyük ölçüde ortadan kaldırarak misyon maliyetlerini ve karmaşıklığını önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, jeopolimer yapılar, Ay'daki aşırı sıcaklık dalgalanmalarına, mikrometeorit çarpmalarına ve kozmik radyasyona karşı doğal bir koruma sağlayabilir (Yan, Kawasaki, 2025).

7.5.5. Uydu ve Roket Bileşenlerinde Kullanım Senaryoları

Jeopolimer esaslı malzemeler, uzay aracının çeşitli alt sistemlerinde rol oynayabilir:

- **Uydu Gövdeleri ve Yapıları:** Hafif ve rijit jeopolimer kompozitler, uyduların ana gövdesi ve panel yapıları için kullanılabilir. Radyasyon zırhlama özelliği, hassas elektronik bileşenleri korumak için ek bir işlev sağlar (Mendoza-Cachú, ve diğerleri, 2024).
- **Roket Motoru Bileşenleri:** Roket motorlarının egzoz nozullarında veya fırlatma rampası yalıtımında, yüksek sıcaklığa dayanıklı jeopolimer kaplamalar veya kompozitler kullanılabilir (Mendoza-Cachú, López-Martínez, Franco-Urquiza, 2024).

- **Isı Kalkanları ve Termal Koruma Sistemleri (TPS):** Jeopolimerlerin yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük termal iletkenliği, onları atmosfere giriş sırasında uzay aracını koruyan ısı kalkanlarının bir bileşeni olarak potansiyel olarak uygun kılar. Ablative jeopolimer kompozitler geliştirilebilir (Tserpes, Sioutis, 2025).
- **İç Donanım ve Yangın Bariyerleri:** Uzay istasyonları veya uzay araçlarının içinde, yanmaz jeopolimer paneller, yangın bariyeri olarak veya ekipman dolapları ve yapısal bölmeler için kullanılabilir (Mendoza-Cachú, ve diğerleri, 2024).

Jeopolimerler, uzay ve havacılık mühendisliğinin sınırlarını zorlayan bir malzeme sınıfını temsil etmektedir. Yapısal, termal ve kalkanlama işlevlerini tek bir malzemede birleştirebilmeleri, onları hem Dünya'daki gelişmiş hava uzay araçları hem de geleceğin uzay keşif ve kolonizasyon misyonları için vazgeçilmez bir teknoloji haline getirme potansiyeline sahiptir. Özellikle, Ay ve Mars'ta in-situ kaynak kullanımı yoluyla yapı malzemesi üretme yeteneği, insanlığın uzaydaki varlığını kalıcı kılmak için bir düzen değiştirici olarak görülmektedir (Mendoza-Cachú, López-Martínez, Franco-Urquiza, 2024).

7.6.Sanatsal ve Kültürel Miras Uygulamaları

Kültürel mirasın korunması, orijinal malzemelere mümkün olduğunca sadık kalırken, aynı zamanda dayanıklılık ve uyumluluk sağlayan gelişmiş malzemeler gerektirir. Jeopolimerler, kimyasal ve mineralojik benzerlikleri, üstün dayanıklılıkları ve ayarlanabilir özellikleri ile geleneksel onarım malzemelerine kıyasla son derece üstün ve sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır (Fugazzotto, Mazzoleni, Stroschio, Barone, 2024).

7.6.1.Tarihi Yapıların Restorasyonunda Jeopolimer Harçlar

Tarihi yapılarda kullanılan geleneksel kireç harçları zamanla bozunmaya uğrar. Jeopolimer harçlar, bu yapıların restorasyonunda bir dizi kritik avantaj sağlar:

- **Uyumluluk ve Tersinirlik İlkesi:** İdeal bir onarım malzemesi, orijinal malzemeden daha sert veya geçirimsiz olmamalıdır.

Jeopolimerlerin mekanik özellikleri ve buhar geçirgenliği, geleneksel kireç harçlarına ve hatta bazı doğal taşlara çok yakın bir şekilde ayarlanabilir. Bu, yapısal gerilmelerin orijinal, genellikle daha zayıf olan malzemede yoğunlaşmasını önler (Krishna, Kumar, VishnuPriyan, 2025). Ayrıca, jeopolimerler asidik çözeltilerle çözünebilir, bu da teorik olarak gelecekteki bir müdahalede tersinir bir uygulama olanağı sunar (El-Kempshawy, El-Mahalawy, Ewais, Kamel, Mahmoud, 2024).

- **Düşük Büzülme ve Yüksek Yapışma:** Jeopolimerler, Portland çimentosu esaslı harçlara kıyasla çok daha düşük kuruma büzülmesi sergiler. Bu, onarım bölgesinde çatlak oluşumunu önleyerek uzun vadeli dayanıklılığı garanti eder (Fugazzotto, Mazzoleni, Stroschio, Barone, 2024). Aynı zamanda, tarihi taş veya tuğla substratına mükemmel bir yapışma gösterirler, bu da restorasyonun mekanik stabilitesini artırır (El-Kempshawy, El-Mahalawy, Ewais, Kamel, Mahmoud, 2024).
- **Hızlı Mukavemet Kazanımı:** Oda sıcaklığında kürlenene jeopolimer harçlar, kireç harçlarına kıyasla çok daha hızlı bir şekilde mukavemet kazanır. Bu, restorasyon çalışmalarında kalıpların daha erken sökülmesini ve yapı iskelesinin daha hızlı kaldırılmasını sağlayarak proje sürelerini kısaltır (P. Zhanga, Y. Zhenga, Wangb, Zhanga, 2018).

7.6.2. Antik Seramik ve Heykel Replikasyonlarında Kullanım

Jeopolimerler, antik seramik ve heykelciliğin kopyalarının veya kayıp parçaların rekonstrüksiyonunun yapılmasında eşsiz bir olanak sunar.

- **Arkeometrik Uyum:** Antik Roma betonu gibi birçok tarihi malzeme aslında doğal puzolanik malzemelerden oluşan ilkel bir jeopolimerik sistemdir. Bu nedenle, jeopolimerler bu antik malzemelerin kimyasal ve mineralojik yapısını taklit etmede son derece başarılıdır. Renk, doku ve mikro yapı bakımından orijinal eserle neredeyse ayırt edilemeyecek replikalar üretmek mümkündür (Ricciotti ve diğerleri, 2022). Bu replikalar, orijinal eserlerin sergilenmesi yerine geçerek aşınma ve yıpranmayı azaltabilir veya

eksik parçaların estetik olarak tamamlanmasını sağlayabilir (RovellaUlian, Moro, Valdrè, 2022).

7.6.3.Estetik ve Renk Stabilitesi Özellikleri

Kültürel miras uygulamalarında estetik görünüm ve renk kararlılığı son derece önemlidir.

- **Renk ve Doku Kontrolü:** Jeopolimer matrisinin kendisi genellikle açık renklidir, bu da renk eklenmesi için nötr bir tuval sağlar. Çeşitli doğal pigmentler, mineral tozları veya ince agregalar eklenerek, orijinal tarihi malzemenin rengi ve dokusu hassas bir şekilde eşleştirilebilir (Ghadban, Abdulrehman, 2024).
- **UV ve Zamanla Renk Kararlılığı:** Organik bağlayıcılar veya boyalar zamanla UV ışınlarından etkilenerek solabilir. Jeopolimerler inorganik bir yapıya sahip olduğundan ve kullanılan pigmentler genellikle mineral esaslı olduğundan, renkleri güneş ışığına ve zamana karşı son derece kararlıdır. Bu, restorasyonun orijinal görünümünü onlarca yıl boyunca koruyacağı anlamına gelir (Ouellet-Plamondon ve diğerleri, 2015).

7.6.4.Biyolojik Bozulmaya ve Çevresel Etkilere Karşı Dayanım

Açık hava kültür varlıkları, biyolojik ve çevresel bozulmaya karşı savunmasızdır.

- **Biyolojik Direnç:** Jeopolimerlerin yüksek alkali doğası başlangıçta alg, liken, yosun ve mantarların büyümesini engeller. Yoğun ve gözeneksiz yapıları, biyolojik organizmaların tutunması ve besin bulması için elverişsiz bir yüzey oluşturur. Bu, tarihi yapıların yüzeylerinde biyolojik kolonizasyonun ve bunun neden olduğu biyolojik ayrışmanın azaltılmasına yardımcı olur (Catauro, Viola, D'Amore, 2023).
- **Asit Yağmuru ve Atmosferik Kirlilik:** Jeopolimerler, asitlere karşı Portland çimentosundan ve hatta kireçten çok daha dayanıklıdır. Asit yağmuru ve endüstriyel kirlilikten kaynaklanan kükürt dioksit (SO_2) gibi asidik gazların neden olduğu kimyasal bozulmaya karşı

yüksek bir direnç gösterirler. Bu, şehir merkezlerinde veya endüstriyel bölgelerdeki tarihi anıtlar için hayati önem taşıyan bir özelliktir (Catauro, Viola, D'Amore, 2023).

7.6.5. Geleneksel Malzemelerle Uyum ve Sürdürülebilirlik Yaklaşımı

Jeopolimer teknolojisi, modern bilimi geleneksel koruma ilkeleriyle birleştirir.

- **Fiziksel ve Kimyasal Uyum:** Yukarıda belirtildiği gibi, jeopolimerlerin mekanik ve fiziksel özellikleri, orijinal tarihi malzemelerle uyum sağlayacak şekilde tasarlanabilir. Bu, güçlendirme yerine uyumlu destek sağlayarak, anıtın orijinal davranışına ve malzeme bilimine saygı duyulmasını sağlar (El-Kempshawy, El-Mahalawy, Ewaisi, Kamel, 2024).
- **Sürdürülebilirlik ve Çevresel Uyum:** Tarihi bir yapıyı onarmak, onun çevresel ayak izini de düşünmeyi gerektirir. Jeopolimerler, endüstriyel yan ürünler kullanılarak üretilir, böylece doğal kaynak tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltır. Ayrıca, daha uzun ömürlü olmaları, daha az sıklıkta bakım ve yenileme ihtiyacı anlamına gelir, bu da yaşam döngüsü boyunca kaynak tüketimini ve atık üretimini azaltır. Bu, kültürel mirasın korunmasını daha geniş bir çevresel sürdürülebilirlik çerçevesine yerleştirir (Mishra, Nanda, Patro, Krishna, 2022).

KAYNAKÇA

- Alves, L., Leklou, N., de Barros, S., (2020). A comparative study on the effect of different activating solutions and formulations on the early stage geopolymerization process. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 322, 01039. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032201039>
- Abbas, R., Abdelzaher, M. A., Shehata, N., Tantawy, M. A., (2024). Production, characterization and performance of green geopolymer modified with industrial by-products. *Scientific Reports*, Vol. 14, 5104. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55494-8>
- Abdellatif, M., Hassanien, A. E., Mortagi, M., Hamouda, H., (2025). Geopolymer foam concrete: a review of pore characteristics, compressive strength and artificial intelligence in GFC strength simulations. *Discover Concrete and Cement*, Vol. 1, 4. <https://doi.org/10.1007/s44416-025-00003-x>
- Abousnina, R., Aljuaydi, F., Benabed, B., Almabrok, M. H., Vimonsatit, V., (2025). A State-of-the-Art Review on the Influence of Porosity on the Compressive Strength of Porous Concrete for Infrastructure Applications. *Buildings*, Vol. 15, 2311. <https://doi.org/10.3390/buildings15132311>
- Adak, D., Sarkar, M., & Mandal, S. (2014). Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, Volume 70, Pages 453-459. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.093>
- Adewuyi, Y. G., (2021). Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation. *ACS Omega*, Vol. 6, 15532–15542. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00662>
- Agustini, N. K. A., Triwiyono, A., Sulisty, D., Suyitno, (2020). Effects of water to solid ratio on thermal conductivity of fly ash-based geopolymer paste. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 426, 012010. doi:10.1088/1755-1315/426/1/012010
- Al-Buriah, M.S., Alomayrah, N., Alsaiani, N.S., Tehçi, T., Çalışkan, F., (2025). Effect of Si₃N₄ on metakaolin clay-based geopolymers: EDS, SEM, hardness, and gamma radiation shielding properties. *Construction*

- and Building Materials 492, 142857.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142857>
- Al-Buriah, M.S., Alzahrani, J.S., Yılmaz, E., Çalışkan, F., Olariño, I.O., (2025). Optimising the physical, strength, and radiation shielding parameters of metakaolin-based geopolymers by using boron carbide: Potential construction materials. Radiation Physics and Chemistry, Volume 235, 112882.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112882>
- Al-Buriah, M.S., Yılmaz, E., Alzahrani, J.S., Çalışkan, F., Alzahrani, H. S., Alshahrani, B., Alshamari, A., (2025). Effects of Bi₂O₃ and Y₂O₃ addition on metakaolin-based geopolymers: physical-microstructure properties and shielding performance against ionizing radiation. Ceramics International, In press, doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.11.393.
- Alahmari, T. S., Abdalla, T. A., Rihan, M. A. M., (2023). Review of Recent Developments Regarding the Durability Performance of Eco-Friendly Geopolymer Concrete. Buildings, Vol. 13, 3033.
<https://doi.org/10.3390/buildings13123033>
- Alanazi, H., (2022). Study of the Interfacial Transition Zone Characteristics of Geopolymer and Conventional Concretes. Gels, Vol. 8, 105.
<https://doi.org/10.3390/gels8020105>
- Alaneme, G. U., Olonade, K. A., Esenogho, E., Lawan, M. M., (2024). Proposed simplified methodological approach for designing geopolymer concrete mixtures. Scientific Reports, vol.14, 15191.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-66093-y>
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., Salem, H. A., (2016). Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. Construction and Building Materials Vol. 121, 694–703.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.062>
- Allahverdi, A., Vafaei, M., Maghsoodloord, H., (2017). Quality control and assessment of geopolymer cements based on reacted and free alkalis. Construction and Building Materials, Vol. 153, 274–283.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.073>

- Alnahhal, M.F., Kim, T., Hajimohammadi, A., (2021). Distinctive rheological and temporal viscoelastic behaviour of alkali-activated fly ash/slag pastes: A comparative study with cement paste. *Cement and Concrete Research* Vol.144, 106441. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106441>
- Alterary, S.S., Marei, N. H., (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University – Science* Vol.33, 101536. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101536>
- Alvarado, A., Baykara, H., Riofrio, A., Cornejo, M., Merchan-Merchan, W., (2024). Preparation, characterization, electrical conductivity, and life cycle assessment of carbon nanofibers-reinforced Ecuadorian natural zeolite-based geopolymer composites. *Heliyon*, Vol.10, e28079. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28079>
- Alves, Z., Labrincha, J. A., Novais, R. M., (2023). Lightweight Geopolymer Composites: The Impact of the Aggregate. *Mater. Proc.*, Vol. 13, 30. <https://doi.org/10.3390/materproc2023013030>
- Amran, M., Al-Fakih, A., Chu, S. H., Fediuk, R., Haruna, S., Azevedo, A., Vatin, N., (2021). Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 15, e00661. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00661>
- Anudeep, P., Reddy, M. A. K., Khed, V. C., Adamu, M., Varalakshmi, M., Ibrahim, Y. E., Shabbir Ahmed, O., (2024). Effect of superplasticizer in geopolymer and alkali-activated cement mortar/concrete: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 63, 20230173. <https://doi.org/10.1515/rams-2023-0173>
- Artyk, Z., Kuan, Y., Zhang, D., Shon, C., Ogwumeh, C. M., Kim, J., (2024). Development of Engineered Geopolymer Composites Containing Low-Activity Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag with Hybrid Fibers. *Construction and Building Materials*, Vol. 422, 135760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135760>
- Aschoff, J., Partschefeld, S., Schneider, J., Osburg, A., (2024). Effect of Microwaves on the Rapid Curing of Metakaolin- and Aluminum Orthophosphate-Based Geopolymers. *Materials*, Vol. 17, 463. <https://doi.org/10.3390/ma17020463>

- Ashfaq, M. H., Sharif, M. B., Irfan-ul-Hassan, M., Saha, U., Akmal, U., Mohamed, A., (2024). Up-scaling of fly ash-based geopolymer concrete to investigate the binary effect of locally available metakaolin with fly ash. *Heliyon*, Vol. 10, e2633. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26331>
- ASTM C125-23. (2023). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM International. <https://www.astm.org/c0125-23.html>
- ASTM C618-23. (2023). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International. <https://www.astm.org/c0618-23.html>
- Azimi, Z., Toufigh, V., (2023). Influence of Blast Furnace Slag on Pore Structure and Transport Characteristics in Low-Calcium Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete. *Sustainability*, Vol. 15(18), 13348. <https://doi.org/10.3390/su151813348>
- Aziz, Ikmal Hakem A.; Abdullah, M. M. A. B., Razak, R. A., Yahya, Z., Salleh, M. A. A. M., Chaiprapa, J., Rojviriya, C. Vitureanu, P. Sandu, A. V., Tahir, M. F., Abdullah. A., Jamaludin, L., (2023). Mechanical Performance, Microstructure, and Porosity Evolution of Fly Ash Geopolymer after Ten Years of Curing Age. *Materials*, Vol. 16, 1096. doi: 10.3390/ma16031096
- Badogiannis, E., Kakali, G., Dimopoulou, G., Chaniotakis, E., Tsivilis, S. (2005). Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins. *Cement and Concrete Composites*, Vol.27, 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.007>
- Bai, C., Zheng, K., Wang, B., Li, B., Sun, G., Li, X., Wang, X., Qiao, Y., Colombo, P., (2024). Facile construction of porous epoxy resin/geopolymer composites using redmud and slag by well-distributed dual-blending. *Int J Appl Ceram Technol.*, Vol. 21, 3967–3980. DOI: 10.1111/ijac.14833
- Bakharev, T. (2004). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, vol.35, 658-670. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>
- Balapanov, B., Montayev, S., Aygun, B., Uysal, M., (2024). Accelerated microwave curing of hybrid geopolymers with nano-silica for enhanced

- physico-mechanical properties. *J Sustain Const Mater Technol*, Vol. 9, 346–354. DOI: 10.47481/jscmt.1606833
- Barbosa, V. F. F., MacKenzie, K. J. D., Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, Vol.2, 309–317. [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6)
- Barbosa, V. F. F., MacKezie, K. J. D., (2003). Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Materials Research Bulletin* Vol. 38, 319-331. Doi:10.1016/S0025-5408(02)01022-X
- Barve, P., Bahrami, A., Shah, S., (2023). Geopolymer 3D printing: a comprehensive review on rheological and structural performance assessment, printing process parameters, and microstructure. *Front. Mater.*, Vol. 10, 1241869. doi: 10.3389/fmats.2023.1241869
- Barzegar, M., Goracci, G., Martauz, P., Dolado, J. S., (2024). Sustainable geopolymer concrete for thermoelectric energy harvesting. *Construction and Building Materials*, Vol. 411, 134398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134398>
- Bashar, I. I., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Islam, A., (2014). The Effect of Variation of Molarity of Alkali Activator and Fine Aggregate Content on the Compressive Strength of the Fly Ash: Palm Oil Fuel Ash Based Geopolymer Mortar. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014, 13. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/245473>
- Bayrak, H., Gümüş M., (2024). Investigation of The Frecture Behavior of Geopolimer Concrete Reinforced With Recycled Steel and Glass Fibers. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 27(2). <https://doi.org/10.17780/ksujes.1375200>
- Bazan, P., Figiela, B., Kozub, B., Łach , M., Mróz, K., Melnychuk, M., Korniejenko, K., (2024). Geopolymer Foam with Low Thermal Conductivity Based on Industrial Waste. *Materials*, Vol. 17, 6143. <https://doi.org/10.3390/ma17246143>
- Ben Haha, M., Le Saout, G., Winnefeld, F., Lothenbach, B. (2011). Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and

- microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. Cement and Concrete Research, vol.41, 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.016>
- Benavidez, E., Grasselli, C., Quaranta, N., (2003) Densification of ashes from a thermal power plant. Ceramics International, vol. 29, 61–68. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00090-1)
- Bernard, E., Rentsch, D., Kuhn, R., Habert, G., Lura, P., (2024). Earth stabilisation with MgO-based cement. Cement and Concrete Research, Vol. 186, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107655>
- Bhavani Siram, K. K., Sathyan, D., (2022). Geopolymer Aggregate Concrete: A review from fundamentals to developments. Earth and Environmental Science, Vol. 982, 012017. doi:10.1088/1755-1315/982/1/012017
- Bhirud, Y. L., Sangle, K. K., Vaidya, O. V., Patore, S. A., (2023). Influence of higher binder content on the splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete: An experimental investigation and proposed prediction equation. Construction and Building Materials, Vol. 398, 132478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132478>
- Buczkowska, K. E., Louda, P., Sharko, A., Sharko, O., Stepanchikov, D., Jancik, L., Los, P., Plawecka, K., Le, V. S., (2024). Maximizing Performance of Geopolymer Mortar: Optimizing Basalt and Carbon Fiber Content Composition. Journal of Natural Fibers, Vol. 21, NO. 1, 2293047. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2293047>
- Capasso, I., D’Angelo, G. , del Río Merino, M., Campanile, A., Caputo, D., Liguori, B., (2025). CDW-Based Geopolymers: Pro and Cons of Using Unselected Waste. Polymers, Vol.17, 570. <https://doi.org/10.3390/polym17050570>
- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Sánchez, S., Vesely, M., Garrido, P., Palma, S., (2021). Factors Affecting the Compressive Strength of Geopolymers: A Review. Minerals, Vol.11, 1317. <https://doi.org/10.3390/min11121317>
- Catauro, M., Viola, V., D’Amore, A., (2023). Mosses on Geopolymers: Preliminary Durability Study and Chemical Characterization of Metakaolin-Based Geopolymers Filled with Wood Ash. Polymers, Vol. 15, 1639. <https://doi.org/10.3390/polym15071639>

- Chass, G. A., Tian K. V., Bodo E., (2023). Aluminium catalysed oligomerisation in cement-forming silicate systems. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 25, 455–461, DOI: 10.1039/d2cp03918d
- Chaunsali, P., Ardeshirilajimi, A., Mondal, P., (2018). On the interaction of Class C fly ash with Portland cement - calcium sulfoaluminate cement binder. *Materials and Structures*, 51, 131. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1245-5>
- Cheah, C. B., Tan, L. E., Ramli, M., (2021). Recent advances in slag-based binder and chemical activators derived from industrial by-products – A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 272, 121657. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121657>
- Chelluri, S., Hossiney, N., Chandra, S., Bekoe, P., Tia, M., (2025). A Review of the Performance Properties of Geopolymer Pavement-Quality Concrete. *Constr. Mater*, Vol. 5, 49. <https://doi.org/10.3390/constrmater5030049>
- Chen, L., Wang, T., Li, F., Zhou, S., (2024). Preparation of Geopolymer for In-Situ Pavement Construction on the Moon Utilizing Minimal Additives and Human Urine in Lunar Regolith Simulant. *Front. Mater.*, Vol. 11, 1413432. DOI 10.3389/fmats.2024.1413432
- Chen, S., Razaqpur, A.G., Wang, T., (2023). Effects of a red mud mineralogical composition versus calcination on its pozzolanicity. *Construction and Building Materials* Vol. 404, 133238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133238>
- Chen, S., Ruan, S., Zeng, Q., Liu, Y., Zhang, M., Tian, Y., Yan, D., (2022). Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 328, 127064. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127064>
- Chen, Y., Miranda de Lima, L., Li, Z., Ma, B., Lothenbach B., Yin, S., Yu, Q., Ye, G., (2024). Synthesis, solubility and thermodynamic properties of N-A-S-H gels with various target Si/Al ratios. *Cement and Concrete Research* Vol. 180, 107484. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107484>
- Chiranjeevi, K., Abraham, M., Rath, B., Praveenkumar, T. R., (2023). Enhancing the properties of geopolymer concrete using nano-silica and

- microstructure assessment: a sustainable approach. *Scientific Reports*, Vol. 13:17302. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44491-y>
- Cong, P., Du, R., Gao, H., Chen, Z., (2024). Comparison and assessment of carbon dioxide emissions between alkali-activated materials and OPC cement concrete. *Journal of Traffic and Transport Tation Engineering (english edition)*, Vol. 11, 918 e938. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.07.011>
- Cui, Y., Ai, W., Tekle, B. H., Liu, M., Qu, S., Zhang, P., (2023). State of the art review on the production and bond behaviour of reinforced geopolymer concrete. *Low-carbon Materials and Green Construction*, Vol. 1, 25. <https://doi.org/10.1007/s44242-023-00027-1>
- Cuia, X.M., Zhenga, G. J., Hana, Y. C., Sua, F., Zhou, J., (2008). A study on electrical conductivity of chemosynthetic $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$ geopolymer materials. *Journal of Power Sources*, Vol. 184, 652–656. doi:10.1016/j.jpowsour.2008.03.021
- Dai, S., Wang, H., AnS., Yuan, L., (2022). Mechanical Properties and Microstructural Characterization of Metakaolin Geopolymers Based on Orthogonal Tests. *Materials*, Vol. 15, 2957. <https://doi.org/10.3390/ma15082957>
- Dandachy, M. E. E., Hassoun, L., El-Mir, A., Khatib, J. M., (2024). Effect of Elevated Temperatures on Compressive Strength, Ultrasonic Pulse Velocity, and Transfer Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Mortars. *Buildings*, Vol. 14, 2126. <https://doi.org/10.3390/buildings14072126>
- Dathe, F., Overmann, S., Koenig, A., Dehn, F., (2024). The Role of Water Content and Binder to Aggregate Ratio on the Performance of Metakaolin-Based Geopolymer Mortars. *Minerals*, Vol. 14, 823. <https://doi.org/10.3390/min14080823>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, 1633-1656, <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Publisher: Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France Editor: Joseph Davidovits, ISBN: 9782954453118 (5th ed.)

- Davidovits, J. (2020). Geopolymer Chemistry and Applications (5th ed.). Institut Géopolymère.
- Davidovits, J., (2011). Application of Ca-based geopolymer with blast furnace slag, a review. Conference: 2nd International Slag Valorisation Symposium At: Leuven, Belgium Volume: Proceedings, pp. 33-49. 18-20/04/201
- Davidovits, J., (2017). Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers. Journal of Ceramic Science and Technology, Vol. 8, 335–350. <https://www.ceramic-science.com/articles/vol8/335-350.pdf>
- Deb, P. S., Nath, P., Sarker, P. K., (2014). The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. Materials and Design, Vol. 62, 32–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.00>
- Dener, M., Karatas, M., Shi, J., Mohabbi M., (2025). Mechanical properties and microstructure of hybrid alkali-activated cement component. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 25, 45. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-01054-w>
- Dheyaaldin, M. H., Mosaberpanah, M. A., Alzebaree, R., (2022). The Effect of Nano-Silica and Nano-Alumina with Polypropylene Fiber on the Chemical Resistance of Alkali-Activated Mortar. Sustainability, Vol. 14, 16688. <https://doi.org/10.3390/su142416688>
- Djobo, J. N. Y., Stephan, D., (2021). Control of the setting reaction and strength development of slag-blended volcanic ash-based phosphate geopolymer with the addition of boric acid. Journal of the Australian Ceramic Society, Vol. 57, 1145–1154. <https://doi.org/10.1007/s41779-021-00610-4>
- Dong, T., Sun, T., Xu, F., Ouyang, G., Wang, H., Yang, F., Wang, Z., (2023). Effect of Solid Sodium Silicate on Workability, Hydration and Strength of Alkali-Activated GGBS/Fly Ash Paste. Coatings, Vol. 13, 696. <https://doi.org/10.3390/coatings13040696>
- Dong, Y., Gao, R., Li, Y., Wang, F., (2025). Microwave Curing of FA- and MK-Based Geopolymer Gels: Effects on Pore Structure, Mechanical Strength, and Heavy Metal Leachability. Gels, Vol 11, 507. <https://doi.org/10.3390/gels11070507>

- Drabczyk, A., Kudłacik-Kramarczyk, S., Korniejenko, K., Figiela, B., Furtos, G., (2023). Review of Geopolymer Nanocomposites: Novel Materials for Sustainable Development. *Materials*, Vol. 16, 3478. <https://doi.org/10.3390/ma16093478>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, Vol.42, 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Duxson, P., Lukey, G. C., Van Deventer, J. S. J. (2007). Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 °C. *Journal of Materials Science*, Vol. 42, 3044–3054. DOI 10.1007/s10853-006-0535-4
- Duxson, P., Mallicoat, S. W., Lukey, G. C., Kriven, W. M., Van Deventer, J. S. J. (2007). The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 29, 8–20. doi:10.1016/j.colsurfa.2006.05.044
- 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*, vol. 37, 1590–1597. doi:10.1016/j.cemconres.2007.08.018
- Du'zy, P., Choiniska, M., Hager, I., Amiri, O., Claverie, J., (2022). Mechanical Strength and Chloride Ions' Penetration of Alkali-Activated Concretes (AAC) with Blended Precursor. *Materials*, Vol. 15, 4475. <https://doi.org/10.3390/ma15134475>
- Echeweozo, E. O., Alomairy, S., Alsaiani, N. S., Al-Buriahi, M. S., (2024). Effect of lead oxide addition on gamma radiation shielding properties of newly developed geopolymers: theoretical and simulation studies. *Scientific Reports*, Vol. 14, 29968. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81186-4>
- Echeweozo, E. O., Alsaiani, N.S., Alomairy, S., Çalışkan, F., Kırkbınar, M., Al-Buriahi M. S., (2024). Synthesis Properties and Neutron Attenuation of New Geopolymers Containing Si, O, Na and Al: Role of Pb Addition. *Silicon* 16:6011–6020. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-03132-3>

- Efe, M., Öz, A., Bayrak, B., Kaplan, G., Aydın, A. C., (2024). Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ rate and natural zeolite content on basalt fiber reinforced eco-efficient slag-based geopolymer mortar synthesis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 24, 215. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-01021-5>
- Ekiz Barış, K., Tanaçan, L., (2022). Natural pozzolan-based green geopolymer foam for thermal insulation. *J Sustain Const Mater Technol*, Vol. 7, 128–144. DOI: 10.47481/jscmt.1142100
- Ekolu, S., Tchadjié, L., Naghizadeh, A., (2022). Alkali-silica reaction resistance versus susceptibility of MATEC Web of Conferences 361, 06003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236106003>
- El Fadili, H., Ait-Khouia, Y., Ouffa, N., Taha, Y., Moukannaa, S., Benzaazoua, M., (2025). Comprehensive review on alkaline dissolution of aluminosilicates and its role in the mechanisms and properties of geopolymers and alkali-activated materials. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 23, e05330. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05330>
- Ellis, B. D., McDowell, D. L., Zhou, M., (2014). Simulation of single fiber pullout response with account of fiber morphology. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 48, 42–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.01.003>
- El-Kempshawy, G. M., El-Mahalawy, M. S., Ewais, A. Y., Kamel, A. M. A., Mahmoud, H. M., (2024). Evaluating some geopolymer-based mortars for restoration purposes of damaged ancient Egyptian mural paintings. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, Vol. 9, 16. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00372-5>
- Ertürkmen, D., Ürünveren, H., Beycioglu, A., Ibadov, N., Aruntaş, H. Y., Garbacz, A., (2025). Bond Performance of GFRP Bars in Glass and Basalt Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete Under Hinged Beam Tests. *Materials*, Vol. 18, 498. <https://doi.org/10.3390/ma18030498>
- Esparham, A., Moradikhrou, A. B., Avanaki, M. J., (2020). Effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *J. Civil Eng. Mater.App.* Vol.4, 115-123. doi: 10.22034/jcema.2020.224071.1018

- Fahim, T. A., Emon, R. A. Kafi, A. A. , Nath, P. D., Debnath, A. K., Hasib, M. A., (2025). Recent advances in fiber-reinforced geopolymer composites: A systematic review of optimization strategies. NEXRES, Vol. 2, 100955. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100955>
- Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., Demirboğa, R., Shihata, A. S., (2023). Performance of Polypropylene Fiber Reinforced GGBFS-based Alkali Activated Composite under Elevated Temperatures. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 21, 523-535, doi:10.3151/jact.21.523
- Fatourehchi, D., Zarghami, E., (2020). Social sustainability assessment framework for managing sustainable construction in residential buildings. Journal of Building Engineering, Vol. 32, 101761. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101761>
- Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I., Palomo, A. (2007) .Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials, Journal of Materials Science, Vol. 42, Sayı 9, 2007, 3055-3065. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0584-8>
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. Cement and Concrete Research, Vol.35, 1984–1992. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.003>
- Fugazzotto, M., Mazzoleni, P., Strosio, A., Barone, G., (2024). Creating Mortars through the Alkaline Activation of Ceramic Waste from Construction: Case Studies on Their Applicability and Versatility in Conservation. Sustainability, Vol. 16, 1085. <https://doi.org/10.3390/su16031085>
- Gaddafi, A. K. F., (2025). Impact of ground granular blast slag proportioning in fly ash geopolymer mortars with eco-processed pozzolana and palm oil clinker sand. Discover Materials, Vol. 5, 57. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00231-9>
- Gao, X., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H., (2015). Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag–fly ash blends. Construction and Building Materials Vol. 80, 105–115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.065>

- García-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Macphée, D. E., (2011). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. Cement and Concrete Research, Vol.41, 9, 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>
- Ghadban, R. A. R., Abdulrehman, M. A., (2024). Effect Of Adding Red and Yellow Pigments to Geopolymer Concrete. Journal of Engineering and Sustainable Development, Vol. 28. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.2.6>
- Giannopoulou, I., Roberta, P. M., Sakkas, K. M., Petrou, M. F., Nicolaides, D., (2023). High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste. Journal of Building Engineering, Vol. 72, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106575>
- Gomes, H. I., Mayes, W. M., Rogerson, M., Stewart, D. I., Burke, I. T., (2016). Alkaline residues and the environment: a review of impacts, management practices and opportunities. Journal of Cleaner Production, Vol. 112, 3571 - 3582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.111>
- Gonçalves, D. K. C., Lana, S. L. B., Sales, R. B. C., Aguiar, M. T. P., (2022). Study of metakaolins with different amorphities and particle sizes activated by KOH and K_2SiO_3 . Case Studies in Construction Materials, Vol. 16, e00778. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00778>
- Granizo, M. L., Blanco Varela, M. T., Palomo, A., (2000). Influence of the starting kaolin on alkali-activated materials based on metakaolin. Study of the reaction parameters by isothermal conduction calorimetry. Journal of Materials Science, Vol. 35, 6309 – 6315. DOI:10.1023/A:1026790924882
- Gunasekara, C., Dirgantara, R., Law, D.W., Setunge, S., (2019). Effect of curing conditions on microstructure and pore-structure of brown coal fly ash geopolymers. Appl. Sci., Vol. 9, 3138. doi:10.3390/app9153138
- Guo, G., Lv, C., Liu, J., Wang, L., (2022). Properties of Fiber-Reinforced One-Part Geopolymers: A Review. Geopolymers: A Review. Polymers, Vol. 14, 3333. <https://doi.org/10.3390/polym14163333>

- Gökçe, H. S., (2024). Durability of slag-based alkali-activated materials: A critical review. *Journal of the Australian Ceramic Society*, Vol.60, 885–903. <https://doi.org/10.1007/s41779-024-01011-z>
- Habert, G., d’Espinose de Lacaillerie, J. B., Roussel, N., (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, 1229 - 1238. doi:10.1016/j.jclepro.2011.03.012
- Haily, E., Ousaleh, H. A., Zari, N., Faik, A., Bouhfid, R., Qaiss, A., (2023). Use of a form-stable phase change material to improve thermal properties of phosphate sludge-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, Vol. 386, 131570. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131570>
- Hamsashree, Pandit, P., Prashanth, S., Katpady, D. N., (2024). Durability of alkali-activated fly ash-slag concrete- state of art. *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol. 9, 222. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01530-5>
- Han, J., Pan, J., Wang, X., Cai, J., Gu, L., Yang, J., (2023). Conductive behavior of engineered geopolymer composite with addition of carbon fiber and nano-carbon black. *Ceramics International*, Vol. 49, 32035–32048. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.170>
- Han, Q., Zhang, P., Wu, J., Jing, Y., Zhang, D., Zhang, T., 2022. Comprehensive review of the properties of fly ash-based geopolymer with additive of nano-SiO₂. *Nanotechnology Reviews*, Vol. 11, 1478–1498. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0092>
- Han, W., Lv, Y., Wang, S., Qiao, J., Zou, C., Su, M., Peng, H., (2023). Effects of Al/Na and Si/Na Molar Ratios on the Alkalinity of Metakaolin-Based Geopolymer Pore Solutions. *Materials* Vol.16,1929. <https://doi.org/10.3390/ma16051929>
- He, C., Osbaeck, B., Makovicky, E. (1995). Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*, Vol.25, 1691–1702. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00165-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00165-4)
- Heshmati, M., Sheikh, M. N., Hadi, M. N. S., (2025). A comprehensive review of the fresh and hardened characteristics of self-compacting

- geopolymer concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 14, 816–835. <http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2025.2461182>
- Hopson, M. N., Fowler, L., (2022). An analysis of and recommendations for comprehensive state water recycling policy strategies in the U.S.. *Resources, Conservation & Recycling*, Vol. 183, 106356. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106356>
- Hosan, A., Haque, S., Shaikh, F., (2016). Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, Vol. 8, 123-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.10.005>
- Hu, H., Jiang, M., Tang, M., Liang, H., Cui, H., Liu, C., Ji, C., Wang, Y., Jian, S., Wei, C., Song, S., (2025). Prediction of compressive strength of fly ash-based geopolymers concrete based on machine learning. *Results in Engineering*, Vol. 27, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106492>
- Huseiena, G. F., Mirzaa, J., Ismaila, M., Ghoshalc, S. K., Husseina, A. A., [2017]. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 80, 54–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.076>
- Izadifar, M., Ukrainczyk, N., Koenders E., (2024). Atomistic Insights into Silicate Dissolution of Metakaolinite under Alkaline Conditions: Ab Initio Quantum Mechanical Investigation. *Langmuir*, Vol. 40, 19332–19342. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00890>
- Jagadisha, H.M., Pandit, P., Prashant, S., Bhole, L., Singh, Y., Verma, O., Kumar, M., (2025). Multi-objective Optimisation of One-Part Slag–Flyash–Microsilica Based Alkali-Activated Ternary Binder Mixes. Jagadisha et al. *Int J Concr Struct Mater*, Vol. 19, 75. <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00822-z>
- Jaji, M. B., Babafemi, A. J., van Zijl, G. P. A. G., (2025). Mechanical performance of extrusion-based two-part 3D-printed geopolymer concrete: A review of advances in laboratory and real-scale construction projects. *Materials Today Sustainability*, Vol. 31, 101131. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101131>

- Jin, Q., Zhang, P., Wu, J., Sha, D., (2022). Mechanical Properties of Nano-SiO₂ Reinforced Geopolymer Concrete under the Coupling Effect of a Wet-Thermal and Chloride Salt Environment. *Polymers*, Vol. 14, 2298. <https://doi.org/10.3390/polym14112298>
- Jozwiak-Niedzwiedzka, D., Rovnaník, P., Dąbrowski, M., Osko, J., Kuc, M., Maciak, M., (2025). Gamma radiation attenuation, mechanical properties and microstructure of barite-modified cement and geopolymer mortars. *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 57, 103295. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.10.057>
- Kadhim, A., Mankhi, B. S., Al-Bujasim, M., (2024). Review of Geopolymer Technology, Barriers and Limitations. *Al-Mustaqbal Journal of Sustain. In Eng. Sciences*, Vol. 2, 48–60. <https://doi.org/10.62723/2959-5932.1014>
- Kamath, M., Prashant, S., Ralegaonkar, R., (2023). Microstructure Properties of Popular Alkali-Activated Pastes Cured in Ambient Temperature. *Buildings*, Vol. 13, 858. <https://doi.org/10.3390/buildings13040858>
- Kamel Khouadjia, M. L., Bensalem, S., Belebchouche, C., Boumaza, A., Hamlaoui, S., Czarnecki, S., (2025). Sustainable Geopolymer Tuff Composites Utilizing Iron Powder Waste: Rheological and Mechanical Performance Evaluation. *Sustainability*, vol. 17, 1240. <https://doi.org/10.3390/su17031240>
- Karaaslan, C., Yener, E., (2021). The Effect of Alkaline Activator Components on the Properties of Fly Ash Added Pumice Based Geopolymer. *Journal of the Institute of Science and Technology*, Vol. 11, 1255-1269. DOI: 10.21597/jist.840872
- Kepniak, M., Zabawski, J., Prochoń, P. (2024). Enhancing Fire Resistance of Geopolymers Modified with Thermal Insulation Additives. *Materials*, Vol. 17, 4854. <https://doi.org/10.3390/ma17194854>
- Ketana, N. S., Reddy, S., Rao, M. V. S., Shrihari, S., (2021). Effect of various parameters on the workability and strength properties of geopolymer concrete. *E3S Web of Conferences*, Vol. 309, 01102. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901102>
- Khale D., Chaudhary, R., (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, Vol. 42, 729-746. Doi:10.1007/s10853-006-0401-4

- Khan, R., Iqbal, S., Soliyeva, M., Alid, A., Elboughdiri, N., (2025). Advanced clay-based geopolymer: influence of structural and material parameters on its performance and applications. *RSC Adv.*, Vol. 15, 12443 - 12471. Doi: 10.1039/d4ra07601j
- Khasawneh, M., A., (2025). Geopolymer concrete in construction projects: a review. *Discover Civil Engineering*, Vol. 2, 124. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00281-1>
- Khater, H. M., Gharieb, M., (2024). Enhancing physico-mechanical properties and thermal stability of geopolymer composites through nano-material incorporation. *Discover Applied Sciences*, Vol. 6, 206. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05863-9>
- Kim, Y. J., Choi, S., Oh, S. R., (2024). The Effects of Ester and Ether Polycarboxylate Superplasticizers on the Fluidity and Setting Behavior of Alkali-Activated Slag Paste. *Materials*, Vol. 17, 4951. <https://doi.org/10.3390/ma17204951>
- Kishore, K., Pandey , A.Wagri , N. K., Saxena, A., Patel, J., Al-Fakih, A., (2023). Technological challenges in nanoparticle-modified geopolymer concrete: A comprehensive review on nanomaterial dispersion, characterization techniques and its mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 19, e02265. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02265>
- Kolade, A. S., Ikotun, B. D., Oyejobi, D. O., (2025). A Review of the Chemistry, Waste Utilization, Mix Design and Performance Evaluation of Geopolymer Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. Published online: 25 March 2025. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01801-w>
- Kolade, A. S., Ikotun, B. D., Oyejobi, D. O., Aderinto, G. E., Madirisha, M. M., (2025). Performance Evaluation of Geopolymer Mortars Prepared with Waste Glass Powder-Derived Sodium Silicate Solution. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. Published online: 09 July 2025. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01952-w>
- Komljenovi', M., Ba'sćarevi', Z., Bradi', V., (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers.

- Journal of Hazardous Materials Vol. 181, 35–42.
doi:10.1016/j.jhazmat.2010.04.064
- Kong, D. L. Y., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol.40, 334-339.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.017>
- Krishna, A. S., Kumar, K. R., VishnuPriyan, M., (2025). A state-of-the-art analysis of repair and rehabilitation of masonry structures by using geopolymer mortar. *Discover Applied Sciences*, Vol. 7, 307.
<https://doi.org/10.1007/s42452-025-06799-4>
- Kriven, W., Leonelli, C., Provis, J. L., Boccaccini, A. R., Attwell, C., Ducman, V. S., Ferone, C., Rossignol, S., Luukkonen, T., J.van Deventer, J. S. , Emiliano, J. V., Lombardi, J. E., (2025). Why geopolymers and alkali-activated materials are key components of a sustainable world: A perspective contribution. *J Am Ceram Soc.*, Vol. 107, 5159–5177. DOI: 10.1111/jace.19828
- Kuijpersa, N. C. W., Vermolenb, F. J., Vuikb, C., Koenisc, P. T. G., Nilsenc, K. E., Zwaaga, S., (2005). The dependence of the β -AlFeSi to α -Al(FeMn)Si transformation kinetics in Al–Mg–Si alloys on the alloying elements. *Materials Science and Engineering A*, Vol.394, 9–19.
doi:10.1016/j.msea.2004.09.073
- Kumar, G. S., Deoliya, R., (2022). Recycled cement and recycled fine aggregates as alternative resources of raw materials for sustainable cellular light weight flowable material. *Construction and Building Materials*, Vol. 326, 126878.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126878>
- Kumar, S., G., K., M., Kinuthia, J. M., Oti, J., Adeleke, B. O., (2025). Geopolymer Chemistry and Composition: A Comprehensive Review of Synthesis, Reaction Mechanisms, and Material Properties—Oriented with Sustainable Construction. *Materials*, Vol. 18, 3823.
<https://doi.org/10.3390/ma18163823>
- Kumar, T. U., Kumar, M. V., Salunkhe, S., Cep, R., Nasr, E. A., (2024). Impact of geopolymer aggregate on the mechanical properties and durability characteristics of concrete. *Front Built Environ*, Vol. 10, 1445954. doi: 10.3389/fbuil.2024.1445954

- La Scalia, G., Saeli, M., Adelfio, L., Micale, R., (2021). From lab to industry: Scaling up green geopolymeric mortars manufacturing towards circular economy. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 316, 128164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128164>
- Lama, G., Duarte, A. P. C., Silva, R. V., Brito, J., (2023). Carbonation of Alkali-Activated Materials: A Review. *Materials*, Vol. 16, 3086. <https://doi.org/10.3390/ma16083086>
- Lamuta, C., Candamano, S., Crea, F., Pagnotta, L., (2016). Direct piezoelectric effect in geopolymeric mortars. *Materials and Design*, Vol.107, 57–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.108>
- Lang, Y. J., Yin, G. J., Wen, X. D., Miao, L., Gao, X. J., Cheng, S. S., (2025). Research progress, hotspot evolution, and future trends of geopolymer concrete: A bibliometric review in the period 2000–2024. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 23, e05383. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05383>
- Le, V. S., Nguyen, V. V., Sharko, A., Ercoli, R., Nguyen, T. X., Tran, D. H., Ło's, P., Buczkowska, K. E., Mitura, S., Špirek, T., Louda P., (2022). Fire Resistance of Geopolymer Foams Layered on Polystyrene Boards. *Polymers*, Vol. 14, 1945. <https://doi.org/10.3390/polym14101945>
- Lee, S., Riessen, A.V., (2022). A Review on Geopolymer Technology for Lunar Base Construction. *Materials*, 15, 4516. <https://doi.org/10.3390/ma15134516>
- Lee, W. K. W., Van Deventer, J. S. J. (2002). Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 211, 49–66. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00237-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00237-6)
- Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., Jameson, G. N. L., Rahier, H., Melo U. F. C., (2013). The role of iron in the formation of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash: a ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy study. *J Mater Sci* Vol. 48, 5280–5286. Doi: 10.1007/s10853-013-7319-4
- Li, C., Sun, H., Li, L., (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and*

- Concrete Research, Vol. 40, 1341–1349. doi:10.1016/j.cemconres.2010.03.020
- Li, H., Zhang, Z., Deng, Y., Xu, F., Hu, J., Zhu, D., Yu, Q., Shi, C., (2024). Geopolymer composites for marine application: Structural properties and durability. *Cement and Concrete Composites* 152, 105647. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105647>
- Li, L., Ding, Q., Zhang, Z., Li, Y., Wei, X., Zhang, Z., Be, H., (2023). The effect of Al and Ti on the microstructure, mechanical properties and oxidation resistance of V-Ni₃(Al, Ti) strengthened austenitic stainless steels. *Journal of materials research and technology*, Vol. 24, 4650-4660. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.156>
- Li, Y., Shan, L., Wang, R., Lian, X., Zhou, Q., (2022). Enhanced n-butanol sensing performance of SnO₂/ZnO nanoflowers fabricated via a facile solvothermal method. *Ceramics International*, Vol. 48, 22426–22434. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.256>
- Lingyu, T., Dongpo, H., Jianing, Z., Hongguang, W., (2021). Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, Vol. 60, 1–14. <https://doi.org/10.1515/rams-2021-0002>
- Liu, J., Shi, X., Zhang, G., Li, L., (2023). Study the Mechanical Properties of Geopolymer under Different Curing Conditions. *Minerals*, Vol. 13, 690. <https://doi.org/10.3390/min13050690>
- Liu, M., Zhao, Y., Yu, Z., Cao, Z., (2022). Binding of Cu(II) and Zn(II) in Portland cement immobilization systems: Effect of C-A-S-H composition. *Cement and Concrete Composites*, Vol.131, 104602. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104602>
- Liu, Y., Hu, X., Du, Y., Nematollahi, B., Shi, C., (2024). A review on high-temperature resistance of geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, Vol. 98, 111241. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111241>
- Lopes, A., Lopes, S., Pinto, I., (2023). Influence of Curing Temperature on the Strength of a Metakaolin-Based Geopolymer. *Materials*, Vol. 16, 7460. <https://doi.org/10.3390/ma16237460>
- Luo, D., Du, Y., Zhang, J., Chen, F., Song, Y., (2025). Preparation of Geopolymers from Fly Ash and Red Mud: Properties, Microstructure and Mechanism. 1 Institute of Resource and Environment Innovation,

- Shandong Jianzhu 6 University, Jinan 250101, Shandong, China.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5142447>
- Lv, Y., Wang, C., Han, W., Li, X., Peng, H., (2023). Study of the Mechanical Properties and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash–Slag Composite Cementitious Materials. *Polymers*, Vol. 15, 1903. <https://doi.org/10.3390/polym15081903>
- Ma, J., Wang, D., Zhao, S., Duan, P., Yang, S., (2021). Influence of Particle Morphology of Ground Fly Ash on the Fluidity and Strength of Cement Paste. *Materials* Vol. 14, 283. <https://doi.org/10.3390/ma14020283>
- Maaty, A. A., Ghazy, M. F., Eldmarny, M. G., (2025). Geopolymer Concrete Performance Utilising Waste Glass: A Review. *Mansoura Engineering Journal*, Vol. 50, 1e15. <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3254>
- Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Şahmaran, M., (2025). Recent advances in CDW-based geopolymers: A review of mechanical performance, structural application, 3D printing, durability and sustainability. *Journal of Environmental Management*, Vol. 391, 126358. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126358>
- Martínez, A., Miller, S.A., (2025). Life cycle assessment and production cost of geopolymer concrete: A meta-analysis. *Resources, Conservation & Recycling* Vol. 215, 108018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108018>
- Matinfar, M., Nychka, J.A., (2023). A review of sodium silicate solutions: Structure, gelation, and syneresis. *Advances in Colloid and Interface Science* Vol. 322, 103036. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103036>
- Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., Musonda, I., 2022. Geopolymer: A Systematic Review of Methodologies. *Materials*, Vol. 15, 6852. <https://doi.org/10.3390/ma15196852>
- 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*, Vol.19, 1080-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Liang, X., Ji, Y., (2021). Mechanical properties and permeability of red mud-blast furnace slag-based geopolymer concrete. *SN Applied Sciences*, Vol. 3, 23, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03985-4>

- Mendoza-Cachú, D., López-Martínez, A. A., Franco-Urquiza, E. A., (2024). Geopolymers for Space Applications Part II: Synthesis and Physical Characterization. *Ceramics*, Vol. 7, 1584–1599. <https://doi.org/10.3390/ceramics7040102>
- Mendoza-Cachú, D., Rojas-Trigos, J. B., Hernández-Wong, J., Madera-Santana, T. J., Franco-Urquiza, E. A., (2024). Geopolymers for Space Applications. *Physchem*, Vol. 4, 197–213. <https://doi.org/10.3390/physchem4030015>
- Mishra, J., Nanda, B., Patro, S. K., Krishna, R. S., (2022). Sustainable Fly Ash Based Geopolymer Binders: A Review on Compressive Strength and Microstructure Properties. *Sustainability*, Vol. 14, 15062. <https://doi.org/10.3390/su142215062>
- Mohamed, R., Abdullah, M. M. A. B., Razak, R. A., Lee, T. L., Imjai, T., Mydin, M. A. O., Yahya, Z., Arokiasamy, P., Hao, D. L. C., (2025). Review: geopolymers for fire protection applications. *J Mater Sci*, Vol. 60, 18678–18709. <https://doi.org/10.1007/s10853-025-11496-z>
- Mukhametkaliyev, T., Ali, Md. H., Kutugin, V., Savinova, O., Vereschagin, V., (2022). Influence of Mixing Order on the Synthesis of Geopolymer Concrete. *Polymers*, Vol. 14, 4777. <https://doi.org/10.3390/polym14214777>
- Muthukrishnan, S., Ramakrishnan, S., Sanjayan, J., (2022). Set on demand geopolymer using print head mixing for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 128, 104451. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104451>
- Nana, A., Epey N., Rodrique K. C., Deutou J. G. N., Djobo J.N.Y., , Toméd S., Alomayri T.S., Ngounéa, J., Kamseu E., Leonelli, C., (2021). Mechanical strength and microstructure of metakaolin/volcanic ash-based geopolymer composites reinforced with reactive silica from rice husk ash (RHA). *Materialia* Vol. 16, 101083. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101083>
- Nath, S.K., Kumar, S., (2019). Reaction kinetics of fly ash geopolymerization: Role of particle size controlled by using ball mill. *Advanced Powder Technology*, vol.30, 1079–1088. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.03.003>

- Nie, Q., Li Y., Wang G., Bai B., (2020). Physicochemical and Microstructural Properties of Red Muds under Acidic and Alkaline Conditions. Appl. Sci. Vol. 10, 2993. doi:10.3390/app10092993
- Nordström, J., Sundblom, A., Jensen, G. V., Pedersen J. S., Palmqvist, A., Matic, A., (2013). Silica/alkali ratio dependence of the microscopic structure of sodium silicate solutions. Journal of Colloid and Interface Science Vol. 397, 9–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.048>
- Nurruddin, M. F., Haruna, S., Mohammed, B. S., Sha’aban, I. G., (2018). Methods of curing geopolymer concrete: A review. International Journal of Advanced and Applied Sciences, vol. 5, 31-36. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005>
- Ouellet-Plamondon, C., Aranda, P., Favier, A., Habert, G., Van Dammed, H., Ruiz-Hitzkyb, E., (2015). The maya blue nanostructured material concept applied to colouring geopolymers. RSC Adv., Vol. 5, 98834–98841. DOI: 10.1039/c5ra14076e
- Overmann, S., Vollpracht, A., Matschei, T., (2024). Reactivity of Calcined Clays as SCM—A Review. Materials Vol. 17, 312. <https://doi.org/10.3390/ma17020312>
- Owino, E. K., Shikuku, V. O., Nyairo, W. N., Kowenje, C. O., Otieno, B., (2023). Valorization of solid waste incinerator fly ash by geopolymer production for removal of anionic bromocresol green dye from water: Kinetics, isotherms and thermodynamics studies. Sustainable Chemistry for the Environment Vol. 3, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100026>
- Ozer, I., Soyer-Uzun, S., (2015). Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. Ceramics International, Vol. 41, 10192–10198. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.125>
- Palomo, A., Monteiro, P., Martauz, P., Bilek, V., Fernandez-Jimenez, A., (2019). Hybrid binders: A journey from the past to a sustainable future (opus caementicium futurum). Cement and Concrete Research Vol. 124, 105829. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105829>
- Papa, E., Landi, E., Miccio, F., Medri, V., (2022). K₂O-Metakaolin-Based Geopolymer Foams: Production, Porosity Characterization and

- Permeability Test. Materials, Vol. 15, 1008. <https://doi.org/10.3390/ma15031008>
- Partschefeld, S., Tatal, A., Halmanseder, T., Schneider, J., Osburg, A., (2023). Investigations on Stability of Polycarboxylate Superplasticizers in Alkaline Activators for Geopolymer Binders. Materials, Vol. 16, 5369. <https://doi.org/10.3390/ma16155369>
- Plando, F. R. P., Supnad M. V., Maquiling J. T., (2025). Assessment of compressive strength, microstructure, thermal, and radiation shielding properties of Taal volcanic ash-based geopolymer mortar. Journal of Building Engineering Vol.99, 111572. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2024.111572>
- Poojalakshmi, E. S., Nagarajan, P., Sudhakumar, J., Thomas, B. S., (2025). Impact of alkaline activator concentration on mechanical properties and microstructure of a ternary blended one-part geopolymer cement. Scientific Reports, Vol. 15, 33808. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01610-1>
- Pontikes, K., Angelopoulos G. N., (2013). Bauxite residue in cement and cementitious applications: Current status and a possible way forward. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 73, pp. 53–63, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.01.005
- Provis, J. L. (2014). Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? Materials and Structures, Vol. 47, 11–25. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5>
- Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. Cement and Concrete Research, vol.114, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Provis, J. L., Van Deventer, J. S. J., (2014). Alkali Activated Materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>
- Provis, J. L., Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. Annual Review of Materials Research, Vol. 44, 299–327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
- Przybek, A., Łach, M., (2024).Insulating Innovative Geopolymer Foams with Natural Fibers and Phase-Change Materials-A Review of Solutions and

- Research Results. Materials, Vol. 17, 4503. <https://doi.org/10.3390/ma17184503>
- Pu, S., Ouyang, Y., (2023). Can carbon emission trading policy promote green innovation? The perspective of corporate operating difficulties. Journal of Cleaner Production, Vol. 420, 138473. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138473>
- Puertas, F., Fernandez-Jimenez, A., (2003). Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes. Cement & Concrete Composites, Vol. 25, 287–292. PII: S09 5 8-9 4 65 (0 2)0 00 5 9- 8
- Qaidi, S. M. A., Tayeh, B. A., Ahmed, H. U., Emad, W., (2022). A review of the sustainable utilisation of red mud and fly ash for the production of geopolymer composites. Construction and Building Materials, Vol. 350, 128892. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128892>
- Qaidi, S., Najm, H.M., Abed, S.M., Ahmed, H.U., Dughaisi, H.A., Lawati, J.A., Sabri, M.M., Alkhatib, F., Milad, A., (2022) Fly Ash-Based Geopolymer Composites: A Review of the Compressive Strength and Microstructure Analysis. Materials, Vol. 15, 7098. <https://doi.org/10.3390/ma15207098>
- Qin, L., Yan, J., Zhou, M., Liu, H., Wang, A., Zhang, W., Duan, P., Zhang, Z., (2023). Mechanical properties and durability of fiber reinforced geopolymer composites: A review on recent progress. Engineering Reports, Vol.5, e12708. <https://doi.org/10.1002/eng2.12708>
- Rabie, M., Irshidat, M. R., Al-Nuaimi, N., (2022). Ambient and Heat-Cured Geopolymer Composites: Mix Design Optimization and Life Cycle Assessment. Sustainability, Vol. 14, 4942. <https://doi.org/10.3390/su14094942>
- Radebe, S. P., Madirisha, M. M., Ikotun, B. D., Dada, O. R., (2025). Durability and Strength Improvement of Ambient-Cured Geopolymer Concrete Using Polypropylene Fibers. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, Accepted: 19 July 2025. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01987-z>
- Rahjoo, M., Goracci, G., Martauz, P., Rojas, E., Dolado, J. S., (2022). Geopolymer Concrete Performance Study for High-Temperature

- Thermal Energy Storage (TES) Applications. Sustainability, Vol. 14, 1937. <https://doi.org/10.3390/su14031937>
- Rahmawati, C., Aprilia, S., Saidi, T., Aulia, T. B., Hadi, A., E., (2021). The Effects of Nanosilica on Mechanical Properties and Fracture Toughness of Geopolymer Cement. Polymers, Vol. 13, 2178. <https://doi.org/10.3390/polym13132178>
- Raj, R. S., Arulraj, P., Anand, N., Kanagaraj, B., Lubloy, E., Naser, M. Z., (2023). Nanomaterials in geopolymer composites: A review. Developments in the Built Environment, Vol. 13, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100114>
- Ram, A.K., Mohanty, S., (2022). State of the art review on physiochemical and engineering characteristics of fly ash and its applications. International Journal of Coal Science & Technology, Vol.9, 9. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00472-6>
- Ramesh, V., Muthramu, B., Rebekha, D., (2025). A review of sustainability assessment of geopolymer concrete through AI-based life cycle analysis. Ramesh et al. AI in Civil Engineering, Vol. 4, 3. <https://doi.org/10.1007/s43503-024-00045-3>
- Ran, M., Wang, J., Zhang, D., (2024). A superior electrolyte composite with high conductivity and strength based on alkali-activated slag and polyacrylamide for structural supercapacitor. Journal of Energy Storage, Vol. 79, 110169. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110169>
- Ranjbar, N., Kuenzel, C., Spangenberg, J., Mehrali, M., (2020). Hardening evolution of geopolymers from setting to equilibrium: A review. Cement and Concrete Composites Vol. 114, 103729. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103729>
- Ranjbar, N., Zhang, M., (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. Cement and Concrete Composites, Vol. 107, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>
- Rathee, M., Surendran, H. K., Thakur, A., Narayana, C., Misra, A., Jayaramulu, K., (2025). Tailoring Functional Graphene-Derived Geopolymer Nanocomposites: Interfacial Interactions and Mechanical Strength Enhancement. ACS Mater. Au, Vol. 5, 698 - 708. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.5c00028>

- Razeghi Tehrani, P., Arjomand, M. A., Behbahaninia, A., Kargari, N., (2024). Compatibility Studies of N-A-S-H and C-A-S-H Gels in Alkali-Activated Geopolymer Mortar. Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE) Research Article Vol. 43, No. 10, Pages 3737-3747. Doi: 10.30492/ijcce.2024.2038383.6745
- Ricciotti, L., Apicella, A., Perrotta, V., Aversa, R., (2023). Geopolymer Materials for Extrusion-Based 3D-Printing: A Review. Polymers, Vol 15, 4688. <https://doi.org/10.3390/polym15244688>
- Ricciotti, L., Frettoloso, C., Franchino, R., Pisacane, N., Aversa, R., (2025). Geopolymer Materials: Cutting-Edge Solutions for Sustainable Design Building. Sustainability, Vol 17, 7483. <https://doi.org/10.3390/su17167483>
- Ricciotti, L., Occhicone, A., Ferone, C., Cioffi, R., Tarallo, O., Roviell, G., (2022). Development of Geopolymer-Based Materials with Ceramic Waste for Artistic and Restoration Applications. Materials, Vol. 15, 8600. <https://doi.org/10.3390/ma15238600>
- Rocha, J., Klinowski, J. (1990). ²⁹Si and ²⁷Al magic-angle-spinning NMR studies of the thermal transformation of kaolinite. Physics and Chemistry of Minerals, vol.17, 179–186. <https://doi.org/10.1007/BF00199671>
- Rosas-Casarez, C. A., Corral-Higuera, R., Arredondo-Rea, S. P., Gómez-Soberón, J. M., Chinchillas-Chinchillas, M. J., Rodríguez-Rodríguez, M., Pellegrini-Cervantes, M. J., Bernal-Camacho, J. M., (2025). Porosity of Geopolymers Using Complementary Techniques of Image Analysis and Physical Adsorption of Gases. Buildings, Vol. 15, 2353. <https://doi.org/10.3390/buildings15132353>
- Rovella N., Ulian G., Moro D., Valdrè G., (2022). Synthesis of geopolymers as sustainable materials for applications in Cultural Heritage. IMEKO-TC4-MetroArchaeo, Vol. 97. Doi: 10.21014/tc4-ARC-2022.097
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. Construction and Building Materials, 24(7), 1176–1183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.02383>

- Ružek, V., Dostayeva, A. M., Walter, J., Grab, T., Korniejenko, K., (2023). Carbon Fiber-Reinforced Geopolymer Composites: A Review. *Fibers*, Vol. 11, 17. <https://doi.org/10.3390/fib11020017>
- Ružek, V., Dostayeva, A. M., Walter, J., Grab, T. Korniejenko, K., (2023). Carbon Fiber-Reinforced Geopolymer Composites: A Review. *Fibers*, Vol. 11, 17. <https://doi.org/10.3390/fib11020017>
- Ryvlová, M., Svobodová, L., Bakalova, T., Voleský, L., (2021). Influence of Basic Environment of Geopolymer Composites on Degradation Rates of E and AR Type Glass Fibers. *Manufacturing Technology Issn*, Vol. 21, 1213–2489. DOI: 10.21062/mft.2021.030
- Sahu, A., Kumar, P., Pratap, B., Gogineni, A., Sembeta R. Y., (2025). Thermal and mechanical performance of geopolymer concrete with recycled aggregate and copper slag as fine aggregate. *Scientific Reports*, Vol. 15, 28968. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15153-y>
- Sama, S., Blanco, I., 2021. An Application Review of Fiber-Reinforced Geopolymer Composite. *Fibers*, Vol. 9, 23. <https://doi.org/10.3390/fib9040023>
- San Nicolas, R., Cyr, M., & Escadeillas, G. (2013). Characteristics and applications of flash metakaolins. *Applied Clay Science*, Vol. 83-84, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.036>
- Sarazin, J., Davy, C. A., Bourbigot, S., Tricot, G., Hosdez, J., Lambertin, D., Fontaine, G., (2021). Flame resistance of geopolymer foam coatings for the fire protection of steel. *Composites Part B*, Vol. 222, 109045. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109045>
- Sayyed, F. S., Enayati, M. H., Nahvi, S. M., Taghipour, M., (2022). Anti-coking and anti-carburizing behavior of amorphous AlPO₄ coating. *Ceramics International*, Vol. 48, 19818–19823. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.256>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, Vol. 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Seidenstuecker, M., Lange, S., Esslinger, S., Latorre, S. H., Krastev, R., Gadow, R., Mayr, H. O., Bernstein, A., (2019). Inversely 3D-Printed

- β -TCP Scaffolds for Bone Replacement. *Materials*, Vol. 12, 3417; Doi:10.3390/ma12203417
- Ser, C. T., Žuvela, P., Wong, M. W., (2020). Prediction of corrosion inhibition efficiency of pyridines and quinolines on an iron surface using machine learning-powered quantitative structureproperty relationships. *Applied Surface Science*, Vol. 512, 145612. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145612>
- Shamsah, M., Kalfat, R., Subramaniam, K. V. L., Hanumananaik, M., (2025). Calcium enhanced ambient cured fly Ash based geopolymer binders. *Scientific Reports*, Vol. 15, 25603. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07854-1>
- Sharanu, Kompa, A., Pal, A., Rao, M., (2023). Structural, spectroscopic, and electrical studies of spin-coated ZnO-ZTO thin films for their potential application in photocatalysis and optoelectronics. *Ceramics International*, Vol. 49, 18272–18280. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.199>
- Shi, C., Jiménez, A. F., Palomo, A., (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, 750-763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
- Shi, D., Xia, Y., Zhao, Y., Ma, X., Wang, J., Liu, M., Yu, K., (2024). Evaluation of technical and gamma radiation shielding properties of sustainable ultra-high performance geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 436, 137003. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137003>
- Shi, X., Chen, S., Wang, Q., Lu, Y., Ren, S., Huang, J., (2024). Mechanical Framework for Geopolymer Gels Construction: An Optimized LSTM Technique to Predict Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Gels Concrete. *Gels*, Vol 10, 148. <https://doi.org/10.3390/gels10020148>
- Shilar, F. A., Ganachari, S. V., Patil, V. B., Khan, T. M. Y., Javed, S., Baig, R. U., (2022). Optimization of Alkaline Activator on the Strength Properties of Geopolymer Concrete. *Polymers*, Vol. 14, 2434. <https://doi.org/10.3390/polym14122434>

- Shilar, F.A., Ganachari, S. V., Patil, V. B., Khan, T. M. Y., Almakayeel, N. M., Alghamdi, S., (2022). Review on the Relationship between Nano Modifications of Geopolymer Concrete and Their Structural Characteristics. *Polymers*, Vol. 14, 1421. <https://doi.org/10.3390/polym14071421>
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, Vol.85, 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Siyal, A. A., Mohamed, R. M. S. R., Shamsuddin, R., Ridzuan, M.B., (2024). A comprehensive review of synthesis kinetics and formation mechanism of geopolymers. *RSC Advances*, 14, 446-462. Doi: 10.1039/d3ra06205h
- Skane, R., Schneider, P. A., Jones, F., van Riessen, A., Sun, E. X., Rickard, W. D. A., (2025). Predicting the stability of geopolymer activator solutions for optimised synthesis through thermodynamic modelling. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 515, 163543. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163543>
- Song, Y., Xue, C., Guo, W., Bai, Y., Shi, Y., Zhao, Q., (2024). Foamed geopolymer insulation materials: Research progress on insulation performance and durability. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 444, 140991. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140991>
- Srikrishna, T. C., Noolu, V., Reddy, S. K., Alaneme, G. U., Prasad, R. D., VishnuPriyan, M., (2025). Investigations on mechanical and stress strain characteristics of geopolymer concrete reinforced with glass fibers. *Scientific Reports*, Vol. 15, 6335. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90752-3>
- Stel'makh, S. A., Beskopylny, A. N., Shcherban, E. M., Elshaeva, D., Chernilnik, A., Kuimov, D., Evtushenko, A., Oganessian, S., (2025). Geopolymer Concrete Physical and Mechanical Properties on a Combined Binder Reinforced with Dispersed Polypropylene Fiber. *Polymers*, Vol. 17, 1710. <https://doi.org/10.3390/polym17121710>
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B., (1999). Alkali activation of Australian slag cements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00170-7)

- Tao, W., Xiangqian, F., Changsheng, G., Chiyu, Q., (2025). Macro-mechanics and Microstructure of Nanomaterialmodified Geopolymer Concrete: A Comprehensive Review. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, Vol .40, 204-214. Doi; <https://doi.org/10.1007/s11595-025-3054-3>
- Tasiopoulou, T., Katsourinis, D., Giannopoulos, D., Founti, M., (2023). Production-Process Simulation and Life-Cycle Assessment of Metakaolin as Supplementary Cementitious Material. *Eng*, Vol. 4, 761 - 779. <https://doi.org/10.3390/eng4010046>
- Tay, C. H., Norkhairunnisa, M., (2021). Mechanical Strength of Graphene Reinforced Geopolymer Nanocomposites: A Review. *Mater*, Vol. 8, 661013. doi: 10.3389/fmats.2021.661013
- Tayebani, B., Said, A., Memari, A., (2023). Less carbon producing sustainable concrete from environmental and performance perspectives: A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 404, 133234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133234>
- Tayeh, B. A., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., Amin, M., (2021). Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 15, e00673. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00673>
- Technology for Automated Production of High-Performance Building Compounds for 3D Printing. *Materials*, Vol. 17, 3829. <https://doi.org/10.3390/ma17153829>
- Teker Ercan, E. E., Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, K., (2023). The Effects of Partial Replacement of Ground Granulated Blast Furnace Slag by Ground Wood Ash on Alkali-Activated Binder Systems. *Materials*, Vol. 16, 5347. <https://doi.org/10.3390/ma16155347>
- Tironi, A., Trezza, M. A., Irassar, E. F., Scian, A. N. (2012). Thermal treatment of kaolin: effect on the pozzolanic activity. *Procedia Materials Science*, Vol. 1, 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.046>
- Tserpes, K., Sioutis, I., (2025). Advances in Composite Materials for Space Applications: A Comprehensive Literature Review. *Aerospace*, Vol. 12, 215. <https://doi.org/10.3390/aerospace12030215>

- Turner, L. K., Collins, F. G., (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 43, 125–130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., Abunada, Z., Lemckert, C., Giustozzi, F., (2025). Carbon Footprint and Uncertainties of Geopolymer Concrete Production: A Comprehensive Life Cycle Assessment (LCA). *C 2025*, Vol. 11, 55. <https://doi.org/10.3390/c11030055>
- Ukritnukun, S., Koshy , P., Rawal, A., Castel, A., Sorrell, C. C., (2020). Predictive Model of Setting Times and Compressive Strengths for Low-Alkali, Ambient-Cured, Fly Ash/Slag-Based Geopolymers. *Minerals*, Vol. 10, 920. Doi:10.3390/min10100920
- Ukritnukun, S., Koshy, P., Feng, C., Rawal, A., Castel, A., Christopher Sorrell, C., (2021). Development of Low-Alkali, Fly Ash/Slag Geopolymers: Predictive Strength Modelling and Analyses of Impact of Curing Temperatures. *Minerals* , Vol.11, 60. <https://doi.org/10.3390/min11010060>
- Ulloa N., Onyelowe, K.C., Ebid A. M., Yaulema, C. S. C. Y., Rodriguez M.G.Z., Vally A. I.A., Onyia M.E., (2024), Influence of alkali molarity on compressive strength of high-strength geopolymer concrete using machine learning techniques based on curing regimes and temperature. *Front. Built Environ.* Vol.10, 1455915. doi: 10.3389/fbuil.2024.1455915
- Ünsal, Z., Ekinici, M. Ö., İlcan, H., Şahin, O., Selçuk, S., Şahmaran, M., (2025). Life cycle assessment of geopolymer materials utilizing construction and demolition waste. *Environmental Research*, Vol. 285, 122359. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122359>
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., Lorenzen, L., (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. *Minerals Engineering*, Vol. 10, 659-669. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(97\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00046-0)
- Vanitha, N., Thanigaiselvan, R., Manivannan, M., Jeyalakshmi, R., Megha, S. N., Kesavan, M., (2024). Expounding the application of nano and micro silica as a complementary additive in metakaolin phosphate geopolymer for ceramic applications—micro and nanoscale structural

- investigation. Vanitha et al. J Mater. Sci: Mater Eng., Vol. 19, 32. <https://doi.org/10.1186/s40712-024-00176-6>
- Vukovic, J., Perusic, M., Stopic, S., Kostic, D., Smaljanic, S., Filipovic, R., Damjannovic, V., (2024). Areview of the red mud utilization possibilities. Ovidius University Annals of Chemistry Volume 35, 165 - 173, Doi: 10.2478/auoc-2024-0021
- Vázquez-Rodríguez, F., Elizondo, N., Montes-González, M., Gómez-Rodríguez, C., González-Carranza, Y., Guzmán, A. M., Rodríguez, E. A., (2023). Microstructural and Mechanical Characteristics of Alkali-Activated Binders Composed of Milled Fly Ash and Granulated Blast Furnace Slag with μ -Limestone Addition. Materials, Vol. 16, 3818. <https://doi.org/10.3390/ma16103818>
- Walkley, B., Provis, J. L. (2019). Solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy of cements. Materials Today Advances, Vol.1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2019.100007>
- Wan, H., Yuan, L., Zhang, Y., (2020). Insight Into the Leaching of Sodium Alumino-Silicate Hydrate (N-A-S-H) Gel: A Molecular Dynamics Study. Front. Mater, Vol.7. Doi: 10.3389/fmats.2020.00056
- Wan, X., Cui , Y., Jin, Z., Gao, L., (2023). Chloride Transport and Related Influencing Factors of Alkali-Activated Materials: A Review. Materials, Vol. 16, 3979. <https://doi.org/10.3390/ma16113979>
- Wan, Y. Cao, H., Zhang, G., Lu , X., Gao, Y., Niu, J., He, C., Lu, X., (2025). Influence of Mixing Conditions on the Strength and Microstructure of Cement Paste. Buildings, Vol. 15, 3277. <https://doi.org/10.3390/buildings15183277>
- Wang, H., Wu, H., Xing, Z., Wang, R., Dai, S., (2021). The Effect of Various Si/Al, Na/Al Molar Ratios and Free Water on Micromorphology and Macro-Strength of Metakaolin-Based Geopolymer. Materials, Vol. 14, 3845. <https://doi.org/10.3390/ma14143845>
- Wang, M., Li, Y., Cheng, Z., Zhong, C., Ma, W., (2021). Evolution and equilibrium of a green technological innovation system: Simulation of a tripartite game model. Journal of Cleaner Production, Vol. 278, 123944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123944>
- Wang, Q., Li, H., Ding, Z., Shan, R., Zhao, M., (2024). Construction of a Molecular Dynamics Model of N-A-S-H Geopolymer Based on XRD

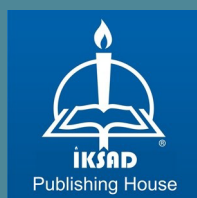
- Analysis. Materials, Vol. 17, 6103.
<https://doi.org/10.3390/ma17246103>
- Wang, T., Fan, X., Gao, C., Qu, C., Liu, J., Yu, G., (2023). The Influence of Fiber on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete: A Review. Polymers, Vol. 15, 827.
<https://doi.org/10.3390/polym15040827>
- Wang, T., Rao, F., Yang, L., Jiang, K., Lin, N., Mo, L., (2024). Influence of Wastes and Synthesis Conditions on the Compressive Strength, Setting Time and Gels of Waste-Based Geopolymers. Gels, Vol. 10, 700.
<https://doi.org/10.3390/gels10110700>
- Wang, Y., Zhang, J., Liu, J., Fan, D., Qu, H., Zhou, L., Zheng, S., (2024). Effects of Different Calcium Sources on Mechanical Properties of Metakaolin Geopolymers. Materials, Vol. 17, 2087.
<https://doi.org/10.3390/ma17092087>
- White, C. E., Provis, J. L., Proffen, T., & van Deventer, J. S. J. (2010). The effects of temperature on the local structure of metakaolin-based geopolymer binder: A neutron pair distribution function investigation. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 93(10), 3486–3492.
<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03906.x>
- Wong, L. S., (2022). Durability Performance of Geopolymer Concrete: A Review. Polymers, Vol. 14, 868.
<https://doi.org/10.3390/polym14050868>
- Wu, J.Q, Li, B., Chen, Y.T., Shi, W., Ghiassi, B. (2024). Self-healing performance of engineered geopolymer composites subjected to sodium sulphate. Journal of Building Engineering 97, 110789.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110789>
- Wu, Y., Fu, X., Zhang, K., Tao, Z., Fan, Y., Lu, W., (2023). A strategy of high-sensitivity solar-blind photodetector for fabricating graphene surface modification ZnGa₂O₄/Ga₂O₃ core-shell structure nanowire networks. Ceramics International, Vol. 49, 18248–18254.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.196>
- Xiong, G., Guo, X., Zhang, H., (2023). Preparation of epoxy resin-geopolymer (ERG) for repairing and the microstructures of the new-to-old interface. Composites Part B, Vol. 259, 110731.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110731>

- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 59, 247–266. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)
- Yan, W., Shi, J., Cao, X., Zhang, M., Li, L., Jiang, J., (2025). A Review on the Applications of Basalt Fibers and Their Composites in Infrastructures. *Buildings*, Vol. 15, 2525. <https://doi.org/10.3390/buildings15142525>
- Yan, Y., Kou, S., Yang, H., Shu, S., Lu, J., (2022). Effect mechanism of mono-particles or hybrid-particles on the thermophysical characteristics and mechanical properties of Cu matrix composites. *Ceramics International*, Vol. 48, 23033–23043. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.281>
- Yan, Z., Kawasaki, S., (2025). Review of In Situ Resource Utilization-Based Biocementation and Regolith Consolidation Techniques for Space Applications. *Buildings*, Vol. 15, 1815. <https://doi.org/10.3390/buildings15111815>
- Yang, Y., Li, M., He, Q., Liao, C., (2025). Study on the Properties and Pore Structure of Geopolymer Foam Concrete Incorporating Lead–Zinc Tailings. *Buildings*, Vol. 15, 1703. <https://doi.org/10.3390/buildings15101703>
- Yao, Z. T., Ji, X.S., Sarker,P.K., Tang, J.H., Ge, L.Q., Xia, M.S., Xi, Y.Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, Vol. 141, 105–121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- Yi, C., Boluk, Y., Bindiganavile V., (2025). Refining Oxide Ratios in N-A-S-H Geopolymers for Optimal Resistance to Sulphuric Acid Attack. *Journal of Composites Science*, Vol. 9, 44. <https://doi.org/10.3390/jcs9010044>
- Yip, C. K., Van Deventer, J. S. J., (2003). Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder. *Journal of Materials Science*, vol. 38, 3851–3860. doi: 10.1023/A:1025904905176
- Yip, C.K., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J., (2005), The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 1688–1697. doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.042

- Yu, Y., Xu, F., Wang, S., Fan, L., Zhang, J., Li, P., Yu, L., (2025). Influence mechanism of curing temperature on geopolymerization reaction: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, Vol. 103, 112195. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112195>
- Zain, M.F.M., Islam, M.N., Mahmud, F., Jamil, M., (2011). Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, 798–805. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.07.003
- Zerzouri, M., Hamzaoui, R., Ziyani, L., Alehyen S., (2024). Comparative Study of the Structural, Microstructural, and Mechanical Properties of Geopolymer Pastes Obtained from Ready-to-Use Metakaolin–Quicklime Powders and Classic Geopolymers. *Materials* Vol. 17, 4151. <https://doi.org/10.3390/ma17164151>
- Zhang, D., Sun, X., (2023). Efficiencies of Super-Plasticizer on Rheology Properties of Fly Ash-Based Alkali-Activated Materials with Different Ms Waterglass Activators. *Polymers*, Vol. 15, 2054. <https://doi.org/10.3390/polym15092054>
- Zhang, H., Wei, W., Shao, Z., Qiao, R., (2022). The investigation of concrete damage and recycled aggregate properties under microwave and conventional heating. *Construction and Building Materials*, Vol. 341, 127859. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127859>
- Zhang, J., Huang, Y., Ma, G., Yuan, Y., Nener, B., (2021). Automating the mixture design of lightweight foamed concrete using multi-objective firefly algorithm and support vector regression. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 121, 104103. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104103>
- Zhang, J., Ma, Y., Hu, J., Wang, H., Zhang, Z., (2022). Review on chloride transport in alkali-activated materials: Role of precursors, activators and admixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 328, 127081. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127081>
- Zhang, P., Feng, Z., Yuan, W., Hu, S., Yuan, P., (2024). Effect of PVA Fiber on Properties of Geopolymer Composites: A Comprehensive Review. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 29, 4086–4101. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.151>

- Zhang, W., Shi, D., Shen, Z., Shao, W., Gan, L., Yuan, Y., Tang, P., Zhao, Z., Chen, Y., (2023). Reduction of the calcium leaching effect on the physical and mechanical properties of concrete by adding chopped basalt fibers. *Construction and Building Materials*, Vol. 365, 130080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130080>
- Zhang, W., Zhang, Z., Yin, Y., Shi, C., Zhu, Y., Zhu, H., Jiang, Z., (2025). A Review of geopolymers for high-temperature and fireproof applications. *Materials Reports: Solidwaste and Ecomaterials*, Vol. 1, 9520010. <https://doi.org/10.26599/MRSE.2025.9520010>
- Zhang, X., Bai, C., Qiao, Y., Wang, X., Jia, D., Li, H., Colombo, P., (2021). Porous geopolymer composites: A review. *Composites: Part A* 150,106629. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106629>
- Zhang, X., Long, K., Liu, W., Li, L., Long, W., (2020). Carbonation and Chloride Ions' Penetration of Alkali-Activated Materials: A Review. *Molecules*, Vol.25, 5074. doi:10.3390/molecules25215074
- Zhang, Y.H., Zhong, W.L., Fan, L.F., (2024). Long-term durability investigation of basalt fiber-reinforced geopolymer concrete in marine environment. *Journal of Materials Research and Technology* 31, 593–605. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.078>
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid A., Wanga H., (2015). Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 62, 97–105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.013>
- Zhanga, P., Zhenga, Y., Wangb, K., Zhanga, J., (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortars. *Composites Part B*. Vol. 152, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031>
- Zhanga, S., Yuana, Q., Lic, Q., Zhanga, F., Xiea, Z., (2023). Microstructural characteristics of bonding interfacial transition zone of concrete and magnesium ammonium phosphate cement. *Journal of Building Engineering*. Vol. 76, 107208. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107208>
- Zhao, C., Li, Z., Peng, S., Liu, J., Wu, Q., Xu, X., (2024). State-of-the-art review of geopolymer concrete carbonation: From impact analysis to model establishment. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 20, e03124. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03124>

- Zheng, X., Zhao, C., Sun, X., Dong, W., (2024). Lunar Regolith Geopolymer Concrete for In-Situ Construction of Lunar Bases: A Review. *Polymers*, Vol. 16, 1582. . <https://doi.org/10.3390/polym16111582>.
- Zhou, J., Dong, Y., Qiu, T., Lv, J., Guo, P., Liu, X., (2025). The Microstructure and Modification of the Interfacial Transition Zone in Lightweight Aggregate Concrete: A Review. *Buildings*, Vol. 15, 2784. <https://doi.org/10.3390/buildings15152784>
- Zink, F., Vipperman, J. S., Schaefer, L. A., (2010). Environmental motivation to switch to thermoacoustic refrigeration. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, 119–126. doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.07.008
- Šimonová, H., Bazan, P., Kucharczyková, B., Kocáb, D., Łach, M., Mierzwinski, D., Setlak, K., Nykiel, M., Nosal, P., Korniejenko, K., (2024). Hybrid Geopolymer Composites Based on Fly Ash Reinforced with Glass and Flax Fibers. *Appl. Sci.*, Vol. 14, 9787. <https://doi.org/10.3390/app14219787>



ISBN: 978-625-378-433-1