

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**POMZA ESASLI GEOPOLİMER HAMURU İLE POMZA
AGREGASINDAN ÜRETİLEN HARÇLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİ VE REOLOJİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Hazırlayan
Enver KÜÇÜKYILDIRIM**

**Danışman
Prof. Dr. Okan KARAHAN
Prof. Dr. Burak UZAL**

Doktora Tezi

**Aralık 2024
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**POMZA ESASLI GEOPOLİMER HAMURU İLE POMZA
AGREGASINDAN ÜRETİLEN HARÇLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİ VE REOLOJİSİNİN ARAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Enver KÜÇÜKYILDIRIM**

**Danışman
Prof. Dr. Okan KARAHAN
Prof. Dr. Burak UZAL**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FDK-2022-11921 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Aralık 2024
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Enver KÜÇÜKYILDIRIM

İmza

“Pomza Esaslı Geopolimer Hamuru ile Pomza Agregasından Üretilen Harçların Mekanik Özellikleri ve Reolojisinin Araştırılması” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Enver KÜÇÜKYILDIRIM

İmza

Danışman

Prof. Dr. Okan KARAHAN

İmza

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Zülküf KAYA

İmza

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgisini ve emeğini esirgemeyen, çalışmalarına yön veren, sabır gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. Okan KARAHAN'a,

Yüksek lisans eğitimimden başlayıp doktora eğitim sürecimin her aşamasında yakın ilgi ve yardımlarıyla bana yol gösteren, deneyimleriyle beni aydınlatan ve bu günlere gelmemde büyük katkısı olan Sayın Prof. Dr. Burak UZAL'a,

Tezimle ilgili araştırmalarımdayaptıkları rehberlik ve öneriler için Tez İzleme Komite Üyesi olan Sayın Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ ve Sayın Doç Dr. Erkan YILMAZ'a,

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmama yardımcı olan, gerek psikolojik gerekse fiili yardımını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR ve Sayın Doç. Dr. Uğur DURAK'a,

Deneysel çalışmalarımdayardıma eden ve destek veren Sayın Ezgi ÖRKLEMEZ, Sayın Sümeyye ÖZUZUN ve Sayın Hediye YORULMAZ'a,

Bu tez çalışmasında maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FDK-2022-11921) teşekkür ederim.

Bu süreçte bana her zaman inanan, destekleyen ve sabırla yanımda olan sevgili eşim, oğlum ve çok değerli tüm aileme en içten şükranlarımı sunuyorum.

Enver KÜÇÜKYILDIRIM

Aralık 2024, KAYSERİ

POMZA ESASLI GEOPOLİMER HAMURU İLE POMZA AGREGASINDAN ÜRETİLEN HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE REOLOJİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Enver KÜÇÜKYILDIRIM

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Aralık 2024
Danışman: Prof. Dr. Okan KARAHAN

ÖZET

Bu çalışmada pomza tozu ve pomza agregası ile üretilen geopolimer numuneler için dayanım, içyapı ve reolojik özellikler araştırılmıştır. Aktivatör olarak bağlayıcı malzemenin ağırlıkça %10'u oranında Na^+ içerecek şekilde sodyum hidroksit (NaOH) ile sodyum hidroksitin (NaOH) kütlece 2,5, 3,0 ve 3,5 katı sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır.

Üretilen geopolimer numuneler havada kür edildikten sonra numunelerin birim ağırlığı, ultrasonik atımlı dalga hızları, eğilme ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Geopolimer hamur numunelerde, kütlece artan Na_2SiO_3 miktarının ekzotermik ısı yayılım hızı ve toplam reaksiyon ısısı üzerindeki etkisi izotermal kalorimetri yoluyla, reolojik özellikler üzerindeki etkisi ise reometre deneyleriyle incelenmiştir. Sertleşmiş geopolimer hamurların ağırlık kaybı termo-gravimetrik analizle, kütlece artan Na_2SiO_3 miktarının hamur numunelerin içyapısı üzerindeki etkileri ise SEM ve EDX analizleri ile incelenmiştir.

Hidratasyon sürecinin kütlece 2,5 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranına sahip pomza esaslı geopolimer hamurlarda görece daha erken başlamış olduğu belirlenmiştir. Kütlece 3,5 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranıyla hazırlanan hamur ve harç numunelerin 28. günlük basınç dayanımının 2,5 ve 3,0 oranla hazırlanan numunelere kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca taze geopolimer hamurlarda $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranındaki artışla birlikte hem akma gerilmelerinin hem de viskozitelerinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pomza; geopolimer; dayanım; reoloji.

**INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND RHEOLOGY OF
MORTARS PRODUCED WITH PUMICE-BASED GEOPOLYMER PASTE
AND PUMICE AGGREGATE**

Enver KÜÇÜKYILDIRIM

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, December 2024

Supervisor: Prof. Dr. Okan KARAHAN

ABSTRACT

In this study, the strength, microstructure and rheological properties of geopolymers produced with pumice powder and pumice aggregate were investigated. Sodium hydroxide (NaOH) containing 10% Na⁺ by weight of the binder material and sodium silicate (Na₂SiO₃) containing 2.5, 3.0 and 3.5 times the sodium hydroxide by mass were used as activators.

After air curing, the unit weight, ultrasonic pulse velocity, flexural strength, and compressive strength of the geopolymer samples were determined. For geopolymer pastes, the effect of increasing Na₂SiO₃ content by weight on the rate of exothermic heat release and total reaction heat was examined using isothermal calorimetry, while its effect on rheological properties was analyzed through rheometer tests. The weight loss of hardened geopolymer pastes was evaluated using thermogravimetric analysis (TGA), and the effects of increasing Na₂SiO₃ content on the microstructure of paste samples were investigated using SEM and EDX analyses.

It was determined that the hydration process began relatively earlier in pumice-based geopolymer pastes with a Na₂SiO₃/NaOH ratio of 2.5 by mass. The paste and mortar samples prepared with a Na₂SiO₃/NaOH ratio of 3.5 by mass exhibited higher 28-day compressive strength values compared to those with ratios of 2.5 and 3.0. Additionally, a significant increase in both yield stress and viscosity was observed in fresh geopolymer pastes with increasing the Na₂SiO₃/NaOH ratio.

Keywords: Pumice; geopolymer; strength; rheology.

İÇİNDEKİLER

POMZA ESASLI GEOPOLİMER HAMURU İLE POMZA AGREGASINDAN ÜRETİLEN HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE REOLOJİSİNİN ARAŞTIRILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
KISALTMALAR.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Pomza.....	4
1.1.1. Pomzanın Sınıflandırılması.....	6
1.1.2. Pomzanın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	7
1.1.3. Pomza Rezervi.....	8
1.1.4. Pomza Kullanım Alanları.....	9
1.2. Geopolimer.....	10
1.2.1. Geopolimerlerin Kimyası.....	10
1.2.2. Geopolimerlerin Alkali Aktivasyon Süreci.....	11
1.3. Reoloji.....	13
1.3.1. Viskozite.....	14
1.3.2. Akma Gerilimi.....	16
1.3.3. Zamana Bağlılık.....	17
1.3.4. Viskoelastisite.....	18
1.4. Literatür Özeti.....	18

2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler.....	30
2.1.1. Pomza	30
2.1.2. Alkali Aktivatör.....	32
2.1.2.1. Sodyum Hidroksit (NaOH).....	32
2.1.2.2. Sodyum Silikat (Na ₂ SiO ₃).....	32
2.1.3. Agrega	33
2.1.4. Su	33
2.2. Numunelerin Üretimi.....	33
2.2.1. Hamur Numunelerin Üretimi	33
2.2.2. Harç Numunelerin Üretimi	35
2.3. Deneysel Çalışmalar	36
2.3.1. Geopolimer Hamur Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler	36
2.3.1.1. Birim Ağırlık Deneyi.....	36
2.3.1.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini Deneyi.....	37
2.3.1.3. Basınç Dayanım Deneyi	38
2.3.1.4. İzotermal Kalorimetre Deneyi	39
2.3.1.5. Reometre Deneyi	40
2.3.1.6. Termogravimetrik Analiz Deneyi.....	40
2.3.1.7. Sem ve EDX Analizi.....	41
2.3.2. Geopolimer Harç Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler	42
2.3.2.1. Eğilme Dayanımı Deneyi	42
2.3.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi.....	42
2.3.2.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini Deneyi.....	43
2.3.2.4. Birim Ağırlık Deneyi.....	43

3. BÖLÜM

BULGULAR - TARTIŞMA

3.1. Hamur Numuneler Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları.....	44
3.1.1. Birim Ağırlık Deney Sonuçları	44
3.1.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini Deney Sonuçları.....	45
3.1.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	45
3.1.4. İzotermal Kalorimetre Deney Sonuçları.....	46

3.1.5. Reometre Deney Sonuçları.....	47
3.1.6. Termogravimetrik Analiz Deney Sonuçları.....	50
3.1.7. Sem ve EDX Analiz Sonuçları.....	51
3.2. Harç Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler	53
3.2.1. Birim Ağırlık Deney Sonuçları	53
3.2.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini Deney Sonuçları.....	55
3.2.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	55
3.2.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	56

4. BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar	58
4.1.1. Hamur Numuneler Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları.....	58
4.1.2. Harç Numuneler Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları	59
4.2. Öneriler	60
KAYNAKÇA	61
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

ASTM	Amerikan Test ve Materyal Topluluğu
EN	Avrupa Normu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
g/cm ³	Gram/santimetreküp
MPa	Mega Paskal
N/mm ²	Newton/milimetrekare
Na ⁺	Sodyum
NaOH	Sodyum Hidroksit
TS	Türk Standartları
XRD	X Işını Kırınım Yöntemi
XRF	X Işını Floresans Spektrometresi
PM	Pomza
Na ₂ SiO ₃	Sodyum Silikat
TGA	Termogravimetrik Analiz

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Asidik pomza ve bazik pomzanın kimyasal bileşimleri .	6
Tablo 1.2.	Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel fiziksel özellikleri.....	7
Tablo 1.3.	Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel kimyasal özellikleri	8
Tablo 2.1.	Pomza tozunun kimyasal kompozisyonu (%).....	31
Tablo 2.2.	Sodyum hidroksit (NaOH) kimyasal analiz sonuçları	32
Tablo 2.3.	Sodyum silikat (Na ₂ SiO ₃) kimyasal analiz sonuçları	32
Tablo 2.4.	Pomza agregası elek analiz sonuçları	33
Tablo 2.5.	Hamur karışım oranı	35
Tablo 2.6.	Harç karışım oranı	36
Tablo 3.1.	Farklı yaşlardaki hamur numunelerinin birim ağırlık değerleri (t/m ³)	44
Tablo 3.2.	Farklı yaşlardaki hamur numunelerinin ultrasonik dalga hızları değerleri (km/s).....	45
Tablo 3.3.	Hamur numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları (MPa)	46
Tablo 3.4.	Farklı yaşlardaki harç numunelerinin birim ağırlık değerleri (t/m ³).....	54
Tablo 3.5.	Farklı yaşlardaki harç numunelerinin ultrasonik dalga hızları değerleri (km/s).....	55
Tablo 3.6.	Harç numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçları (MPa).....	55
Tablo 3.7.	Harç numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları (MPa).....	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Volkanlar ve ilişkili diğer jeolojik süreçlerin genel bir modeli	5
Şekil 1.2.	Pomza agregasının gözenekli yapısı	6
Şekil 1.3	Asidik ve bazik pomza.....	7
Şekil 1.4	Dünya pomza rezervinin başlıca ülkelere göre dağılımı	9
Şekil 1.5.	Geopolimer yapısı.....	11
Şekil 1.6.	Farklı Si/Al oranlarına sahip geopolimerin yapısal birim modeli	13
Şekil 1.7.	İki plakalı model	15
Şekil 1.8.	Tipik Reolojik davranışlar: (1) Newton tipi akışkan, (2) görünüşte plastik (kayma incelmesi), (3) Plastik, (4) Dilatant-genleşen sıvı, (5) Bingham akışı.....	17
Şekil 1.9.	Kesme hızına karşı viskozite	18
Şekil 2.1.	Pomza tozu XRD deseni	31
Şekil 2.2.	Karıştırma mikseri	34
Şekil 2.3.	Hamur numunelerin kalıplara yerleştirilmesi	34
Şekil 2.4.	Harç numunelerin kalıplara yerleştirilmesi.....	36
Şekil 2.5	Ultrasonik atımlı dalga hızının belirlenmesi.....	37
Şekil 2.6.	Basınç dayanımı deney cihazı.....	38
Şekil 2.7.	İzotermal kalorimetre cihazı	39
Şekil 2.8.	Reometre cihazı, ölçüm kabı ve karıştırıcı başlık.....	40
Şekil 2.9.	Termogravimetrik Analiz (TGA) cihazı	41
Şekil 2.10.	SEM cihazı.....	41
Şekil 3.1.	Farklı yaşlardaki hamur numunelerinin birim ağırlığı grafiği	45
Şekil 3.2.	Farklı yaşlardaki hamur numunelerinin basınç dayanımı grafiği	46
Şekil 3.3.	Pomza bazlı geopolimer hamurların hidrasyon oranı	47
Şekil 3.4.	Pomza bazlı geopolimer hamurların toplam reaksiyon ısısı.....	47
Şekil 3.5.	Akma gerilimi-akma hızı eğrileri	49
Şekil 3.6.	Logaritma ölçeğinde depolama modülü-akma gerilmesi grafiği.....	49
Şekil 3.7.	1 gün kür edilen pomza bazlı geopolimer hamurun ağırlık kaybı (%)	51
Şekil 3.8.	3 gün kür edilen pomza bazlı geopolimer hamurun ağırlık kaybı (%)	51

Şekil 3.9.	2,5 oranlı 1 günlük (a), 3 günlük (b), 28 günlük (c); 3 oranlı 1 günlük (d), 3 günlük (e), 28 günlük (f); 3,5 oranlı 1 günlük (g), 3 günlük (h), 28 günlük (i) SEM görüntüleri.....	52
Şekil 3.10.	28 günlük EDX sonuçları 2,5 (a)-3,0 (b)-3,5(c) oranlı.....	52
Şekil 3.11.	Farklı yaşlardaki harç numunelerinin birim ağırlığı grafiği	54
Şekil 3.12.	Farklı yaşlardaki harç numunelerinin eğilme dayanımı grafiği.....	56
Şekil 3.13.	Farklı yaşlardaki harç numunelerinin basınç dayanımı grafiği	57



GİRİŞ

Yaşanan iklim değişikliğinin etkileri gün geçtikçe artarak devam etmektedir. Bu artışın en önemli sebebi arasında CO₂ emisyonlarındaki artış gösterilebilir. Beton endüstrisi küresel ısınmaya sebep olan temel faktörler arasında yer almaktadır. Beton agrega, çimento ve su karışımından oluşan yapay bir malzemedir. Betonda bağlayıcı malzeme olan Portland çimentosuyla ilişkilendirilebilir. Karbon emisyonunun fazla olduğu sektörler arasında çimento sektörü gelmektedir. Çimento üretiminde ortaya çıkan emisyonun %67'si kalsinasyon sürecinde, %37'si ise kalsinasyon olabilmesi için gerekli yakıtlardan kaynaklanmaktadır [1]. 2010 yılında çimento üretiminden kaynaklanan 1,25 Gt CO₂ emisyonu, 2021 yılında gelindiğinde 1,67 Gt olmuştur. 2021 yılında çimento üretiminden kaynaklı CO₂ emisyonu en yüksek olan ülke %51 (853 milyon ton) ile Çin olmuştur. Ülkemiz ise bu sıralamada %2,6 ile dünyada 5'inci sırada yerini almıştır [2]. Bu nedenlerden dolayı çimento üretiminde ortaya çıkan karbon salınımını azaltmak adına hem alternatif hammadde ve hem de alternatif yakıt arayışına girilmiştir.

Geleneksel betona kıyasla geopolimer betonda, enerji maliyeti ve beton içerisindeki çimentodan kaynaklı karbon salınımını büyük ölçüde azaltmasının yanında, uçucu kül ve cüruf gibi yan ürünlerden yararlanılarak inşaat sektöründe sürdürülebilir gelişim potansiyeli bulunmaktadır [3].

Huntzinger ve Eatmon (2009) yaptıkları çalışmada, Portland çimentosu ve farklı teknolojilerle üretilen bağlayıcıların çevre sorunlarına etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmayla bağlayıcıların “küresel ısınma faktörü” incelemiştir [4]. Bu incelemede, bağlayıcıların üretim yöntemleri sırasıyla katkılı çimento (doğal puzolanlar), çimento üretimi esnasında ortaya çıkan tozlar (yan ürünler) ile bağlayıcı üretilmesi ve çimento üretiminde CO₂ üretimine neden olan aşamaların azaltılması ile üretilen çimentolardır. Bu üretim yöntemleri arasında çimento yerine farklı oranlarda doğal puzolan ikamesiyle

üretilen bağlayıcıların küresel ısınma faktörünün azaltılması noktasında en etkili yöntem olduğu belirlenmiştir.

Mineral katkı malzemelerinin çimento veya betondaki kullanım oranının mümkün olduğu kadar yüksek olmasının bahsedilen yararı artıracığı açıktır. Ancak mineral katkı malzemeleri, özellikle de doğal puzolanlar, bağlayıcı sistemlerin su ihtiyacını artırdığından ve dayanım kazanma hızlarını düşürdüğünden dolayı, bu malzemelerin çimento veya betondaki kullanım miktarları sınırlı kalmaktadır [5].

Beton üretiminde geopolimer bağlayıcıların kullanılması, alternatif eko-verimli bir malzeme sunarken, çimentonun devre dışı bırakılmasıyla da karbon emisyonunun azaltılması bakımından oldukça önemli bir rol oynamaktadır [6].

Mart 2021'den bu yana Ülkemizin de tarafı olduğu Paris İklim Anlaşması uzun vadede sıcaklık hedefini, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerden; 2 °C (3,6 °F) civarlarından artış seviyesini 1,5 °C civarlarında tutmayı hedeflemektedir. Bu anlaşma uyarınca her ülke kendisine karbon salım konusunda hedef belirleyip, her yıl bu belirlenen bu hedeflerden daha iyi durumda olması gerekmektedir. Çevresel etkileri en aza indiren yeşil yapı malzemesi olarak pomza esaslı geopolimer kullanımı hedeflenmiştir.

Portland çimentosu ile geopolimerleri karşılaştırdığımızda, geopolimerlerin daha hızlı basınç dayanımı kazandığı, geopolimerik yapıda bulunan ağır metal iyonları sayesinde asit saldırılarına karşı direncin daha iyi olduğu belirtilmektedir [7-8]

Hafif agrega içeren ve alkali ile aktifleştirilmiş geopolimer malzemelerin üretilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır [9]. Posi ve ark [10] geri dönüşümlü hafif blok agregası içeren geopolimer betonla ilgili çalışmalar yapmışlardır. Huiskes ve ark [11] ise polietilen malzemeyi agrega olarak hafif geopolimer beton üretmişlerdir. Ayrıca bazı çalışmalarda da, uçucu kül ile metakaolin [12] veya palmye kabuğu [13] ikame edilerek geopolimer beton yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda hafif agreganın kimyasal bileşimi ve fiziksel özelliği yeni oluşan malzeme üzerinde etkisinin oldukça fazla olduğu belirlenmiştir. Wongsu ve ark [14] ise uçucu kül ve pomza agregasıyla hazırlanan hafif geopolimer betonun ısı yalıtım malzemesi olarak daha uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada alkali ile aktive edilmiş sistemlerin mekanik, içyapı ve reolojik özellikleri araştırılmıştır. Laboratuvar koşullarında kür edilen pomzanın, çimentodan kaynaklı karbon salınımını büyük ölçüde azaltmasının yanında sürdürülebilir gelişim potansiyeli olan geopolimerlerin oluşturulması amaçlanmıştır. Alkali ile aktive edilen sistemlerin özelliklerini reolojik açıdan, hem de içyapılarının termal analiz ve SEM görüntüleriyle belirlemek ve belirli düzeyde hafif ve ısı yalıtım niteliği olan yapı malzemeleri sağlayarak sürdürülebilir yeşil bir bağlayıcı sistem oluşturulmaya çalışılmıştır.



1. BÖLÜM

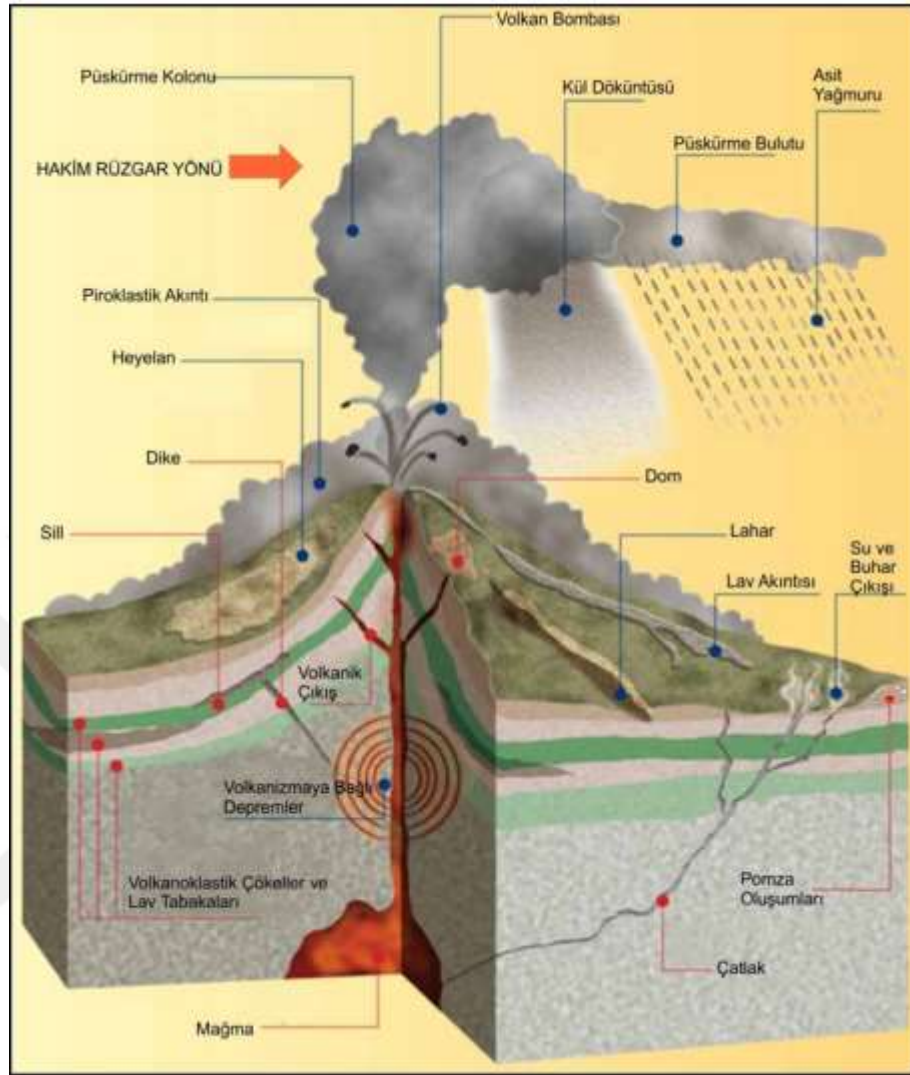
GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Pomza

Pomza, birbiriyle bağımsız boşlukları bulunan, sünger görünümlü, içeriğinde silikat oranı yüksek, genel olarak birim hacim ağırlığı 1 g/cm³'ten küçük, sertlik verileri ise Mohs skalasına göre 5-6 olan, camsı yapıya sahip volkanik olaylar neticesinde oluşan bir kayadır [15].

Değişik dillerde pomza farklı farklı adlandırılmaktadır. Fransızca 'da "Ponce", İngilizce' de iri taneli olana "Pumice", ince taneli olana "Pumicite", denilmekte iken Türkçe' de ise süngertaşı, köpüktaşı, kisir, kiveki taşı gibi yöresel isimler kullanılmaktadır [16].

Volkanlarda basıncın artmasıyla patlama şeklinde magmadaki erimiş gazlar ve asidik malzemeler *Şekil 1.1'* da gösterildiği gibi volkan bacasından püskürtülür. Püskürme sırasında oluşan ani basınç ve ani genleşmeler uçucu bileşenlerin uzaklaşmasını sağlar. Uzaklaşan bileşenleri takiben geride kalan erimiş parçacıkların havaya temas etmesi sonucunda ise boşluklu yapıya sahip pomza oluştuğu belirtilmiştir [17].



Şekil 1.1. Volkanlar ve ilişkili diğer jeolojik süreçlerin genel bir modeli [17].

Pomza volkanik kökenli kayaç olduğundan, magma hava ile temas ettiğinde ani soğuma sonucunda pomza da gözenekli yapı oluşur. Makro boyutlarda oluşan gözenekler birbiri ile temas halinde olmayıp bağımsız davranış gösterirler. Bu durum pomza agregasını ısı ve ses yalıtımını bakımından öne çıkarmaktadır [16]. Pomza agregasına ait gözenekli yapılar Şekil 1.2' de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Pomza agregasının gözenekli yapısı [18].

1.1.1. Pomzanın Sınıflandırılması

Pomza, oluşumu açısından magmanın ani soğuması ve gazların hızla terk etmesi sonucu oluştuğundan boşluklu bir yapıdadır. Magmanın yapısı pomza türünü de belirlemektedir. Bu durumda, asidik magmanın ani ve hızlı soğuması sonucu asidik pomza, bazik magmanın ani ve hızlı soğuması sonucu da bazik pomza oluşur. Asidik magmanın yoğunluğu bazik magmaya göre düşük olduğundan, oluşan asidik pomzanın yoğunluğu da bazik pomzadan düşüktür. Asidik pomza beyaz veya gri renkte iken bazik pomzalar kahverengi veya siyah renktedirler. Asidik pomzaların yoğunluğu $0,35-1 \text{ g/cm}^3$ aralığında iken bazik pomzaların yoğunluğu $1-2 \text{ g/cm}^3$ aralığında değişmektedir. Asidik pomzalar yüksek silis içermesinden ötürü açık renkli olduğu belirtilmektedir [18]. Tablo 1.1' de pomza türlerinin kimyasal içerikleri ve Şekil 1.3'de asidik ve bazik pomza sunulmuştur.

Tablo 1.1. Asidik pomza ve bazik pomzanın kimyasal bileşimleri [19].

Kimyasal İçerik	Asidik Pomza (%)	Bazik Pomza (%)
SiO ₂	70	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2,5	7
CaO	0,9	11
MgO	0,6	7
Na ₂ O+K ₂ O	9	8
Kızdırma Kaybı	3	1



Şekil 1.3. Asidik ve bazik pomza [20][35].

1.1.2. Pomzanın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Ülkemizde bulunan pomza kayaçlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1.2 ve Tablo 1.3 'de sunulmuştur [21].

Tablo 1.2. Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel fiziksel özellikleri

Renk	Açık griden, kirli beyaza
Kristal şekli	Amorf
Kristal suyu	Yok
Sertlik (MOHS)	5,5-6,0
K.B. Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	0,32-0,97
Porozite (%)	45-90
Rötre (mm/m)	< 1
Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0,08-0,20
Isınma Isısı (cal/gr.°C)	0,24-0,28
Ses Yalıtımı (dB)	40-55
Su Emme (ağırlıkça %)	30-70
Buhar Diffüzyon Katsayısı	5-10

Tablo 1.3. Ülkemizdeki pomza kayaçlarının genel kimyasal özellikleri

pH	7-7,3
Radyoaktivite	Yok
Suda çözünen madde miktarı (Ağırlıkça %)	≤
Asitte çözünen madde miktarı (Ağırlıkça %)	≤2,9
Uçucu madde (Ağırlıkça %)	Yok
Asitlerle etkileşim (*)	İnert
Alevlenme derecesi (°C)	Yok
Ergime derecesi (°C)	>900
(*) Pomza sadece hidroflorik asit ile etkileşerek toksik silikon tetraflorit gazı çıkarır.	

1.1.3. Pomza Rezervi

Yapılan araştırmalar neticesinde Dünya’da 18 milyar ton pomza rezervi bulunduğu ve ülkelere göre dağılımı Şekil 1.4’ da gösterilmektedir. Dünya’ da en fazla pomza rezervi bulunan başlıca ülkeler ABD, Türkiye ve İtalya’dır. Dünya pomza rezervinin %15,8 ‘i yani 2.834 milyon tonu Ülkemizde bulunmaktadır. Bu durum Ülkemizi önemli pomza üreticilerinden biri haline getirmiştir [17]. Ülkemizde bulunan pomza rezervinin neredeyse %50’si Nevşehir ilinde bulunurken kalan kısmı ise İç Anadolu Bölgesinde bulunan Kayseri ve Konya’da, Doğu Anadolu Bölgesinde bulunan Bitlis, Van ve Ağrı ‘da, Akdeniz Bölgesinde Osmaniye’de, Ege Bölgesinde ise Manisa ve İzmir gibi Ülkemizin farklı bölgelerine yayılmış vaziyette bulunmaktadır. Her bölgeden farklı kalitede ve farklı özellikte pomza bulunduğu için, bölgelerdeki pomza kaynaklı sektörel gelişim de buna göre değişiklik göstermektedir. Özellikle Nevşehir ilinden çıkarılan pomza, beyaz renkli ve asidik özelliğinin yanı sıra yüksek kaliteli olması ve ulaşım sorunu olmamasından kaynaklı oldukça yoğun talep görmektedir [22].



Şekil 1.4. Dünya pomza rezervinin başlıca ülkelere göre dağılımı

1.1.4. Pomza Kullanım Alanları

Volkanik olaylar sonucu oluşan pomza türlerine göre çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Genellikle inşaat sektöründe kullanılmasının yanında, tarım, tekstil, kimya gibi sektörlerde de kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe genellikle asidik pomza kullanılmaktadır. Asidik pomza hem hafif hem de silisyum içeriği bakımından zengin olduğu için tercih edilmektedir. Hafif olması bina ağırlığını azalttığı için, depreme kaynaklı oluşabilecek yatay ve düşey deprem yüklerini emici özellik göstermektedir. Boşluklu yapıda olmasından dolayı da ısı ve ses yalıtımında faydalar sağlamaktadır [22].

Tarım sektöründe ise daha çok magnezyum, alüminyum ve demir gibi bileşenler barındıran bazik pomza tercih edilmektedir. Su tutma kapasitesi yüksek olduğu için kuraklık sorunu çözümlerine etkili rol oynamaktadır [22].

Kimya sektöründe ise deterjan, sabun, izolatif boya vb. ürünlerin üretiminde katkı maddesi olarak yer almaktadır. Tarım ilaçlar ve kibrit sanayinde taşıyıcı olarak, gübre sanayinde ise topaklaşmanın önlenmesine yardımcı olarak kullanılmaktadır [17].

Cam, metal ve plastik sanayi, yağ filtreleme gibi sektörler de de kullanılmaktadır. Asfalt yollarda buzlanmaya karşı tedbir, akaryakıttan kaynaklı çevre kirliliğini bertaraf etmede

ise süper emici özelliği yardımıyla kullanımı sağlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı yüksek olduğundan mangal ve ızgaralarda yer almaktadır [22].

1.2. Geopolimer

Beton endüstrisinin küresel ısınmaya sebep olan temel faktörler arasında yer aldığı belirtilmektedir. Bu durum bağlayıcı malzeme olan Portland çimentosuyla ilişkilendirilebilir. Bu nedenle çevresel sürdürülebilirlik açısından çimentoya alternatif olarak bağlayıcı özelliği olan ve ekonomik ürünler bulma yolunda araştırmalara yoğunlaşmıştır.

Çimento üretimi sırasında atmosfere salınan sera gazının etkisinin azaltılmasıyla hem ekonomik hem de çevre dostu bir ürün olan geopolimer kullanımı bu tür kısıtlamaları ortadan kaldıracaktır. Bu nedenle araştırmacılar yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi puzolanik malzemeleri kullanarak yeni bir bağlayıcı arayışına girmişlerdir [23]. Bu nedenle bünyesinde reaktif Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO amorf malzemelerin alkali çözeltiler ile reaksiyonu sonucunda inorganik polimerik yapıya sahip bağlayıcı sistemlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır [24].

1979 yılında Joseph Davidovits' in geopolimer olarak adlandırdığı, çeşitli aktivatörler yardımıyla muhteviyatında Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 ve CaO gibi elementleri bulduran puzolanik malzemelerden bağlayıcı malzeme üretimi olarak tanımlanmıştır [25]. Geopolimerler yardımıyla oluşturulan bağlayıcılık ile portland çimentosu üretiminden kaynaklı hem %60 enerji tasarrufu hem de 5 kat daha az CO_2 salınımı gerçekleşmektedir [26]. Geopolimerleşme reaksiyonu silisyum, alüminyum ve alkali aktivatörlerden oluşan çözeltili ortamda başlar [27]. Geopolimerlerin dayanım/dayanıklılık gibi özellikleri içerisinde bulunan silisyum/alüminyum oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [28]. Portland çimentosu ile geopolimerleri karşılaştırdığımızda, geopolimerlerin daha hızlı basınç dayanımı kazandığı, geopolimerik yapıda bulunan ağır metal iyonları sayesinde asit saldırılarına karşı direncin daha iyi olduğu belirtilmektedir [7-8].

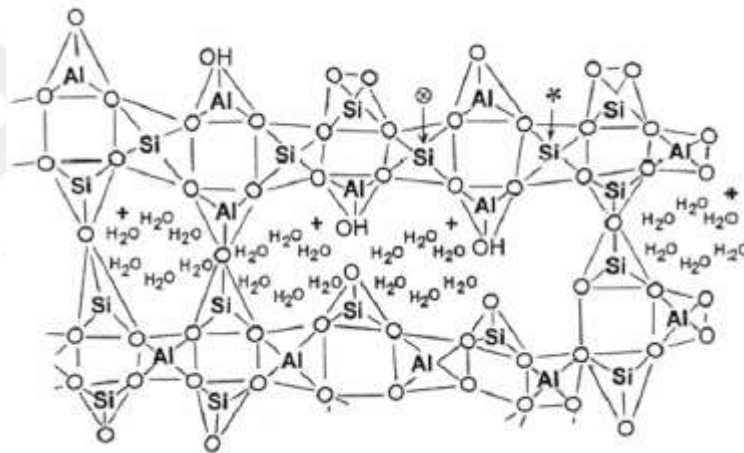
1.2.1. Geopolimerlerin Kimyası

Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda "Geopolimer" adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimer oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu

sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır [24][19]. Alüminosilikat ağı, SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral yapısal biriminin oksijen atomunun paylaşılmasıyla oluşur. Alüminyumun negatif iyon yükünü dengede tutabilmek için Na^+ , K^+ , Ca^{+2} gibi pozitif iyonlu yapılar bulunmalıdır [29-30].

Geopolimerizasyon mekanizması 3 aşamada gerçekleştiği belirtilmiştir. Bunlar, 1- alkali çözeltinin bağlayıcı malzemeyi çözmesi, 2- çözülmüş türlerin birbiriyle uyumu, 3- polimerik ağ yapılarının oluşumu için polikondenzasyon aşamalarından oluşur [31].

Oluşan geopolimerin mukavemeti organik polimer malzemelere çok benzeyen Şekil 1.5' de gösterildiği gibi -Si-O- ve -Al-O- birimlerinin polimerizasyonundan elde edilirken geopolimer tipik olarak amorf veya kısmen kristalleşir.



Şekil 1.5. Geopolimer yapısı

1.2.2. Geopolimerlerin Alkali Aktivasyon Süreci

Geopolimer üretiminde iki çeşit puzolan kullanılmaktadır. Bunlardan yapay puzolan kullanımı depolanması ve yok edilmesi zor olan endüstriyel atıkların, çevreye zarar vermeden bertaraf edilip ekonomiye kazandırılması açısından çok önemlidir. Geopolimerler de bağlayıcı olarak en çok kullanılan puzolanik malzemeler aşağıda sunulmuştur [32].

- 1- Uçucu kül
- 2- Yüksek fırın cürufu

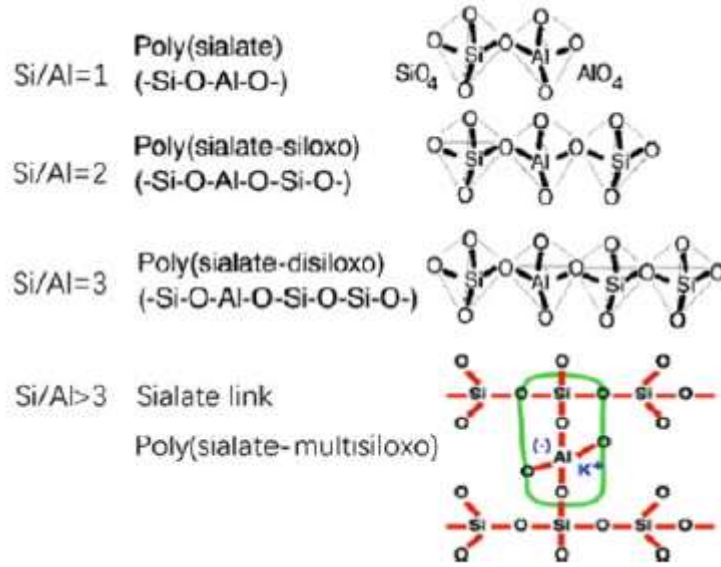
- 3- Metakaolin
- 4- Kaolinit killer
- 5- Pirinç kabuğu külü
- 6- Silis dumanı
- 7- Kırmızı çamur
- 8- Pomza

Yukarıda belirtilen malzemeleri aktifleştirmek için en çok kullanılan aktivatör türleri ise; KOH (potasyum hidroksit), NaOH (sodyum hidroksit), sodyum karbonat, $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ (sodyum silikat) (cam suyu) ve $n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$ (potasyum silikat) karışımlarıdır [32]. Bu aktivatörler geopolimer üretimi sırasında katı veya sıvı olarak karışıma eklenebilmektedirler.

James Whiting 1895 yılında cüruf, sönmüş kireç ve kostik soda karışımından elde edilen malzemenin çimento benzeri bağlayıcı özellik gösterdiği ile ilgili patent almıştır. Bu patentte karışıma eklemiş olduğu kostik sodanın %2 oranında kullanıldığında priz süresini azaltarak basınç dayanımına da pozitif etkisinin olduğunu belirtmiştir [33].

Alkali ile aktive olan geopolimer sistemler aşağıdaki gibi sınıflandırılır [7];

- 1- Hammaddenin cinsine göre sınıflandırma: Örneğin uçucu kül bazlı geopolimer, cüruf bazlı geopolimer gibi.
- 2- Geopolimer monomerindeki AlO_4 ve SiO_4 birimlerinin miktarına (Si/Al oranı) göre sınıflandırma: Davidovits'e göre geopolimerler *Şekil 1.6'* de gösterildiği gibi dört kategoriden oluşur. Si/Al= 1 olduğunda poli(sialate), Si/Al= 2 olduğunda poli(sialate-siloxo), Si/Al= 3 olduğunda poli(sialate-disiloxo) ve Si/Al > 3 olduğunda poli(sialate-multisiloxo) bağları oluşur.



Şekil 1.6. Farklı Si/Al oranlarına sahip geopolimerin yapısal birim modeli [7][5].

- 3- Aktivasyon iyonlarına göre sınıflandırma: Örneğin Na bazlı geopolimer, K bazlı geopolimer gibi.

1.3. Reoloji

Reoloji terimi eski Yunanca 'da Rheı ve Rheo kelimelerinden türetilmiştir. Bu kelimeler akış anlamındadır [34]. Bu yüzden reoloji akış ve deformasyon bilimi olarak nitelendirilmektedir. En önemli değişkenler parametrelerden olan kuvvet, sapma ve hız parametrelerini fizik, matematik ve malzeme biliminden almaktadır. Reoloji, malzemelerin üretim süreçlerini anlama ve kontrol etme noktasında hem bilimsel hem de teknolojik alanlarda uzun zamandır kullanılmaktadır. Reolojik araştırmalarla malzemenin deformasyona ve akışa karşı tepkisi belirlenmektedir. Reolojik deneyler sadece sıvıların akış davranışı hakkında değil, aynı zamanda katıların deformasyon davranışı hakkında da bilgi vermektedir. Kesme kuvvetleri sonucunda oluşan deformasyon birçok malzemenin akmasında neden olmaktadır. Kesme davranışları sıvıların viskozitesi ve akışı ile katıların elastikiyet ve deformasyonları reoloji deneyleriyle tespit edilebilmektedir. Sıvılar, katı malzemelerin aksine deformasyon üreten enerjii dağıttığı için dış kuvvet ortadan kalktığında başlangıç durumuna geri dönemediğinden akışkan malzemeyi ifade etmektedir. Katılar da ise dış kuvvete maruz kalındığında malzeme enerjii emer ve uygulanan gerilme ortadan kalktığında da malzeme rahatsız olmayan şekillerine geri

dönmektedir. Bu durumda enerji, şeklin değiştirilmesi veya ısı üretme gibi farklı şekillerde harcanmaktadır [35]. Viskoelastik sistemlerde ise deformasyonlar kısmen geri dönüşümlü kısmen geri dönüşümlü değildir. Bu durum reolojik yönetimin endüstriyel süreç için malzemelerin karmaşık durumunu ortadan kaldırmaya yardımcı olmaktadır [36].

Reolojinin sözlük anlamı; deformasyon ve madde akışının incelenmesi olarak tanımlanmıştır. Ancak bu tanım reoloji kelimesini tam olarak açıklamamaktadır. Aşağıda reoloji kelimesinin farklı tanımları da sunulmuştur:

- Reoloji, kuvvet ve deformasyon arasındaki herhangi bir ilişki ile tanımlanan özelliklere sahip malzemelerin incelenmesidir.
- Reoloji, deformasyonu viskoz ve elastik etkilerin üst üste binmesine neden olan malzemelerle ilgilidir.

Reoloji katı, sıvı ve ara formda olan farklı malzemelerin mekanik performansını araştıran bilim dalıdır. Malzemelerin temel davranışsal özelliklerini temsil eden modeller elde etmeyi amaçlamaktadır. Malzemenin davranışının kuvvetler ve şekil değişiklikleri ile ilişkisi bulunmaktadır [37].

1.3.1. Viskozite

Tüm akan sıvılarda moleküller birbirleri arasında hareket göstererek iç sürtünme kuvvetleri ile birleşmektedir. Bu nedenle tüm hareket halindeki tüm sıvılar için, viskozite açısından belirlenebilen belirli bir akış direnci meydana gelmektedir. Bu durumda viskozite, akışkanın akmaya karşı göstermiş olduğu iç direnç olarak da tanımlanmaktadır. Reolojideki viskozite açıklamasını *Şekil 1.7'* de iki plakalı model kullanarak açıklamak daha uygundur. Plakalara yapışma gösterdiği kabul edilen numune iki paralel yüzey arasına yerleştirilir. Numunenin akışı sadece katmanlar arasında olduğu çalkantılı bir akışının olmadığı kabul edilerek reolojik parametrelerin doğruluğu kabul edilebilir. Numune üzerindeki basıncı önlemek için üst yüzeye F kuvveti plakalara paralel olarak uygulanır.



Şekil 1.7. İki plakalı model

$$\sigma = F/A;$$

Burada;

σ (τ): Kesme gerilimi,

A: birim alanı,

F: Birim alan başına uygulanan kuvvet olarak tanımlanır.

Numune dengedeki iç sürtünme kuvveti uygulanan dış kuvveti dengelediğinde, hızlanan üst yüzeyin hareketi, sabit bir V_{max} hızına ulaşana kadar başlangıç aşaması olarak değerlendirilmektedir. Mikroskobik ölçekte bile herhangi bir sıvının hareketi, sonsuz küçük katmanları birbirine kaydırarak başladığından kesme hızı belirlenebilir.

$$\dot{\gamma} = V_{max}/h$$

Burada;

V_{max} : hareketli yüzeyin hızı,

h: paralel tabakalar arasındaki mesafe,

$\dot{\gamma}$: hız gradyanı olarak tanımlanır.

Kesme hızı akış hızı ile ilişkilidir. Dinamik viskozite kesme geriliminin kesme hızına oranı olarak açıklanmaktadır.

$$\eta = \sigma / \dot{\gamma}$$

Viskozite malzeme için karakteristik bir özellik değildir. Çeşitli değişken parametrelerin etkisi ile viskozitede değişiklikler olmaktadır. Malzemeler Newton ve Newton olmayan sıvılara ayrılmaktadır. Newton sıvılar, farklı kesme hızlarına göre viskozitesi değişmeyen ve malzemenin matrisini etkileyebilecek parametreleri sabit olan malzemelere denilmektedir. Newton olmayan sıvılarda ise diğer parametreler sabit kalırken malzemenin matrisinde kesme hızındaki değişikliğe dayanarak aşağıdaki gibi karakterize edilmektedir.

- Kesme incilmesi, artan kesme hızı ile viskozitede gözlenen azalmanın olduğu matrisi ifade ederken,
- Kesme kalınlaşması ise, artan kesme hızı ile viskozitede gözlenen artışın olduğu matrisi ifade etmektedir.

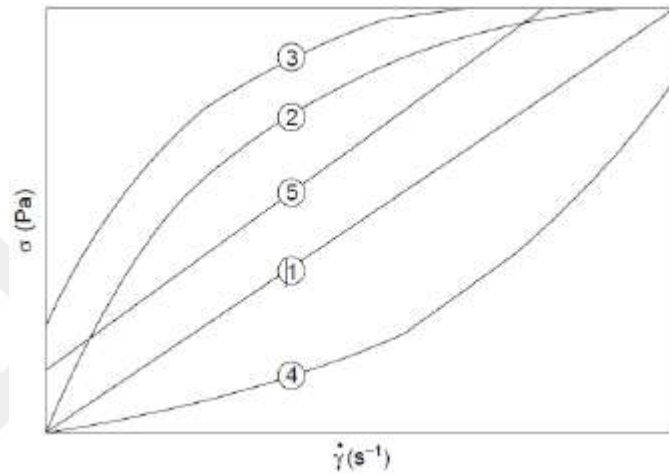
Bu tür malzemelerin viskozitesi sabit olmadığı için, malzemelerin viskozitesi “görünür viskozite” olarak tanımlanmaktadır. Genellikle orta ile yüksek konsantrasyonlu sıvılarda çözünen katı tozdan oluşan sistemler Newton olmayan tutum sergilemektedir. Kesme hızı ile viskozitedeki değişim, akışı teşvik eden veya önleyen sürekli fazda dağılmış fazın yeniden düzenlenmesine atıfta bulunmaktadır [36].

1.3.2. Akma Gerilimi

Sistemin akışını başlatabilmek için en düşük kesme gerilimi olarak tanımlanan akma gerilimi σ_0 ’ ın belirlenmesi gerekmektedir. Reolojide böyle bir kısıtlamanın olmadığı ancak uygulamada pratik amaçlar için akma gerilimi fikrinin kullanılmasının yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

Reolojik bazı yaygın davranışlar *Şekil 1.8*’ de sunulmuştur. Birincisi, sabit eğimli düz bir çizgiyle gösterilen sabit bir viskoziteyle kanıtlanan Newton tipi akışkan olarak adlandırılmaktadır. İkincisi, akma gerilimi olmayan kayma inceltici akışkan görünüşte plastik (psödoplastik) olarak adlandırılmaktadır. Üçüncüsü, akma noktası açısından öncekinden farklılık gösteren akma gerilimi nedeniyle plastik olarak adlandırılmaktadır. Artan kayma hızıyla birlikte hem 2. hem de 3. davranışlar kayma gerilimi üzerinde daha

az doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu durum viskozitede bir artışla birlikte azalma anlamına geliyor gibi görünmektedir. Dördüncüsü, kayma hızıyla birlikte viskozitedeki artışa bağlı olarak kayma geriliminde doğrusaldan daha yüksek bir artışın gösterdiği dilatant-genleşen sıvı davranışını temsil etmektedir. Beşincisi Newton tipi davranışa benzer ancak akma gerilimi olan Bingham akışkanı olarak adlandırılmaktadır [36].



Şekil 1.8. Tipik Reolojik davranışlar: (1) Newton tipi akışkan, (2) görünüşte plastik (kayma incelmesi), (3) Plastik, (4) Dilatant-genleşen sıvı, (5) Bingham akışı

1.3.3. Zamana Bağlılık

Çoğu sistem, sabit kesme hızı veya kesme gerilmesinde zaman içinde viskozitede farklılaşma olarak ifade edilen “zamana bağlı” olarak adlandırılan davranışı sergilemektedir. “Anti-tiksotropi” (veya reopeksi olarak da adlandırılır) ve “tiksotropi” olmak üzere zıt davranışlar bulunmaktadır.

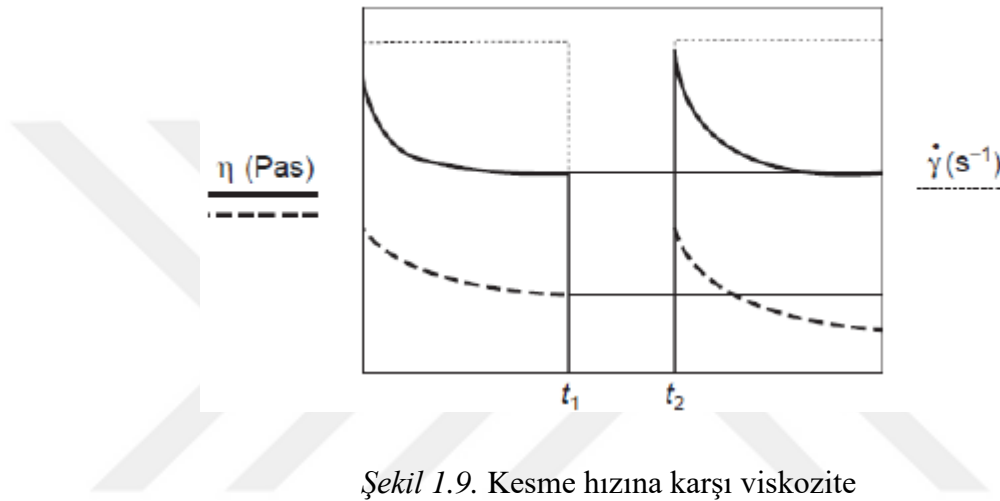
Tiksotropi, sabit uygulanan kayma gerilimi için viskozite değerinde zamanla artan bir azalma olarak tanımlanmaktadır ve bu gerilim ortadan kaldırıldığında kademeli bir iyileşme izleyen sistemler olarak tanımlanmaktadır.

Her iki davranış da zamana bağlıdır. “zamana bağlılık” terimi Şekil 1.9 incelenerek daha kolay açıklanmaktadır.

Malzemeler, sabit bir viskozite değerinin elde edilmesine izin verecek kadar uzun süre kesme hızına maruz bırakılırsa, viskozite eğilimlerini gösterebilirler: (i) düz çizgiyle

gösterilen numune zamana bağlıdır ve özellikle tiksotropiktir. (ii) kesikli çizgi ile gösterilen numune ise sadece zamana bağlı olarak ifade edilmektedir.

Geopolimerik bir sistem, reaktifliği, çökelme ve buharlaşma olaylarının oluşması nedeniyle tiksotropik veya anti-tiksotropik sistemlere çok benzer davranışlar sergilememektedir. Geopolimerlerin reolojik etkisi zamana bağlı olarak daha genel tanımlanmaktadır [36].



1.3.4. Viskoelastisite

Viskoelastik sistemler, ideal katı ve ideal sıvının iki sınırlayıcı durumu arasında ara özelliklere sahip sistemler olarak adlandırılmaktadır. İsminden de anlaşılacağı üzere “visko” akışkan görevi gören, “elastik” ise katı görevi gören malzemeler anlamına gelmektedir. Dolayısıyla viskoelastik malzemeler gerilme altında hem akışkan hem de katı karakteristik özelliklerinin göstermektedir. Polimer malzemeler genellikle farklı liflerden ve yapılardan oluştuklarından viskoelastik davranış sergilemektedir. Reolojik değerlendirme açısından, özellikle erken aşamalarda malzemelerdeki mikroyapısal boyutlardaki değişimin tespiti açısından büyük önem arz etmektedir [36].

1.4. Literatür Özeti

Şahin (1996) yaptığı çalışmada, hafif beton üretiminde pomza agregasının etkisi ve üretilen pomza tozunun çimento ile ikameli kullanıldığında puzolanik aktivesi araştırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, pomza agregası miktarının karışım içerisinde

artmasıyla basınç dayanımında azalma olduğu ancak numunelerin birim ağırlıklarında normal harçlara göre daha düşük birim ağırlık değeri elde edildiğini belirlemiştir [38].

Allahverdi vd. (2008) yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_2) çözeltilerinden oluşan alkali aktivatörü kullanarak pomza ile üretilen geopolimerler üzerinde su/bağlayıcı oranı, sodyum oksit konsantrasyonu ve silika modülü etkisi araştırılmıştır. 28 günlük sonunda en iyi sonucu 0,36 su/bağlayıcı oranı, silika modülü 0,60 ve sodyum oksit konsantrasyonu ağırlıkça %10 olan numunelerde olduğunu belirtmiştir [30].

Kani ve Allahverdi (2009) yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltilerinden oluşan alkali aktivatörü kullanarak pomza ile üretilen geopolimerler üzerinde farklı sıcaklıkların ve kür sürelerinin etkisini araştırmışlardır. Basınç dayanımında en iyi sonucu 25 °C havada kür edilen numune, 85 °C de 20 saat hidrotermal işlemlili numune ile 20 saat kür 7 gün bekleyen numune olabileceğini belirlemiştir [39].

Kani ve Allahverdi (2011) yaptıkları çalışmada, Yüksek fırın cürufu ile belirli oranlarda pomza ikamesiyle numune üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde priz süresi ve basınç dayanımının etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, cüruf kullanımının priz süresinde ciddi değişikliğe sebep olmadığı ancak pomza ile üretilen numunelerin basınç dayanımının cüruf-pomza karışımlarına göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu, bu farklılığında $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranındaki artıştan olabileceğini belirlemiştir [40].

Pekdemir (2011) yaptığı çalışmada, pomza agregası ve normal agregası kullanarak çimento ile ikameli uçucu kül ve silis dumanı katkılı betonlar üretmiştir. Üretilen numunelerde değişen agregası oranı ve cinsine göre betonların gelen mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, pomza agregasının yüzdesel miktarı arttıkça betonun basınç ve eğilme dayanımında azalma olduğu, numune içerisine su alma miktarında artış olduğunu belirlemiştir [41].

Bondar vd. (2011) yaptığı çalışmada, iki farklı aktivatörü yardımıyla volkanik külü aktive ederek doğal puzolanlar üzerinde kullanılan kür koşulları, alkali tipi, alkali miktarı, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının üretilen geopolimer numunelerdeki dayanım ve dayanıklılık

özellikleri araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda, numunelerin basınç dayanımları kıyaslandığında KOH ile üretilen geopolimerlerin NaOH ile üretilen geopolimere oranla daha iyi sonuç verdiği ve 28 gün sonunda en yüksek basınç dayanım değeri otoklavda kür edilen 7,5 molar KOH içeren numune olarak belirlemişlerdir [42].

Öztürk (2012) yaptığı çalışmada, pomza agregası, perlit agregası ve EPS yi agrega olarak kullanmış hafif beton numunesi üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde kullanılan agreganın betonun mekanik ve fiziksel özelliğine etkisini araştırmışlardır. Yapılan alışma sonucunda %85 pomza agregası ve %15 kum içeren deney numunelerinin en iyi dayanım sonucu verdiğini belirlemişlerdir [43].

Yodallahi vd. (2014) yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_2) karışımlarından oluşan alkali aktivatörü kullanarak pomza ile üretilen geopolimerler üzerinde farklı sıcaklıkların etkisini araştırmışlardır. Yapılan alışma sonucunda en iyi basınç dayanımının 65 °C ve su/bağlayıcı oranı sabit tutup sodyum silikat miktarının artması sonucunda olduğunu belirlemişlerdir [44].

Salman vd. (2014) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufunu alkali ile aktifleştirerek, kür sıcaklıkları ve farklı bekleme süresinin malzemenin basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda, en yüksek basınç dayanımı 110 °C de en iyi dayanım sonucu verdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca dayanım kazanma hızının ilerleyen yaşlarda yavaşladığını da belirlemişlerdir [45].

Nadoushan vd. (2016) yaptıkları çalışmada, potasyum hidroksit (KOH), sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_2) alkali aktivatörü olarak kullanmış ve pomzayı yüksek fırın cürufu ikameli olarak geopolimer numunesi üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde kullanılan alkali aktivatörün basınç dayanımlarına etkisini araştırmıştır. Yapılan alışma sonucunda potasyum hidroksitin (KOH), sodyum hidroksitten (NaOH) daha iyi sonuç verdiğini belirlemişlerdir [46].

Bahavsar vd. (2014) yaptığı çalışmada, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat kimyasalları kullanarak hazırlanan uçucu kül esaslı geopolimere silis dumanı ve priz hızlandırıcı katkıları katarak üretilen numunelerde işlenebilirlik özelliğine etkisini araştırmıştır. Yapılan alışma sonucunda, silis dumanı malzemesi ve priz hızlandırıcı

malzemenin katılmasıyla işlenebilirliğin olumsuz etkilendiği ancak süper akışkanlaştırıcı malzeme oranı arttığında işlenebilirliğin arttığını belirlemişlerdir [47]

Aydın ve Baradan (2014) yaptığı çalışmada, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kimyasallarını kullanarak cüruf malzemesini aktive ederek numunelerin işlenebilme ve dayanım özelliklerini araştırmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, 90 gün sonunda en yüksek basınç dayanım sonucu $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 1,6 ve 8 molar NaOH içeren numune olduğu, eğilme dayanımında ise $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı 0,8 ve 6 molar NaOH içeren numune olduğu belirlenmiştir. Ayrıca karışımdaki NaOH miktarındaki artışın işlenebilmeyi azalttığını belirlemişlerdir [48].

Bilim vd. (2015) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufundan oluşan karışımlarda farklı oranlarda sodyum konsantrasyonuna sahip sodyum metasilikat malzemesi ile alkali ile aktifleştirilmiş geopolimer numuneler hazırlayarak bu numuneler üzerinde katkı ve kür koşullarının etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, alkali ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu harçlarının sertleşme süreleri üzerinde katkı maddelerini etkisi olmadığı, kür koşullarının normal portland çimentosuna kıyasla erken yaşlarda ve ilerleyen yaşlarda yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler üzerinde sıcaklığa bağlı kür koşulunun önemli bir etkisinin olduğunu belirlemişlerdir [49]

Huseien vd. (2016) yaptığı çalışmada, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve her ikisiyle kimyasal malzeme kullanılarak alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül ve palmye yağ külünün aktivatörü türü ve kür koşullarının etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, en iyi dayanım sonucunu sodyum hidroksit ve sodyum silikat malzemesinin beraber kullanıldığı geopolimerlerin oda sıcaklığında kür edilmesiyle daha yüksek basınç dayanımı elde edildiğini belirlemişlerdir [50].

Atiş vd. (2016) yaptığı çalışmada, 3 farklı aktivatör (sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat) kullanarak alkali ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufunun basınç dayanımları ve eğilme dayanımları ile numunelerin 6 aylık rötre ve priz sürelerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilen yüksek fırın cürufu numunelerin priz sürelerinin normal portland çimentosuna göre daha yüksek olduğu ancak sodyum karbonat ile aktifleştirilen yüksek fırın cürufu numunelerin priz süresinin portland çimentosuyla yaklaşık aynı olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilen yüksek

fırın cürüflü numunelerin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarının normal portland çimentosu ile hazırlanan numunelere oranla daha düşük olduğu, sodyum silikat ve sodyum karbonat kullanılarak aktive edilen yüksek fırın cürüflü numunelerin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarının normal portland çimentosu ile hazırlanan numunelere oranla daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [51].

Bingöl (2018) yaptığı çalışmada, farklı sodyum oranlarına sahip sodyum metasilikat malzemesi yardımıyla alkali ile aktifleştirilmiş öğütülmüş yüksek fırın cürufunun farklı kür koşullarında mekanik ve dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, %4 ve %8 oranında sodyum metasilikat malzemesi ile hazırlanan numunelerin diğer numunelere oranla daha iyi eğilme ve basınç dayanımı elde edildiği ve geopolimer numunelerin kontrol numunelerine kıyasla oldukça iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir [52]

Ban vd. (2019) yaptıkları çalışmada, sodyum silikat ve sodyum karbonat çözeltisi ile aktive edilerek hazırlanan cüruf ve uçucu külün silis dumanı ile etkileşimini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, %4 silis dumanı içeren geopolimer harçların en yüksek mekanik mukavemet gösterdiği, aşırı silis dumanı ilavesi, mekanik mukavemette düşüşe sebep olduğunu belirlemişlerdir [53].

Altundal (2019) yaptığı çalışmada, sodyum silikat ve sodyum hidroksit yardımıyla aktive edilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve her iki mineral katkı malzemesinden eşit oranlarda katılarak hazırlanan geopolimer numunelerin durabilitesini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, uçucu kül ile hazırlanan numunelere ısıl kür uygulanması gerektiği, yüksek fırın cürufu ile hazırlanan numunelerin ise ısıl küre ihtiyaç duymadığı, her iki mineral katkı malzemesinden eşit miktarda katılarak hazırlanan geopolimer numunelerin ise %5 sülfürik asit etkisine karşı en iyi sonuç verdiğini belirlemişlerdir [54]

Pilehvar vd. (2019) yaptığı çalışmada, iki farklı faz değişim malzemesi içeren geopolimer beton ile Portland çimento betonunun fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, mikroyapı çalışmalarında hamur/agrega ve hamur/faz değişim malzemesi içeren geopolimerlerin arasındaki zayıf arayüzey geçiş bölgelerinde ortaya çıkan mikro çatlaklara katkıda bulunabileceğini belirlemişlerdir [55].

Alanazi vd. (2019) yaptığı çalışmada, ortam sıcaklığında kürlenen alkali ile aktive edilmiş uçucu kül geopolimerinde, cüruf, metakaolin ve silis dumanı gibi farklı puzolanik malzemelerle uçucu kül ikamesinin geopolimer karışımlara etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, alkali ile aktive edilmiş uçucu kül geopolimerine metakaolin eklenmesi, erken erken mukavemet noktasında iyileşme sağladı, alkali ile aktive edilmiş uçucu kül geopolimerine cüruf eklenmesi, mekanik ve geçirgenlik özelliklerinde iyileşme sağladığı, alkali ile aktive edilmiş uçucu kül geopolimerine cüruf eklenmesi, silis dumanı eklenmesi ise mekanik özelliklerde azalmaya yol açarak büyük kılcal gözeneklerin hacimsel büyümeye yol açtığını belirlemişlerdir [56].

Pehlivan (2020) yaptığı çalışmada, üretilen tüm serilerde alkali aktivatörü olarak 12 molar sodyum hidroksit (NaOH) kullanarak yüksek fırın cürufunu aktive ederek farklı oranlarda alkali içeriği ve silika modülünün harç numuneler üzerinde mekanik ve işlenebilirlik özelliğini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, 28 günlük en yüksek basınç ve eğilme dayanım sonucu %9 Na₂O/cüruf ve silika modülü 2,0 olan numunede gözlenmiştir. Silika modülü ve karışımdaki sodyum miktarındaki artışın işlenebilmeyi azaltmış olduğunu belirlemişlerdir [57].

Occhipinti vd. (2020) yaptığı çalışmada, 8 molar sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat kimyasalları ile aktive edilerek hazırlanan pomza esaslı geopolimer harçlar ile farklı oranlarda karıştırılan metakaolin ikilisinin restorasyon materyali olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, ağırlıkça %20-30 oranında metakaolin ile karıştırılarak hazırlanan pomza esaslı geopolimerlerin basınç dayanımı, su emme oranı ve gözeneklilik oranlarının hafif beton oluşturmak için uygun olduğunu belirlemişlerdir [58].

Top vd. (2020) yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kimyasalları ile aktive edilerek hazırlanan uçucu kül esaslı geopolimerlerin hafif agregalarla kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, kür sıcaklığının ve alkali aktivatör konsantrasyonunun geopolimerizasyon sürecinde etkili olduğunu belirlemişlerdir [59].

Özcan (2020) yaptığı çalışmada, sodyum silikat kimyasalı ile aktive edilerek hazırlanan yüksek fırın cürufu ve uçucu kül esaslı geopolimerlerin optimizasyonu araştırmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, 24 saat 75 °C kür sıcaklığı ile %10 Na içeriğine sahip

karışımın en iyi dayanım sonucu verdiği, uçucu kül ilavesiyle de numunelerin işlenebilme, kuruma büzülmesi ve karbonatlaşma derinliklerinde iyileşmelerin olduğunu belirlemiştir [60].

Wang vd. (2020) yaptıkları çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimerlerde değişken Si/Al oranının geopolimerin gözenek yapısı ve çiçeklenmesi üzerine etkilerini araştırmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, geopolimerin Si/Al oranı 1,5 olduğunda $[AlO_4]$ yapılarının yoğun olduğu, bu durumun geopolimerin gözenek hacmi ve boyutunda küçülme sağladığı ve bu nedenle de geopolimerde çiçeklenmenin diğer Si/Al oranlarına göre daha az olduğunu belirlemiştir [61].

Hamid vd. (2022) yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve pomza tozunun aktive edilmesiyle oluşturulan geopolimer karışımlarda farklı alkali/bağlayıcı oranının numuneler üzerinde mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, karışımlardaki pomza oranı yüksek numunelerde dayanım kaybı olduğu, uçucu külün yüksek sıcaklığa pomzadan daha iyi dayanım gösterdiği ve alkali/bağlayıcı oranının geopolimer dayanımlarında önemli bir etkisi olduğunu belirlemiştir [62].

İlkentapar ve Eren (2021) yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit ile aktive edilerek hazırlanan uçucu kül esaslı geopolimerler karışımlarda farklı agrega kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, yüksek sıcaklığın %20 ve %40 genleştirilmiş polistiren agrega içeren geopolimer harçların basınç dayanımındaki azalmanın referans olarak hazırlanan geopolimer harca göre daha az olduğunu belirlemiştir [63].

Ahmed vd. (2021) yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kimyasalları ile aktive edilerek hazırlanan ferrosilikon cüruf ve alümina atıkları kullanarak termal yalıtım geopolimer tuğlalarının farklı kür koşullarında etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, alümina içeriğinin artırılmasının geopolimer özelliklerini arttırdığı, ancak hazırlanan geopolimer numunelerin basınç dayanımında azalma olduğunu belirlemiştir [64].

Matsimbe vd. (2022) yaptıkları çalışmada, geopolimerlerin ortak bir tanımının olmaması ve metodolojinin olmaması nedeniyle disiplinler arasındaki tutarsızlığı ortadan kaldırmak ve karışıklığa yol açmayacak geopolimer metodolojilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda, daha az geçirgen ve gözenekli bir geopolimer ürünü, agresif

sıvıların geopolimer matrisine girmesini önleyerek geopolimeri fiziksel ve kimyasal saldırılardan koruduğunu, ancak geopolimerlerde portland çimentosu gibi net bir karışım tasarımının olmamasından dolayı yeterli kadar güvenilir olmadığını belirlemişlerdir [65].

Zhang vd. (2023) yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kimyasalları ile aktive edilerek hazırlanan granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu küle silis dumanı ilavesinin geopolimer yapısına etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda, silis dumanı içeriği %20 olduğunda geopolimerin 28 günlük basınç dayanımında iyileşme olduğu, geopolimerin içindeki zararlı gözeneklerin büyük ölçüde azaldığı ve erken kuruma büzülmesinde de %50 oranında azalma olduğunu belirlemişlerdir [66].

Kop ve Yazıcıoğlu (2023) yaptıkları çalışmada, farklı molar konsantrasyona sahip sodyum silikat malzemesi ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve her iki bağlayıcıdan oluşan deney setlerine farklı sıcaklıklarda kür uygulayarak numunelerin mekanik ve mikroyapı analizlerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, en yüksek basınç dayanımına sahip numuneler 100 °C de kürlenmiş numunelerin olduğu ve uçucu kül içeren numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının yüksek fırın cürufu içeren numunelere oranla daha düşük olduğunu belirlemişlerdir [67].

Mohammed ve Yaltay (2024) yaptıkları çalışmada, 2 farklı molar konsantrasyonuna sahip sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile aktive edilerek hazırlanan farklı oranlarda cüruf ve pomzadan oluşan geopolimer esaslı numuneler üzerinde basınç dayanımının ve numunelerin yüksek sıcaklıklara direncini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, cüruf kullanımının basınç dayanımını arttırdığı ve cürufu birlikte belirli oranda pomza kullanılarak elde edilen numunelerin ise yüksek sıcaklıklara karşı direnci arttırdığını belirlemişlerdir [68].

Literatürde geopolimerlerin reolojisi üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Ancak bu çalışmaların çoğunda geopolimerlerin priz süresinin ve işlenebilirliğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise, reometreler kullanılarak geopolimerler hakkında daha detaylı reolojik çalışmalar yaygınlaşmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Chindapasirt vd. (2007) yaptıkları çalışmada, yüksek kalsiyumlu uçucu külden oluşan geopolimer harçların işlenebilirliği ve mukavemeti araştırılmıştır. Deneysel çalışma

sonucunda, geopolimerlerin işlenebilirliğinin $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ molaritesi ile ilgili olduğu, NaOH ve sodyum silikat molaritesindeki artışın akışkanlığı azalttığını belirlemişlerdir [69].

Palacios vd. (2008) yaptıkları çalışmada, alkali ile aktifleştirilmiş cüruf hamuru ve harçlarının priz süreleri ve reolojik özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, alkali ile aktifleştirilen cüruf hamurlarının ve harçlarının reolojilerinin kullanılan alkali aktivatöre göre değişkenlik gösterdiğini belirlemişlerdir. Aktivatör çözeltisi sodyum silikat olduğunda, hamur ve harç numunelerde büyük yapısal bozulmalar olduğu ve bu bozulmalar neticesinde numunelerin Herschel-Bulkley modeline uyduğunu belirlemişlerdir. Aktivatörü çözeltisi NaOH olduğunda ise, hamur ve harç numunelerin Bingham akışkanları gibi davrandığını belirlemişlerdir [70].

Sathonsawaphak vd. (2009) yaptıkları çalışmada, su, NaOH ve naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı ilavelerinin geopolimerlerin işlenebilirliği ve mukavemetine etkilerini araştırmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, NaOH çözeltisinin eklenmesi ile geopolimerlerin mukavemeti korunurken karışımın akışkanlığının nispeten arttırıldığını belirlemişlerdir [71].

Montes vd. (2012) yaptıkları çalışmada, farklı karışım tasarımı formülasyonları kullanılarak hazırlanan uçucu kül esaslı geopolimerler hamurların reolojik davranışlarını araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, süperakışkanlaştırıcı kullanılan geopolimerlerin Bingham akışkanı gibi davrandığı ve tiksotropi özelliği gösterdiğini belirlemişlerdir. Hidroksit molaritesi, numunenin matrisinin viskozitesini arttırdığını belirlemişlerdir [72].

Vance vd. (2014) yaptıkları çalışmada, aktivatörü tipi ve molaritenin alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül esaslı geopolimerlerin reolojik özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, NaOH veya KOH ile aktifleştirilmiş uçucu kül esaslı geopolimerlerin, esas olarak çözeltinin viskozitesindeki değişimden ve uçucu kül tanelerinin yüzey yükünden etkilendiğini belirlemişlerdir [73].

Rifaa'i vd. (2019) yaptıkları çalışmada, çeşitli NaOH molariteleri ile aktive edilen uçucu kül esaslı geopolimerlerin akış ve viskoelastik özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, incelenen geopolimerler kayma incelmeleri davranışı göstermesine

rağmen, reolojik özelliklerin NaOH molaritesinden etkilendiğini belirlemiştir. NaOH molaritesinin 7 mol/l çıkarılması, akma gerilmesinde ve sertleşmede artışa yol açtığını da belirlemiştir [74].

Alghamdi vd. (2019) yaptıkları çalışmada, 3D yazdırılabilir alkali ile aktive edilmiş uçucu kül esaslı geopolimerlerin malzeme tasarımı ve reolojik özelliklerini araştırmışlardır. Alkali aktivatörü olarak NaOH, tek aktivatör olarak veya alümino silikatın çözünmesini ve çökmesini sağlamak için gerekli alkaliniteyi sağlamak üzere sodyum silikat veya sodyum sülfat ile birlikte kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, alkali aktivatörü kullanımı geleneksel portland çimentolu sistemlerde süperakışkanlaştırıcı kullanımına benzer olarak geopolimer hamurların kayma-akma gerilmelerinin azaldığı ama yapışkanlığının arttığını belirlemiştir [75].

Ishwarya vd. (2019) yaptıkları çalışmada, sodyum karbonat/sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilmiş uçucu kül/cüruf hamurlarının reolojisi, geopolimerizasyonu ve dayanımını araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, karışımdaki cüruf içeriği arttıkça tiksotropik derecesinin arttığı, tüm hamurların viskozite oranının 1'den küçük olduğunu belirlemiştir. Uçucu kül geopolimer hamurunun Bingham modeline benzerlik gösterirken, kompozit geopolimer hamurların Herschel-Bulkley modeline benzerlik gösterdiğini belirlemiştir [76].

Güllü ve Agha (2021) yaptıkları çalışmada, metakaolin ve cüruf ile zemin geliştirmede harçla yapılan soğuk bağlı geopolimer stabilizatörlerin potansiyel kullanımını araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, %0-%30 oranında düşük miktarlarda soğuk bağlanmış metakaolin ve SL jeopolimer stabilizatör kullanan çimentolu enjeksiyon malzemelerinin enjeksiyon mühendisliğinde kullanılmaya uygun iyi akış ve mukavemet sunduğunu belirlemiştir [77].

Zhang vd. (2020) yaptıkları çalışmada, faklı NaOH içeriğine sahip uçucu kül-cüruf esaslı geopolimer hamurların su bileşimi, amorf gel ve reoloji özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, C-(A)-S-H jelinin daha yüksek su bağlama yeteneği olduğu, serbest suyun jel suyuna dönüşümü hızlandığını ve bu durumunda parçacıkların hareket direncini artırdığını belirlemiştir. Ayrıca bu durumun reolojik özelliklerin artmasına ve geopolimer taze hamurların akışkanlığının azalmasına neden olduğunu da belirlemiştir [78].

Dadsetan vd. (2021) yaptıkları çalışmada, sodyum silikat/sodyum hidroksit çözeltileri ile aktive edilmiş metakaolin/cam tozu hamurlarının reolojik, mekanik ve mikro yapısal özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, metakaolin esaslı geopolimerlerin reolojik özelliklerinin, içerisine cam tozu ikame edilmesiyle değişmediği, tüm hamurların, kayma hızına göre viskozitenin azalmasıyla kayma incelenmesi (psödoplastik) davranış sergilediğini belirlemişlerdir. Ayrıca %100 metakaolin içeren geopolimer hamurların basınç dayanımının %25 cam tozu ikameli metakaolin bazlı geopolimer hamurlarla eşit olduğunu da belirlemişlerdir [79].

Alnahhal vd. (2021) yaptıkları çalışmada, alkali ile aktive edilmiş uçucu kül/cüruf malzemeleri ile çimento hamurları arasındaki viskoelastisitedeki temel farklılıkları araştırmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, aktivatörün viskozitesi alkali ile aktive edilmiş geopolimer hamurun viskozitesini önemli ölçüde etkilediğini belirlemiştir. Ayrıca yüksek viskoz aktivatör nedeniyle aktive edilmiş geopolimer hamurların viskozitesinin çimento hamurlarının viskozitesinden 4-8 kat daha fazla olduğunu da belirlemiştir [80].

Palacios vd. (2021) yaptıkları çalışmada, sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilmiş cüruf hamurlarının reolojisi ve zaman içerisinde oluşan reaksiyon ürünlerinin değişimini araştırmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, cürufun sodyum silikat çözeltisinde çözülmesiyle ilk 30 dk boyunca Al, Ca ve Mg konsantrasyonunda bir artış olduğu ancak herhangi bir hidratasyon ürünü oluşmadığı, 30-40 dk reaksiyondan sonra Al, Ca ve Mg konsantrasyonlarında sert bir düşüş olduğu ve reaksiyon ürünlerinde keskin bir artışın meydana geldiğini belirlemiştir [81].

Li vd. (2022) yaptıkları çalışmada, farklı uçucu kül, cüruf ve silika dumanı içeriğine sahip geopolimerler harç malzemelerinin reolojik ve viskoelastik özelliklerini araştırmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, tüm hazırlanan geopolimer numunelerinin Bingham modeline uyduğu ve geopolimer numunelerin akışkanlığı farklı uçucu kül, cüruf ve silika dumanı kombinasyonları kullanılarak değiştirilebileceğini belirlemişlerdir [82].

Liu vd. (2023) yaptıkları çalışmada, sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi ile aktive edilerek hazırlanan cüruf ve uçucu külün silis dumanı ile etkileşimi sonucunda geopolimer hamurların reolojisindeki değişimi araştırmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, sodyum hidroksit ile aktive edilen geopolimer hamurlara silis dumanı

eklenmesi, plastik viskozite ve akma geriliminde artış olurken, sodyum silikat ile aktive edilen geopolimer hamurlara silis dumanı eklenmesi plastik viskozite ve akma geriliminde azalışa neden olduğunu belirlemişlerdir [83].

Wang vd. (2023) yaptıkları çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimerin işlenebilirliği, reolojisi ve geopolimerizasyonunda alkali içeriği, aktivatör modülü ve su/bağlayıcı oranının rolünü araştırmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, geopolimer hamurunun reolojik eğrisi Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu, bununla birlikte geopolimer hamurunun reolojik modelinin alkali karışımı, aktivatör modülü ve su/bağlayıcı oranındaki değişikliklerle değişmediğini belirlemişlerdir [84].

Pan vd. (2024) yaptıkları çalışmada, çeşitli oranlarda silika içeren silis dumanı tipinin geopolimer harcın reolojisi ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, %20 oranında Silis dumanı1 ve silis dumanı2 içeren geopolimer harçların basınç dayanımını artırdığı ancak silis dumanı3 kullanıldığında basınç dayanımında azalma olduğu ayrıca silis dumanı eklenmesinin geopolimerlerin plastik viskozitesinde artışa neden olduğunu belirlemişlerdir [85].

Kumar vd. (2024) yaptıkları çalışmada, sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi ile aktive edilerek hazırlanan öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu geopolimer betonlarda silis dumanının reolojik, mekanik ve dayanıklılığını araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın sonucunda, silis dumanı dahil edilmesinin geopolimer betonun basınç ve eğilme mukavemetini artırdığını ve %30 silis dumanı içeren geopolimer betonun %2 sülfürik asit, %5 sodyum sülfat ve %5 sodyum klorür varlığında oldukça güvenilir olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi ile aktive edilerek hazırlanan öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu geopolimere giderek artan bir oranda silis dumanı eklenmesi betonun akış kabiliyetini artırdığı silis dumanı içeriği arttıkça kalsiyum içeriğinin azaldığını belirlemişlerdir [86].

2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, pomza tozu kullanılarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_2) ile aktive edilerek üretilen, pomza esaslı geopolimerik hamurlar ile pomza agregası katılarak elde edilen pomza esaslı geopolimer harçlardan oluşan numunelerin dayanım, içyapı ve reolojik özellikleri incelenmiştir.

Çalışmada geopolimer öncü malzeme olarak sadece mikronize pomza kullanılmıştır. Karışım tasarım aşamasında, eşdeğer sodyum hidroksit (NaOH) içeriği tüm numunelerde bağlayıcı malzemeye göre ağırlıkça Na^+ içeriği sabit kalacak şekilde kullanılmıştır. Pomza esaslı geopolimerik hamurların ve harçların hazırlanmasında kütlece $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı değişken parametre olarak kullanılmıştır.

Bu değişken parametrelerle hazırlanan pomza esaslı geopolimer hamur ve harç numuneler üzerinde dayanım ve içyapı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca hazırlanan pomza esaslı geopolimer hamur numuneler üzerinde de reometre deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve yapılan deneysel çalışmaların detayları ile üretilen numunelerin karışım oranlarını içeren tablolar aşağıda verilmiştir.

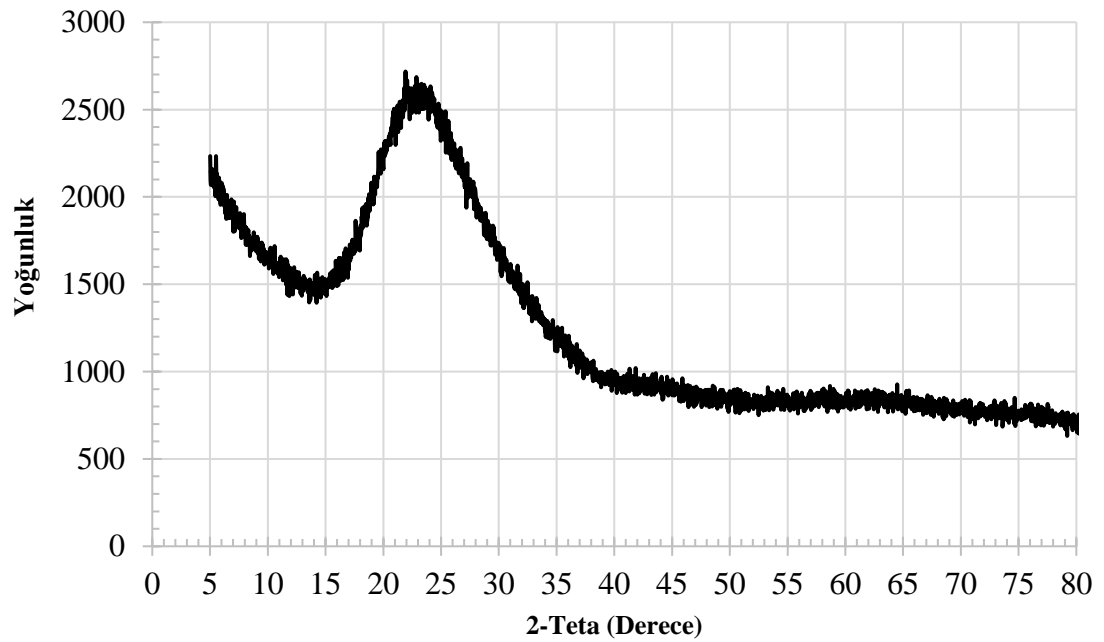
2.1. Malzemeler

2.1.1. Pomza

Deneysel çalışmada kullanılmak üzere, Nevşehir ili, Avanos ilçesinde bulunan Miner Madencilik adlı firmadan 40 μm altı olarak temin edilmiştir. Temin edilen asidik mikronize pomza kimyasal kompozisyonu Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (TAUM) yapılan analizler sonucunda Tablo 2.1'de gösterilmektedir. Kullanılan pomza agregasının XRD deseni Şekil 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Pomza tozunun kimyasal kompozisyonu (%)

Oksit	Oranlar %
SiO ₂	76,08
Al ₂ O ₃	12,46
Fe ₂ O ₃	1,33
Na ₂ O	1,18
MgO	<0,05
K ₂ O	4,74
CaO	0,55
TiO ₂	0,17
Kızdırma kaybı	3,63



Şekil 2.1. Pomza tozu XRD deseni

2.1.2. Alkali Aktivatör

Toz bağlayıcı olan pomzayı aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Kullanılan aktivatörlerle ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.1.2.1. Sodyum Hidroksit (NaOH)

Endüstriyel kullanımda kostik veya kostik soda olarak da bilinen kimyasal bir bileşik olan sodyum hidroksit su ile karıştırıldığında ekzotermik reaksiyon oluşturmaktadır. Bu çözünme sırasında kısa sürede çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu yüzden sodyum hidroksiti nemli ortamlarda muhafaza ederken çok dikkat edilmelidir. Sodyum hidroksit diğer kimyasal malzemelere göre ucuz bir kimyasal olduğu için kullanım alanı çok geniştir. Sodyum hidroksit malzemesi 25 kg'lık torbalar halinde temin edilmiş ve uygun laboratuvar koşullarında saklanmıştır. Kullanılan sodyum hidroksitin analiz sonuçları Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Sodyum hidroksit (NaOH) kimyasal analiz sonuçları

Malzeme	Kimyasal İçerik (%)					
	NaOH	Na_2CO_3	Cl	Fe	Al	SO_4
NaOH (%)	98,49	1,42	0,03	0,01	0,02	0,02

2.1.2.2. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)

Endüstriyel kullanımda cam suyu olarak bilinen sodyum silikat kimyasal maddesi sodyum oksit ve silisyum oksit içermektedir. Deneysel çalışmamızda sodyum meta silikat kimyasalı kullanılmıştır. Kullanılan sodyum silikat kimyasalı 25 kg'lık torbalar halinde toz formunda kullanılmıştır. Kullanılan sodyum silikatın analiz sonuçları Tablo 2.3'de gösterilmektedir.

Tablo 2.3. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) kimyasal analiz sonuçları

Malzeme	Kimyasal İçerik (%)					
	Safiyet	Na_2O	SiO_2	Fe	Suda Çözünmeyen	pH
Na_2SiO_3 (%)	$\geq 95,0$	48,0-51,0	44,4-47,4	$\leq 0,1$	$\leq 0,5$	>12

2.1.3. Agregas

Deneysel çalışmada agregas olarak kırmızı pomza agregası kullanılmıştır. Kullanılan 0-5 mm boyutlarındaki pomza agregası $2,20 \text{ gr/cm}^3$ yoğunlukta ve %20,70 su emme oranına sahiptir. Deneyslerde kullanılan pomza agregasına ait elek analizi deney sonuçları Tablo 2.4' de sunulmuştur.

Tablo 2.4. Pomza agregası elek analiz sonuçları

Özellik	Elek Çapı (mm)					
	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,125
Elek üstü kalan (%)	1,82	36,12	65,45	80,89	90,33	94,81

2.1.4. Su

Deneysel çalışmada Erciyes Üniversitesi Laboratuvarında bulunan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır.

2.2. Numunelerin Üretimi

2.2.1. Hamur Numunelerin Üretimi

Karışım tasarım aşamasında, eşdeğer sodyum hidroksit (NaOH) içeriği tüm numunelerde bağlayıcı malzemeye göre ağırlıkça %10 Na^+ içerecek şekilde kullanılmıştır. Su/Bağlayıcı oranı sade pomzadan hazırlanmış hamur numunelerde 0,8 olarak sabit tutulmuştur. Su laboratuvar ortamında bulunan içilebilir çeşme suyundan oluşmaktadır. Numunelerdeki su/bağlayıcı oranları akış kabiliyeti sağlayacak şekilde önceden belirlenmiştir. Tüm numunelerde 80 gr NaOH, 450 gr pomza tozu kullanılmıştır. Kütlece $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5, 3,0 ve 3,5 oranları için sırasıyla Na_2SiO_3 ağırlığı 200, 240 ve 280 gr olarak değiştirilmiştir.

Karışım oranlarına ilişkin detaylı bilgi Tablo 2.5'de verilmiştir. Şekil 2.2'da gösterilen laboratuvar mikseri kullanılarak hamur numuneler hazırlanmıştır. Karışımlarda kullanılacak NaOH-Su çözeltisi cam kavanozlarda hazırlanmış ve oda sıcaklığında bir gün bekletilmiştir. Kullanıma hazır hale gelen NaOH-Su çözeltisi kuru karışıma eklenip miksera ilave edilmiştir. Solüsyon ilave edildikten sonra karışımlar 30 saniye 62,5 devir/s

de karıştırılmıştır. Mikser durdurulup karıştırma kabı etrafına yapışan malzemeler kaşık yardımıyla sıyırılmış ve mikser 30 saniye daha 62,5 devir/s de karıştırılmıştır. Daha sonra mikser 125 devir/s ye ayarlanarak 60 saniye daha karıştırma işlemi yapılmıştır. 120 saniye tamamlandığında mikser durdurulmuş ve karıştırma kabı içerisinde bulunan hamur kaşık yardımıyla alt-üst edilmiştir.

Üretilen geopolimer hamurlar, daha önceden yağlanmış olan 40x40x160 mm³ boyutlarındaki kalıplara sarsma tablası üzerinde iki aşamada yerleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan numuneler laboratuvar koşullarında 1 gün, 2 gün, 3 gün, 7 gün ve 28 günlük havada küre tabi tutulmuşlardır.



Şekil 2.2. Karıştırma mikseri



Şekil 2.3. Hamur numunelerin kalıplara yerleştirilmesi

Tablo 2.5. Hamur karışım oranı

Kütlece Na ₂ SiO ₃ /NaOH oranı	NaOH (g)		Na ₂ SiO ₃ (g)	Pomza Tozu (g)
	Su	Pul		
2,5	365	80	200	450
3,0	365	80	240	450
3,5	365	80	280	450

2.2.2. Harç Numunelerin Üretimi

Hamur formunda elde edilen basınç deneyi sonuçlarından yararlanılarak harç karışımları oluşturulmuştur. Harç karışımlarında bazik pomza agregası kullanılmıştır. Karışım tasarım aşamasında, eşdeğer sodyum hidroksit (NaOH) içeriği tüm numunelerde bağlayıcı malzemeye göre ağırlıkça %10 Na⁺ içerecek şekilde kullanılmıştır. Su/Bağlayıcı oranı sade pomzadan hazırlanmış harç numunelerde 0,9 olarak sabit tutulmuştur. Su laboratuvar ortamında bulunan içilebilir çeşme suyundan oluşmaktadır. Numunelerdeki su/bağlayıcı oranları akış kabiliyeti sağlayacak şekilde önceden belirlenmiştir. Tüm numunelerde 80 gr NaOH, 450 gr pomza tozu ve 850 gr pomza agregası kullanılmıştır. Kütlece Na₂SiO₃/NaOH 2,5, 3,0 ve 3,5 oranları için sırasıyla Na₂SiO₃ ağırlığı 200, 240 ve 280 gr olarak değiştirilmiştir.

Karışım oranlarına ilişkin detaylı bilgi Tablo 2.6'de verilmiştir. Şekil 2.2'da gösterilen laboratuvar mikseri kullanılarak harç numuneler hazırlanmıştır. Karışımlarda kullanılacak NaOH-Su çözeltisi cam kavanozlarda hazırlanmış ve oda sıcaklığında bir gün bekletilmiştir. Kullanıma hazır hale gelen NaOH-Su çözeltisi kuru karışıma eklenip mikser ilave edilmiştir. Solüsyon ilave edildikten sonra karışımlar 30 saniye 62,5 devir/s de karıştırılmıştır. Mikser çalışır durumdayken 850 gram agrega karıştırma kabı içerisine ilave edilip 30 saniye daha 62,5 devir/s de karıştırılmıştır. Daha sonra mikser 125 devir/s ye ayarlanarak 60 saniye daha karıştırma işlemi yapılmıştır. 120 saniye tamamlandığında mikser durdurulmuş ve karıştırma kabı içerisinde bulunan hamur kaşık yardımıyla alt-üst edilmiştir.

Üretilen geopolimer harçlar, daha önceden yağlanmış olan 40x40x160 mm³ boyutlarındaki kalıplara sarsma tablası üzerinde iki aşamada yerleştirilmiştir. Üretimi

tamamlanan numuneler laboratuvar koşullarında 1 gün, 2 gün, 3 gün, 7 gün ve 28 günlük havada küre tabi tutulmuşlardır.



Şekil 2.4. Harç numunelerin kalıplara yerleştirilmesi

Tablo 2.6. Harç karışım oranı

Kütlece Na ₂ SiO ₃ /NaOH oranı	NaOH (g)		Na ₂ SiO ₃ (g)	Pomza Tozu (g)	Pomza Agregası (g)
	Su	Pul			
2,5	425	80	200	450	850
3,0	425	80	240	450	850
3,5	425	80	280	450	850

2.3. Deneysel Çalışmalar

2.3.1. Geopolimer Hamur Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

Hamur fazla 3 farklı oranda üretilen numuneler üzerinde birim ağırlık deneyi, ultrasonik atımlı dalga hızının tayini deneyi, basınç dayanım deneyi, izotermal kalorimetre deneyi, reometre deneyi, termo-gravimetrik analiz deneyi ile SEM ve EDX analizi yapılmıştır.

2.3.1.1. Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen hamur numuneler havada 1 gün, 2 gün, 3 gün, 7 gün ve 28 gün süre sonrasında ağırlıkları tartılmıştır. Üretilen numunelerin kumpas yardımıyla geometrik boyutları

ölçülmüştür. Kumpas ile ölçülen geometrik boyutlarına bölünmüştür. Bu şekilde yaklaşık olarak numunelerin birim ağırlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen birim ağırlık değerleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

(A_{KS} =Kür sonrası ağırlık)

Birim Ağırlık (t / m^3) = $A_{KS} / \text{Numune Boyutları}$

2.3.1.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini Deneyi

Numunelerin ultrases geçiş hızları ASTM C 597 [87] standardına uygun şekilde PUNDİT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) adı verilen *Şekil 2.5*'de gösterilen Proceq marka cihaz ile belirlenmiştir. Deney cihazında alıcı ve verici isiminde iki farklı giriş bulunmaktadır. Verici girişinde bulunan transduser tarafından gönderilen ultrasonik sinyaller numune içerisinden geçerek alıcı girişinde bulunan transduser tarafından alınır ve cihaz tarafından ultrasonik sinyallerin alış-veriş süresi μs cinsinden hassas olarak ölçülmektedir. Ölçüm yapılan numunelerde transduserlerden daha iyi sonuç alınabilmesi ve yüzeyinin daha pürüzsüz olmasını sağlamak için ultrasonik jel kullanılmıştır. Ultrases geçiş hızı ölçümleri $40 \times 40 \times 160$ mm ebatlarında üretilen numunelerin 160 mm uzunluğundaki doğrultusundan yapılmıştır. Üretilen her bir seri için ultrases geçiş hızı test ölçümleri 3 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Ultrases geçiş hızları aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.5. Ultrasonik atımlı dalga hızının belirlenmesi

$$V = \frac{L}{T}$$

Burada;

V: Ultrasonik hız, m/s

L: Geçiş uzunluğu, m

T: Geçiş zamanı, s

2.3.1.3. Basınç Dayanımı Deneyi

3 farklı $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranıyla üretilen geopolimer hamur numuneler $40 \times 40 \text{ mm}^2$ genişlik ve 10 mm kalınlıkta başlık kullanılarak 500 N/s yükleme hızında Şekil 2.6' de gösterilen cihaz yardımıyla 1, 2, 3, 7 ve 28 gün sonunda basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Kırılma sonucunda elde edilen maksimum yük değeri ile aşağıdaki denklem kullanılarak basınç dayanım değeri hesaplanmıştır. Her bir seri için 6 adet yarım numuneye basınç deneyi uygulanmış ve elde edilen 6 adet basınç deneyi aritmetik ortalaması basınç dayanım değeri olarak alınmıştır.



Şekil 2.6. Basınç dayanım deney cihazı

$$f = \frac{F}{a \times b}$$

Burada;

f: Basınç dayanımı, N/mm²

a: Numunenin kesitinin eni, (40 mm)

b: Numunenin kesitinin boyu, (40 mm)

F: Numuneyi kıran kuvvet, (Newton)

2.3.1.4. İzotermal Kalorimetre Deneyi

Deneysel çalışmada üretilen numunelerin reaksiyon kinetiği özellikleri izotermal kalorimetre cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. *Şekil 2.7*'de gösterilen izotermal kalorimetre cihazı, numunenin ısı akışını referans malzeme ile karşılaştırıp ölçerek numuneyi ve ortamı sabit bir sıcaklıkta tutar.

Kalorimetrik kanalda bulunan sensörler yardımıyla gelen ısı akışı, cihaz monitörüne yansıyan orantılı bir voltaj sinyali üretir. Böylece çimento hamuru numunelerinin ısı akışı gözlemlenmekte ve zaman içinde ölçülmektedir.

Her bir hamur fazı için 20 gr karışım hazırlanmıştır. Hamurun hazırlanmasında her karışım için 0,40 su/bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Pomza hamuru karışımları hazırlandıktan hemen sonra numune ampullere doldurularak cihaza yerleştirilmiştir. Bu numunelerin ısı akışı 72 saat boyunca kaydedilmiştir.



Şekil 2.7. İzotermal kalorimetre cihazı

2.3.1.5. Reometre Deneyi

Deneysel çalışmada *Şekil 2.8* de gösterilen Anton Paar marka reometre cihazı yardımıyla kütlece 3 farklı $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranıyla hazırlanan geopolimer hamur numunelerin rotasyon ve salınım deneyleri yapılmıştır.

Kütlece 3 farklı $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranıyla üretilen geopolimer hamur numuneler hazırlandıktan hemen sonra *Şekil 2.8* de gösterilen ölçüm kabına doldurularak, üretilen numunelerin reolojik özellikleri reometre cihazı yardımıyla tespit edilmiştir. Ölçüm kabının içerisi numunelerin kaymasını önlemek için özel olarak tasarlanmış olup deney sırasında çift taraflı karıştırıcı başlık yardımıyla numuneler karıştırılmıştır.



Şekil 2.8. Reometre cihazı, ölçüm kabı ve karıştırıcı başlık

2.3.1.6. Termogravimetrik Analiz Deneyi

Deneysel çalışmada üretilen numuneler havada kür edilip homojen hale geldikten sonra, geopolimer hamurlar plastik şırıngalara konularak nem kaybını ve karbonatlaşmayı önlemek için şırıngaların içerisine doldurularak şırınganın uçları kapaklarla kapatılmıştır. *Şekil 2.9*'da gösterilen Termogravimetrik analiz cihazı ile önceden hazırlanan numunelere $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızı ile $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtma yapılmıştır. Numuneler üzerinde 1. gün ve 3. gün TGA ölçümleri yapılmıştır. Numunelerde kademeli olarak artan sıcaklığın bir fonksiyonu olarak meydana gelen kütle kaybı (%) tespit edilmiştir.



Şekil 2.9. Termogravimetrik Analiz (TGA) cihazı

2.3.1.7. Sem ve EDX Analizi

Taramalı elektron mikroskobu, numune yüzeyine elektron demeti gönderilerek numune yüzeyini taraması sonucunda görüntü elde edilmesi prensibine göre çalışır. Gönderilen elektronlar ile numunede bulunan atomlar etkileşerek yüzeyin topografyasını çıkarıp etkileşen atom vasıtasıyla numunenin içeriğini belirlenmesi için sinyaller gönderilir. Gönderilen sinyaller toplayıcı vasıtasıyla ekrana aktarılır ve görüntü elde edilir [88].

Üretilen hamur numuneler üzerinde Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) Şekil 2.10'de gösterilen taramalı elektron mikroskobu yardımıyla ile hamur numunelerin içyapı özellikleri incelenmiştir.



Şekil 2.10. SEM cihazı

2.3.2. Geopolimer Harç Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

2.3.2.1. Eğilme Dayanımı Deneyi

Deneysel çalışmada üretilen numuneler 4x4x16 cm boyutlarında dikdörtgen prizma kalıplarına yerleştirilir. Üretilen prizma numunelere TS EN 1015-11 [89] standardında belirtilen şartlara uygun *Şekil 2.6*'te gösterilen cihaz yardımıyla tek noktadan veya çift noktadan yükleme yapılarak maksimum yük değeri elde edilmiştir. Aşağıdaki denklem kullanılarak eğilme dayanım değeri hesaplanmıştır. Her bir seri için 3 adet eğilme deneyi uygulanmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması eğilme dayanım değeri olarak alınmıştır.

Burada;

$$f = 1,5 \frac{F \times L}{bd^2}$$

f: Eğilmede çekme dayanımı, N/mm²

b: Numunenin kesitinin genişliği, (40 mm)

d: Numunenin kesitinin yüksekliği, (40 mm)

F: Numuneye orta noktasından uygulanan kuvvet, (Newton)

L: Destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (100 mm)

2.3.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyi sonucunda iki parçaya ayrılan numunelere düzgün yüzeylerinden TS EN 1015-11 [89] standardında belirtilen şartlara uygun şekilde basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Yükleme hızı olarak 500 N/s yük uygulanan *Şekil 2.6*'de gösterilen cihaz yardımıyla basınç dayanım deneyinde numuneler kırılmıştır. Kırılma sonucunda elde edilen maksimum yük değeri ile aşağıdaki denklem kullanılarak basınç dayanım değeri hesaplanmıştır. Her bir seri için 3 adet numune üretilmiştir. Üretilen bu numunelere önce eğilme deneyi yapılmış ve sonucunda elde edilen 6 adet yarım numuneye basınç deneyi

uygulanmıştır. Elde edilen 6 adet basınç deneyi sonucunun aritmetik ortalaması basınç dayanım değeri olarak alınmıştır.

$$f = \frac{F}{a \times b}$$

Burada;

f: Basınç dayanımı, N/mm²

a: Numunenin kesitinin eni, (40 mm)

b: Numunenin kesitinin boyu, (40 mm)

F: Numunenin kırma kuvveti, (Newton)

2.3.2.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini Deneyi

Yukarıda 2.3.1.2 bölümünde belirtilen aynı yöntemsel yaklaşımla deneyler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

2.3.2.4. Birim Ağırlık Deneyi

Üretilen harç numuneler havada 1 gün, 2 gün, 3 gün, 7 gün ve 28 gün süre sonrasında ağırlıkları tartılmıştır. Üretilen numunelerin kumpas yardımıyla geometrik boyutları ölçülmüştür. Kumpas ile ölçülen geometrik boyutlarına bölünmüştür. Bu şekilde yaklaşık olarak numunelerin birim ağırlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen birim ağırlık değerleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

(A_{KS}=Kür sonrası ağırlık)

Birim Ağırlık (t / m³) = A_{KS} / Numune Boyutları

3. BÖLÜM

BULGULAR - TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar kapsamında hamur fazda yapılan deneyler ile harç fazla yapılan deneylerin sonuçları bu bölümde gösterilmiştir.

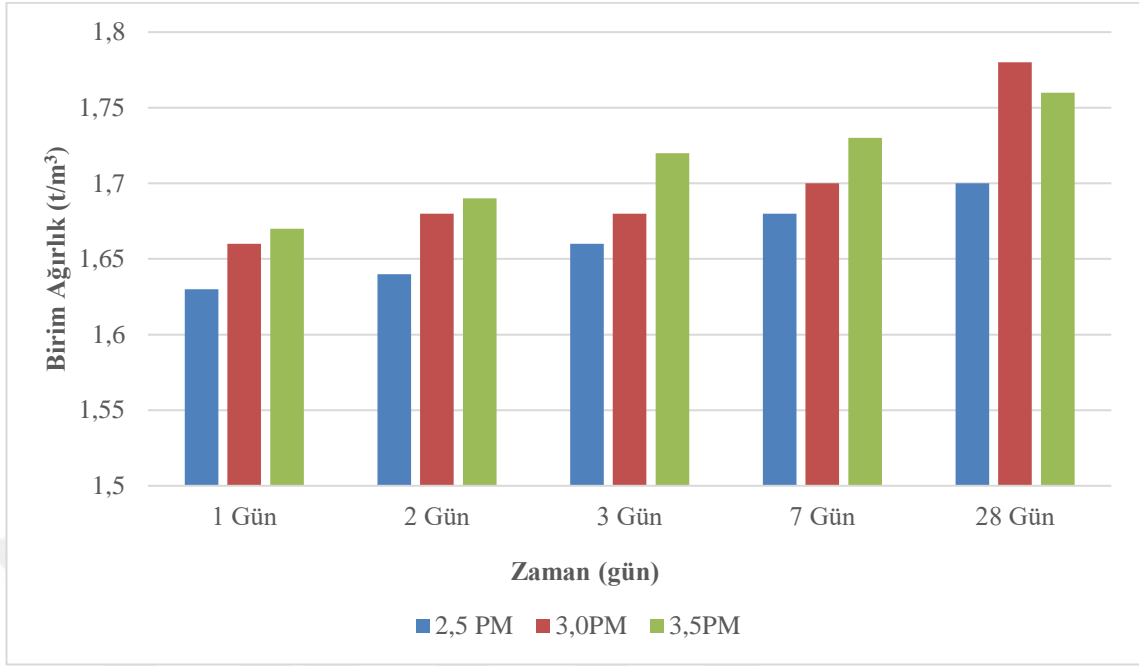
3.1. Hamur Numuneler Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları

3.1.1. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Sertleştirilmiş geopolimer hamur numunelerinin birim ağırlıkları Tablo 3.1 ve Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.1 de 2,5 PM karışım kodlu numuneler tüm yaşlar için birim ağırlık açısından en düşük değere sahiptir. Örneğin 1. gün yapılan birim ağırlık testinde 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM için sırasıyla 1,63 t/m³, 1,66 t/m³ ve 1,67 t/m³ olduğu belirlenmiştir. 7. günde birim ağırlık değerleri 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM için sırasıyla 1,68 t/m³, 1,70 t/m³ ve 1,73 t/m³ olmuştur. Na₂SiO₃/NaOH miktarının kütlece artırılmasıyla hazırlanan numunelerde birim ağırlığın bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Bu artışın, Na₂SiO₃/NaOH oranı arttıkça çözeltinin birim ağırlığının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla geopolimer numunelerin birim ağırlığı Na₂SiO₃/NaOH oranının artmasıyla birlikte artmaktadır. Ayrıca Şekil 3.1'de hava kütleme süresinin artmasıyla birlikte geopolimer numunelerinin birim ağırlığının da arttığı görülmektedir. Kür süresindeki bu artışın, geopolimer hamurların havadan CO₂ olarak Na₂CO₃ yapısı oluşturarak reaksiyona girmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Tablo 3.1. Farklı yaşlardaki hamur numunelerinin birim ağırlık değerleri (t/m³)

Kür Süresi (gün)	1 Gün	2 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün
2,5 PM	1,63	1,64	1,66	1,68	1,70
3,0 PM	1,66	1,68	1,68	1,70	1,78
3,5 PM	1,67	1,69	1,72	1,73	1,76



Şekil 3.1. Farklı yaşlardaki hamur numunelerinin birim ağırlığı grafiği

3.1.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini Deney Sonuçları

Deneysel çalışmada üretilen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki hamur numuneler havada kür edildikten sonra numunelerin 160 mm olan doğrultusundan Ultrasonik dalga hızı ölçülmüştür. Elde edilen ultrasonik dalga hızı değerleri Tablo 3.2' de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Farklı yaşlardaki hamur numunelerinin ultrasonik dalga hızları değerleri (km/s)

Kür Süresi (gün)	1 Gün	2 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün
2,5 PM	0,00	0,90	1,10	2,10	-
3,0 PM	0,00	0,90	1,30	2,20	-
3,5 PM	1,00	1,20	1,70	2,30	-

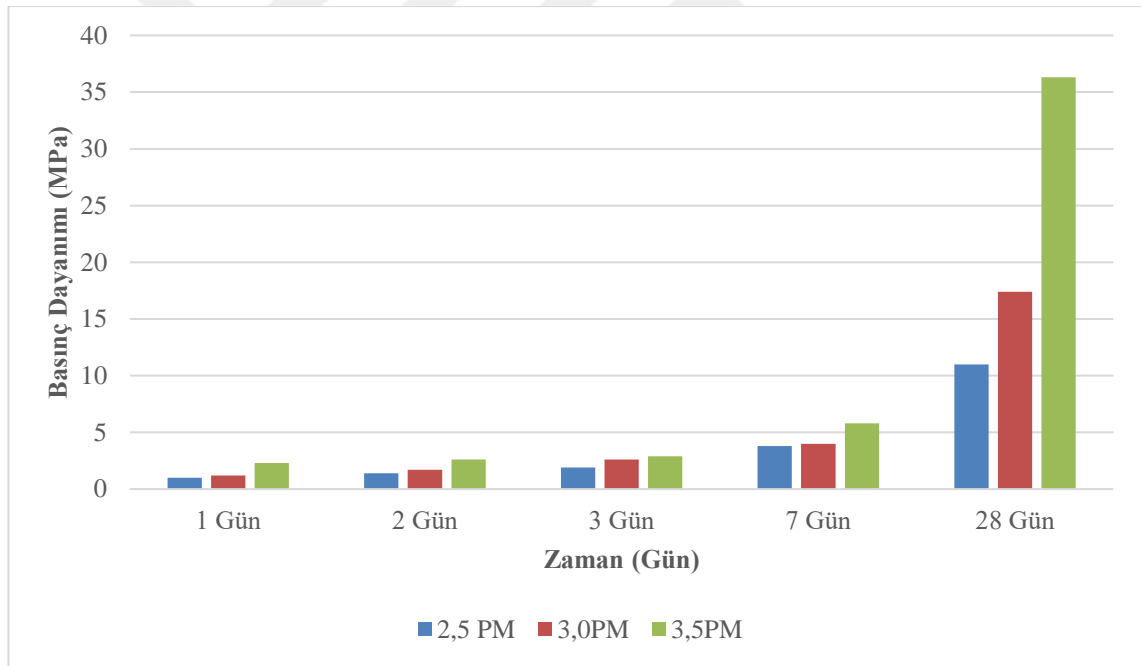
3.1.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Deneysel çalışmada üretilen hamur numunelerinin basınç dayanımları Tablo 3.3'de gösterilmektedir. Şekil 3.2'e göre, 1. gündeki basınç dayanımı 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numuneler için sırasıyla 1,00, 1,20 ve 2,30 MPa olarak belirlenmiştir. 2. gündeki basınç dayanımı 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunesi için 1,40, 1,70 ve 2,60 MPa olarak belirlenmiştir. 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunelerinin 3. gün basınç dayanımı 1,90, 2,60

ve 2,90 MPa olarak belirlenmiştir. 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunelerin 7. gündeki basınç dayanımı 3,80, 4,00 ve 5,80 MPa olarak belirlenmiştir. 28 günlük basınç dayanımı, 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM için sırasıyla 11,00 MPa, 17,40 MPa ve 36,30 MPa olarak belirlenmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranındaki artışın, üretilen hamur numunelere her yaşta basınç dayanımına olumlu etki yaptığı görülmüştür.

Tablo 3.3. Hamur numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları (MPa)

Kür Süresi (gün)	1 Gün	2 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün
2,5 PM	1,00	1,40	1,90	3,80	11,00
3,0 PM	1,20	1,70	2,60	4,00	17,40
3,5 PM	2,30	2,60	2,90	5,80	36,30

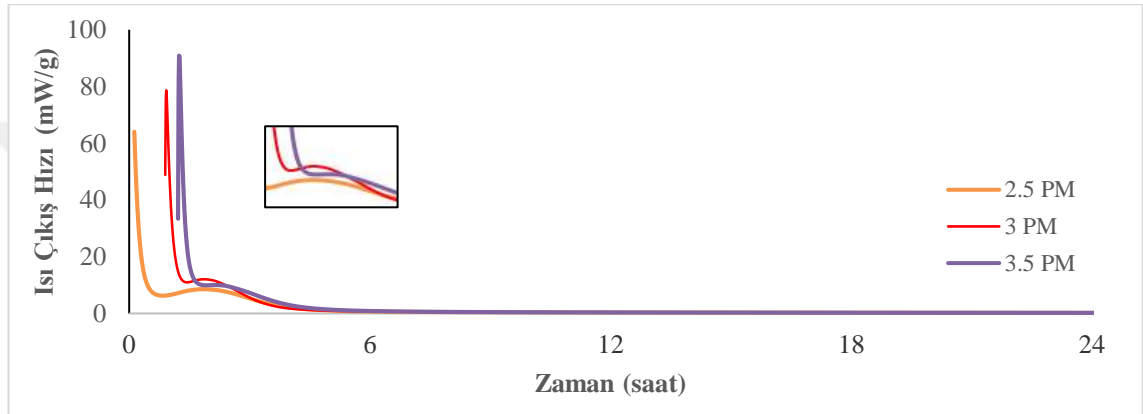


Şekil 3.2. Farklı yaşlardaki hamur numunelerinin basınç dayanımı grafiği

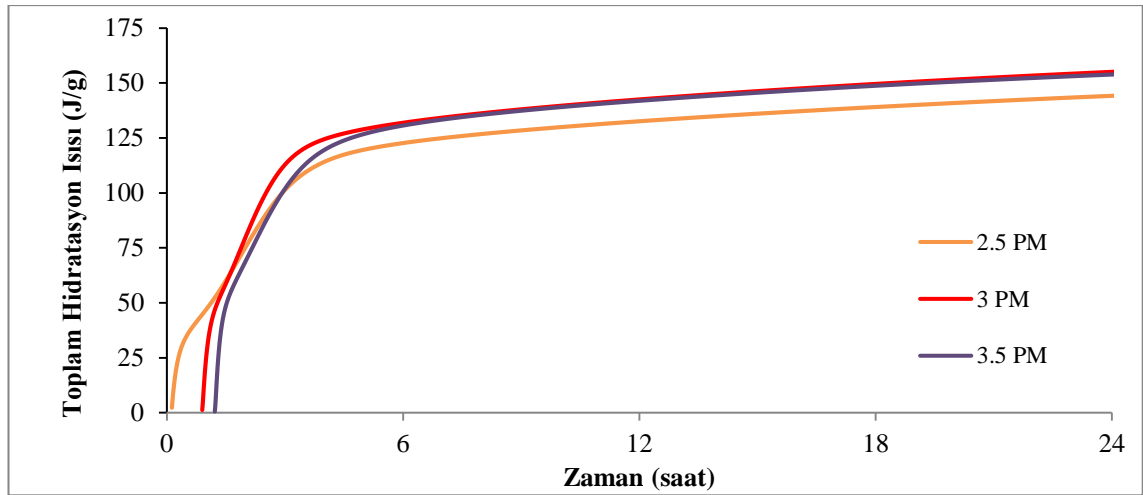
3.1.4. İzotermal Kalorimetre Deney Sonuçları

Pomza esaslı geopolimer hamurlara 25 °C'de 72 saat izotermal kalorimetri testleri yapılmış ve test sonuçları Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 ' de sunulmuştur. Şekil 3.3 göre 3PM diğerlerinden daha yüksek hidrasyon oranına sahiptir. Ancak, 3.5PM'lik hidrasyon oranı, 3PM'e çok yakındır. Bu grafiğe göre pomza esaslı geopolimerlerde hidrasyonun

oda koşullarında hemen başlamadığı, belli bir süre sonra başladığı yorumu yapılabilir. Hamur numuneler hazırlandıktan yaklaşık 100 dk, 155 dk, 170 dk sonra saat 2,5PM, 3,0PM, 3,5PM olarak hidrasyona başlanır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı arttıkça hidrasyonun daha geç başladığı gözlemlendi. Şekil 3.4' e göre deneysel sonuçlar incelendiğinde hidrasyon ısı değerlerinin 160 J/g ile 171,8 J/g arasında değiştiği görülmektedir. Görüldüğü gibi 3,0 PM en yüksek hidrasyon ısısına sahiptir. Hidratasyonu ilk başlayan numune 2,5 PM olmasına rağmen toplam hidrasyon ısı değeri diğer iki numuneye göre daha düşüktür.



Şekil 3.3. Pomza bazlı geopolimer hamurların hidrasyon oranı



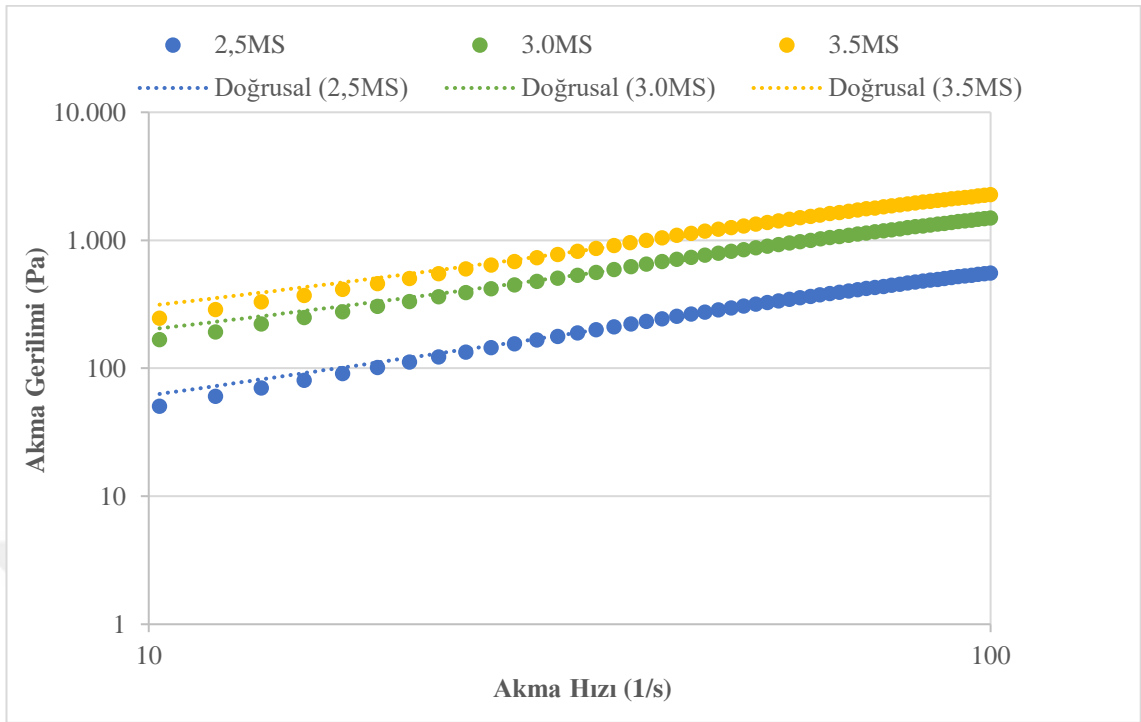
Şekil 3.4. Pomza bazlı geopolimer hamurların toplam reaksiyon ısısı

3.1.5. Reometre Deneysel Sonuçları

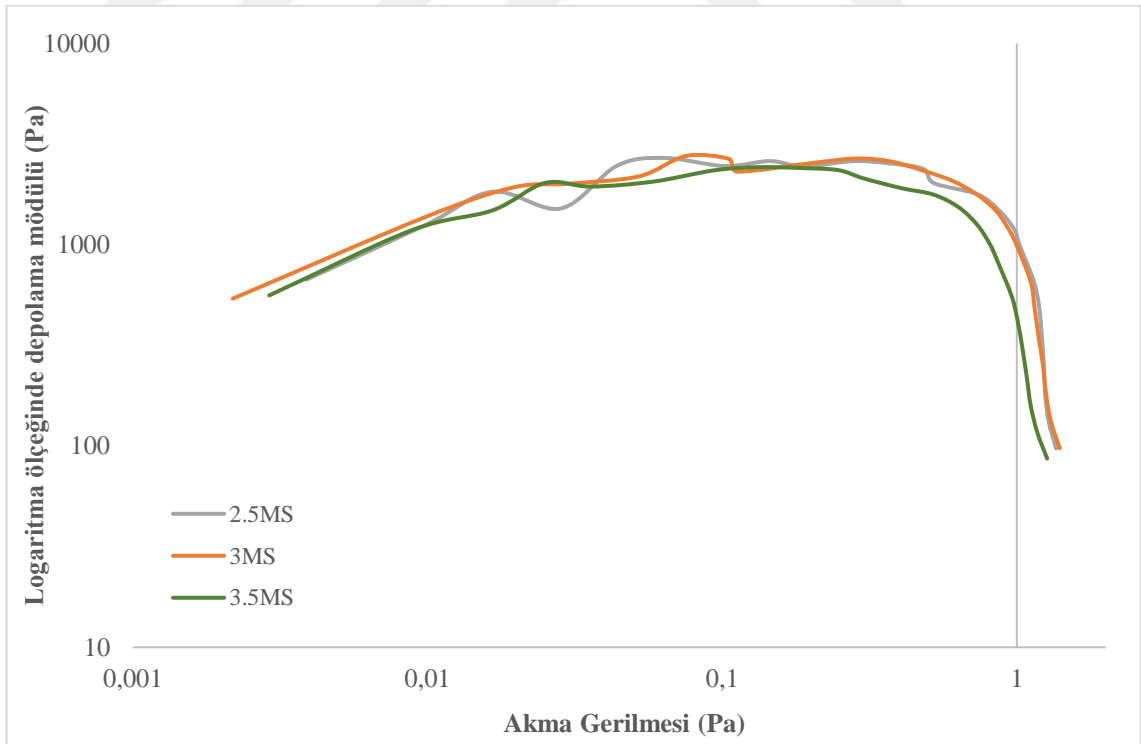
Pomza esaslı geopolimer hamurların reolojik özelliklerini karakterize etmek ve ölçmek için rotasyon ve salınım deneyleri yapılmıştır. Kütlece 3 farklı oranda hazırlanan

geopolimer hamurların *Şekil 3.5* de akma gerilimi-akma hızı eğrileri sunulmuştur. Kütlece 2,5 Na₂SiO₃/NaOH oranlı geopolimer hamurun akma gerilmesi 41 Pa, 3,0 Na₂SiO₃/NaOH oranlı geopolimer hamurun akma gerilmesi 116 Pa, 3,5 Na₂SiO₃/NaOH oranlı geopolimer hamurun akma gerilmesi ise 207 Pa olarak ölçülmüştür. Bu hamurların viskoziteleri ise sırasıyla 5765 mPa.s, 16137 mPa.s ve 24658 mPa.s olarak tespit edilmiştir. Ayrıca geopolimer hamurların reolojik davranışı Bingham modeline benzer davranış sergilemiştir [76]. Değerler literatürdeki diğer çalışmalarla da benzerlik göstermektedir [82].

Kütlece 3 farklı oranda üretilen geopolimer hamurların oluşma kinetiği, zaman tarama ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir. Yapılanmanın oluşabileceği dinlenme süresi öncesinde mükemmel bir dağılım sağlamak için ön kesme işlemi uygulanmıştır. Geopolimer hamurların katı hal davranışını yarı yarıya tanımlayan viskoelastik davranışın elastik kısmını depolama modülü ile belirlenmeye çalışılmıştır. Doğrusal viskoelastik alanı ve karşılık gelen kritik gerinim değerini belirlemek için gerçekleştirilen gerinim tarama ölçümleri *Şekil 3.6* de sunulmuştur. Pomza esaslı geopolimer hamurların kritik gerinimi %0,002 ile %0,004 arasında değişmektedir. En yüksek depolama modülü 2,5 ve 3,0 oranlı geopolimer hamurlarında görülürken en düşük depolama modülü 3,5 oranlı geopolimer hamurda görülmüştür. Birbirlerine göre nispeten daha yüksek oranda Na₂SiO₃ kullanılarak hazırlanan geopolimer hamurda daha düşük depolama modülü ve daha yüksek kritik gerinim değeri ile yansıtılan geopolimerizasyonu kinetiği gözlemlenmiştir. Bu durum literatürdeki diğer çalışmalarla da benzerlik göstermiştir [90].



Şekil 3.5. Akma gerilimi-akma hızı eğrileri

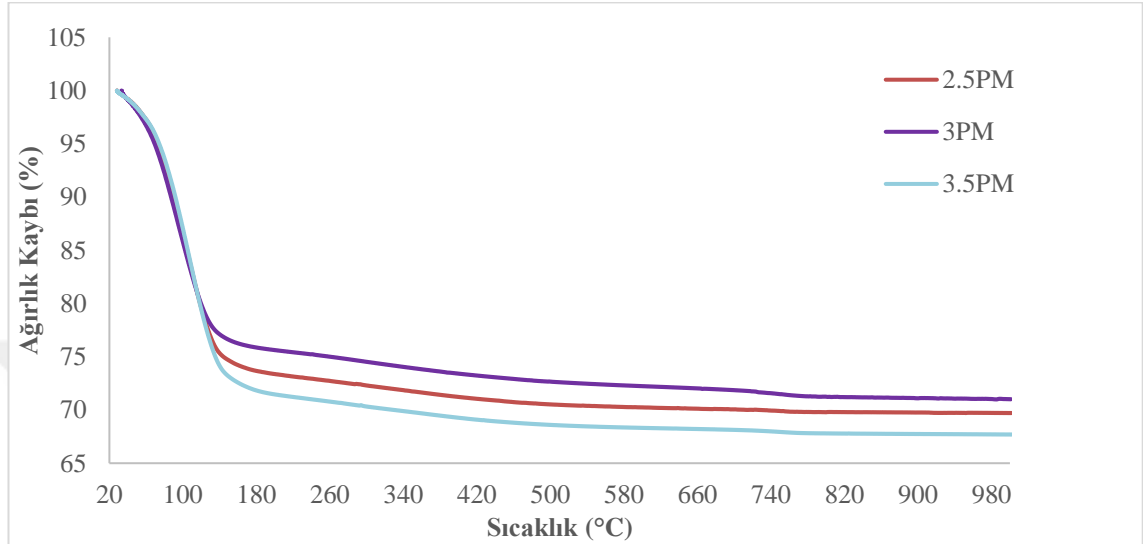


Şekil 3.6. Logaritma ölçeğinde depolama modülü-akma gerilmesi grafiği

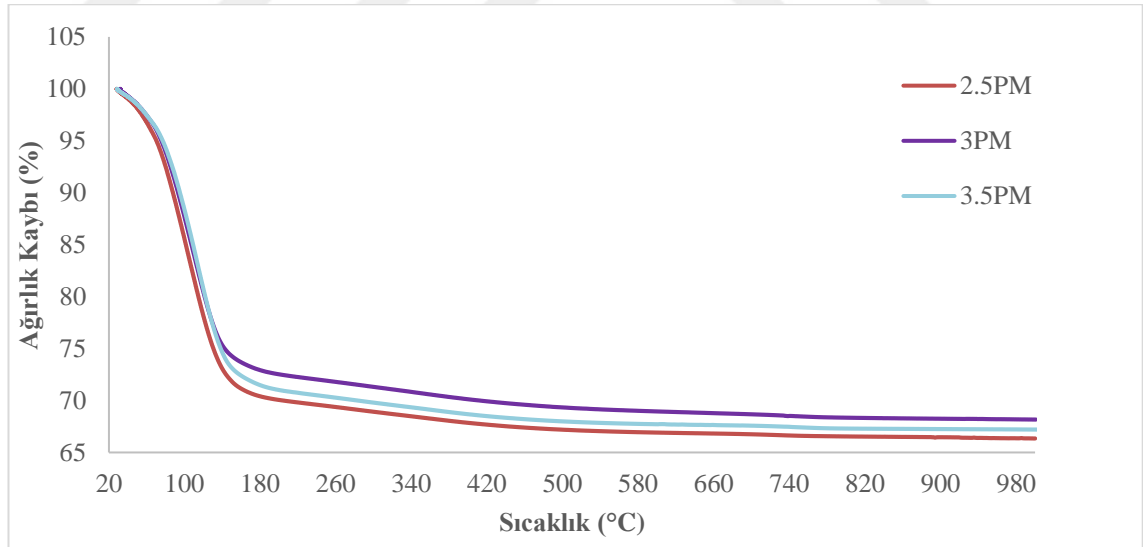
3.1.6. Termogravimetrik Analiz Deney Sonuçları

Termogravimetrik analiz cihazı ile önceden hazırlanan numunelere 15 °C/dak ısıtma hızı ile 1000 °C'ye kadar ısıtma yapılmıştır. Numuneler üzerinde 1. gün ve 3. gün TGA ölçümleri yapılmıştır. Artan sıcaklıkla birlikte serbest suyun buharlaşmasıyla bağlantılı olarak ağırlıkta 120 °C'ye kadar hızlı bir azalma meydana gelmiştir. Tüm numunelerde 100-500 °C arasında ağırlık kaybı olmasına rağmen ilk aşamaya göre daha yavaş olmuştur. 500 °C'den sonra ağırlıktaki azalma çok daha azalmış ve eğri neredeyse yatay hale gelmiştir. 138 °C ile 500 °C arasındaki düşüşün 138 °C -300 C ye kadar N-A-S-H ve gel gözenekleri içerisinde sıkışan suyun buharlaşması sonucu bir azalma olduğu düşünülmektedir. Yani hidratlanmış jelin dehidroksilasyonu olarak da ifade edilebilir [91-93]. Literatüre göre TGA verilerinde 300 °C'nin üzerindeki ağırlık kayıpları kimyasal olarak bağlı suyun dehidrasyonuna bağlanmaktadır [94]. Ranjbar vd. (2014) yılındaki çalışmasında FA/POFA bazlı geopolimerlerde Termogravimetrik Analizin 4 aşamada gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu aşamalar; Su ve OH gruplarının buharlaşması, kalsiyum hidroksit gibi geopolimer bileşenlerin ayrışması, nefelin evresine dönüşüm, ağırlık kayıplarının değişmediği aşamalardan oluştuğunu belirtmiştir [94]. 138 °C de meydana gelen azalma, geopolimerleşme aşamasından önce solisyon hazırlamak için eklenen suyu buharlaşması olarak değerlendirilebilir. Bu durum Škvára vd. (2009) çalışmasında da belirttiği gibi, 5 nm üzerindeki gözeneklerdeki suyu buharlaşması olarak düşünülebilir [95]. 300°C - 400°C arasındaki ağırlık kayıpları ise kimyasal olarak bağlı durumda bulunan suyun dehidrasyonu olarak paralellik gösterir. 400 °C - 500 °C arasındaki ağırlık kaybı ise demir oksitin kristalize olmasıyla açıklanabilir. 138 °C - 500 °C arasındaki ağırlık kayıpları faz değişimleri sırasında hidroksil gruplarındaki bağlı bulunan suların buharlaşması olarak değerlendirilmektedir [94]. 500 °C - 800 °C de azalma ise nefelin evresine dönüşüm aşamasındaki kayıplardan oluştuğu değerlendirilmektedir. 800 °C - 1000 °C de arası sabit kalma aşamalarından oluşur. Nath vd. (2020) çalışmasında 3 farklı boyutta kullandığı uçucu külde yaptığı TGA analizinde, ince malzemelerin daha reaktif olduğunu ve bu yüzden eklenen alkali çözeltilisinin çoğunlukla N-A-S-H jeli oluşumunda tüketildiğini belirtmiştir. Bu durumun geopolimer matrisi içerisine nüfus eden CO₂ miktarını azalttığını belirtmiştir [91]. *Şekil 3.7* ve *Şekil 3.8* 'e göre 1 günlük 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunelerindeki ağırlık kaybı sırasıyla %8,02, %6,35 ve %7,95 olarak gözlemlendi. 3 günlük 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM örneklerinde ağırlık kaybı sırasıyla %8,0,

%6,95 ve %6,81 olarak gözlemlendi. 2,5 PM numunesindeki ağırlık kaybı, 1 güne kıyasla 3 günde neredeyse aynı olarak kalmıştır. Ağırlık kaybı 3,0 PM numunesinde artarken 3,5 PM numunesinde azalmıştır.



Şekil 3.7. 1 gün kür edilen pomza bazlı geopolimer hamurun ağırlık kaybı (%)

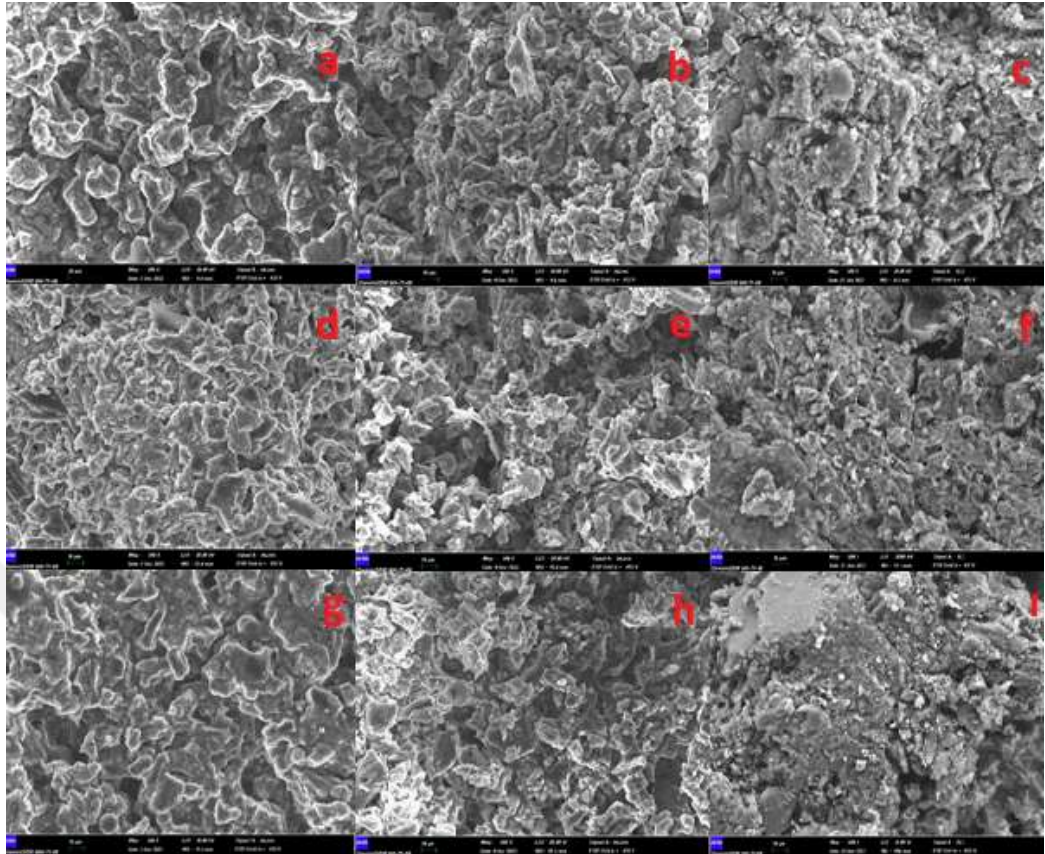


Şekil 3.8. 3 gün kür edilen pomza bazlı geopolimer hamurun ağırlık kaybı (%)

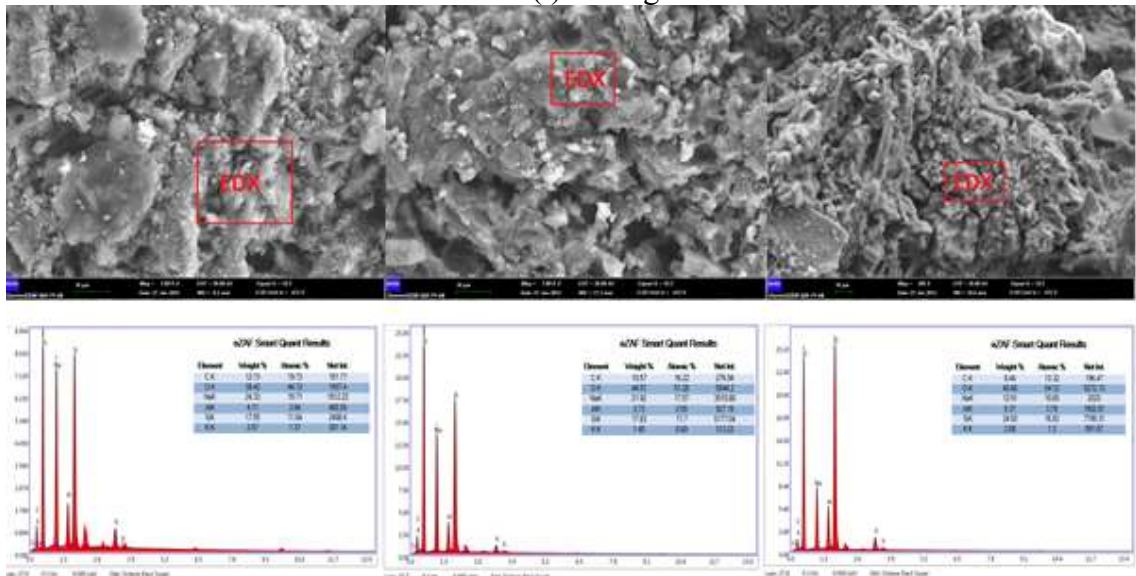
3.1.7. Sem ve EDX Analiz Sonuçları

Deneysel çalışmada üretilen numunelere ait 1 günlük, 3 günlük ve 28 günlük Sem görüntüleri

Şekil 3.9'da ve 28 günlük EDX sonuçları da Şekil 3.10'da sunulmuştur.



Şekil 3.9. 2,5 oranlı 1 günlük (a), 3 günlük (b), 28 günlük (c); 3 oranlı 1 günlük (d), 3 günlük (e), 28 günlük (f); 3,5 oranlı 1 günlük (g), 3 günlük (h), 28 günlük (i) SEM görüntüleri



Şekil 3.10. 28 günlük EDX sonuçları 2,5 (a)-3,0 (b)-3,5 (c) oranlı

SEM görüntülerinde geopolimer numuneleri için, geopolimer jeli, gözenekler, reaksiyona girmemiş toz partikülleri gösterilmektedir. Karışımlar arasındaki SEM görüntülerindeki

farklılıklar göze çarpmaktadır. Hazırlanan numunelerde 1 günlük ve 3 günlük SEM görüntülerinde kompakt olmayan, boşluklu ve kırılğan bir yüzeye sahip geopolimer jeli ile düşük bir çözünmeye işaret eden çok sayıda reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş pomza partikülleri görülmektedir. Bu gözlem başka araştırmacılar tarafından da yapılmıştır [96]. 28 günlük SEM görüntülerinde ise birkaç reaksiyona girmemiş öncü parçacıkla daha homojen ve daha yoğun bir mikro yapı görülmektedir. 28 günlük SEM görüntülerine bakıldığında 3,5 PM numunesinde geopolimerleşmenin daha fazla olduğu ve daha yoğun bir yapı olduğu *Şekil 3.10* de verilen EDX analiz sonuçlarıyla da örtüşmektedir.

Şekil 3.10'de 28 günlük EDX verileri gösterilmektedir. Element bileşimlerinin miktarları, geopolimer hamurların yüzeyi üzerinde haritalama analizi yapılarak SEM-EDS kullanılarak oluşturulmaktadır. Pomza tozunun ana element bileşimleri Si, Na ve Al elementleridir. Bunlar, amorf bir alkali alüminosilikat jelin geopolimerizasyon ürünü olduğunu göstermektedir [96-98]. Böylece EDX analiz sonuçlarına göre 3,5PM-1 pomza bazlı geopolimer hamurun basınç dayanımlarında elde edilen artışı desteklemiştir.

Alkali çözeltinin Si/Na veya Si/K atomik oranları çözünen malzemenin polimerleşme derecesini büyük ölçüde etkilemektedir [99-100]. Si/Na oranlarının belirli bir orana kadar artmasıyla basınç dayanımında artış olduğu önceki çalışmalarda rapor edilmiştir. Benzer sonuç bu çalışmada da görülmektedir. Buna göre 3,5 PM, 3,0 PM, 2,5 PM numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 36,30, 17,40 ve 11,00 MPa olarak elde edilirken, Si/Na oranları sırasıyla 1.59, 0.67, 0.59 olarak elde edilmiştir.

Şekil 3.9'da oluşan geopolimer jel yapısı ve birbirine bağlanmış geopolimerleşmiş pomza taneleri resim c ve f'den oldukça farklı bir mikro yapı göstermektedir ve sodyum kristallerinin yaklaşık hepsi geopolimerleşme reaksiyonlarında tüketilmiştir. Bu durum EDX sonuçlarına göre Si/Na oranı (1,59) ve 28 günlük basınç dayanım sonuçlarını da açıklamaktadır.

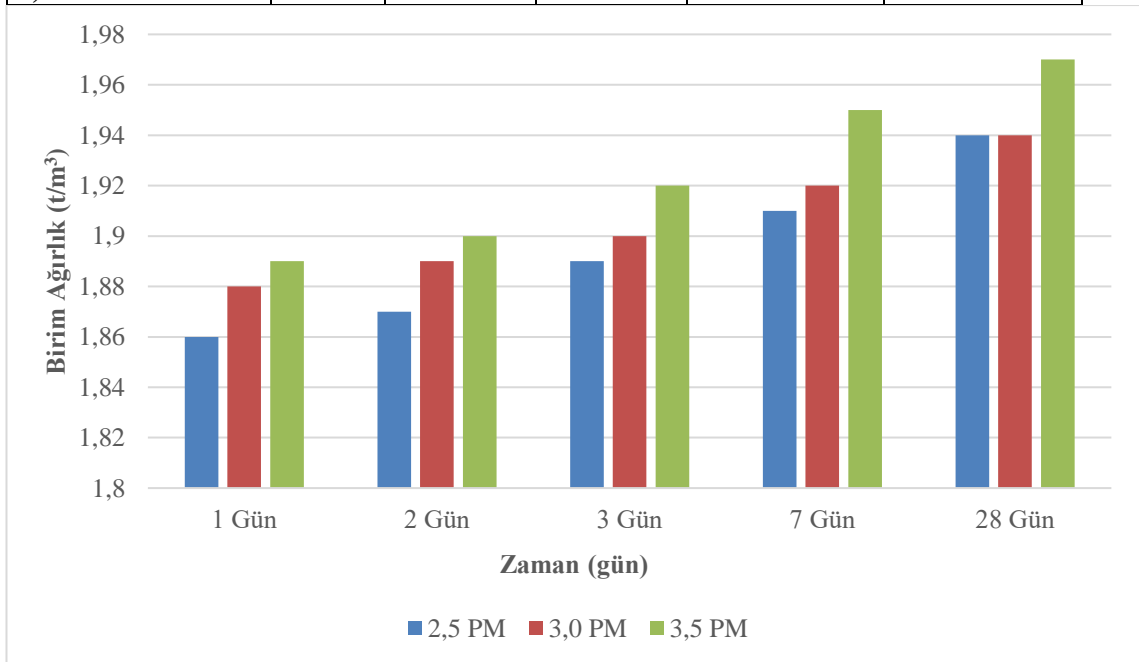
3.2. Harç Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

3.2.1. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Sertleştirilmiş geopolimer harç numunelerinin birim ağırlıkları Tablo 3.4' de gösterilmiştir. Şekil 3.11 'de 2,5 PM göre karışım kodlu numuneler tüm yaşlar için birim ağırlık açısından en düşük değere sahiptir. Örneğin 1. gün yapılan birim ağırlık testinde 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM için sırasıyla 1,86 t/m³, 1,88 t/m³ ve 1,89 t/m³ olduğu belirlenmiştir. 7. günde birim ağırlık değerleri 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM için sırasıyla 1,91 t/m³, 1,92 t/m³ ve 1,95 t/m³ olmuştur. Na₂SiO₃/NaOH miktarının kütlece arttırılmasıyla hazırlanan numunelerde birim ağırlığın bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Bu artışın, Na₂SiO₃/NaOH oranı arttıkça çözeltinin birim ağırlığının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla geopolimer numunelerinin birim ağırlığı Na₂SiO₃/NaOH oranının artmasıyla birlikte artmaktadır. Ayrıca Şekil 3.11 de hava kütleme süresinin artmasıyla birlikte geopolimer numunelerinin birim ağırlığının da arttığı görülmektedir. Kür süresindeki bu artışın, geopolimer hamurların havadan CO₂ olarak Na₂CO₃ yapısı oluşturarak reaksiyona girmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Tablo 3.4. Farklı yaşlardaki harç numunelerinin birim ağırlık değerleri (t/m³)

Kür Süresi (gün)	1 Gün	2 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün
2,5 PM	1,86	1,87	1,89	1,91	1,94
3,0 PM	1,88	1,89	1,90	1,92	1,94
3,5 PM	1,89	1,90	1,92	1,95	1,97



Şekil 3.11. Farklı yaşlardaki harç numunelerinin birim ağırlığı grafiği

3.2.2. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini Deney Sonuçları

Deneysel çalışmada üretilen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki harç numuneler havada kür edildikten sonra numunelerin 160 mm olan doğrultusundan Ultrasonik dalga hızı ölçülmüştür. Elde edilen Ultrasonik dalga hızı değerleri Tablo 3.5' de gösterilmiştir. Kütlece $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2,5 olarak üretilen numunenin ultrasonik atımlı dalga hızı 2,30 km/s olarak ölçülmüştür. Kütlece $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı artan numunelerde yapılan ölçümlerde ultrasonik atımlı dalga hızının arttığı görülmüştür.

Tablo 3.5. Farklı yaşlardaki harç numunelerinin ultrasonik dalga hızları değerleri (km/s)

Kür Süresi (gün)	7 Gün	28 Gün
2,5 PM	2,20	2,30
3,0 PM	2,60	2,80
3,5 PM	3,30	4,20

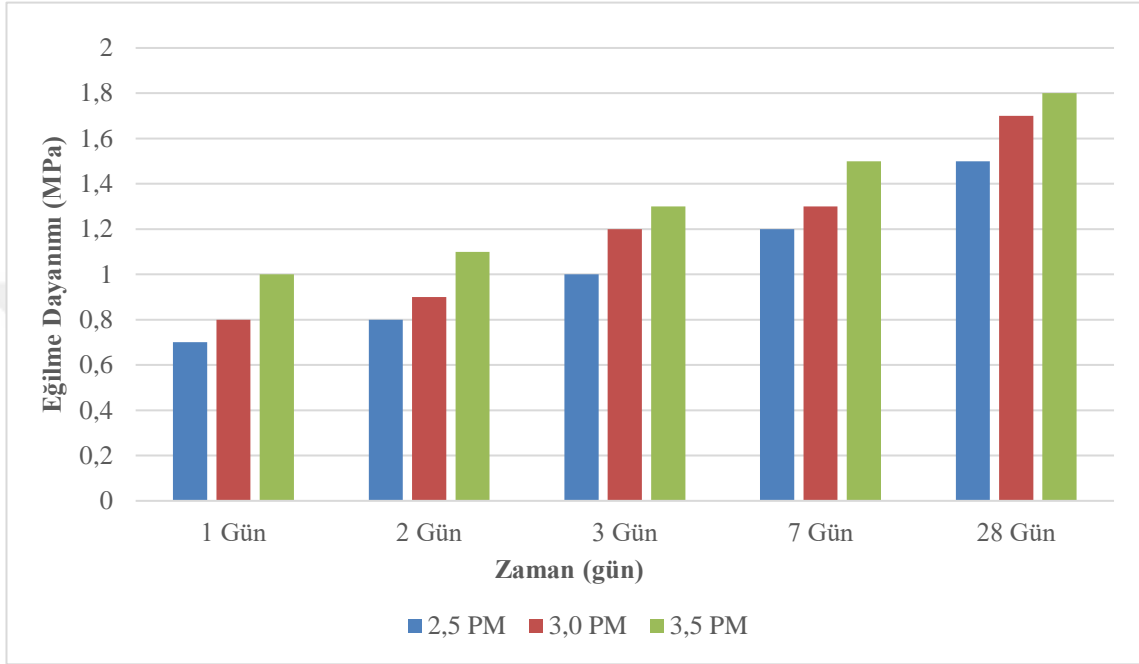
3.2.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Deneysel çalışmada üretilen harç numunelerin eğilme dayanımları Tablo 3.6' da gösterilmektedir. Şekil 3.12 'e göre, 1. gündeki eğilme dayanımı 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numuneler için sırasıyla 0,70, 0,80 ve 1,00 MPa olarak belirlenmiştir. 2. gündeki eğilme dayanımı 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunesi için sırasıyla 0,80, 0,90 ve 1,10 MPa olarak belirlenmiştir. 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunelerin 3. gün eğilme dayanımı sırasıyla 1,00, 1,20 ve 1,30 MPa olarak belirlenmiştir. 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunelerin 7. gündeki eğilme dayanımı 1,20, 1,30 ve 1,50 MPa olarak belirlenmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı, 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM için sırasıyla 1,50 MPa, 1,70 MPa ve 1,80 MPa olarak belirlenmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranındaki artışın, üretilen harç numunelerde her yaşta eğilme dayanımına olumlu etki yaptığı görülmüştür.

Kür Süresi (gün)	1 Gün	2 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün
2,5 PM	0,70	0,80	1,00	1,20	1,50

3,0 PM	0,80	0,90	1,20	1,30	1,70
3,5 PM	1,00	1,10	1,30	1,50	1,80

Tablo 3.6 Harç numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçları (MPa)



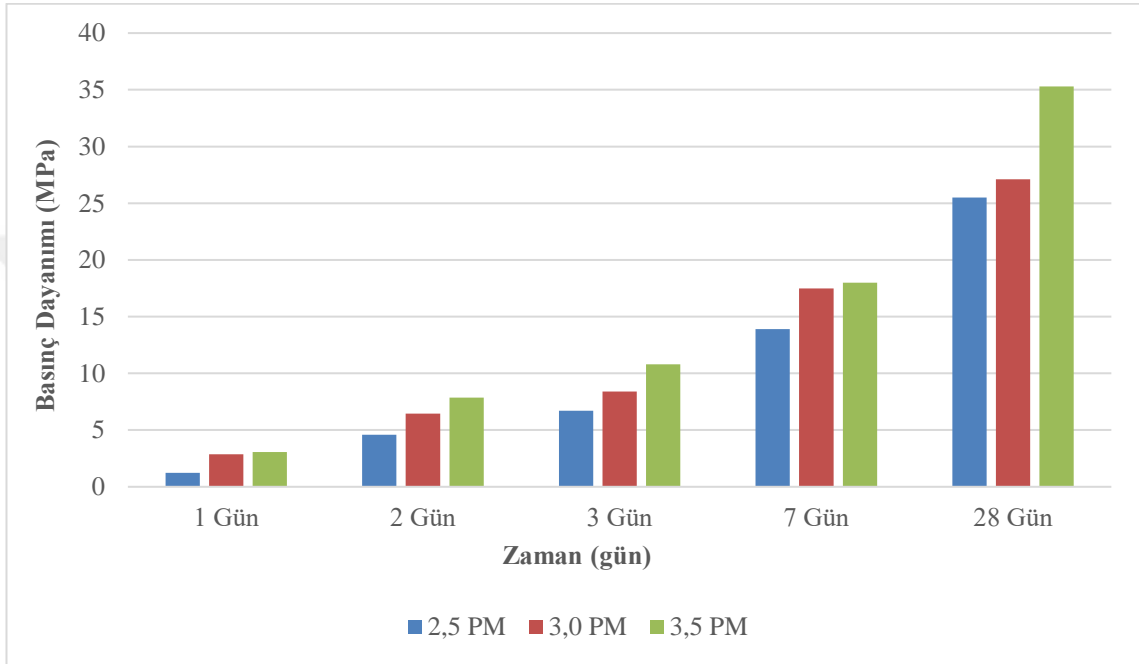
Şekil 3.12. Farklı yaşlardaki harç numunelerinin eğilme dayanımı grafiği

3.2.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Deneysel çalışmada üretilen harç numunelerin basınç dayanımları Tablo 3.7' de gösterilmektedir. Şekil 3.13' e göre, 1. gündeki basınç dayanımı 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numuneler için sırasıyla 1,22, 2,86 ve 3,06 MPa olarak belirlenmiştir. 2. gündeki basınç dayanımı 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunesi için sırasıyla 4,58, 6,46 ve 7,86 MPa olarak belirlenmiştir. 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunelerin 3. gün basınç dayanımı sırasıyla 6,70, 8,40 ve 10,80 MPa olarak belirlenmiştir. 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM numunelerin 7. gündeki basınç dayanımı sırasıyla 13,90, 17,50 ve 18,00 MPa olarak belirlenmiştir. 28 günlük basınç dayanımı, 2,5 PM, 3,0 PM ve 3,5 PM için sırasıyla 25,50 MPa, 27,10 MPa ve 35,30 MPa olarak belirlenmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranındaki artışın, üretilen harç numunelerde her yaşta basınç dayanımına olumlu etki yaptığı görülmüştür.

Tablo 3.7. Harç numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları (MPa)

Kür Süresi (gün)	1 Gün	2 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün
2,5 PM	1,22	4,58	6,70	13,90	25,50
3,0 PM	2,86	6,46	8,40	17,50	27,10
3,5 PM	3,06	7,86	10,80	18,00	35,30



Şekil 3.13. Farklı yaşlardaki harç numunelerinin basınç dayanımı grafiği

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı kütle oranlarında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ kullanılarak aktive edilen pomza tozunun geopolimerizasyonu ve reolojisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

4.1.1. Hamur Numuneler Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları

Hamur numunelerdeki 28 günlük birim ağırlık artışı, havadaki CO_2 ile hamur numunelerinin reaksiyonu sonucunda Na_2CO_3 oluşumu ile ilişkilidir. Bu artış numuneler hazırlanırken karışımda kullanılan Na_2SiO_3 ile orantılı olarak artmış olduğu görülmüştür.

DeneySEL sonuçlara göre $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2,5 ve 3,0 olan hamur numunelerde 1. Gün için ultrasonik atımlı dalga hızı verisi elde edilememiştir. 7.gün sonunda en yüksek değer $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 3,5 olan numunede elde edilmiştir. Ancak 28 gün sonunda hiçbir numunede ultrasonik atımlı dalga hızı verisi elde edilememiştir.

28 günlük en yüksek basınç dayanımı kütlece 3,5 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranıyla hazırlanan hamur numunesinde elde edilmiştir. Numune hazırlanırken kullanılan sodyum silikat

miktarındaki kütlece artış daha fazla silika jel oluşturmuş ve böylece ileriki yaşlarda daha yüksek mukavemet sağladığı görülmüştür.

Deneysel sonuçlara göre $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2,5 olan pomza bazlı geopolimer hamurların hidratasyon sürecine daha erken başlamasına rağmen toplam hidratasyon ısı en düşük seviyededir.

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 3,0 ve 3,5 olan hamur numuneleri birbirine oldukça benzer değerler göstermiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının kütlece artması sonucunda Na_2O içeriği de artmıştır. Na_2O içeriğindeki artış, çözünme-jelleşme durumunu gösteren tepe noktalarında kaymalara neden olduğu değerlendirilmiştir.

Kütlece 2,5 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranlı geopolimer hamurun akma gerilmesi 41 Pa, 3,0 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranlı geopolimer hamurun akma gerilmesi 116 Pa, 3,5 $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranlı geopolimer hamurun akma gerilmesi ise 207 Pa olarak ölçülmüştür. Bu hamurların viskoziteleri ise sırasıyla 5765 mPa.s, 16137 mPa.s ve 24658 mPa.s olduğu ve tüm numunelerin reolojik davranışının ise Bingham modeline benzer davranış sergilediği görülmüştür. En yüksek depolama modülü kütlece 2,5 ve 3,0 oranlı geopolimer hamurlarda görülürken en düşük depolama modülü 3,5 oranlı geopolimer hamurda görülmüştür.

TGA testi sonuçlarında gözlemlenen verilere göre 120 °C'ye kadar olan ağırlık kaybının karışımlar içerisinde bulunan serbest sudan kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda, 1 günlük sonuçlara göre en yüksek ağırlık kaybı sırasıyla 3,5 PM, 2,5 PM ve 3,0 PM numunelerinde gözlemlenmiştir. Ancak 3 günlük sonuçlara bakıldığında en yüksek ağırlık kaybının sırasıyla 3,5 PM, 3,0 PM ve 2,5 PM numunelerinde olduğu görülmüştür. Numuneler üzerindeki ağırlık kaybındaki azalmanın geopolimer jellerin bozulmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Erken yaşlarda SEM görüntülerinde çok sayıda reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş pomza parçacıklarının kompakt olmayan, gözenekli bir yapısı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak ilerleyen günlerde daha yoğun ve daha homojen bir yapı gözlemlenmiştir. EDX sonuçlarına göre 3,5 PM numunesinin daha yoğun bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

4.1.2. Harç Numuneler Üzerinde Yapılan Deneysel Sonuçları

Harç numunelerdeki 28 günlük birim ağırlık artışı, havadaki CO₂ ile hamur numunelerinin reaksiyonu sonucunda Na₂CO₃ oluşumu ile ilişkilidir. Bu artış numuneler hazırlanırken karışımda kullanılan Na₂SiO₃ ile orantılı olarak artmış olduğu görülmüştür.

Deneysel sonuçlara göre kütlece Na₂SiO₃/NaOH oranı 28 gün sonunda ultrasonik atımlı dalga hızı verisi en yüksek olan numune 3,5 oranlı olan numune olarak ölçülmüştür. Na₂SiO₃/NaOH oranı arttıkça yapılan ölçümlerde ultrasonik atımlı dalga hızının arttığı görülmüştür.

Harç numunelerdeki eğilme ve basınç dayanım sonuçları kür süresinin artması ile eğilme ve basınç dayanım değerlerinin artma eğiliminde olduğu görülmüştür. 28 günlük en yüksek basınç ve eğilme dayanımı kütlece 3,5 Na₂SiO₃/NaOH oranıyla hazırlanan harç numunesinde elde edilmiştir. Numune hazırlanırken kullanılan sodyum silikat miktarındaki kütlece artış daha fazla silika jel oluşturmuş ve böylece ileriki yaşlarda daha yüksek mukavemet sağladığı görülmüştür.

4.2. Öneriler

Hidroksitlere ve silikatlara daha az çevresel etki ve minimum maliyetle alternatif aktivatörlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Alkali aktivatörlerin üretimi sırasında da CO₂ ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle mevcut alkali aktivatörleri değiştirecek yeni biyomalzemelere ihtiyaç vardır.

Geopolimerin ortam sıcaklığında, kür süresi ile erken yaş mukavemet kazanımı arasındaki ilişkinin açıklanması için daha fazla çalışmaya ihtiyacı vardır.

Geopolimerlerin dayanıklılığını ve mikro yapısal özelliklerini kapsamlı bir şekilde tanımlamak ve test yöntemlerinin ve doğrulama tekniklerinin geliştirilmesini kolaylaştırmak için farklı laboratuvar ve yerinde test koşulları altında uzun vadeli tekrarlı testler gereklidir. Bu nedenle geopolimer için ek uzun vadeli kütleme çalışmalarına ihtiyaç vardır.

KAYNAKÇA

- [1] Cembureau, 2019. The View of Cement Sector: Recarbonation - How Concrete Locks Up and Stores Carbon Dioxide Permanently.
- [2] Our World in Data, Türkiye Sera Gazı Envanteri, PwC Analizi 2023.
- [3] Coelho, A., Brito, J., 2013. Analysis of the viability of construction and demolition waste recycling plants in portugal- part II: economic sensitivity analysis. **Journal of Cleaner Production**, **39**: 329-337.
- [4] Huntzinger, D.N., Eatmon, T.D., 2009. A life-cycle assessment of portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, **17**: 668-675.
- [5] Yılgin, M. ve Akkoca, D. B., 2008. Bigadiç klinoptilolitik tüfün kimyasi, yüzey alanı ve gözeneklilik özelliklerine farklı asitlerin etkilerinin incelenmesi. **Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, **20** (1): 175-184.
- [6] Wongsa, A., Sata, V., Nuaklong, P., Chindaprasirt, P., 2018. Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, **188**: 1025-1034.
- [7] Davidovits, J., 1989. Geopolymers and geopolymeric materials. **Journal of Thermal Analysis**. **35** (2): 429-441.
- [8] Zhang, Y. S., Sun, W., Li, Z. J., 2010. Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. **Applied Clay Science**, **47** (3-4): 271-275.
- [9] Ameri, F., Shoaie, P., Zareei S. A., Behforouz, B., 2019. Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars. **Construction and Building Materials**, **222**: 49-63.

- [10] Posi, P., Teerachanwit, C., Tanutong, C., Limkamoltip, S., Lertnimoolchai, S., Sata, V., Chindaprasirt, P., 2013. Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block. **Material and Design**, **52**: 580–586.
- [11] Huiskes, D. M. A., Keulen, A., Yu, Q.L., Brouwers, H. J. H., 2016. Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete. **Material and Design**, **89**: 516–526.
- [12] Li, B., Xu, L., Shi, Y., Chi, Y., Liu, Q., Li, C., 2018. Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, **181**: 474–486.
- [13] Shafigh, P., Alengaram, U.J., Bin Mahmud, H., Jumaat, M. Z., 2013. Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash. **Material and Design**, **49**: 613–621.
- [14] Wongsu, A., Sata, V., Nuaklong, P., Chindaprasirt, P., 2018. Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, **188**: 1025–1034.
- [15] Kotan, T., 2009., Pasinler – Demirdöven pomzasi ile üretilen hafif betonların mekanik özelliklerine atmosferik basınçlı buhar kürünün etkisi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, 147 s.
- [16] Özkan, Ş. G., Tuncer G., 2001. Ponza madenciliğine genel bir bakış. **Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi**, **VII** (2): 269-276
- [17] Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi (PAUM), 2015. Fizibilite Raporu. Nevşehir: Ahiler Kalkınma Ajansı. (Web sayfası: <https://ahika.gov.tr/assets/ilgiliDosyalar/Pomza-Arastirma-ve-Uygulama-Merkezi-Fizibilite-Raporu.pdf>) (Erişim tarihi: 25.11.2021)
- [18] Davraz, M., 2001. Pomzanın endüstriyel kullanım alanları Doktora semineri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [19] Gündüz, L., Sarıışık A., Tozaçan B., Uğur İ., O. Çankıran, 1998. Pomza teknolojisi (pomza karakterizasyonu), Isparta, 1: 285 s

- [20] Toklu, K., 2009. Pomza taşından üretilen bims blok kalitesinin artırılma olanaklarının araştırılması. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul. 94 s.
- [21] Bims Sanayicileri Derneği, 2006. Bims (Pomza) alt sektör raporu. TOBB Türkiye Toprak Sanayi Meclisi, Ankara.
- [22] Eroğlu, G., Şahiner, M., 2020. Dünyada ve Türkiye’de pomza, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.
- [23] Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Mohamed, H., et al. 2011. Properties and microstructural characteristics of geopolymers using fly ash with different percentages of kaolin at room temperature curing. **Journal of Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, 5 (10): 824-828.
- [24] Aydın, S., 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 330 s.
- [25] Davidovits, J., Comrie, D., 1988. Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals. *Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy, June 01-03, 1988, Compiègne, Fransa*, 125-134.
- [26] El-Gamal, S. M. A., Selim, F. A., 2017. Utilization of some industrial wastes for eco-friendly cement production. **Sustainable Materials and Technologies**, 12: 9-17.
- [27] Barbosa, V., MacKenzie, K. J., Thaumaturgo, C., 2000. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**, 2 (4): 309-317.
- [28] Xu, H., Van Deventer, J. S., 2002. Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolinite/stilbite mixtures using xrd, mas-nmr, sem/edx, tem/edx, and hrem. **Cement and Concrete Research**, 32 (11): 1705-1716.

- [29] Davidovits, J., 1999. Chemistry of geopolymeric systems, terminology. 2nd Geopolymer *International Conference, Saint-Quentin, France*, 9-40.
- [30] Allahverdi, A., Mehrpour, K., Kani, E.N., 2008. Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzolan in production of geopolymer cement, **Ceramics Silikat** **52**(1): 16-23.
- [31] Davidovits, J., Davidovics, M., Davidovits, N., 1994. Process for Obtaining a Geopolymeric Alumino-Silicate And Products Thus Obtained. U.S. Patent no: 5342595, September 20, 1994.
- [32] Arslan, A. A., 2019. Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçlara Farklı Kür Koşullarının Etkisinin İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, 88 s.
- [33] Whiting, J., 1895. Manufacture Of Cement. Amerika Birleşik Devletleri/Chicago Patent no: 544,796, August 20, 1895.
- [34] Beris, A. N., Giacomin, A. J., 2014. Panta rhei –everything flows, **Applied Rheology**. **24**: 1-13.
- [35] Mezger, T. G., 2011. The Rheology Handbook. 3rd revised ed. Hanover, Vincentz Network.
- [36] Pacheco-Torgal, F. Labrincha, A., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindapasirt P., 2017. Handbook Of Alkali-Activated Cements, Mortars And Concretes. 830 pp.
- [37] Malkin, A. I., Isayev, A. I. (2012). Rheology: Concepts, methods, and applications. Toronto: ChemTec Publish.
- [38] Şahin, R., 1996. Kocapınar Pomzası İle Üretilen Hafif Betonun Mukavemetinin Araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, 116 s.
- [39] Kani, E. N., Allahverdi, A., 2009. Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan. **Journal of Materials Science**, **44**(1): 3088-3097.

- [40] Kani, E. N., Allahverdi, A., 2011. Investigating shrinkage changes of natural pozzolan based geopolymer cement paste. **Iranian Journal of Materials Science and Engineering**, **8**(3): 50-60.
- [41] Pekdemir, M., 2011. Hasankale Pasinler Pomzası İle Üretilen Betonların Bazı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, 116 s.
- [42] Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., Ramezani-pour, A. A., 2011. Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. **Cement and Concrete Composites**, **33** (2): 251-260.
- [43] Öztürk, M., 2012. Pomza Ve Perlit İçerikli Hafif Betonun Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ, 47 s.
- [44] Yadollahi, M. M., Demirboğa, R., Polat, R., 2014. Effect of heat treatment temperature on ground pumice activation in geopolymer composites. **Science and Engineering of Composite Materials**, **21** (3): 377-382.
- [45] Salman, M., Cizer, Ö., Pontikes, Y., Vandewalle, L., Blanpain, B., Van Balen, K., 2014. Effect of curing temperatures on the alkali activation of crystalline continuous casting stainless steel slag. **Construction and Building Materials**, **71**: 308-316.
- [46] Nadoushan, M. J., Ramezani-pour, A. A., Kheriandish, S. M., 2016. Mechanical and durability properties of alkali activated slag for sustainable concrete. *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Las Vegas, 2016.*
- [47] Bahavsar, G. D., Talavia, K. R., Suthar, D. P., Amin, M. B., Parmar, A. A., 2014. Workability properties of geopolymer concrete using accelerator and silica fume as an admixture. **International Journal For Technological Research In Engineering**, **1** (8): 541-544.

- [48] Aydın, S., Baradan, B., 2014. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars, **Composites Part B: Engineering**, **57**: 166-172.
- [49] Bilim, C., Karahan, O., Atiş, C. D., İlkentapar, S. 2015. Effects of chemical admixtures and curing conditions on some properties of alkali-activated cementless slag mixtures. **KSCE Journal of Civil Engineering**, **19**: 733-741.
- [50] Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Hussin, M.W., 2016. Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of gbfs geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash, **Construction and Building Materials**, **125**: 1229-1240.
- [51] Atiş, C. D., Bilim, C., Çelik, Ö., Karahan, O., 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, **23** (1): 548-555.
- [52] Bingöl, Ş., 2018. Alkali İle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 131 s.
- [53] Ban, C. C., Ee T. L. , Ramli, M, 2019. The engineering properties and microstructure of sodium carbonate activated fly ash/ slag blended mortars with silica fume. **Composites Part B**, **160**: 558-572
- [54] Bilenler Altundal, M. 2019. Yüksek Fırın Cürufu Ve Uçucu Kül Katkılı Geopolimer Betonların %5 Sülfürik Asit Etkisinde Mekanik Davranışı. İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 71 s.
- [55] Pilehvar, S., Szczotok, A.M., Rodríguez, J.F., Valentini, L., Lanz'on, M., Pamies, R., Kjøniksen, A., 2019. Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials. **Construction and Building Materials**, **200**: 94–103

- [56] Alanazi, H., Hu, J., Kim, Y., 2019. Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature. **Construction and Building Materials**, **197**: 747–756.
- [57] Pehlivan, A. O., 2020. Effect of alkali content and activator modulus on mechanical properties of alkali activated mortars. **Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi**, **10** (2): 177-185.
- [58] Occhipinti, R., Stroschio, A., Finocchiaro, C., Fugazzotto, M., Leonelli, C., Faro, M. J. L., Mazzoleni, P., 2020. Alkali activated materials using pumice from the Aeolian Islands (Sicily, Italy) and their potentiality for cultural heritage applications: Preliminary study. **Construction and Building Materials**, **259**(1).
- [59] Top, S., Vapur, H., Altiner, M., Kaya, D., Ekicibil, A., 2020. Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as aggregates. **Journal of Molecular Structure**, **1202** (2).
- [60] Almaz Özcan, Z., 2020. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Ve Uçucu Kül Tabanlı Harçların Özellikleri. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 221 s.
- [61] Wang, Y., Liu, X., Zhang, W., Li, Z., Zhang, Y., Li, Y., Ren, Y., 2020. Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer. **Journal of Cleaner Production**, **244**.
- [62] Hamid, M. A., Yaltay, N. Türkmenoğlu, M., 2022. Properties of pumice-fly ash based geopolymer paste. **Construction and Building Materials**, **316** (11).
- [63] İlkentapar, S., Eren, H., 2021. EPS ile ikame edilmiş uçucu küllü geopolimer hafif harcın fiziksel, mekanik ve ısı geçirimsizlik özelliklerinin incelenmesi. **Academic Platform-Journal of Engineering and Science**, **9** (1): 28-38.
- [64] Ahmed, M.M., El-Naggar, K.A.M., Tarek, D., Ragab, A., Sameh, H., Zeyad, A.M., Tayeh, B.A., Maafa, I.M., Yousef, A., 2021. Fabrication of thermal insulation geopolymer bricks using ferrosilicon slag and alumina waste. **Case Studies in Construction Materials**, **15**.

- [65] Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., Musonda, I., 2022. Geopolymer: a systematic review of methodologies. **Sustainability in Construction and Building Materials**, **15** (19).
- [66] Zhang, Y., Liu, H., Ma, T., Gu, G., Chen, C., Hu, J., 2023. Understanding the changes in engineering behaviors and microstructure of FA-GBFS based geopolymer paste with addition of silica fume. **Journal of Building Engineering**, **70**
- [67] Kop, M., Yazıcıoğlu, S., 2023. Uçucu kül ve yüksek fırın cüruf esaslı geopolimer harçların ısıtılma ortamında mekanik özellikleri. **Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology**, **11**(3): 756-765.
- [68] Mohammed, D. T., Yaltay, N., 2024. Strength and elevated temperature resistance properties of the geopolymer paste produced with ground granulated blast furnace slag and pumice powder. **Ain Shams Engineering Journal**, **15**(3).
- [69] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, **29** (3): 224-229.
- [70] Palacios, M., Phillip, F., Banfill, G., Puertas, F., 2008. Rheology and setting of alkali-activated slag pastes and mortars: effect of organic admixture, **Acı Materials Journal**, **105**(2):140-148
- [71] Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K., 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of Hazardous Materials**, **168** (1): 44-50.
- [72] Montes, C., Zang, D., Erez, N. Allouche, 2012. Rheological behavior of fly ash-based geopolymers with the addition of superplasticizers. **Journal of Sustainable Cement- Based Materials**, **1**(4): 179-185.
- [73] Vance, K., Dakhane, A., Sant, G., Neithalath, N., 2014. Observations on the rheological response of alkali activated fly ash suspensions: the role of activator type and concentration. **Rheologica Acta**, **53** (10-11): 843-855.

- [74] Rifaai Y., Yahia A., Mostafa A., Aggoun S., Kadri E. H., 2019. Rheology of fly ash-based geopolymer: Effect of NaOH concentration. **Construction and Building Materials** **223**: 583–594.
- [75] Alghamdi, H., Nair, S. A. O., Neithalath, N., 2019. Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D printable alkali-activated fly ash-based binders. **Materials and Design**, **167**.
- [76] Ishwarya, G., Singh, B., Deshwal, S., Bhattacharyya, S. K., 2019. Effect of sodium carbonate/sodium silicate activator on the rheology, geopolymerization and strength of fly ash/slag geopolymer pastes, **Cement and Concrete Composites**, **18**.
- [77] Güllü, H., Agha, A. A., 2021. The rheological, fresh and strength effects of cold-bonded geopolymer made with metakaolin and slag for grouting. **Construction and Building Materials**, **274**.
- [78] Zhang, D. W., Zhao, K.-F., Xie, F., Li, H., Wang, D., 2020. Effect of water-binding ability of amorphous gel on the rheology of geopolymer fresh pastes with the different NaOH content at the early age. **Construction and Building Materials**, **261**.
- [79] Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., 2021. Extensive evaluation on the effect of glass powder on the rheology, strength, and microstructure of metakaolin-based geopolymer binders. **Construction and Building Materials**, **268**.
- [80] 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**, **144**.
- [81] Palacios, M., Gismara, S., Alonso, M.M., d'Espinose de Lacaillerie, J. B., Lothenbach, B., Favier A., Brumaud, C., Puertas, F., 2021. Early reactivity of sodium silicate-activated slag pastes and its impact on rheological properties. **Cement and Concrete Research**, **140**.

- [82] Li, L., Wei, Y., Li, Z., Farooqi, M. U., 2022. Rheological and viscoelastic characterizations of fly ash/slag/silica fume-based geopolymer. **Journal of Cleaner Production, 354.**
- [83] Liu, Y., Lu, C., Hu, X., Shi, C., 2023. Effect of silica fume on rheology of slag-fly ash-silica fume-based geopolymer pastes with different activators, **Cement and Concrete Research, 174.**
- [84] Wang, W., Fan, C., Wang, B., Zhang, X., Liu, Z., 2023. Workability, rheology, and geopolymerization of fly ash geopolymer: Role of alkali content, modulus, and water–binder ratio. **Construction and Building Materials, 367.**
- [85] Pan, Z., Tan, M., Zheng, G., Wei, L., Tao, Z., Hao, Y., 2024. Effect of silica fume type on rheology and compressive strength of geopolymer mortar. **Construction and Building Materials, 430.**
- [86] Kumar, A. S., Kadarkarai, A., Thankaswamy, J., Karuppasamy, M., Kumar, P. V., Pradeep, D., Karthikeya, S. S. S., 2024. Effect of silica fume on rheological, mechanical and durability properties of ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. *International Conference on Recent Innovations in Science and Technology (RIST2022), AIP Conference Proceedings, April 02, 2024, Kerala/Hindistan.*
- [87] ASTM C597-09. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.
- [88] ESOGÜ, 2019. (<https://arum.ogu.edu.tr/Sayfa/Index/65/taramali-elektron-mikroskobu-sem>) (Erişim tarihi: Haziran 2024).
- [89] TS EN 1015-11., 2000. Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini. Ankara: TSE.
- [90] Rifaai, Y., Yahia, A., Mostafa, A. M., Aggoun, S., Kadri, E. H., 2019. Rheological and mechanical properties of alkali-activated hybrid matrix for self-consolidating concrete. *Rheology and Processing of Construction Materials: RheoCon2 & SCC9, September 08–11, 2019, Dresden.*

- [91] Nath, S. K., Kumar, S., 2020. Role of particle fineness on engineering properties and microstructure of fly ash derived geopolymer. **Construction and Building Materials, 233**.
- [92] Rodríguez E. D., Bernal, S. A., Provis, J. L., Paya, J., Monzo, J. M., Borrachero, M. V., 2013. Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder. **Cement and Concrete Composites, 35** (1): 1–11, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.025.
- [93] Görhan, G., Kürklü, G., 2014. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. **Composites: Part B: Engineering, 58**: 371–377.
- [94] Ranjbar, N., Mehrali, M., Alengaram, U. J., Metselaar, H. S. C., Jumaat, M. Z., 2014. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. **Construction and Building Materials, 65** : 114–121.
- [95] Škvára, F., Kopecký, L., Šmilauer, V., Bittnar, Z., 2009. Material and structural characterization of alkali activated low-calcium brown coal fly ash, **Journal of Hazardous Materials, 168** (2-3): 711–720.
- [96] Nasaeng, P., Wongsa, A., Cheerarot, R., Sata, V., Chindapasirt, P., 2022. Strength enhancement of pumice-based geopolymer paste by incorporating recycled concrete and calcined oyster shell powders. **Case Studies in Construction Materials, 17**.
- [97] Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., Chindapasirt, P., 2011. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Fuel 90** (6): 2118–2124.
- [98] Nuaklong, P., Janprasit, K., Jongvivatsakul, P., 2021. Enhancement of strengths of high-calcium fly ash geopolymer containing borax with rice husk ash. **Journal of Building Engineering, 40**.

- [99] Swaddle, T. W., 2001. Silicate complexes of aluminum (III) in aqueous Systems. **Coordination Chemistry Reviews**, **219-221**: 665-686.
- [100] Komnitas, K., Zaharaki, D., 2007. Geopolymerization: a review and prospects for the minerals industry. **Mineral Engineering**, **20** (14): 1261-1277.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Enver KÜÇÜKYILDIRIM

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Niğde Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği	2013
Lisans	Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği	2010
Lise	Fatih Lisesi, Niğde	2005

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2018-Halen	Aksaray Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü	Şube Müdürü
2014-2018	Aksaray Çevre, Şehircilik İl Müdürlüğü	İnşaat Mühendisi
2013-2014	Niğde Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü	İnşaat Mühendisi
2011-2013	Niğde Üniversitesi	İnşaat Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Kucukyildirim, E., Uzal B., 2014. Characteristics of calcined natural zeolites for use in high-performance pozzolan blended cements. **Construction And Building Materials**, 73: 229-234.

2. Kucukyildirim, E., Yorulmaz, H., Durak, U., Ilkentapar, S., Uzal, B., Karahan, O., ATİŞ, C. D., 2023. Reaction kinetics and properties of pumice-based geopolymer systems cured at room temperature. **Construction And Building Materials, 409.**

