



## Erzurum Pasinler Bölgesi Perlitinin Geopolimer Üretiminde Kullanımının Araştırılması

Fatih AKBULUT<sup>1</sup>, Rıza POLAT<sup>1\*</sup>, Fatma KARAGÖL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

Fatih AKBULUT ORCID No: 0000-0002-3010-4914

Rıza POLAT ORCID No: 0000-0002-8990-035X

Fatma KARAGÖL ORCID No: 0000-0003-1760-1972

\*Sorumlu yazar: rizapolat@atauni.edu.tr

(Alınış: 23.09.2020, Kabul: 05.03.2021, Online Yayınlanma: 25.06.2021)

### Anahtar Kelimeler

Geopolimer,  
Perlit,  
Yüksek sıcaklık,  
Asit etkisi,  
Sülfat etkisi,  
Donma-çözünme

**Öz:** Küresel ısınma ve iklim değişikliğine sebebiyet veren en önemli sera gazlarından birisi CO<sub>2</sub>'dir. Bu gazın salınımının önemli bir miktarı (%6-8), çimento üretiminden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple yaklaşık yirmi yıldır araştırmacılar, çimentoya alternatif sürdürülebilir bağlayıcı malzeme olan geopolimer üzerinde yoğun olarak çalışmaktadırlar. Geopolimer üretimi temel olarak, atık yan ürünler (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) veya doğal mineral malzemeler (volkanik kül, kil, pomza vb.) gibi bir alümino-silikat kaynağı ve NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> vb. aktivatörlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada ise, Erzurum Pasinler bölgesinde önemli miktarda bulunan ve alümino silikat içeren perlit, bağlayıcı olarak kullanılıp geopolimer üretimi araştırılmıştır. Karışımlarda alkali aktivatör olarak yalnızca NaOH kullanılmıştır ve üretilen numunelere yapılan ön deneyler sonucunda 90°C'de 72 saat ısıtma uygulanmıştır. Üretilen numunelerin su emme oranları, birim hacim ağırlıkları ve 3, 7, 28 ve 150 günlük basınç dayanımları tespit edilmiştir. Ayrıca numuneler %5 konsantrasyonlu HCl ve MgSO<sub>4</sub> çözeltilerine, 50 çevrimlik donma-çözünme etkisine ve 300°C, 500°C ve 700°C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır ve numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak, perlit esaslı geopolimer üretiminde NaOH tek başına kullanılarak maksimum 21,14 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

## Investigation of Using Perlite of Erzurum Pasinler Region in Geopolymer Production

### Keywords

Geopolymer,  
Perlite,  
Elevated temperature,  
Acid effect,  
Sulfate effect,  
Freeze-thaw

**Abstract:** One of the most important greenhouse gases that cause global warming and climate change is CO<sub>2</sub>. A significant amount (6-8%) of this gas emission is due to cement production. For this reason, researchers have been working intensively on geopolymer, which is an alternative sustainable binding material to cement, for nearly two decades. Geopolymer production mainly consists of an alumino-silicate source such as waste by-products (fly ash, blast furnace slag etc.) or natural mineral materials (volcanic ash, clay, pumice, etc.) and activators such as NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, etc. In this study, geopolymer production from perlite containing alumino silicate and found in significant amount in Erzurum Pasinler region was investigated. Only NaOH was used as an alkali activator in the mixtures, and as a result of preliminary experiments, heat curing at 90°C was applied for 72 hours. The water absorption rates, unit volume weights and 3, 7, 28 and 150 days compressive strength of the produced samples were determined. In addition, samples were exposed to 5% concentrated HCl and MgSO<sub>4</sub> solutions, 50 cycles of freeze-thaw effect and high temperatures of 300°C, 500°C and 700°C, and the mechanical and physical properties of the samples were determined. As a result, maximum 21.14 MPa compressive strength was obtained by using NaOH alone in the production of perlite based geopolymer.

### 1. GİRİŞ

Yapıların inşasında, bağlayıcı malzemeler önem arz etmektedir ve asırlardır yoğun olarak kullanılmaktadır.

Bağlayıcı malzeme olarak genelde çamur, alçı, kireç, puzolan ve kireç-puzolan karışımları kullanılmıştır. Çimento üretiminin başlamasıyla hemen hemen diğer bağlayıcı malzemeler bazı özel uygulamalar dışında kullanılmamaktadır.

Çimento, insan uygarlığının ilerlemesine önemli katkılar sağlamıştır ve sağlamaya da devam etmektedir. Diğer taraftan çimento üretimi, temel olarak kalker ve kilin homojen ve uygun oranlarda karıştırılıp 1400-1600°C'de yakılması sonucu elde edildiğinden yüksek enerji tüketimi gerektirmektedir. Ayrıca, kalkerin kalsinasyonu, büyük miktarlarda sera gazı, özellikle karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımına yol açmaktadır [1]. Çimento üretimindeki enerji tüketimi, toplam endüstriyel enerji tüketiminin %10'undan fazlasını oluşturmaktadır ve bir ton çimento üretiminde yaklaşık 0,9 ton CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır [2, 3].

Dolayısıyla, son yıllarda küresel ısınma, çevre kirliliği ve iklim değişikliği gibi problemlerden dolayı çimento üretiminin azaltılması ve alternatif bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu nedenle araştırmacılar, geleneksel çimento esaslı bağlayıcılar yerine daha sürdürülebilir malzemelere dayalı alternatif bağlayıcı malzemelerden birisi olan geopolimerlere yönelmişlerdir.

Geopolimerler, ilk olarak 1972'de J. Davidovits tarafından önerilen alternatif çimentolu malzemelerdir ve son on yılda dünya çapında araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir [4]. Geopolimerler, alkali veya asidik ortam koşullarında çeşitli alüminosilikat kaynaklarından sentezlenebilen inorganik polimerik malzemelerdir [4-6]. Ayrıca geopolimerler, hızlı sertleşme, yüksek erken dayanım, kimyasal saldırı altında kararlılık, yüksek sıcaklık direnci ve düşük geçirgenlik gibi özel uygulamalar için bazı çekici özelliklere sahiptir [7, 8].

Alüminosilikat esaslı kaynak malzemeler ya doğal olarak meydana gelen kaolin, metakaolin, pirinç kabuğu külü, volkanik kaya tozları veya endüstriyel işlemlerle atık ürün olarak ortaya çıkan uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren mineral malzemelerdir [1].

Alkalilerle aktive edilen malzemeler olarak da adlandırılan geopolimerlerin hammaddeleri, genellikle diğer endüstriyel işlemlerden (örneğin uçucu kül, yüksek fırın cürufu) kaynaklanan atık ürünler olduğundan; kullanımları inşaat sektöründe hem maliyet (%30'a varan azalma) hem de sera gazı emisyonları (%80'e varan azalma) açısından daha sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmektedir [9].

Geopolimerizasyon, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bakımından zengin inorganik malzemelerin yüksek alkali bir ortamda moleküllerin çözünmesi, taşınması, yönlendirilmesi ve polikondenzasyonunu içeren ve 3 boyutlu alüminosilikat ağlarının oluştuğu ekzotermik bir kimyasal işlemdir [10]. Bu haliyle bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Normal Portland çimentosu ile üretilenlerle kıyaslandığında, geopolimer bağlayıcılar ile üretilen harç ve betonların bazı mekanik ve durabilite özelliklerinin daha üstün olduğu belirtilmiştir. Saavedra et al. [11], uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerin, geleneksel Normal Portland çimentosu ile üretilen betona kıyasla sülfat saldırısına karşı daha iyi direnç gösterdiğini ve Sagoe-Crentsil et al. [12], geopolimerlerin daha düşük sünme ve kuruma

büzülmesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Hu et al. [13], geopolimerlerin aderans ve aşınma dirençlerinin çimento esaslı onarım malzemesinden daha iyi olduğunu ve Sakkas et al. [14] ayrıca, geopolimerlerin genellikle seramik benzeri mikro yapıları ve özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra iyi termal-fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olduğunu ifade etmişlerdir [15]. Geopolimerler ile ilgili son yıllarda yapılan derleme çalışmalarında detaylı bilgi mevcuttur [1, 16-18].

Perlit, mineralojik karakter bakımından %3-10'u kristalleşmiş mineraller olan ve obsidyen parçacıkları içeren asidik karakterli volkanik bir camdır. Kimyasal yapısında silikat ve alüminat değerleri yüksektir. Ülkemizde Maden Teknik Arama (MTA) verilerine göre yüksek tenörlü cevherlerin görünür rezervi 11,5 milyon tondur. Her türdeki cevherin muhtemel ve potansiyel rezervlerinin tamamı 3,5 milyar tonu aşar. Bu bakımdan Türkiye'nin perlit potansiyeli, dünya ülkeleri arasında Amerika ve Rusya'dan sonra üçüncü sırayı alır. MTA enstitüsünün verilerine göre ülkemizdeki perlit rezervleri; Erzurum-Pasinler 30-40, Van-Erciş-Süphan-Nemrut 80, Ankara-Kızılcaham I-II 40, İzmir-Cumaovası 20, İzmir-Foça 10, Balıkesir Çanakkale 20, İzmir-Dikili 5, Manisa-Saruhanlı 10, Konya-Nevşehir-Niğde 700, Eskişehir-Kütahya-Afyon 4,6 milyon ton olarak tayin edilmiştir. Dolayısıyla, yüksek rezervi bulunan perlitin, geopolimer üretiminde değerlendirilmesi ülkemiz için ekonomik ve çevresel kazanımlar sağlayacaktır. Ayrıca perlit belirli coğrafi bölgelerde büyük miktarlarda bulunur, kolayca erişilebilir, bu da düşük maliyet sağlar ve düşük çevresel etkiye sahiptir.

Perlit esaslı geopolimerlere ait yapılan çalışmalarda, Taxiarchou et al. [19] perlit esaslı geopolimerlerde iki aşamalı kürün etkisini incelemiştir. Sonuç olarak çalışmada perlitin 50°C kürde dayanım kazanmadığı, 70°C'de 5 gün ve iki aşamalı kürde dayanım kazandığı ve 90°C'de perlitin hızlı dayanım kazandığı tespit edilmiş olup 72 saat kürün yeterli olduğu belirtilmiştir. Erdoğan [20], perlitin yalnızca NaOH çözeltisiyle oda sıcaklığında yeterli dayanım sağlamadığını ve sodyum silikat ile 30-40 MPa dayanıma ulaştığını belirtmiştir. Isıl kürde 100°C'nin altında ve üstündeki sıcaklıklarda mukavemetin düştüğü ifade edilmiştir.

Kozhukhova et al. [21] tarafından yapılan çalışmada perlitin NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ile 65°C'de 24 saat kür etkisinde geopolimerizasyonu incelenmiştir. Sonuç olarak en yüksek basınç dayanımı 14,3 MPa olup NaOH kullanılan karışımda tespit edilmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ile üretilen numunelerde basınç dayanımı elde edilmemiştir. Tsaousi et al. [22] tarafından yapılan çalışmada 90°C'de tüm NaOH çözeltilerinde priz sürelerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yadollahi ve Varolüneş [23] ve Mohabbi ve Dener [24], perlit esaslı geopolimerlerde polipropilen lif takviyesi ve perlit inceliği arttıkça basınç dayanımının arttığını ifade etmiştir. Güzelküçük ve Demir [25], perlit esaslı geopolimerlerde kür süresi ve kür sıcaklığının etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak en iyi dayanımı

veren karışım; 15,5 NaOH molaritesinde, 24 saatlik kür süresi ve 110°C'de elde edilmiş olup bu değer 46,76 MPa olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda; 90°C kür sıcaklığında 48 saatlik kür süresinin ve 110°C kür sıcaklığında ise 24 saatlik kür süresinin numunelerin basınç dayanım gelişimi için gerekli olduğu görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan perlitin yaklaşık %65'inin tane boyutu 40 mikronun üstündedir. Ayrıca ısıl kür işleminden hemen sonraki basınç dayanım sonuçları incelenmiştir. Kimyasal bileşim açısından, çalışmamızda kullanılan perlitin Fe, Al, Si ve Ca içeren oksit miktarları farklıdır.

Volkanik esaslı malzemeler, genellikle oldukça düşük reaktiviteye sahiptir ve jeolojik kaynağına bağlı olarak fiziksel özellikler, kimyasal ve mineralojik bileşimler açısından oldukça değişkendir [26]. Bu nedenle, geopolimer üretiminde kür sıcaklığı, alkali tipi, molaritesi vb. araştırılmalıdır.

Bu çalışmanın amacı; ülkemizde mevcut bulunan perlit rezervini geopolimer üretiminde aktif bir şekilde değerlendirmek, doğal malzemelerin kullanılmasıyla Portland çimentosunun üretiminden dolayı meydana gelen CO<sub>2</sub> salınımını ve çimento üretimi esnasında harcanan enerji kaybını azaltmaktır. Bu kapsamda, perlitin NaOH ile aktivasyonu ile üretilen betonların 300°C, 500°C ve 700°C'de yüksek sıcaklık etkisi, -18°C ile +4°C arasında 50 çevrimlik donma-çözünme etkisi, %5 konsantrasyonlu HCl ve %5 konsantrasyonlu MgSO<sub>4</sub> etkisi sonrası bazı fiziko-mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Çalışmada geopolimer bağlayıcı üretmek amacıyla alüminosilikat kaynağı olarak Erzurum ili Pasinler ilçesi ve civarında çıkarılan perlit, Kale Blok Bims Hafif Yapı Ele. İnş. Malz. İnş. Taah. Maden. Nak. Tur. San. ve Tic. A.Ş. tesislerinden temin edilmiştir. Elde edilen perlit, doğal halde farklı tane boyutlarından oluştuğundan, öncelikle 24 saat boyunca 105°C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuş ve daha sonra bilyalı çubuklu değirmende (Şekil 1) ortalama 30 mikron inceliğinde öğütülmüştür. Perlitin özgül ağırlığı 2,4 olarak tespit edilmiştir. Kullanılan perlitin kimyasal bileşimi (XRF analizi) Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Laboratuvar tipi bilyalı - çubuklu değirmen

Tablo 1. Perlitin kimyasal özellikleri

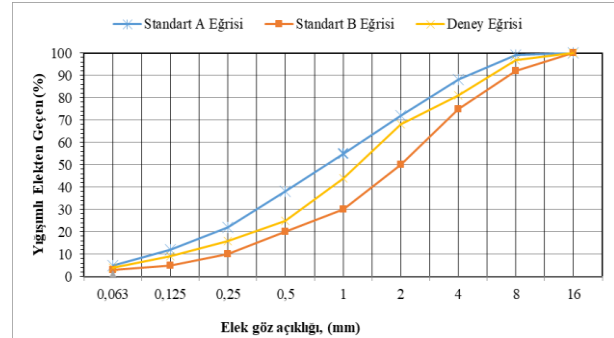
Birleşim	Oranı (%)
SiO <sub>2</sub>	69,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,58
CaO	2,53
Na <sub>2</sub> O	4,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,13
MgO	0,25
K <sub>2</sub> O	3,78
SO <sub>3</sub>	0,05
Cl	0,048
A. Za (Kızdırma Kaybı)	4,15

Alkali aktivatör olarak, NaOH (98% saflıkta) kullanılmış olup kimyasal özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Çözelti hazırlamada ve karışım suyu olarak, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi şebeke suyu kullanılmıştır. Çalışmada kimyasal katkı olarak BASF Türk Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen lignin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı EBA914 kullanılmıştır.

Tablo 2. NaOH'in kimyasal özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül Formülü	NaOH
Molekül Kütlesi (gr/mol)	40,00
Renk	Beyaz, Pul Şeklinde
pH	13-14
Bağıl Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,13

Normal betonda olduğu gibi geopolimer betonunda hacminin büyük bir bölümünü oluşturacak agregalar; dere agregalarından seçilmiştir. Karışımlarda kullanılan maksimum agrega tane çapı 8 mm olarak belirlenmiştir. Dere agregasının tane büyüklüğü dağılımı TS EN 933-1'e göre [27] ve özgül ağırlık ve su emme oranı tayinleri ise TS EN 1097-6'ya göre [28] yapılmış (Tablo 3) ve doygun kuru yüzey haliyle kullanılmıştır. Granülometri eğrisi Şekil 2'de gösterilmiştir [29].



Şekil 2. Geopolimer beton üretiminde kullanılan agregaların granülometri eğrisi

Tablo 3. Agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı değerleri

Özellik	0-4 mm	4-8 mm
Kuru özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,58
Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,62
Su emme oranı (%)	0,26	1,66

### 2.2. Metot

Geopolimer beton karışımları için perlit miktarı, 500 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Yapılan ön denemelerde farklı molariteler (6, 10, 12 ve 14 M NaOH) ve farklı

çözelti/bağlayıcı oranları (0,45, 0,50, 0,55 ve 0,60) araştırılmış ve çözeltinin optimum derişimi 10 M olarak ve çözelti/bağlayıcı oranı ise işlenebilirlik ve basınç dayanım değerlerine göre optimum 0,55 olarak belirlenmiştir. Yeterli işlenebilirliği sağlamak için, ek su ilavesi yerine lignin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı (bağlayıcı ağırlığının %1'i) kullanılmıştır. Tablo 4'de karışım hesabı verilmiştir [30].

**Tablo 4.** 1 m<sup>3</sup> beton için karışım miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

Karışım Kodu	Çözelti/Bağlayıcı Oranı	Perlit	10 M NaOH	0-4 mm	4-8 mm
P100	0,55	500	275	1176	208

Karışımında kullanılacak 10 M NaOH çözeltisi dökümden 24 saat önce hazırlanmıştır. Agregası ve bağlayıcı malzemelerin sıcaklığı ve iklim şartları nihai dayanımı etkilediğinden [31], 25°C'de olmasına özen gösterilmiş ve gerekliyse ön ısıtmaya tabi (25°C) tutulmuştur. Geopolimer beton karışımları, 10 dm<sup>3</sup> kapasiteli 3 kademeli 280 dev/dk karıştırma hızına sahip karıştırıcı ile üretilmiştir. Geopolimer üretiminde, ilk olarak 3 dakika süresince agregalar ve bağlayıcı malzeme (perlit) karıştırılmıştır ve daha sonra NaOH çözeltisi ve süper akışkanlaştırıcı birlikte eklenerek 4 dakika daha karıştırılmıştır. Hazırlanan geopolimer beton karışımı yağlanan 50x50x50 mm<sup>3</sup> çelik kalıplara 3 aşamada her bir aşamada 25 defa şişlenerek ve sarsma tablasında yerleşmesi sağlanarak yerleştirilmiştir. Durabilite etkileri öncesi ve sonrasındaki basınç dayanımlarının tespiti için toplam 30 adet numune üretilmiştir. Kalıplara düzgün şekilde yerleştirilen karışımlar alüminyum folyo ile kaplanarak fırın poşetine konulmuştur (Şekil 3).



**Şekil 3.** a- Taze halde numune b- Yalıtımlı numuneler

Ön denemelerde kür sıcaklığı olarak 65, 70, 90 ve 105°C kullanılmış ve perlitin NaOH ile aktivasyonunda basınç dayanımı sonuçlarına göre 90°C optimum olarak belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler 90°C'deki hava dolaşımli etüvde 24 saat bekletildikten sonra, numunelerin kalıpları sökülerek 48 saat daha etüvde bırakılmıştır. Toplamda 72 saat sonunda etüvden çıkarılan numuneler 23±1°C sıcaklıktaki laboratuvar ortamında deney zamanlarına kadar kür edilmiştir.

Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları 3, 7, 28 ve 150 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra 3'er adet numunenin aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Ayrıca, 28 günlük kür süresi sonunda, üretilen bu numunelerden 3'er adedi 4 hafta boyunca %5 konsantrasyonlu asit (HCl) çözeltisine, 3'er adedi %5

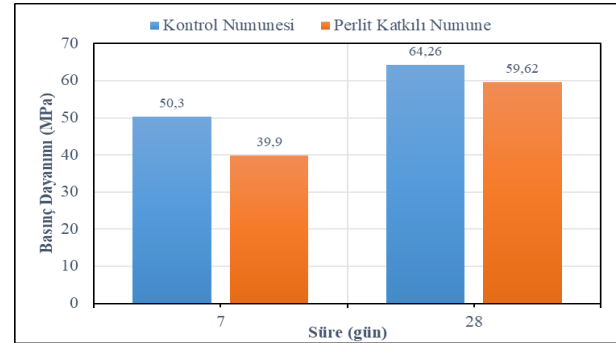
konsantrasyonlu sülfat (MgSO<sub>4</sub>) çözeltisine, 3'er adedi yüksek sıcaklık fırınında 300°C (3 adet), 500°C (3 adet) ve 700°C'lerde (3 adet) 2 saat süreyle yüksek sıcaklığa ve 3'er adedi ise 50 çevrim olmak üzere donma-çözünme çevrimlerine maruz bırakılıp ağırlık ve basınç dayanımı değişimleri tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, referans numunelerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımları TS EN 12390-3'e [32], ağırlıkça su emme oranları ASTM C-642'ye [33], donma-çözünme testi ASTM C666/C666M [34] standardı Prosedür A'ya, %5 HCl ve %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltilerinde 4 hafta için bekletme ASTM C267'ye [35] göre ve ayrıca perlitin puzolanik aktivite deneyi ASTM C311'e [36] göre yapılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Puzolanik Aktivite

Çalışmada kullanılan perlitin puzolanik aktivite deneyi yapılmış olup 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 4'de verilmiştir.



**Şekil 4.** Puzolanik aktivite deney sonuçları

ASTM C618'standardına [37] göre puzolanik aktivite değeri Eşitlik 1'e göre hesaplanmaktadır.

$$\text{Puzolanik aktivite} = (A/B) \times 100 \quad (1)$$

A: çimento/puzolan karışımı numunelerin ortalama basınç dayanımı (kgf/cm<sup>2</sup>)

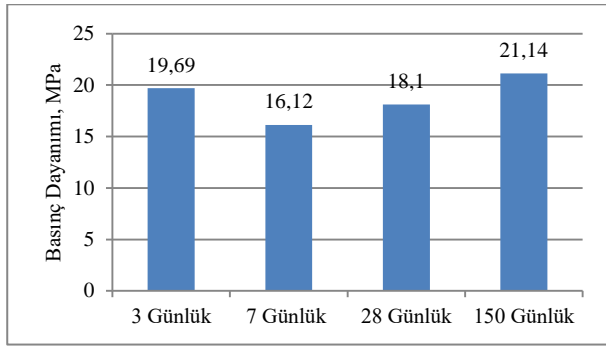
B: referans numunesi ortalama basınç dayanımı (kgf/cm<sup>2</sup>)

Perlitin 28 gün sonraki puzolanik aktivite indeksi 7 günlük %79 ve 28 günlük %92,77 olarak bulunmuştur. İlgili standartta puzolanik aktivite için dayanım indeksi ölçüt olarak değerlendirilmiştir. ASTM C618'e göre ise doğal puzolan, silis dumani ve uçucu külün puzolanik aktivite indeksleri kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %75, %110 ve %75 olmalıdır. Bu sonuca göre perlitin puzolanik aktivite indeksinin yeterli olduğu tespit edilmiştir.

#### 3.2. Basınç Dayanımı

Çalışma kapsamında üretilen geopolimer beton numuneleri, 72 saatlik ısı kür işleminden sonra laboratuvar ortamında deney zamanlarına kadar kür edilmiştir ve 3, 7, 28 ve 150 günlük kür sürelerini

tamamlandıktan sonra basınç dayanımları tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Perlit esaslı geopolimer betonların basınç dayanımları

Alkali aktivatör olarak yalnızca NaOH kullanılarak üretilen perlit esaslı geopolimer betonlarda ortalama 150 gün için 21,14 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Fakat poşetli ısl külden sonra 7. güne kadar dayanım azalması görülürken, 7 günden sonra 28 ve 150 güne kadar dayanım artışı meydana gelmiştir. Dolayısıyla yalnızca NaOH içeren alkali aktivatörlerle üretilen geopolimer karışımların ısl küle kazanılan basınç dayanımlarında, kür işleminden hemen sonraki laboratuvar ortamında düşüş meydana geldiğinden bu durum dayanım sınıfı hakkında net bir ifade için ileri yaş dayanımlarının tespitinin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Şekil 5'te görüldüğü gibi erken yaşlarda dayanım kazanma hızı daha yüksek olup, numunelerin 150 günlük dayanımlarının en az %93'ünü ilk 3 günde kazandıkları görülmektedir. Benzer şekilde Haddad ve Alshbuol [38] tarafından doğal puzolan kullanılarak üretilen geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada; numunelerin 3 günlük kür süresinde ulaşacağı erken dayanımın, nihai dayanımlarının % 70'ini aştığı belirtilmiştir.

Perlit esaslı geopolimer üretimi ile ilgili çalışmalardan, Kozhukhova et al. [21] tarafından NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gibi farklı aktivatörler ile 65°C'de 24 saat kür etkisindeki perlitin en yüksek basınç dayanımının 14,3 MPa olarak NaOH kullanılan karışımda elde edildiği görülmüştür. Diğer taraftan Güzelküçük ve Demir [25], perlit esaslı geopolimerlerde kür süresi ve kür sıcaklığının etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak en iyi dayanımı veren karışım; 15,5 NaOH molaritesinde, 24 saatlik kür süresi ve 110°C'de elde edilmiş olup bu değer 46,76 MPa olarak belirlenmiştir. Fakat bu çalışmada yalnızca ısı kürünün hemen sonrası dayanım özellikleri mevcut olup ileri yaş dayanımları bulunmamaktadır.

### 3.3. Su Emme Oranları ve Birim Hacim Ağırlığı

Geopolimer beton numunelerinde yapılan su emme deneyi ve birim hacim ağırlık deneyi sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Geopolimer betonların su emme oranları ve birim hacim ağırlığı

Karışım Kodu	Su Emme Oranı (%)	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )
P100	8,44	2,15

Portland çimentosu ile üretilen C20/25 - C30/37 sınıflarındaki normal betonların taze haldeki birim hacim ağırlıkları ortalama 2,40 - 2,50 gr/cm<sup>3</sup> civarındadır. Perlit esaslı geopolimerin birim hacim ağırlık değeri ise 2,15 gr/cm<sup>3</sup> olarak tespit edilmiş olup, Portland çimentosu betonlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Perlit içeren geopolimerlerin, su emme oranları %8,44 olarak tespit edilmiştir. Şinik [39] uçucu kül kullanarak yaptığı çalışmada, su emme oranlarını %9,2 - %8,1 aralığında bulmuştur. Bingöl [40] yüksek fırın cürufu kullanarak ürettiği numunelerin su emme oranlarının %7,11 - %11,08 aralığında olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmada üretilen geopolimer numunelerin su emme değerleri literatürle ve cüruf ve uçucu küle üretilen geopolimerlerin su emme değerleriyle örtüşmektedir.

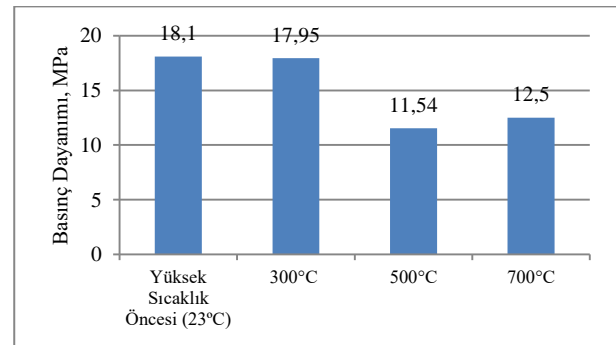
### 3.4. Yüksek Sıcaklık Etkisi

28 günlük geopolimer beton numunelerinin 300°C, 500°C ve 700°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki ağırlık değişimi sonuçları % olarak Tablo 6'da ve basınç dayanımı sonuçları ise Şekil 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık değişimi

Karışım Kodu	Ağırlık Değişimi (%)		
	300°C	500°C	700°C
P100	4,15	6,43	7,77

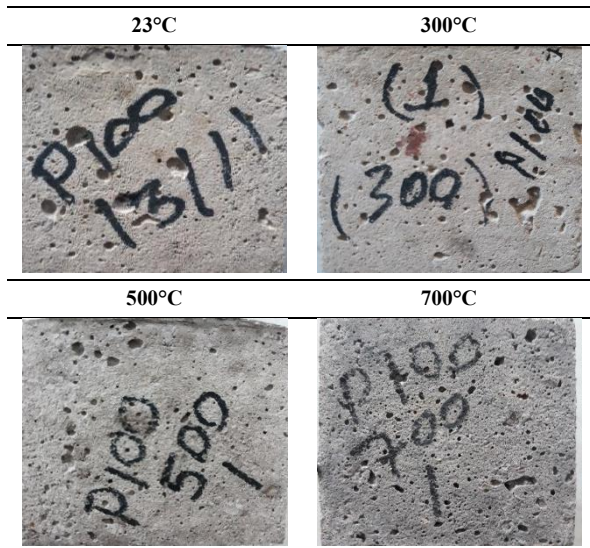
Yapılan deney sonucunda tüm karışım gruplarında sıcaklık artışıyla beraber ağırlık kaybı görülmüştür. Numunelerin bünyesindeki suyun sıcaklıkla birlikte kaybolması bu durumu normal hale getirmektedir.



Şekil 6. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları

Sonuçlar incelendiğinde, 300°C, 500°C ve 700°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımındaki azalma miktarları sırasıyla %0,86, %36,27 ve %30,94 olarak tespit edilmiştir. %100 perlit ile üretilen numuneler, dayanım açısından 300°C'de hemen hemen hiç etkilenmemiştir. Geleneksel Portland çimentosu betonda %70-%80 arasında dayanım kaybı olmaktadır. %100 perlitli geopolimer betonda ise %30 dayanım kaybıyla yüksek sıcaklık direncinin yüksek olduğu görülmektedir. Literatür incelendiğinde 500°C ve 700°C'de ise normal Portland çimentosu beton ile karşılaştırıldığında çok iyi performans göstermiştir. Zhang et al. [41], 700°C'de geopolimer betonların normal betonlar gibi parçalanmadığını, ayrıca geopolimer betonların 500°C'de içyapılarının önemli oranda değiştiğini ve sinterleşmenin olduğunu ifade

etmiştir. Barbosa ve MacKenzie [42], aktivatör olarak NaOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile yapılan karışımlarda, 100-200°C'de geopolimer bünyesindeki suyun %15'ini kaybettiğini ve buna bağlı olarak hacimde büzülme meydana geldiğini ve numunelerin 1000-1300°C sıcaklıklarda eriyene kadar yapısal stabiliteğini koruduklarını ifade etmişlerdir. Martin et al. [43] alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül esaslı çimentoları normal Portland çimentoları ile karşılaştırmıştır. Uçucu kül içeren numuneler 600°C'de dayanım artışı gösterirken, normal Portland çimentolu numuneler dayanım kaybetmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça boşluk miktarında çok az artış olmuş ve hafif renk değişimi gözlenmiştir.



Şekil 7. Yüksek sıcaklık sonrasında numunelerin renk değişimi

### 3.5. Donma-çözünme

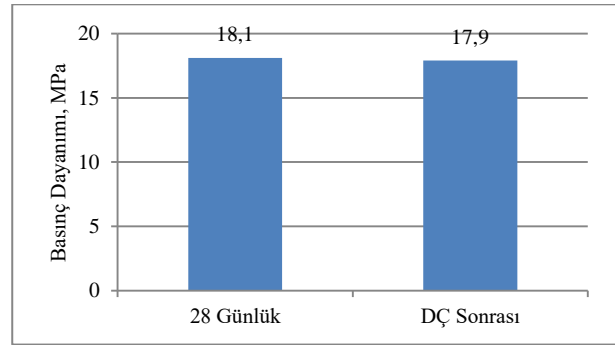
Donma-çözünme çevrimleri, ASTM C666/C666M standardı Prosedür A'ya göre suda donma-suda çözünme şeklinde ve -18 ile +4°C arasında 4 saatlik sürede tamamlanmıştır. 72 saatlik ısı kurden sonra etüvden çıkarılan numuneler laboratuvar ortamında toplamda 28 gün olacak şekilde deney gününe kadar bekletilmiş ve daha sonra 50 donma-çözünme çevrimi uygulanmıştır.

Ağırlık kaybının perlit esaslı geopolimer numunelerde, %3,31 olduğu görülmektedir. Zhu et al. [44], uçucu kül kullanarak geopolimer ürettikleri çalışmada, 25 donma-çözünme çevriminden sonra numunelerin ağırlık kaybının %0,69-%1,42 aralığında olduğunu, 50 donma-çözünme çevriminden sonra bu oranın %2,17-%24,60 seviyelerine kadar arttığını tespit etmişlerdir.

Donma çözünmeye maruz kalan numunelerin basınç dayanımı sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde geopolimer numuneler 50 çevrimde donma-çözünme etkisinden %1,10 oranında, dolayısıyla, hemen hemen hiç etkilenmemişlerdir.

Slavik et al. [45] yaptıkları çalışmada numuneleri 50 donma-çözünme çevrimine maruz bırakmışlardır. Deney sonunda numunelerdeki basınç dayanım kaybının %20'den fazla olmadığını tespit etmişlerdir. İkinci et al.

[46] yaptıkları çalışmada ürettikleri numuneleri 300 donma-çözünme çevrimine maruz bırakmışlardır. Sonuç olarak numunelerdeki basınç dayanım kayıpları yalnızca NaOH kullanılan karışımlarda %20-27 oranlarında elde edilmiştir.



Şekil 8. Donma-çözünme etkisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımları (Öncesi ve Sonrası)

Şekil 9'da görüldüğü üzere donma-çözünme sonrası boşluk miktarı artmakta ve renk değişimleri meydana gelmektedir.



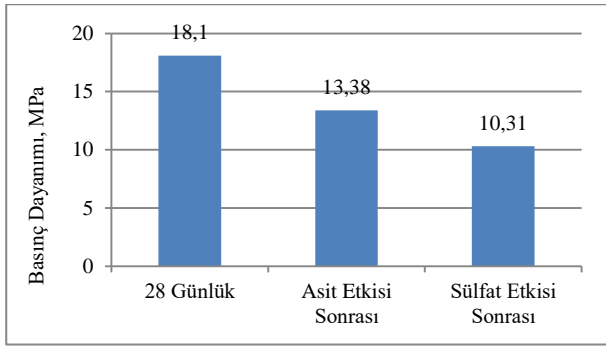
Şekil 9. Numunelerin donma çözünme etkisindeki görsel değişimi

### 3.6. HCl ve $\text{MgSO}_4$ etkisi

28 günlük kür sürelerini tamamladıktan ve %5 konsantrasyonundaki HCl ve  $\text{MgSO}_4$  çözeltilerinde 4 hafta boyunca bekletildikten sonra numunelerde sırasıyla %6,91 ve 2,29 oranında ağırlık kaybı meydana gelmiştir.

HCl ve  $\text{MgSO}_4$  etkisi sonrası basınç dayanımları değişimleri ise Şekil 10'da verilmiştir. HCl ve  $\text{MgSO}_4$  etkisi sonrası basınç dayanımı kayıpları sırasıyla %26,08 ve %43,04 oranlarında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerde asit etkisiyle meydana gelen dayanım kaybı alüminosilikat yapının asit etkisi sonrası kırılması sonucu oluşmaktadır. Asit ortamında geopolimer bağlayıcıların bozulması Si-O-Al bağlarının kırılması ile Si-OH ve Al-OH bağlarının sayısının artması ve geopolimer matrisindeki silisik asit miktarının artması sonucu meydana gelmektedir [47].



Sekil 10. HCl ve MgSO<sub>4</sub> etkisi sonrası basınç dayanımları

Ganeshan ve Venkataraman [48] yaptıkları çalışmada, lif takviyeli uçucu kül geopolimer betonunun % 3 sodyum sülfat çözeltisine daldırıldıktan sonra, geleneksel betondan daha üstün dayanıklılık özelliklerine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Benzer şekilde Sata et al. [49] yaptıkları çalışmada linyit taban külü geopolimer harcının %5 sodyum sülfat direncini araştırmış ve taban külü geopolimer harçlarının geleneksel Portland çimento harçlarına göre sülfat saldırısına daha az duyarlı olduğunu bulmuşlardır.

Wallah ve Rangan [31], geopolimerlerin uzunluk değişimlerini incelemişler ve son derece küçük değişiklikler sergilediğinden ve ayrıca sülfat çözeltisine bir yıl maruz kaldıktan sonra kütlede çok az artış gösterdiğinden, mükemmel dayanıklılık özelliklerine sahip olduklarını bildirmişlerdir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada Erzurum Pasinler yöresinden temin edilen perlitten, alkali aktivatör olarak yalnızca NaOH üretilen geopolimerlerin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir:

- Perlit esaslı geopolimer üretiminde, yalnızca NaOH ile elde edilen optimum kür koşulları 90°C ve 72 saat ısı kürüdür.
- Isıl kür uygulanan numunelerin basınç dayanımları, kürden sonra azalmaktadır. Diğer bir ifadeyle poşetli ısıl kürden sonra 7. güne kadar dayanım azalması meydana gelmiştir. Fakat 7 günden sonra 28 -150 güne kadar dayanım artışı meydana gelmiştir.
- Numuneler, dayanım açısından 300°C'de hemen hemen hiç etkilenmemiştir. 500°C ve 700°C'de ise normal Portland çimentolu betona göre çok iyi performans göstermiştir.
- Donma çözünme çevriminde, geopolimer betonun basınç dayanım kaybı %1,10 olup, normal betona göre daha iyi performans göstermiştir.
- 4 hafta boyunca %5 derişimde HCl ve MgSO<sub>4</sub> çözeltilerinde bekletilen numunelerde sırasıyla %26,08 ve %43,04 oranında dayanım kaybı gözlenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Nawaz M, Heitor A, Sivakumar M. Geopolymers in construction - recent developments. *Construction and Building Materials*. 2020;260.
- [2] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ. Geopolymer technology: The current state of the art. *J Mater Sci*. 2007;42:2917-33.
- [3] Stafford FN, Raupp-Pereira F, Labrincha JA, Hotza D. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. *J Clean Prod*. 2016;137:1293-9.
- [4] Davidovits J. Geopolymers - Inorganic Polymeric New Materials. *J Therm Anal*. 1991;37:1633-56.
- [5] Wang YS, Dai JG, Ding Z, Xu WT. Phosphate-based geopolymer: Formation mechanism and thermal stability. *Mater Lett*. 2017;190:209-12.
- [6] Tchadjie LN, Ekolu SO. Enhancing the reactivity of aluminosilicate materials toward geopolymer synthesis. *J Mater Sci*. 2018;53:4709-33.
- [7] van Deventer JSJ, Provis JL, Duxson P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Miner Eng*. 2012;29:89-104.
- [8] Provis JL, Bernal SA. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annu Rev Mater Res*. 2014;44:299-327.
- [9] Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang GP, Tao MJ. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*. 2013;47:1468-78.
- [10] De Silva P, Sagoe-Crenstil K, Sirivivatnanon V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>. *Cement Concrete Res*. 2007;37:512-8.
- [11] Saavedra WGV, Angulo DE, de Gutierrez RM. Fly Ash Slag Geopolymer Concrete: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack. *J Mater Civil Eng*. 2016;28.
- [12] Sagoe-Crenstil K, Brown T, Taylor A. Drying shrinkage and creep performance of geopolymer concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2013;2:35-42.
- [13] Hu SG, Wang HX, Zhang GZ, Ding QJ. Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag. *Cement Concrete Comp*. 2008;30:239-44.
- [14] Sakkas K, Sofianos A, Nomikos P, Pnias D. Behaviour of Passive Fire Protection K-Geopolymer under Successive Severe Fire Incidents. *Materials*. 2015;8:6096-104.
- [15] Jiang X, Xiao R, Ma Y, Zhang M, Bai Y, Huang B. Influence of waste glass powder on the physico-mechanical properties and microstructures of fly ash-based geopolymer paste after exposure to high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020;262.
- [16] Zhang P, Wang KX, Li QF, Wang J, Ling YF. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review. *J Clean Prod*. 2020;258.
- [17] Jindal BB. Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral

- admixtures: A review. *Construction and Building Materials*. 2019;227.
- [18] Farhan KZ, Johari MAM, Demirboğa R. Assessment of important parameters involved in the synthesis of geopolymer composites: A review. *Construction and Building Materials*. 2020;264.
- [19] Taxiarchou M, Pnias D, Panagiotopoulou C, Karalis A, Dedeloudis C. "Study on the Suitability of Volcanic Amorphous Aluminosilicate Rocks (Perlite) for the Synthesis of Geopolymer-Based Concrete," in *Geopolymer Binder Systems*, ed. L. Struble and J. Hicks. (West Conshohocken, PA: ASTM International). 2013:34-53.
- [20] Erdogan ST. Properties of Ground Perlite Geopolymer Mortars. *J Mater Civil Eng*. 2015;27.
- [21] Kozhukhova NI, Zhernovsky IV, Strokova VV. Evaluation of geopolymer binders biopositivity based on low-calcium fly ash. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10:35527-9.
- [22] Tsaousi GM, Douni I, Pnias D. Experimental Evaluation of Efficient Si Dissolution from Perlite at Low Level Activator's Concentration. *Minerals-Basel*. 2018;8.
- [23] Yadollahi MM, Varolgüneş S. Polipropilen Liflerin Perlit Esaslı Geopolimerlerin Mekanik Davranışına Etkisi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*. 2018;7:36-41.
- [24] Yadollahi MM, Dener M. Investigation of elevated temperature on compressive strength and microstructure of alkali activated slag based cements. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2019.
- [25] Güzelküçük S, Demir İ. Perlit Esaslı Geopolimer Kompozitlere Kür Süresi ve Sıcaklığın Etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*. 2019;11:730-7.
- [26] Ndjock BIDL, Elimbi A, Cyr M. Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation. *J Non-Cryst Solids*. 2017;463:31-9.
- [27] TSE. TS EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye*. 2012.
- [28] TSE. TS EN 1097-6: Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğuve su emme oranının tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye*. 2013.
- [29] TSE. TS 802: Beton karışım tasarımı hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye*. 2016.
- [30] Akbulut, F., 2020, Kırmızı Çamur ve Yüksek Fırın Cürufunun Perlit Esaslı Geopolimer Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [31] Wallah SE, Rangan BV. Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete: Long Term Properties. . Research Report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. 2006.
- [32] TSE. TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye*. 2010.
- [33] ASTM C642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org. 2013.
- [34] ASTM C666 / C666M. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org. 2015.
- [35] ASTM C267-01. Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org. 2012.
- [36] ASTM C311 / C311M. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org. 2018.
- [37] ASTM C618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org. 2019.
- [38] Haddad RH, Alshbuol O. Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Constr Build Mater*. 2016;114:699-707.
- [39] Şinik O. Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması / The investigation of durability properties on geopolymer concretes: Afyon Kocatepe Üniversitesi; 2019.
- [40] Bingöl Ş. Alkali İle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması: Erciyes Üniversitesi; 2018.
- [41] Zhang T, Zhang Y, Xiao ZQ, Yang ZL, Zhu HH, Ju JW, et al. Development of a novel bio-inspired cement-based composite material to improve the fire resistance of engineering structures. *Constr Build Mater*. 2019;225:99-111.
- [42] Barbosa VFF, MacKenzie KJD. Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Mater Res Bull*. 2003;38:319-31.
- [43] Martin A, Pastor JY, Palomo A, Jimenez AF. Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers). *Constr Build Mater*. 2015;93:1188-96.
- [44] Zhu HJ, Liang GW, Xu J, Wu QS, Du JZ. Surface-modification of fly ash and its effect on strength and freezing resistance of slag based geopolymer. *Constr Build Mater*. 2019;199:574-80.
- [45] Slavik R, Bednarik V, Vondruska M, Nemeč A. Preparation of geopolymer from fluidized bed combustion bottom ash. *J Mater Process Tech*. 2008;200:265-70.
- [46] Ekinçi E, Turkmen I, Kantarci F, Karakoc MB. The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at



- different ratios. *Constr Build Mater.* 2019;201:257-67.
- [47] Djobo JNY, Elimbi A, Tchakoute HK, Kumar S. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Constr Build Mater.* 2016;124:606-14.
- [48] Ganeshan M, Venkataraman S. Durability and microstructural studies on fly ash blended self-compacting geopolymer concrete. *Eur J Environ Civ En.* 2019.
- [49] Sate V, Sathonsaowaphak A, Chindaprasirt P. Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement Concrete Comp.* 2012;34:700-8.