

Atf İçin: Karaaslan C, Yener E, Bağatur T, Polat R, Gül R, 2022. Uçucu Kül ve Kalsiyum Alüminat Çimentosu Katkılı Pomza Esaslı Geopolimer Harçların Sülfürik Asit Direnci. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(4): 2302 - 2312.

To Cite: Karaaslan C, Yener E, Bağatur T, Polat R, Gül R, 2022. Sulfuric Acid Resistance of Pumice Based Geopolymer Mortars with Fly Ash and Calcium Aluminate Cement Additives. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(4): 2302 - 2312.

Uçucu Kül ve Kalsiyum Alüminat Çimentosu Katkılı Pomza Esaslı Geopolimer Harçların Sülfürik Asit Direnci

Cemal KARAASLAN^{1*}, Engin YENER¹, Tamer BAĞATUR², Rıza POLAT³, Rüstem GÜL¹

ÖZET: Bu çalışmada, uçucu kül ve/veya kalsiyum alüminat çimentosu ağırlıkça toplam toz bağlayıcının %10, 20 ve 30' u kadar pomza ile ikame edilerek pomza esaslı geopolimer (PGP) harçlar üretilmiştir. Ortam sıcaklığı ve 60 °C'de kür edilen bu harçlar, 28. günde %5 derişime sahip sülfürik asit (H₂SO₄) çözeltisine konularak 120 gün bekletilmiştir. PGP numunelerde sülfürik asit etkisiyle oluşan görsel değişim, ağırlık kaybı ve kalan basınç dayanımı, 60 ve 120. günde ölçülmüş ve Portland Çimentosu esaslı referans harçla kıyaslanmıştır. Çalışma, referans numunelerinin sülfürik asit ortamında çözünerek 60 günün sonunda %25.6 ağırlık kaybı yaşadığını buna karşılık %20 ve 30 oranında kalsiyum alüminat çimentosu içeren karışımların ortam sıcaklığında kür edilmiş numuneleri hariç PGP harçlarda (görsel açıdan) bir çözünme olmadığını göstermiştir. Ayrıca ortam sıcaklığı ve 60 °C'de kür edilen PGP numunelerin 120 günün sonunda sırasıyla en fazla %6.5 ve 4.1 ağırlık kaybına uğradıkları tespit edilmiştir. PGP harçlar, sülfürik asit çözeltisinde 120 günün sonunda %70'e varan basınç dayanım kayıpları yaşamıştır. Ancak yeterli miktarda uçucu kül ve kalsiyum alüminat çimentosu ikamesi ile PGP harçların basınç dayanımı önemli derecede arttığı gibi sülfürik asit direnci de iyileşmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, pomza, uçucu kül, kalsiyum alüminat çimentosu, ısl küre, sülfürik asit direnci

Sulfuric Acid Resistance of Pumice Based Geopolymer Mortars with Fly Ash and Calcium Aluminate Cement Additives

ABSTRACT: In this study, pumice based geopolymer (PGP) mortars were produced by replacing 10, 20, and 30 wt.% of the pumice with fly ash and/or calcium aluminate cement. After curing at ambient temperature and 60 °C, the mortars were placed in a 5% sulfuric acid (H₂SO₄) solution on the 28th day and kept for 120 days. The change in appearance, weight loss and residual compressive strength of the PGP samples due to the effect of sulfuric acid were determined on the 60th and 120th days and compared with the Portland Cement based reference mortar. The study showed that the reference samples underwent a weight loss of 25.6% at the end of 60 days by dissolving of hardened cement paste in the sulfuric acid medium. However, it was observed that the PGP mortars did not undergo any visual change in sulfuric acid solution, except for the samples containing 20 and 30% calcium aluminate cement (for ambient curing). In addition, it was determined that the PGP samples cured at ambient temperature and 60 °C had a maximum weight loss of 6.5% and 4.1, respectively, at the end of 120 days. PGP mortars underwent compressive strength losses of up to 70% in the 120-day sulfuric acid solution. However, with sufficient fly ash and calcium aluminate cement substitution, the compressive strength of PGP mortars increased significantly as well as the sulfuric acid resistance.

Keywords: Geopolymer, pumice, fly ash, calcium aluminate cement, heat curing, sulfuric acid resistance

¹Cemal KARAASLAN (Orcid ID: 0000-0002-8993-7566), Engin YENER (Orcid ID: 0000-0002-0286-2435), Rüstem GÜL (Orcid ID: 0000-0003-1827-9137) İğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İğdır, Türkiye

²Tamer BAĞATUR (Orcid ID: 0000-0002-4243-3029), Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

³Rıza POLAT (Orcid ID: 0000-0002-8990-035X), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Cemal KARAASLAN, e-mail: cemal.karaaslan@igdir.edu.tr

Bu çalışma Cemal KARAASLAN'ın Doktora tezinden üretilmiştir.

GİRİŞ

Beton üretiminde kullanılan Portland Çimentosu'nun (PÇ) dünya çapındaki yıllık tüketimi, 4.1 milyar ton civarındadır (Agrawal ve Savoikar, 2022). Diğer taraftan, PÇ üretimi için kalker ve bir miktar kilin yaklaşık 1450 °C sıcaklığa kadar pişirilmesi gerektiğinden dolayı bu üretim için önemli derecede enerji sarfiyatına ihtiyaç duyulmaktadır (Celik ve ark., 2019). Ayrıca bu süreçte kalker (CaCO_3); CaO ve CO_2 olarak ayrışmakta ve 1 ton PÇ üretimi için yaklaşık 1 ton CO_2 atmosfere salınmaktadır (Nehdi ve Yassine, 2020). Bunun yanında sertleşmiş PÇ hamurunun asidik ortamlarda çözünerek betondan ayrıldığı bilinmektedir (Mehta ve Monteiro, 2014). PÇ'nin bu etkilerini azaltmak için alınan tedbirlerden biri, betonda kullanılacak PÇ miktarını biraz azaltıp onun yerine puzolanların kullanılması yöntemidir. Ancak puzolanların betona dayanım sağlama mekanizması, PÇ'nin hidrasyonunu takiben gerçekleştiğinden dolayı puzolan içeren betonların dayanım kazanma hızı düşüktür. Bu yüzden de PÇ yerine kullanılacak puzolan miktarı, sınırlı oranlarda kalmaktadır (Hardjito ve Rangan, 2005). Buna karşın PÇ'ye alternatif olabilecek bağlayıcılardan biri olan geopolimerler, çevre dostu olmalarının yanında üç boyutlu inorganik polimer (geopolimer) yapıları sayesinde yüksek sıcaklığa ve asit-sülfat saldırılarına karşı oldukça dirençlidirler (Davidovits, 2005).

Geopolimer bağlayıcılar; genellikle uçucu kül (UK), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi ısı işlem sonucu elde edilen puzolanların alkali hidroksit ve/veya alkali silikatlarla aktive edilmesi ile elde edilirler (Duxson ve ark., 2007). Ancak metakaolin büyük ölçekli uygulamalar için pahalı bir malzeme olduğundan dolayı pek tercih edilmez. Beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan bir endüstri dalında atık/yan ürün olarak elde edilen UK ve cürufun varlığı ise ilgili endüstrinin devamlılığına bağlıdır. Ayrıca bu malzemeler, genellikle endüstrinin yoğun olduğu bölgelerde bulunmakta ve diğer bölgeler için yüksek nakliye bedelleri gerektirmektedir. Buna karşın volkanik tüf, pomza ve volkanik kül gibi doğal puzolanlar, ek bir işlem gerektirmemeleri ve yerelde de mevcut olabilmelerinden dolayı geopolimer bağlayıcılar için iyi bir kaynak hükmündedirler (Firdous ve ark., 2018; Provis, 2018).

Son yıllarda, doğal puzolanların geopolimer üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar, önemli derecede artmıştır (Djobo ve ark., 2017). Bu çalışmalar, geopolimer üretiminde, düşük puzolanik aktivitelerinden dolayı doğal puzolanların yapay puzolanlar kadar iyi bir kaynak olmadığını göstermektedir (Firdous ve ark., 2018). Ancak doğal puzolan esaslı geopolimerlerin dayanım ve dayanıklılığını iyi bir seviyeye çıkarmak için bazı yöntemler önerilmiş ve etkinlikleri tartışılmıştır. Bu yöntemlerden biri, doğal puzolanlardan daha reaktif olan yapay puzolan veya çimentoların belli oranlarda doğal puzolanlara ikame edilerek kullanılmasıdır. Yapılan çalışmalar, doğal puzolanlara ikame edilerek kullanıldıklarında; UK, kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ), PÇ, klinker ve cüruf gibi toz malzemelerin doğal puzolan esaslı geopolimerlerin mekanik özelliklerini iyileştirilebileceğini göstermektedir (Vafaei ve Allahverdi, 2016; Yener ve Karaaslan, 2019; Balun ve Karataş, 2021; Hamid ve ark., 2022).

Bir doğal puzolan olan pomza da değişik katkılarla kısmen değiştirilerek geopolimer bağlayıcılar üretilmiş ve bazı özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar genellikle pomza esaslı geopolimer (PGP) bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özellikleri ile alakalı olmuştur. Buna karşın PGP'lerin durabilitesi, nispeten daha az araştırılmıştır. Ayrıca mineral katkı olarak sadece bir tane malzeme kullanımı yaygın iken birden fazla mineral katkının kullanılmasına pek rastlanmamaktadır.

Bu çalışma ile UK ve KAÇ'nin PGP harçların sülfürik asit direncine etkisinin ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, UK ve KAÇ'nin ağırlıkça pomzanın %0, 10, 20 ve 30'u oranında

pomza ile değiştirilmesi ile üretilen ve ortam sıcaklığı ile 60 °C sıcaklıkta kür edilen PGP harçların 60 ve 120 günlük %5 derişime sahip sülfürik asit çözeltilisine karşı direnci belirlenmiştir.

MATERYAL ve METOT

Materyal

Bu çalışmada kullanılan pomza, Küçük Ağrı Dağı'nın Iğdır ili sınırları dahilinde bulunan bir ocaktan elde edilmiştir (Şekil 1). İri taneli haldeki bu pomza, bilyalı değirmende öğütülerek toz haline getirilmiştir.



Şekil 1. Pomzanın temin edildiği ocak

Katkı olarak kullanılan uçucu kül ve kalsiyum alüminat çimentosu ise sırasıyla Çatalağzı Termik Santrali (Zonguldak) ve Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den (Refro 50 - Mersin) temin edilmiştir. Ayrıca referans numuneler üretmek için TS EN 197-1 standardına uygun olan CEM I 42.5 R Portland Çimentosu, ARKOZ MADENCİLİK - Ağrı Çimento Fabrikası'ndan temin edilerek kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan toz bağlayıcılar, Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan toz bağlayıcılar

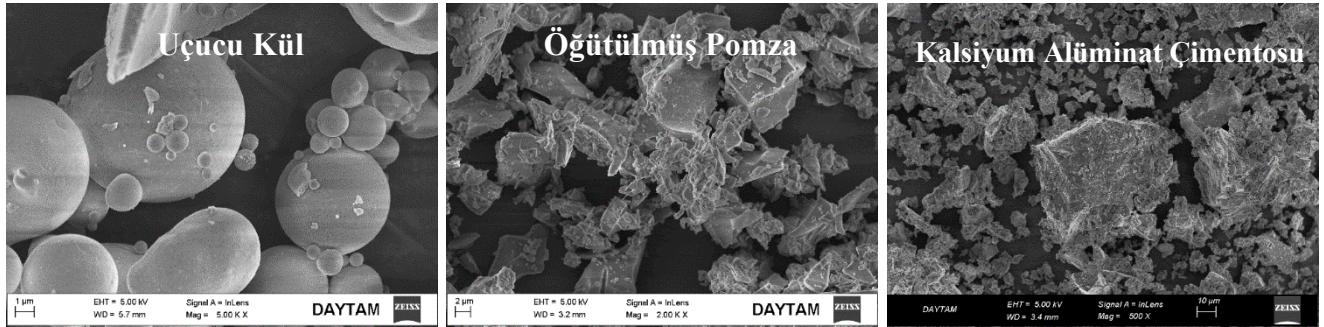
Geopolimer harç üretiminde alüminosilikat kaynağı olarak kullanılan toz bağlayıcılar ile Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonu, X-Işını Floresansı (XRF) yöntemiyle belirlenmiş ve Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Toz bağlayıcıların kimyasal kompozisyonları (%), özgül ağırlıkları ve özgül yüzey alanları

Toz Bağlayıcı	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Özgül Ağırlık	Özgül Yüzey Alanı (cm ² g ⁻¹)
Pomza	3.56	67.49	13.07	3.98	0.69	2.63	2.36	0.18	3.69	2.67	4980
Uçucu Kül	2.46	55.51	23.09	6.64	1.58	0.14	3.56	0.24	1.63	2.13	3805
Kalsiyum Alüminat Ç.	37.60	4.50	52.90	1.29	0.78	0.00	0.46	0.03	0.25	3.03	3600
Portland Çimentosu	63.60	19.42	4.68	2.93	1.43	0.38	0.44	2.49	2.65	3.12	3650

LOI: Kızdırma kaybı (Loss on ignition)

Bu toz bağlayıcıların tane boyutu dağılımları, mineralojik bileşimleri ile bazı mekanik özellikleri, yazarlara ait başka bir çalışmada (Karaaslan ve ark., 2022a) verilmiştir. Toz bağlayıcıların SEM görüntüleri, UK taneciklerinin küresel şekilli olduğunu, buna karşılık pomza ve KAÇ taneciklerinin köşeli ve düzensiz bir şekle sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 3).

**Şekil 3.** Toz bağlayıcıların SEM görüntüleri

Toz bağlayıcıları aktive etmek için sodyum hidroksit (%98 saflıkta) ile sodyum silikat (ağırlıkça; SiO₂/Na₂O oranı, 2.04 ve SiO₂ içeriği %24.5) kullanılmıştır. Harç karışımların üretilmesinde ince agrega olarak TS EN 196-1'e (TS EN 196-1, 2009) uygun maksimum tane boyutu 2 mm olan CEN Standart Kum'u kullanılmıştır.

Numunelerin üretilmesi

Alkali aktivatör olarak sodyum silikat çözeltisinin 8 M sodyum hidroksit çözeltisine ağırlıkça oranının 2.3 olduğu bir karışım kullanılmıştır (Karaaslan ve Yener, 2021). Bu karışım, hazırlandıktan sonra 24 saat dinlendirilen 8 M sodyum hidroksit çözeltisinin sodyum silikat çözeltisine eklenip 5 dakika boyunca karıştırılmaları ile elde edilmiştir. Hazırlanan karışım, 1 saat bekletilerek kullanılmıştır. Karışımlara ait toz bağlayıcılar ise pomzanın bir miktar UK ve KAÇ ile değiştirilmesiyle elde edilmiştir. Buna göre pomza, ağırlıkça %0, 10, 20 ve 30 oranında UK ve/veya KAÇ ile değiştirilmiştir. UK ve KAÇ ikame oranlarına bağlı olarak isimlendirilen PGP harçların karışım oranları, Çizelge 2'de verilmiştir.

PGP harçların karıştırma işlemi; pomza, UK (eğer varsa) ve KAÇ'nin (eğer varsa) mikserde 5 dakika boyunca karıştırılması ile başlamıştır. Ardından standart kum eklenerek, katı malzemeler, 5 dakika karıştırılmıştır. Katı malzemeler homojen hale getirildikten sonra alkali aktivatör ve ek-su aralıklı olarak eklenerek sırasıyla 3 ve 2 dakika daha karıştırılarak bu işlem toplamda 15 dakikada tamamlanmıştır.

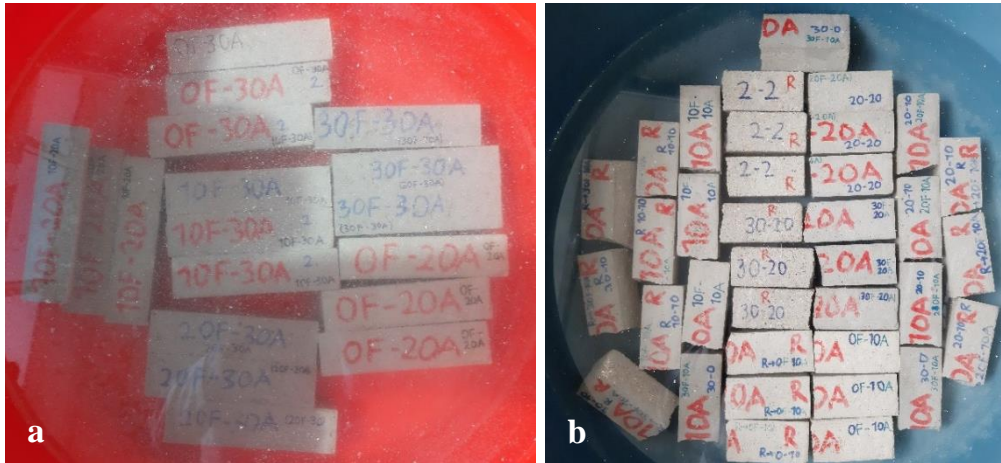
Taze haldeki harç karışımlar, iç ölçüleri 40 mm x 40 mm x 160 mm olan prizmatik metal kalıplara yerleştirilmiştir. Naylon film ile sarılan numunelerin yarısı ortam sıcaklığında (~24 °C) diğer yarısı ise 60 °C'de 7 gün boyunca kür edilmiştir (Yener ve Karaaslan, 2020). Bu sürenin sonunda filmleri açılan numuneler, deney gününe kadar laboratuvar ortamında açıkta bekletilmiştir. PGP harçları kıyaslamak için TS EN 196-1'e uygun şekilde PÇ-esaslı referans numuneler üretilmiş ve ilgili standarda göre kirece doygun suda kür edilmiştir (TS EN 196-1, 2009).

Çizelge 2. PGP harçların karışım oranları (g)

Karışım	Pomza	Uçucu kül	Kalsiyum alüminat ç.	Sodyum hidroksit	Sodyum silikat	Standart kum	Ek-su
P100	450	-	-	75	172.5	1450	30
0F-10A	405	-	45	75	172.5	1450	30
0F-20A	360	-	90	75	172.5	1450	30
0F-30A	315	-	135	75	172.5	1450	30
10F-0A	405	45	-	75	172.5	1450	30
10F-10A	360	45	45	75	172.5	1450	30
10F-20A	315	45	90	75	172.5	1450	30
10F-30A	270	45	135	75	172.5	1450	30
20F-0A	360	90	-	75	172.5	1450	30
20F-10A	315	90	45	75	172.5	1450	30
20F-20A	270	90	90	75	172.5	1450	30
20F-30A	225	90	135	75	172.5	1450	30
30F-0A	315	135	-	75	172.5	1450	30
30F-10A	270	135	45	75	172.5	1450	30
30F-20A	225	135	90	75	172.5	1450	30
30F-30A	180	135	135	75	172.5	1450	30

Deneysel yöntem

Harç numunelerin basınç dayanımı, TS EN 196-1 standardına uygun olarak 20 kN kapasiteli çimento basma ve eğilme test presisi ile belirlenmiştir. PGP harçların asit direncini belirlemek için 28 günlük prizmatik numuneler, %5 derişime sahip H₂SO₄ (sülfürik asit) çözeltisinin içerisinde bırakılmıştır (Şekil 4a). Bu numunelerin görsel değişimi, ağırlık kaybı ve kalan eğilme ile basınç dayanımı, 60 günün sonunda belirlenmiştir. Kalan basınç dayanımı testi, eğilme testi sonucu ortadan ikiye bölünen yaklaşık olarak 40x40x80 mm³ boyutlu prizma şekilli yarım numunelerin yarısı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kalan diğer yarım numuneler ise yeniden hazırlanmış %5 derişime sahip H₂SO₄ çözeltisine bırakılmıştır (Şekil 4b). Benzer şekilde bir 60 günün daha sonunda numunelerin görsel değişimi, ağırlık kaybı ve kalan basınç dayanımı belirlenmiştir. Böylece PGP harçların 60 ve 120 günlük sülfürik asit direnci belirlenmiştir.

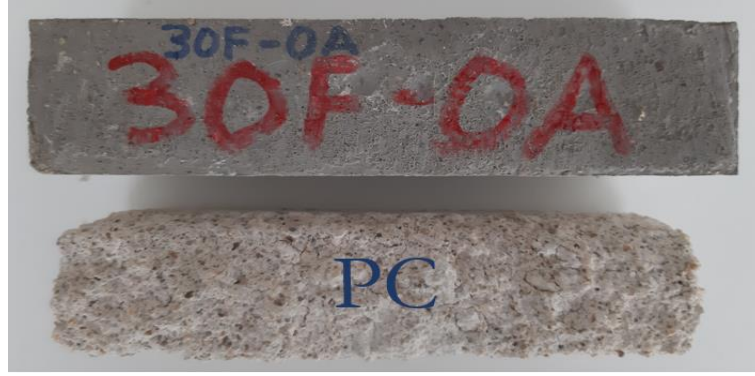


Şekil 4. Sülfürik asit etkisine maruz bırakılan numuneler (a) Tam numuneler (60 günlük), (b) Yarım numuneler (120 günlük)

BULGULAR VE TARTIŞMA

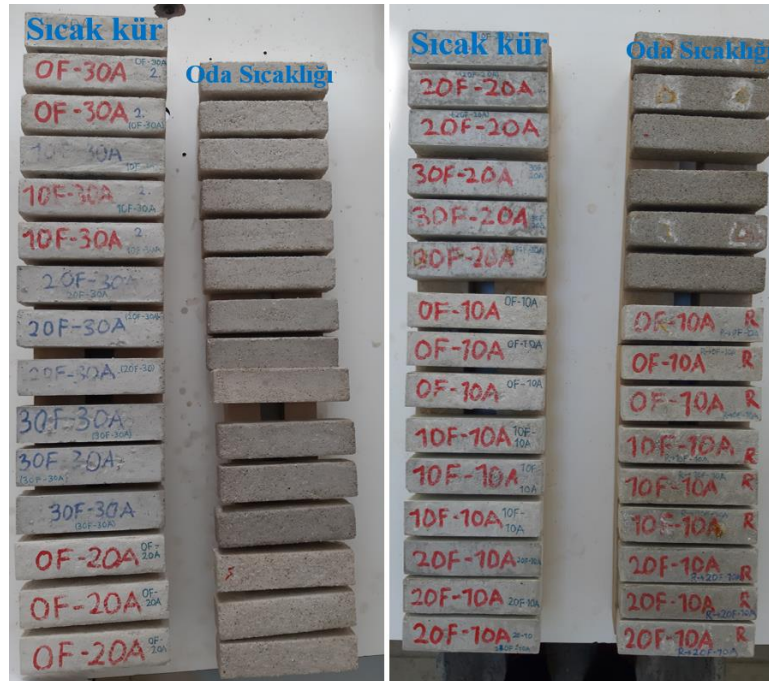
Görsel Değişim

Sülfürik asit çözeltisinde 60 gün bekletilen bir PGP numunesi ile PÇ-esaslı referans numune Şekil 5'te verilmiştir. PGP numunesinde görsel değişimin neredeyse hiç olmadığı buna karşılık, referans numunenin sertleşmiş çimento hamurunun önemli oranda çözündüğü görülmektedir. Bağlayıcı hamurun çözünmesi, aynı zamanda kendisinin bağlamış olduğu kum tanelerinin de yıkanmasına sebep olmuştur. Böylece referans numunenin boyunda kısalma eninde ise daralma olmuştur.



Şekil 5. Sülfürik asit etkisinde 60 gün kalan PGP ve PÇ esaslı numuneler

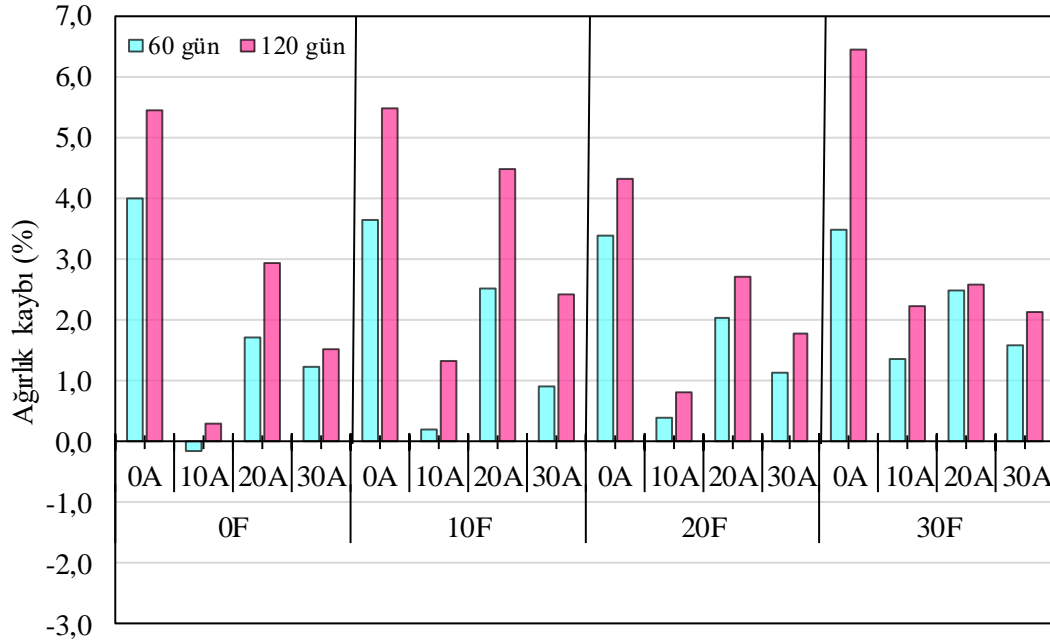
60 gün %5 sülfürik asit çözeltisinde bekletilen PGP harçları, Şekil 6'da verilmiştir. Görülebileceği gibi ısıt küre tabi tutulan PGP numunelerde görsel değişim pek olmamıştır. Buna karşılık, %20 ve %30 KAÇ içeren karışımların ortam sıcaklığında kür edilen numunelerinin bağlayıcı hamuru, bir miktar çözünmüş ve çözelti ortamında yıkanmıştır. KAÇ ikame oranı, %10 ve 0 olan numunelerde böyle bir durum gözlenmemiştir. Bu farkın sebebi, KAÇ katkısının sağlamış olduğu Ca içeriği ile açıklanabilir. Isıl kür, geopolimerleşmeyi kolaylaştırdığından dolayı ısıt küre tabi tutulan numunelerde, KAÇ geopolimerik reaksiyona katılarak 3 boyutlu ağ yapısını geliştirmektedir (Kani ve ark., 2012). Böyle bir polimer yapının sülfürik asit etkisiyle çözünmesi daha zordur. Ancak ısıt küre tabi tutulmayan ve KAÇ içeriği belli bir seviyede olan (%20 ve üstü) karışımlarda, Ca içeriği yüksek olan KAÇ'nin hidratasyon reaksiyonlarını da gerçekleştirdiği ve C-S-H türü hidratasyon ürünleri oluşturduğu anlaşılmaktadır (Wang ve ark., 2019; Karaaslan ve ark., 2022b). Hidratasyon ürünleri ise asit ortamında daha kolay çözünmeye uğramaktadır (Neville, 1995).



Şekil 6. Sülfürik asit etkisinde 60 gün kalan PGP numunelerdeki görsel değişim

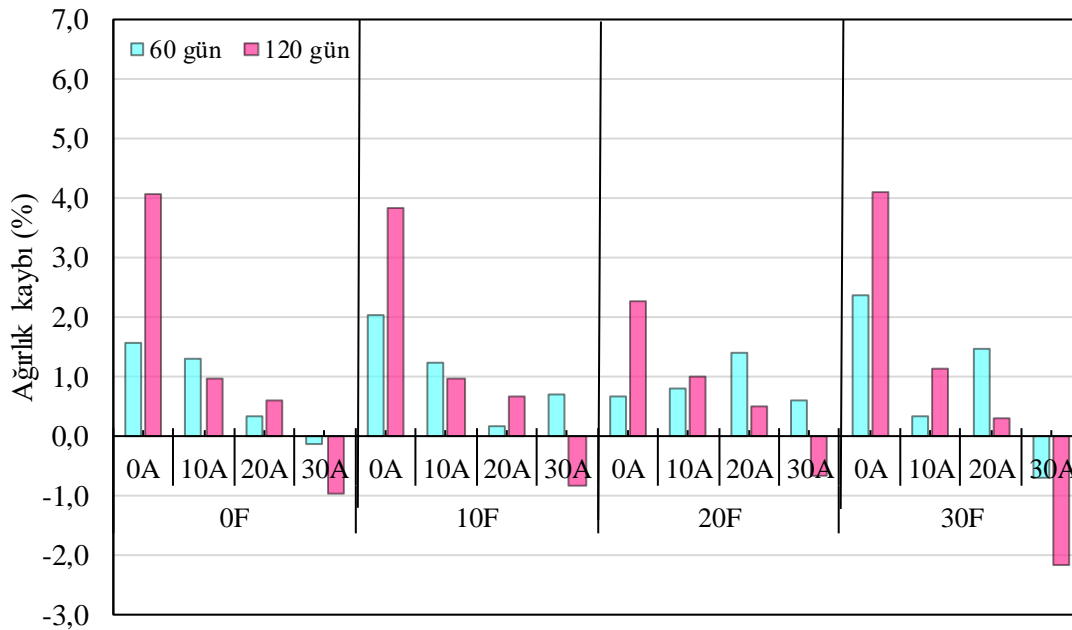
Ağırlık kaybı

Sülfürik asit etkisinde 60 ve 120 gün kalan ortam sıcaklığında ve 60 °C'de kür edilmiş numunelerin ağırlık kayıpları, sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Referans numune, bağlayıcı hamurunun asit etkisiyle çözünmesi sonucu 60 günün sonunda %25.6 ağırlık kaybı yaşamıştır (Şekil 5).



Şekil 7. Sülfürik asit etkisinde 60 ve 120 gün kalan ortam sıcaklığında kür edilmiş numunelerin ağırlık kaybı

Sülfürik asit çözeltisinde en çok çözünen numuneler, KAÇ içeriği yüksek olan karışımların ortam sıcaklığında kür edilmiş numuneleri olduğundan dolayı bu numunelerde, diğerlerinden daha çok ağırlık kaybı beklenmektedir. Ancak tam tersine, KAÇ içeriğinin artmasıyla genel olarak ağırlık kaybı, azalmaktadır. Bu durum, Ca içeriği az olan geopolimerlerin Si-O-Al bağ yapılarının asit etkisiyle kısmen parçalanması sonucu Si-OH ve Al-OH bağlarının artması ve geopolimer matrisindeki silisik asit miktarının artmasıyla açıklanabilir. Buna göre sülfürik asit çözeltisi, geopolimer matrisindeki Al miktarının azalmasına ve Si/Al oranının artmasına neden olmaktadır. Bu durum ise numunelerin ağırlık kaybına neden olmaktadır (Bakharev, 2005; Djobo ve ark., 2016). KAÇ içeriği fazla olan numunelerde ise Ca, sülfürik asit ile reaksiyona girerek numune ağırlığında artışlara sebep olan yeni ürünler oluşturabilmektedir (Bakharev, 2005; Mehta ve Siddique, 2017; Aiken ve ark., 2018).



Şekil 8. Sülfürik asit etkisinde 60 ve 120 gün kalan 60 °C kür edilmiş numunelerin ağırlık kaybı

Sülfürik asit etkisinde 120 gün kalan ısıtılmış kür görmüş numunelerin ağırlık kaybı, KAÇ içeriğinin artmasıyla sürekli azalmış ve KAÇ içeriği %30 olan numunelerde ağırlık artışı olmuştur. Ağırlık

kaybındaki azalmanın nedeni, ortam sıcaklığında kür edilen numuneler için açıklanan nedenlere benzerdir. Ayrıca bu numunelerin 120 günlük ağırlık değişiminin genel olarak UK içeriğinden pek etkilenmediği söylenebilir.

Basınç dayanımı kaybı

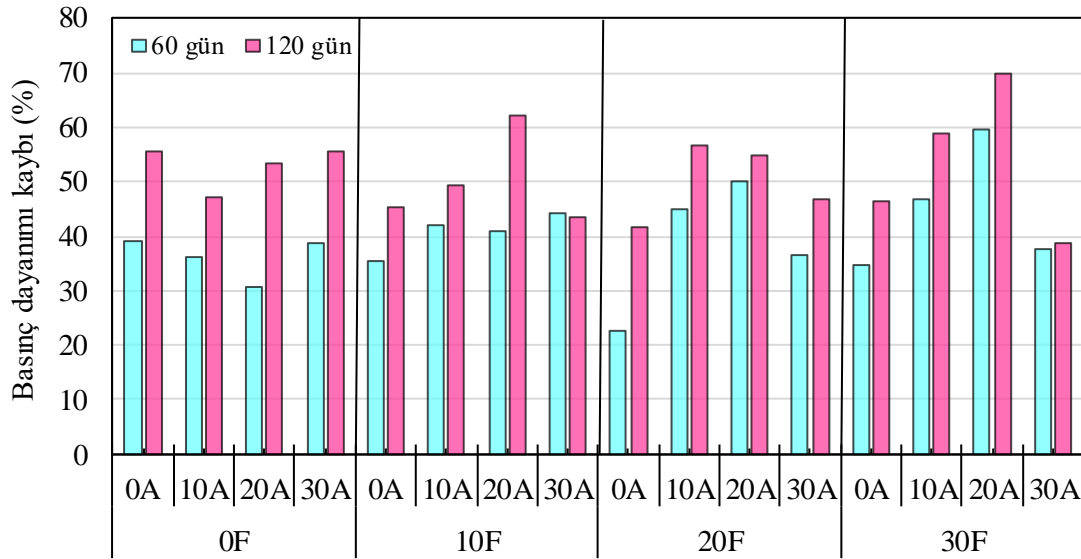
PGP harçlar ile referans harcın 28 günlük basınç dayanımları ile 60 ve 120 günlük sülfürik asit etkisi sonrası kalan basınç dayanımları Çizelge 3'te verilmiştir. PÇ esaslı referans numunenin şekli, sülfürik asit etkisiyle önemli derecede bozulduğundan dolayı basınç testine tabi tutulamamıştır. Diğer taraftan, PGP harçlar pek fazla şekilsel değişim yaşamamalarına rağmen önemli derecede dayanım kayıpları yaşamıştır. Dayanım kayıplarının başlıca sebebi, her doğal puzolan gibi pomzanın da yeterince reaktif olmaması ve NaOH molaritesinin düşük olmasından dolayı geopolimerleşmenin yeterince gerçekleşmemesidir (Djobo ve ark., 2017; Firdous ve ark., 2018). Sülfürik asit etkisinde 60 ve 120 gün kalan ortam sıcaklığında ve 60 °C'de kür edilmiş numunelerin basınç dayanımı kayıpları, sırasıyla Şekil 9 ve 10'da verilmiştir.

Çizelge 3. Harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımı ve sülfürik asit etkisi sonrası kalan basınç dayanımı (MPa)

Karışım	Ortam Sıcaklığı		Isıl Kür			
	28 Günlük Basınç Dayanımı	Kalan Basınç Dayanımı		28 Günlük Basınç Dayanımı	Kalan Basınç Dayanımı	
		60 gün	120 gün		60 gün	120 gün
P100	21.9	13.3	9.8	25.5	15.3	14.4
0F-10A	34.5	22.0	18.2	47.4	29.7	28.9
0F-20A	32.6	22.6	15.2	57.8	42.8	27.3
0F-30A	38.7	23.7	17.2	57.3	39.8	28.4
10F-0A	20.0	12.9	10.9	30.5	15.9	13.0
10F-10A	36.0	20.9	18.2	50.3	31.1	30.0
10F-20A	30.3	17.9	11.4	62.7	41.5	27.9
10F-30A	39.6	22.1	22.4	65.9	44.4	33.1
20F-0A	20.3	15.7	11.9	32.3	15.2	12.9
20F-10A	34.6	19.1	15.0	50.1	28.4	26.6
20F-20A	27.8	13.9	12.5	70.6	42.2	36.1
20F-30A	42.3	26.9	22.5	62.8	36.8	31.1
30F-0A	23.0	15.0	12.3	38.6	12.8	12.1
30F-10A	34.2	18.2	14.1	52.1	28.8	25.6
30F-20A	26.4	10.6	8.0	70.3	47.8	35.7
30F-30A	40.3	25.2	24.8	56.1	37.7	27.8
Referans	47.9	*	-	-	-	-

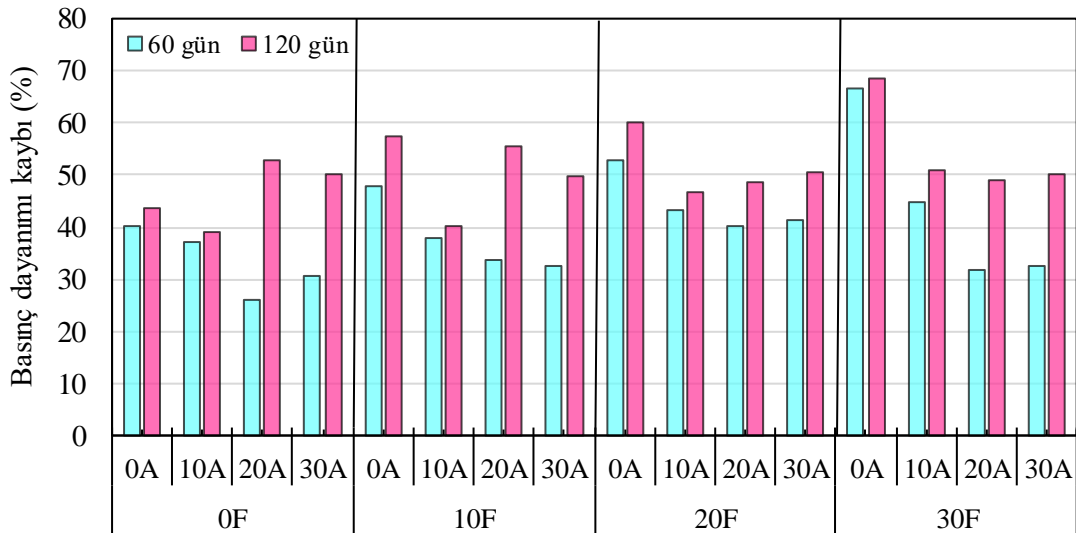
*Numunenin şekli bozulduğundan dolayı ölçüm yapılamamıştır.

Ortam sıcaklığında kür edilen numunelerin sülfürik asit etkisiyle %70'e kadar basınç dayanımı kaybına uğradıkları görülmektedir (Vafaei ve ark., 2018). 120 günlük sülfürik asit etkisi dikkate alındığında UK'li karışımlarda %20 KAÇ içeren numunelerin daha çok dayanım kaybettikleri görülmektedir. UK'li bu numunelerden %30 KAÇ içerenlerin 60 günlük sülfürik asit etkisinden sonra ikinci 60 günde pek dayanım kaybetmediği görülmektedir. Ortam sıcaklığında kür edilen bu numunelerin %5 sülfürik asit çözeltisine karşı direnci (120 günlük); kalan basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı oranı olarak birlikte ele alındığında, 30F-30A numunesinin en iyi performansı gösterdiği söylenebilir: Bu numunenin kalan basınç dayanımı, 24.8 MPa olurken, basınç dayanımı kaybı, %39 olmuştur. Bu durum, mineral katkı kullanımı ile PGP harçların sülfürik asit direncinin artırılabilirliğini göstermektedir (Mehta ve Siddique, 2017).



Şekil 9. Sülfürik asit etkisinde 60 ve 120 gün kalan ortam sıcaklığında kür edilmiş numunelerin basınç dayanımı kaybı

Isıl küre tabi tutulan PGP harçların 120 günlük sülfürik asit direncine bakıldığında %30 KAÇ içeren numunelerin UK içeriğinden bağımsız %50 basınç dayanımı kaybı yaşadığı görülmektedir. 60 günlük sülfürik asit için ısıl kür görmüş numunelerde sabit bir UK içeriği için KAÇ miktarının %20'ye kadar artmasıyla kalan basınç dayanımı sürekli bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, KAÇ içeriğinin PGP harçların mikroyapısında bulunan geçirimli çatlakları azaltarak asit girişini azaltması sonucu hasarı azaltmasıyla açıklanabilir. Ancak KAÇ içeriğinin bu değerden fazla olması, karışımdaki Ca miktarının fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durumda Ca ve sülfürik asit arasında reaksiyonlar gelişerek alçıtaşı oluşmasına sebep olmaktadır (Ariffin ve ark., 2013). Benzer şekilde sülfürik aside maruz kalma süresi 120 gün olduğunda, asit, numunelerin daha iç kısımlarına nüfuz ederek KAÇ içeriği %20 olan numunelerin de basınç dayanımı kaybını arttırmaktadır (Vafaei ve ark., 2018).



Şekil 10. Sülfürik asit etkisinde 60 ve 120 gün kalan 60 °C kür edilmiş numunelerin basınç dayanımı kaybı

Isıl küre tabi tutulmuş 20F-20A ve 30F-20A numunelerinin 120 günlük sülfürik asit etkisi sonrası kalan basınç dayanımları, sırasıyla 36.1 ve 35.7 MPa olurken, bu numunelerin basınç dayanımı kayıpları ise %49 olmuştur. Isıl küre tabi tutulan numuneler arasında en iyi performansı bu iki numunenin gösterdiği söylenebilir.

Numunelerin görsel değişimi, ağırlık kaybı ve kalan basınç dayanımları dikkate alındığında, PGP harçların sülfürik asit direncinin kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Buna karşılık, PÇ esaslı referans numuneler, 60 günün sonunda önemli derecede ağırlık kaybı yaşamış ve basınç dayanımı ölçülemeyecek derecede şekil değişimine uğramıştır. PGP harçların sülfürik asit direncinin PÇ esaslı harçlardan (ve beton) iyi olması, kanalizasyon borusu gibi sülfürik asit etkisine sık sık maruz kalan beton ve betonarme elemanlarda PGP bağlayıcıların kullanımının fayda sağlayacağını göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, ortam sıcaklığında ve 60 °C’de kür edilen UK ve KAÇ katkılı PGP harçların ve PÇ esaslı referans harcın %5 derişime sahip sülfürik asit çözeltisine karşı olan dirençleri, 60 ve 120 gün için tayin edilmiştir. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

I. Referans numunenin bağlayıcı hamuru, sülfürik asit ortamında çözünerek yıkanmıştır. 60 günün sonunda numune, %25.6 ağırlık kaybı yaşayarak basınç testine tabi tutulamayacak derecede şekil değişimine uğramıştır. PGP harçlar ise ortam sıcaklığında kür edilen %20 ve 30 KAÇ içerikli numunelerin bağlayıcı fazının hafif olarak çözünmesi dışında diğer numunelerde neredeyse hiç görsel değişim olmamıştır.

II. PGP harçlar sülfürik asit ortamında önemli derecede basınç dayanımı kaybına uğramıştır. Bu dayanım kaybı, çözelti ortamında bir kısım Si-O-Si bağlarının Si-OH bağlarına dönüşmesi ve geopolimer matrisinde bulunun bir kısım Ca’nın sülfürik asit ile reaksiyona girerek alçı taşı oluşturması nedeniyle olmaktadır.

III. UK ve KAÇ’nin ağırlıkça %20’şer oranda pomza yerine kullanılması ile PGP harçların basınç dayanımı arttığı gibi sülfürik asit direnci de iyileşmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Iğdır Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “MÜF0720A17” kodlu proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Agrawal VM, Savoikar PP, 2022. Sustainable use of normal and ultra-fine fly ash in mortar as partial replacement to ordinary Portland cement in ternary combinations. *Materials Today: Proceedings*, 51: 1593-1597.
- Aiken TA, Kwasny J, Sha W, Soutsos MN, 2018. Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymer binders to sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, 111: 23-40.
- Ariffin M, Bhutta M, Hussin M, Tahir MM, Aziah N, 2013. Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 43: 80-86.
- Bakharev T, 2005. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4): 658-670.
- Balun B, Karataş M, 2021. Influence of curing conditions on pumice-based alkali activated composites incorporating Portland cement. *Journal of Building Engineering*, 43: 102605.
- Celik K, Hay R, Hargis CW, Moon J, 2019. Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 197: 803-812.

- Davidovits J, 2005. Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions: proceedings of the world congress geopolymer 2005. Geopolymer Institute.
- Djobo JNY, Elimbi A, Tchakouté HK, Kumar S, 2016. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 124: 606-614.
- Djobo JNY, Elimbi A, Tchakouté HK, Kumar S, 2017. Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5): 4433-4446.
- Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JS, 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9): 2917-2933.
- Firdous R, Stephan D, Djobo JNY, 2018. Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 190: 1251-1263.
- Hamid MA, Yaltay N, Türkmenoğlu M, 2022. Properties of pumice-fly ash based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, 316: 125665.
- Hardjito D, Rangan BV, 2005. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete.
- Kani EN, Allahverdi A, Provis JL, 2012. Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement and Concrete Composites*, 34(1): 25-33.
- Karaaslan C, Yener E, 2021. The Effect of Alkaline Activator Components on the Properties of Fly Ash Added Pumice Based Geopolymer. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(2): 1255-1269.
- Karaaslan C, Yener E, Bağatur T, Polat R, 2022b. Improving the durability of pumice-fly ash based geopolymer concrete with calcium aluminate cement. *Journal of Building Engineering*, 59: 105110.
- Karaaslan C, Yener E, Bağatur T, Polat R, Gül R, Alma MH, 2022a. Synergic effect of fly ash and calcium aluminate cement on the properties of pumice-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 345: 128397.
- Mehta A, Siddique R, 2017. Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 146: 136-143.
- Mehta PK, Monteiro PJ, 2014. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Nehdi ML, Yassine A, 2020. Mitigating Portland cement CO₂ emissions using alkali-activated materials: system dynamics model. *Materials*, 13(20): 4685.
- Neville AM, 1995. *Properties of concrete (Vol. 4)*. Longman London.
- Provis JL, 2018. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114: 40-48.
- TS EN 196-1, 2009. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini (Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength). In. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Vafaei M, Allahverdi A, 2016. Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 114: 290-296.
- Vafaei M, Allahverdi A, Dong P, Bassim N, 2018. Acid attack on geopolymer cement mortar based on waste-glass powder and calcium aluminate cement at mild concentration. *Construction and Building Materials*, 193: 363-372.
- Wang Y, Hu S, He Z, 2019. Mechanical and fracture properties of fly ash geopolymer concrete additive with calcium aluminate cement. *Materials*, 12(18): 2982.
- Yener E, Karaaslan C, 2019. Effect of Clinker Additive on Pumice-based Geopolymer Properties. 4th International Conference on Advances in Natural & Applied Sciences,
- Yener E, Karaaslan C, 2020. Curing Time and Temperature Effect on the Resistance to Wet-Dry Cycles of Fly Ash Added Pumice Based Geopolymer. *Cement Based Composites*, 1(2): 19-25.