

Nano silis katkıli trakitik tuf esash geopolimer harçların farklı kür ortamlarında özelliklerinin incelenmesi

Nano silica added trachytic tuff based geopolymer mortars investigation of properties in different curing environment

Hadaan PEHLİVAN*¹ 

¹Kilis 7 Aralık Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

• Geliş tarihi / Received: 15.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 16.05.2023

Öz

Bu çalışmada, nano silis (NS) ilave edilmiş alkalilerle aktifleştirilmiş trakitik tuf (TT) ile üretilen geopolimer harçların farklı kür ortamlarında dayanımları araştırılmıştır. Harçları aktive etmek için çok yaygın olarak kullanılmayan kalsiyum hidroksit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) kombine alkali aktivatörü kullanılmıştır. Geopolimerler çevre dostu üretimlere katkı sağlayacak şekilde alümino silikat ve endüstriyel atık esaslı malzemelerden elde edilebilir. Çalışmada kullanılan trakitik tuf bol miktarda alümino-silikat içeren volkanik orijinli ve alkali aktive özelliği endüstriyel atıklara göre düşük bir malzemedir. Bu nedenle geopolimer harçlar literatür ayrıntılı incelenerek 80°C sıcaklıkta 96 saat kür ortamında sentezlenmiştir. Sülfat ve asit saldırıları yapı malzemelerinin hizmet ömrünü etkileyen en önemli kimyasal sorunlardır. Bu kapsamda %5 sodyum sülfat (Na_2SO_4), magnezyum sülfat (MgSO_4), ve hidroklorik asit (HCl) çözeltilerinde 360 gün pH değişimleri ile birlikte mekanik davranışı incelenen geopolimer harçlarda en iyi performans gösteren %1.0 nano silis katkıli numunelerin sırasıyla; pH değerlerinin 13.2-11.8, 11.6-8.5, 3.5-2.6 aralığında; eğilme dayanımının 12.25, 11.50, 7.41 MPa; basınç dayanımının 66.12, 50.63, 40.82 MPa; olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Alkali aktivatör, Asit, Geopolimer, Nano silis, Sülfat, Trakitik tuf

Abstract

In this study, the strength of geopolymer mortars produced with alkali-activated trachytic tuff (TT) with nano silica (NS) added was investigated by curing in different environments. Calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and sodium carbonate (Na_2CO_3) combined alkali activator, which is not widely used, was used to activate the mortars. Geopolymers can be obtained from aluminosilicate and industrial waste based materials to contribute to environmentally friendly production. The trachytic tuff used in the study is a material of volcanic origin containing abundant aluminosilicate and has a lower alkaline-activated property compared to industrial wastes. For this reason, geopolymer mortars were synthesized in a 96-hour curing environment at 80°C by examining the detailed literature. Sulfate and acid attacks are the most important chemical problems affecting the service life of building materials. In this context, the samples with 1.0% nano silica additive, which showed the best performance in geopolymer mortars, whose mechanical behavior was examined in 5% sodium sulphate (Na_2SO_4), magnesium sulphate (MgSO_4), and hydrochloric acid (HCl) solutions along with pH changes for 360 days; pH values are in the range of 13.2-11.8, 11.6-8.5, 3.5-2.6; bending strength of 12.25, 11.50, 7.41 MPa; compressive strength of 66.12, 50.63, 40.82 MPa; was found to be.

Keywords: Alkali activator, Acid, Geopolymer, Nano silica, Sulphate, Trachytic tuff.

*Hadaan PEHLİVAN; hadaantaban@kilis.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Tarih öncesi dönemlerde puzolanik malzemelerin özellikle su yapılarında hidrolik bağlayıcı olarak kullanımına dikkat çekilmiş ve kullanım oranları bilgisi verilmiştir. Marn (killi kireçtaşı) ve alçıtaşı kullanımı uzun dönemde özellikle neme karşı dayanıklılık sorunları yaratmaktaydı. Bu dönemlerde dayanıklı harç veya beton yapımında volkanik malzemelerin kullanımına Romalıların öncülük ettiği bilgisine ulaşmaktayız. Günümüzde çimentolu kompozitlerden yüksek teknolojiye sahip olmaları aynı zamanda ekolojik kriterlere sahip olması beklenmektedir. Mikro katkıları ile birlikte nano katkıların kullanım olanakları araştırılmaktadır. Aynı zamanda çimento üretiminin çevreye vereceği zararları göz önünde bulundurulduğunda çimentosuz kompozitler olarak bilinen geopolimerler önem kazanmaktadır.

Alkali ile aktive edilerek üretilen geopolimerler atmosfere salınan kirli gazların düşük seviyelerde kalmasını ve doğal kaynaklar yerine atıklar kullanılarak çevrenin daha az zarar görmesini sağlamaktadır. Geopolimer üretiminde en fazla kullanılan alümino silikatlara örnek olarak uçucu kül, metakaolin, kırmızı çamur, cüruf, taban külü, pirinç kabuğu külü, silis dumanı verilebilir. Bu amorf karakterli endüstriyel atık malzemeler bir aktivatörle aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülmektedir (Bingöl, 2018).

Yüksek kür sıcaklığı gerektiren sodyum esaslı aktivatörlerdeki yüksek konsantrasyondaki hidroksit iyonları (OH⁻) özellikle uçucu kül aktivasyonunda etkili bir şekilde yüksek mukavemet gelişimi sağlar, bu aktivatörler yüksek pH toksisitesi (14'ün üzerinde) ve yüksek maliyet gibi sorunlara sahiptir. Kalsiyum hidroksit [Ca(OH)₂], daha düşük bir pH'a (14'ten az) sahip olduğundan ve NaOH veya Na₂SiO₃'e göre daha ucuz olduğundan, sodyum esaslı aktivatörlere potansiyel bir alternatif olabilir. Bu nedenle Ca(OH)₂ ile aktifleştirilmiş bir uçucu kül bağlayıcı sisteminde yalnızca mukavemeti etkili bir şekilde iyileştirmekle kalmayan, aynı zamanda dayanıklılık sorunlarını da önleyen yeni bir katkı maddesine ihtiyaç vardır. Bir uçucu kül bağlayıcının mukavemeti ve mikroyapısal gelişimi için yeni bir katkı maddesi olarak Na₂CO₃'ün iyileştirici etkisi araştırılmaktadır (Jeon vd., 2015).

Alkali aktivasyon teknolojisi sadece CO₂ emisyonlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda yüksek mekanik özellikler ve sülfat saldırılarına karşı yüksek direnç sağlar. Günümüzde geopolimer üretiminde en yaygın kullanılan sodyum, potasyum hidroksit (NaOH, KOH) ve sodyum ve potasyum silikat (Na₂SiO₃, K₂SiO₃) kullanımı yüksek maliyet, hızlı sertleşme, yüksek kuruma büzülmesi ve çok sayıda mikro çatlak oluşumuna yol açabilir. Na₂CO₃, Na₂SO₄, CaO, Ca(OH)₂ kullanımı ve reaktif MgO daha düşük maliyet, daha uzun sertleşme süresi ve daha yavaş dayanım gelişimi nedeniyle daha çevre dostu alkali aktive malzemeler üretmek için alternatif bir seçenek sunar. Bununla birlikte düşük pH'ın neden olduğu erken yaşlarda yavaş mukavemet gelişimi bu tip aktivatörlerin kullanımını sınırlar. CaO/Ca(OH)₂ ve Na₂CO₃ kombinasyonu ümit verici bir aktivatördür. Bir yandan, CaO/Ca(OH)₂'nin Na₂CO₃ ile reaksiyonu sonucu oluşan NaOH, ortamın pH'ını yükseltebilir, erken yaşlarda daha yüksek bir cüruf çözünme hızıyla sonuçlanan gözenekli çözelti; diğer yandan, CaCO₃'ün doldurma etkisi ve çekirdeklenme etkisi C-(A)-S-H jellerinin oluşumu ve gözenekliliğin azalması üzerinde olumlu etkilere neden olabilir. CaO ve Na₂CO₃'ün birlikte kullanımı, NaOH oluşumuna bağlı olarak gözenek çözeltilsinin pH'ını yükselterek, erken yaşlarda uygun bir basınç dayanımına katkıda bulunur (Bian vd., 2021).

Na₂CO₃ doğal alkaliler ve sodyum karbonat bakımından zengin tuzlu sulardan elde edilen veya çeşitli kimyasal işlemler sonucunda üretilen doğal bir mineraldir. Dünya çapında 24 milyar tondan fazla Na₂CO₃ rezervi bulunmaktadır. Bu mineral, çimentolu malzemelerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir. Örneğin Na₂CO₃ kullanılması çimentonun erken basınç dayanımını ve klorür direncini geliştirebilir. Püskürtme betonda Na₂CO₃ betonun işlenebilirliğini artırmak için hızlandırıcı olarak kullanılır. Klinkersiz alkali ile aktifleştirilmiş çimentoda, hızlandırıcı olarak Na₂CO₃ kullanılması, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanımına kıyasla üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca daha güvenli ve daha çevre dostudur (Wang vd., 2022).

Trakit ince taneli genelde açık tonlarda, kaba bir yüzeye sahip feldspatça zengin volkanik kayadır. Farklı kaynaklardaki araştırmalara göre bu kaya tipini ilk tanımlayan jeoloji tarihinde kalıcı bir iz bırakan Alexandre Brongniart (1770-1847) ve René Just Haüy (1743-1822) olarak bilinen Fransız mineraloglardır. Günümüzde andezit ve riyolit diye bilinen kayaların ismine geçmişte trakit adı verilmiştir. Trakit bu ikisi arasında bir kimyasal bileşime sahip bir kayadır. Trakit bol olmasına rağmen az bilinir. Trakit genellikle potasyum feldspat

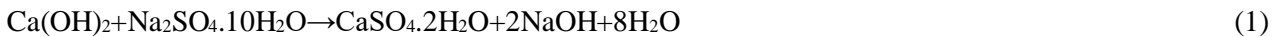
ve sanidin içeriği bilinir, fakat plajiyoklaz, anortoklaz ve feldspatoyidik gibi çeşitleri de vardır. Plajiyoklaz olan trakitler, traki-andezit olarak tanımlanır (Sert, 2010; Görmüş & Sagular, 2003).

Türkiye’de bulunan trakit alanlarının içerisinde Isparta Gölcük volkanitleri, kuzey batısında kalan Gölcük krater gölünden dolayı; trakit, traki-andezit, andezit, tüf ve tüfitten oluşur (Bilgin vd., 1990). Isparta bölgesinde görülen trakitler haricinde Afyon volkanitleri petrografik olarak başlıca; trakit, traki-andezit, porfiroidal trakit, trakitik tüf ve çok az oranlarda da bazalt bileşimli olup, asidik-nötr kayalardır. Afyonkarahisar il merkezi ve yakın çevresinde yüzeylenen volkanik kayaların ve tüflerin yapı taşı olarak kullanılabilme ve kolay kazılabilme özelliğine sahip olması, volkanik küllerinin çok ince taneli ve toz halinde olması nedeniyle çimento üretiminde kullanılması önerilebilir (Kibici vd., 2012).

Çimentolu sistemlerde küçük bir nano silis yüzdesinin, daha yoğun bir mikro yapı ile önemli bir mukavemet artışına neden olabileceği gözlemlenmiştir. (Deb vd., 2016). Geopolimerizasyon sürecini hızlandırmak ayrıca geopolimer betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek için genellikle ısı aktivasyonunun gerekli olduğu bilinmektedir. Nano silis ilavesi ile yüksek hacimli uçucu kül harçlarının basınç dayanımı ve dayanıklılığı oda sıcaklığında kür koşullarında da önemli ölçüde iyileştirilmiştir (Adak vd., 2017). Nano silis gözenek doldurma etkisinin yanı sıra reaktif olması nedeniyle çimentolu kompozitlerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır. Nano silis amorf doğası nedeniyle, daha geniş yüzey alanı ve Si-Al ve Si çözünme oranlarına bağlı, uçucu kül bazlı geopolimer betonlarda geopolimerizasyon sürecini önemli derecede geliştirir. Nano silis geopolimerizasyon sürecini geopolimer jel miktarını, silika ve alüminanın çözünme oranını artırarak iyileştirebilir. Ayrıca, yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle mikroyapısal özellikleri de geliştirir (Raj vd., 2023).

Sülfat saldırısı geopolimer malzemeler için önemli bir dayanıklılık ve hizmet sorunudur. Portland çimentosu ve katkılı çimento betonlarının da sülfat saldırısına maruz kaldığında bozulduğu görülmüştür. Portland çimentosu betonu üzerindeki sülfat saldırısı nedeniyle meydana gelen reaksiyonlar; CH, CSH ve sertleşmiş çimento hamurunun alüminat bileşenini içerir. Genleşme ve çatlama doğrudan veya dolaylı olarak etrenjit ve jips oluşumundan kaynaklanırken, yumuşama ve parçalanma CSH'nin yok edilmesinden kaynaklanır. Geopolimer betonların agresif ortamlarda daha iyi performans gösterdikleri bulunmuştur (Elyamany vd., 2018).

Sülfatların özellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve C_3A gibi hidrate çimento bileşenleriyle yaptıkları reaksiyonlar sonucunda oluşan ürünler alçıtaşı ve kalsiyum sülfat alüminattır. Sodyum sülfatın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile yaptığı katı fazın hacmini %124 arttıran reaksiyon Denklem 1’de verilmiştir. Sodyum sülfatın hidrate C_3A ile reaksiyonu ise Denklem 2’de verilmiştir. Kalsiyum sülfat ise Denklem 3’te verildiği gibi yalnızca C_3A ile reaksiyona girer ve kalsiyum sülfat alüminat oluşturur. Bu reaksiyonlar sonucu oluşan etrenjit katı fazın hacmini %227 arttırmaktadır. Magnezyum sülfatın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile yaptığı reaksiyonda Denklem 4’te verildiği gibi C_3A ve aynı zamanda CSH 'a saldırı görülmektedir (Ilca, 2018). Doygun magnezyum sülfat çözeltisinin pH değeri 10.5 gibi bir seviyede olduğu için çimento hamurunun taşıyıcı iskeleti olan CSH kararlılığını sürdürmez ve çimentolu sistemde çok kısa sürede ciddi tahribat oluşmaktadır (Baradan vd., 2018).



Başka bir konu ise iç sülfat etkisinin özel bir durumu olan gecikmiş etrenjit ve tomasit oluşumudur. Gecikmiş etrenjit oluşumu çimentonun yüksek oranda içerdiği çözünen sülfat iyonlarının uzun süre ve ıslanma-kuruma sonunda jel görünümlü etrenjite dönüşmesidir. Bunun için betonun sülfatlı sularla temas etmesi şart değildir. CSH jelini tüketen, jips ve etrenjite göre daha zararlı olan tomasit oluşumu için ise betonun sülfatlı bir ortamda bulunması gerekir. Bu etki sülfata karşı direnci sağlamak amacıyla düşük oranda C_3A içeren çimentoların kullanımında da görülmüştür (Van Aardt & Visser, 1975). Tomasit, etrenjit kristallerine çok benzeyen bir kafes yapısına sahip olmasına karşın yapısında Al_2O_3 yerine SiO_4 bulunmaktadır. Tomasit oluşumu CSH jeli ile SO_4^{2-} , CO_2 veya CO_3^{2-} ve su arasındaki reaksiyon sonucu meydana gelmektedir (Santhanam vd., 2001).

Bu çalışmada, geopolimer kompozit üretiminde kullanılabilirliği üzerine araştırma yapılmamış olan volkanik kökenli kayalardan olan trakitik tüf (TT) seçilmiştir. Volkanik kayalar bakımından zengin olan bölgelerdeki yöresel hammaddelerin çimento esaslı ve çimento esaslı olmayan üretimlerde değerlendirilmesi önemli olmaktadır. Çimento esaslı malzemeler üzerinde sülfat etkisini azaltmak için nano silis kullanımı önerilmektedir. Ancak nano silis katkılı geopolimer kompozitlerin sülfat ve asit ortamlarında davranışları konusunda araştırmalar sınırlıdır. Bu kapsamda nano silis (NS) katkısı ilave edilmiş trakitik tüfü (TT) alkali aktive etmek için yaygın kullanılmayan kalsiyum hidroksit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) kombine aktivatörü tercih edilmiştir. pH değişimleri belirli sürelerde takip edilen sülfat ve asit ortamlarında bekletilen geopolimer harçların mekanik özellikleri araştırılmıştır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Materyal

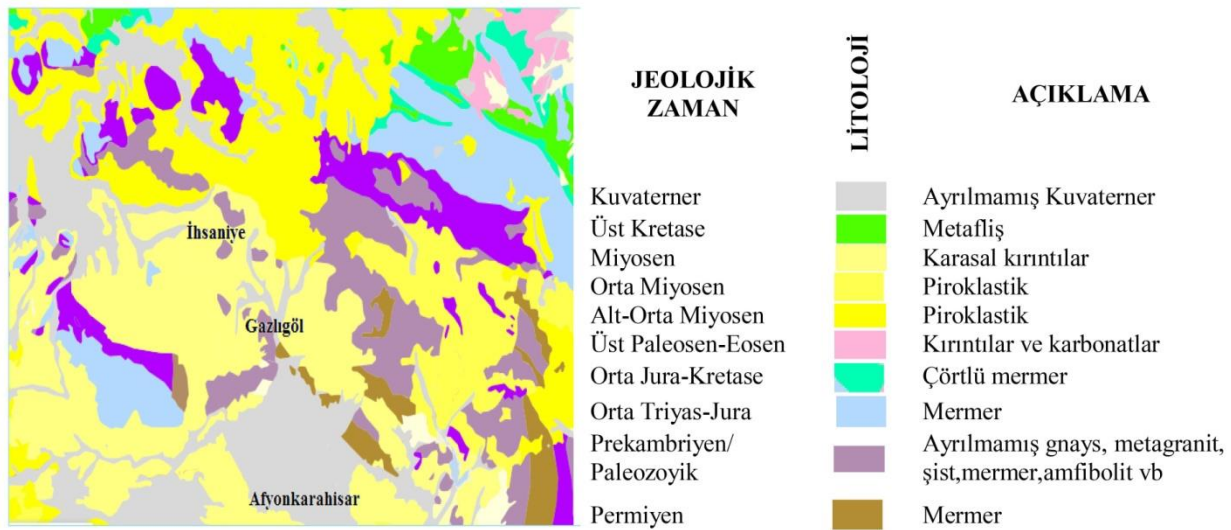
2.1.1. Material

Bu çalışmada geopolimer harç üretmek için trakitik tüf (TT), nano silis (NS), standart kum, alkali aktivatör olarak $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$, farklı kimyasal kür ortamları hazırlamak için magnezyum sülfat (MgSO_4), sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve hidroklorik asit (HCl) kullanılmıştır.

2.1.1.1. Trakitik tüf (TT)

2.1.1.1. Trachytic tuff (TT)

Bu çalışmada kullanılan trakitik tüf (TT) numunesinin temin edildiği tektonik faaliyetlere bağlı olarak oluşan kıta içi volkanizma Afyonkarahisar civarı rezerv alanı Şekil 1'de verilmiştir. Orta Anadolu özellikle Orta Miyosenden bu yana şiddetli volkanik olaylar etkisinde çok geniş alanlarda yaygın ürünler olduğu Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanına ait jeoloji haritası ve litostragfisi (MTA Web Sitesi kullanılarak hazırlanmıştır)
Figure 1 Geological map and lithostratigraphic chart of the study area (prepared using MTA Web Site)

Miyosen yaşlı volkanitler; çoğunlukla andezit ve dasitik türlerin egemen olduğu çeşitli lavlar; ignimbiritler ve volkanik küller; eş yaşlı çökel kaya birimleriyle ara katkılı olan volkanik küllerden oluşmaktadır. Kuvaterner yaşlı volkanitler ise çeşitli türde lavlardan meydana gelmektedirler (Ercan, 1985).

Çalışmada kullanılan Afyonkarahisar'dan temin edilen Şekil 2'de görülen trakitik tüf (TT) numunesine ait kayaç parçaları puzolanlarda incelik sınırlarına ASTM C618-19 (2019) göre 45μ elekten geçen numune miktarı %64,2 olacak şekilde öğütülmüştür.



Şekil 2. Trakitik tuf kayaç parçaları ve öğütülmüş trakitik tuf
Figure 2. Trachytic tuff rock fragments and ground trachytic tuff

Trakitik tufün (TT) X-Işını Floresans (XRF) analizine göre kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. TT kızdırma kaybının %7.84 olduğu, TT içerisinde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının %83.5 olduğu, CaO'un %2.21 oranında, MgO'un %0.39 oranında ve diğer bileşenlerin (K_2O , Na_2O , SO_3 . vd.) %5.78 oranında olduğu görülmüştür.

Tablo 1. Trakitik tuf kimyasal ve fiziksel özellikleri
Table1. Chemical and physical properties of trachytic tuff

Kimyasal bileşen	Miktar (%)
SiO_2	66.98
Al_2O_3	11.40
Fe_2O_3	2.12
CaO	2.21
MgO	0.39
K_2O	5.00
Na_2O	0.74
SO_3	0.04
Kızdırma Kaybı	7.84
Fiziksel özellik	Miktar (%)
Yoğunluk(g/cm^3)	2.28
Özgül yüzey (cm^2/g)	4670

2.1.2. Nano silis (NS)

2.1.2. Nano silica (NS)

Geopolimer harç üretiminde volkanik esaslı trakitik tuf (TT) ile birlikte özellikleri Tablo 2' de verilen nano silis (NS) kullanılmıştır.

Tablo 2. Nano silis kimyasal ve fiziksel özellikleri
Table2. Chemical and physical properties of nano silica

Nano silis fiziksel ve kimyasal özellik	Değer
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	45
Safılık(%)	99.9
Yüzey Alanı (cm^2/g)	8000
Renk	Beyaz
Kristal Yapısı	Polikristal
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2.33

2.1.3. Alkali aktivatörler

2.1.3. Alkaline activators

Trakitik tüfü (TT) aktive etmek için Tablo 3'te kimyasal özellikleri verilen kalsiyum hidroksit [Ca(OH)₂], +sodyum karbonat (Na₂CO₃) kullanılmıştır.

Tablo 3. Kalsiyum hidroksit ve sodyum karbonata ait kimyasal özellikleri
Table 3. Chemical properties of calcium hydroxide and sodium carbonate

Özellikler	Kalsiyum hidroksit	Sodyum karbonat
Cas no	1305-62-0	497-19-8
Molekül formülü	Ca(OH) ₂	Na ₂ CO ₃
Molekül ağırlığı (g/mol)	74.09	105.98
Yoğunluk (g/cm ³)	2.21	2.54
Safılık (%)	91.50	99.50
Erime Noktası (°C)	580	851
Kaynama Noktası (°C)	2850	1304

2.1.4. Kür çözeltileri

2.1.4. Curing solutions

40×40×160 mm boyutlarında geopolimer harçlar 96 saat etüvde kür prosesi sonrasında farklı kimyasal ortamlarda kür için Tablo 4'te özellikleri verilen % 5 susuz magnezyum sülfat (MgSO₄) çözeltisi, % 5 susuz sodyum sülfat (Na₂SO₄) ve % 5 hidroklorik asit (HCl) çözeltileri içerisinde 360 gün bekletilmiştir. [ASTM C1012M-18b \(2019\)](#) ve [ASTM C267 \(2020\)](#) esaslarına göre hazırlanmış kimyasal ortamlarda geopolimer numunelerin bekletildiği çözeltilerin pH ölçümleri alınmış ve geopolimer numunelerin mukavemetleri test edilmiştir.

Tablo 4. Magnezyum sülfat, sodyum sülfat ve hidroklorik asite ait kimyasal özellikleri
Table 4. Chemical properties of magnesium sulfate, sodium sulfate and hydrochloric acid

Özellikler	Magnezyum sülfat	Sodyum sülfat	Hidroklorik asit
CAS no	10034-99-8	7757-82-6	7647-01-0
Molekül formülü	MgSO ₄	Na ₂ SO ₄	HCl
Molekül ağırlığı (g/mol)	246.47	142.04	36.46
Yoğunluk (g/cm ³)	1.68	2.66	1.2
Safılık (%)	98	99	30-33
Erime Noktası (°C)	150	884	-35
Kaynama Noktası (°C)	330	1429	57

2.1.5. Kum

2.1.5. Sand

Geopolimer harçların üretiminde Limak Batı Çimento San. Tic. A.Ş.'den temin edilen kum kullanılmıştır.

2.2. Metot

2.2. Method

Bu çalışmada geopolimer harçları üretmek için trakitik tuf (TT), trakitik tufün ağırlıkça %0, 1, 1.5 ve 2 oranlarında nano silis (NS), %10 oranında Na₂CO₃, %5 oranında Ca(OH)₂ kullanılmıştır. Üretilen numuneler sırasıyla; TTNS0.0, TTNS1.0, TTNS1.5 ve TTNS2.0 olarak kodlanmıştır. Nano silis (NS) katkılı trakitik tuf (TT) esaslı geopolimer harçların farklı kür ortamlarında mekanik özelliklerini araştırmak için 40x40x160 mm boyutlarında Tablo 5'te verilen plana göre üretimi yapılmıştır.

Tablo 5. Geopolimer harçlara ait karışım oranları**Table 5.** Mixing ratios of geopolimer mortars

Karışım	Trakitik tuf (g)	Nano silis (g)	Na ₂ CO ₃ (g)	Ca(OH) ₂ (g)	Su (g)	s/b	Kum (g)
TTNS0.0	450	0	45	22.5	225	0.50	1350
TTNS1.0	450	4.5	45	22.5	235	0.52	1350
TTNS1.5	450	6.75	45	22.5	240	0.53	1350
TTNS2.0	450	9	45	22.5	253	0.56	1350

Trakitik tuf esaslı geopolimer harç hazırlamak için ağırlıkça trakitik tuf miktarına göre sodyum karbonat (Na₂CO₃) ve kalsiyum hidroksit [Ca(OH)₂] kombine aktivatörü kullanılmıştır. Na₂CO₃ dozu (Bernal vd., 2015; Walling vd., 2018; Yang vd., 2019) trakitik tufün ağırlıkça %10'u olarak alınmıştır. Ca(OH)₂ 'nin toplam miktarı ise (Jin vd., 2015; Ke vd., 2016; Yang vd., 2019) trakitik tufün ağırlıkça %5'i olarak alınmıştır.

Çalışmada kullanılan alkali aktivatörün kombine reaksiyonu Denklem 5'te verilmiştir.



Kombine alkali aktivatörün pH değeri Şekil 3'te görüldüğü gibi 13.7 olarak ölçülmüştür. Ca(OH)₂ kullanımı yaygın olan sodyum esaslı alkali aktivatörlere göre düşük pH (14'ün altında) avantajı sağlamaktadır.



Şekil 3. Kombine alkali aktivatörün pH'ı
Figure 3. pH of the combined alkaline activator

Geopolimer kompozitlerde en uygun alkali aktivatör, kür süresi ve zaman ilişkisi belirlenerek dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılması gerekmektedir. Özellikle geopolimer üretiminde kullanılacak trakitik tuf gibi düşük alkali aktive özelliğine sahip volkanik orijinli malzemelerde bu ilişkiler çok daha önemli olmaktadır.

Khale ve Chaudhary (2007) tarafından kür sıcaklığı 50°C'nin üzerine çıkarıldığında geopolimer sentezinin kısa sürede olması; Al Bakri vd. (2011) tarafından kür sıcaklığının ortalama 40-70°C aralığında önerilmesi dikkate alınarak geopolimer kompozitleri üretmek için Şekil 4'te görüldüğü gibi kür sıcaklığı 80°C ve kür süresi 96 saat olarak alınmıştır.



Şekil 4. Geopolimer harçların etüv kürü
Figure 4. Oven curing of geopolimer mortars

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

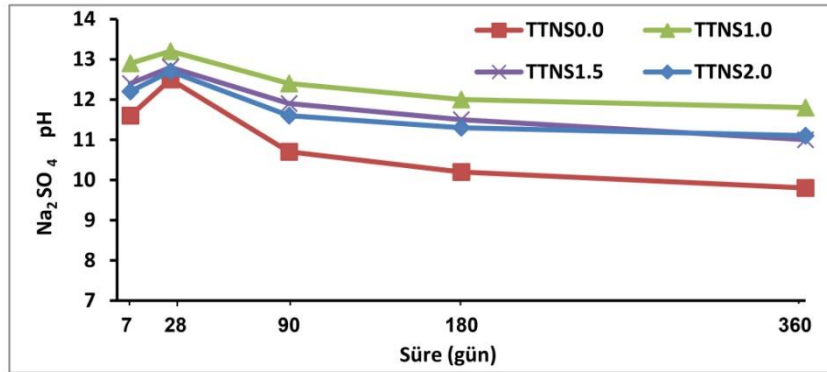
Portland çimentosu esaslı kompozitlerin en önemli sorunlarından bir tanesi sülfat ve asit etkilerine karşı direncinin düşük olmasıdır. Yapı hizmet ömrünü uzatmak için düşük C_3A içeriğine sahip çimentoların kullanılması önerilmektedir ancak yeterli olmadığı için alternatif malzemelerin araştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda geopolimerlerin çözüm olabileceği düşünülmektedir.

Geopolimer harçların bekletileceği farklı kür ortamlarının başlangıç pH değerleri; %5 sülfat çözeltileri için ($MgSO_4$ ve Na_2SO_4) sırasıyla 7.8 ve 8.2 olarak, %5 asit çözeltisi için (HCl) ise 3.1 olarak ölçülmüştür. Kombine alkali aktivatör kullanılarak 40x40x160 mm boyutlarında üretilen geopolimer harçların 360 gün sülfat ve asit çözeltileri içerisindeki pH değişimleri Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde; nano silis (NS) katkılı ve katkısız tüm geopolimerlerin, sülfat çözeltileri içerisinde ($MgSO_4$ ve Na_2SO_4) 28 gün bekletildiğinde çözeltilerin pH değerlerinin arttığı sonrasında 90, 180 ve 360 gün bekletildiğinde ise pH değerlerinin bir miktar azalıp sonrasında fazla bir değişim olmadığı anlaşılmaktadır. Nano silis (NS) katkılı ve katkısız tüm geopolimerlerin asit çözeltisi içerisinde (HCl) 28 gün ve sonrasında 90, 180 ve 360 gün bekletildiğinde ise çözeltilerin pH değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Thokchom vd. (2010) çalışmasında, 24 hafta %10 $MgSO_4$ çözeltisinde uçucu kül (UK) esaslı geopolimer harç numunelerinin pH değerlerinin ilk haftalarda hızlıca arttığını daha sonra önemli bir artışın olmadığını hatta durduğunu saptamıştır. Alcamand vd. (2018) tarafından yapılan benzer bir çalışmada NaOH ile aktive edilmiş metakaolin ve cüruf bazlı geopolimer harçlar 28 gün boyunca oda koşullarında kür sonrası 180 gün %5 $MgSO_4$ çözeltisine maruz bırakılmıştır. Sülfat çözeltilerinin pH değerlerinin ilk 30 gün %31.29 artış gösterdiği daha sonra testin sonuna kadar (180 gün) pH değerinin çoğunlukla sabit olduğu belirtilmiştir.

Bu durum literatüre paralel bir şekilde ilk günlerde (28 güne kadar) geopolimerdeki alkalilerin çözeltilere geçmesi ile açıklanabilir.

Şekil 5'ten TTNS0.0, TTNS1.0, TTNS1.5 ve TTNS2.0 numunelerin tüm günlerde Na_2SO_4 çözeltisi içerisinde pH değerlerinin en büyük ve en küçük değerleri sırasıyla; 12.5 -9.8, 13.2-11.8, 12.8-11.0, 12.7-11.1 aralığında olduğu anlaşılmaktadır.



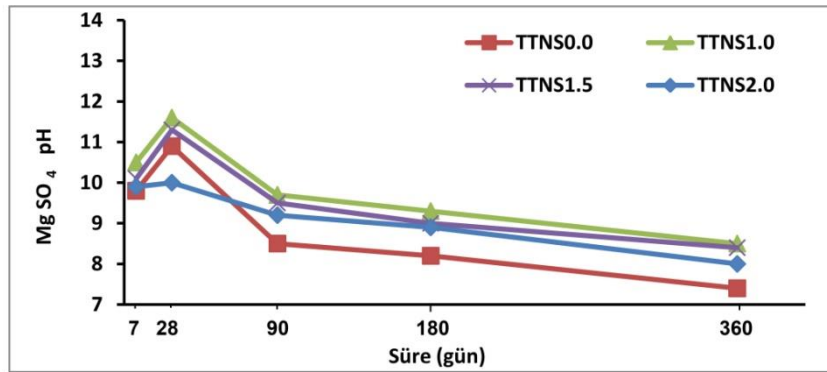
Şekil 5. Geopolimer numunelerin günlere göre Na_2SO_4 çözeltisinde pH değerleri
Figure 5. pH values of geopolimer samples in Na_2SO_4 solution according to days

Şekil 6'dan TTNS0.0, TTNS1.0, TTNS1.5 ve TTNS2.0 numunelerin tüm günlerde $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde pH değerlerinin en büyük ve en küçük değerleri sırasıyla; 10.9-7.4, 11.6-8.5, 11.3-8.4, 10.0-8.0 aralığında olduğu anlaşılmaktadır.

Kwasny vd. (2018) çalışmasında, Portland çimentosu bazlı betonların agresif sulu ortamlarda reaksiyona girebileceğini ayrıca yüksek alkali ortamda ($pH > 12.5$) sertleşmiş çimento hamurunun agresif iyonlar taşıyan sularla teması durumunda fiziksel olduğu kadar kimyasal bozunmaya da uğrayabileceğini bildirmiştir.

Bulunan değerler, kullanılan kombine alkali aktivatörlerin yüksek pH toksisitesine ($\text{pH} > 14$) neden olmayacağına ve agresif ortamlarda geopolimer harçların daha iyi performans gösterebileceğine işaret etmektedir.

Sülfat çözeltileri ile temas eden geopolimerlerde reaksiyona giren kalsiyum hidroksit $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ azalmaktadır. Na_2SO_4 çözeltileri ile temas halinde jips ve etrenjit, MgSO_4 çözeltileri ile temas halinde sadece jips gibi hacim artışına neden olan tuzlar oluşmaktadır. Geopolimerdeki kalsiyum hidroksit $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ile sodyum sülfat (Na_2SO_4) reaksiyonu sonucunda jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve sodyum hidroksit (NaOH) oluşurken, magnezyum sülfat (MgSO_4) reaksiyonu sonucunda jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve magnezyum hidroksit/brüst $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ oluştuğu bilinmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6'dan; geopolimerlerin temas ettiği çözeltilerin pH değerlerini, suda çözünürlüğü yüksek olan NaOH 'ın, $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ tüketimini azaltarak Na_2SO_4 ortamında arttırdığı; suda çözünürlüğü düşük olan $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ 'in ise $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ tüketimini arttırarak MgSO_4 ortamında düşürdüğü; görülmektedir. Bu durumda geopolimerlerden sülfat çözeltilerine geçen bazik iyonların sayısı zaman içerisinde azalmaktadır.

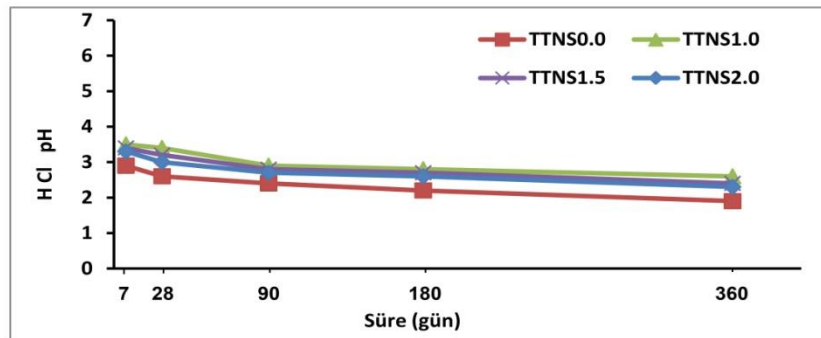


Şekil 6. Geopolimer numunelerin günlere göre MgSO_4 çözeltisinde pH değerleri
Figure 6. pH values of geopolymer samples in MgSO_4 solution according to days

Şekil 7'de TTNS0.0, TTNS1.0, TTNS1.5 ve TTNS2.0 numunelerin tüm günlerde HCl çözeltisi içerisinde pH değerlerinin en büyük ve en küçük değerleri sırasıyla; 2.9-1.9, 3.5-2.6, 3.4-2.4, 3.3-2.3 aralığında olduğu görülmektedir.

Asit etkisine maruz kalan betondaki bozulma süresi, kalsiyum tuzlarının suda çözünme sürelerine bağlıdır. HCl çok kolay çözünebilir CaCl_2 meydana getirir Bazik karakterde olan Portland Çimentoları asitlere karşı dayanıksızdır. $\text{pH} < 6.5$ değerine sahip olan sular, beton içerisindeki çimento harcı ve agregada bulunan karbonat kökenli tanecikler üzerinde çözücü ve ayrıştırıcı etki oluşturur (Baradan vd., 2010).

Başlangıçtan itibaren temas çözeltilerinin pH değerlerinin zaman içerisinde azalması geopolimerdeki kalsiyum hidroksit $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ile hidroklorik asit (HCl) reaksiyonu sonucunda zayıf baz karakterli kalsiyum klorür $[\text{Ca}(\text{Cl})_2]$ oluşumu ile açıklanabilir.



Şekil 7. Geopolimer numunelerin günlere göre HCl çözeltisinde pH değerleri
Figure 7. pH values of geopolymer samples in HCl solution according to days

96 saat etüv kürü sonrası 28 gün suda bekletilen, sonrasında 360 gün sülfat ve asit çözeltilerine maruz bırakılan geopolimer harçların mekanik özellikleri Tablo 6 ve Tablo 7'de verilmiştir. Tablolar incelendiğinde; %1.0 nano silis katkılı geopolimer harç numunelerinin (TTNS1.0) eğilme ve basınç dayanımlarının; tüm kür ortamlarında en iyi olduğu, nano silis ilave oranı arttıkça düştüğü; Na₂SO₄ çözeltilinde 360 gün bekleyen geopolimer numunelerin MgSO₄ ve HCl ortamında bekleyen numunelere göre arttığı; görülmektedir.

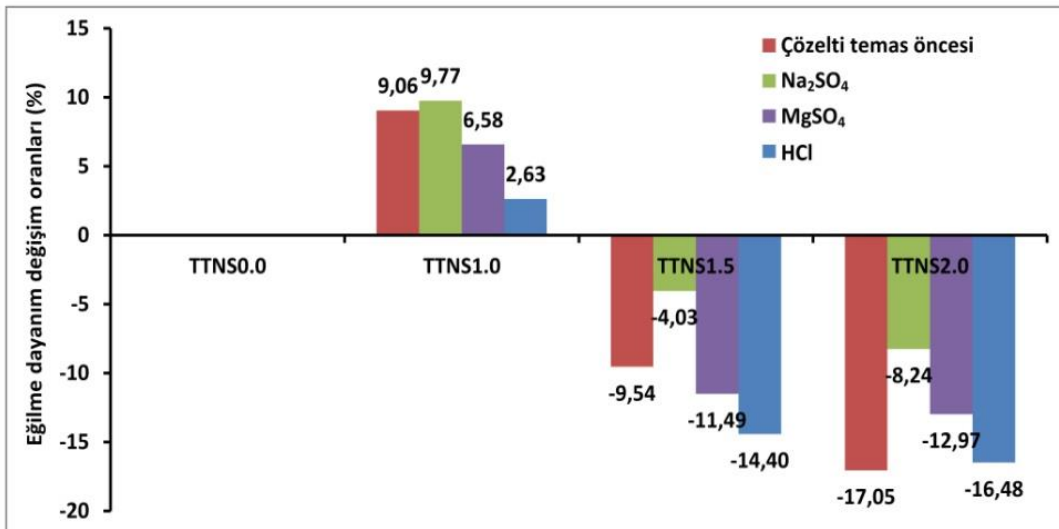
Tablo 6. Farklı ortamlarda kür edilmiş geopolimer harçların 360 günlük eğilme dayanımları
Table 6. 360-day flexural strengths of geopolimer mortars cured in different environments

Karışımlar	Eğilme dayanımı (MPa)			
	Sülfat ve asit temas öncesi	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	HCl
TTNS0.0	10.38	11.16	10.79	7.22
TTNS1.0	11.32	12.25	11.50	7.41
TTNS1.5	9.39	10.71	9.55	6.18
TTNS2.0	8.61	10.38	9.39	6.03

Tablo 7. Farklı ortamlarda kür edilmiş geopolimer harçların 360 günlük basınç dayanımları
Table 7. 360-day compressive strength of geopolimer mortars cured in different environments

Karışımlar	Basınç dayanımı (MPa)			
	Sülfat ve asit temas öncesi	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	HCl
TTNS0.0	47.53	59.61	47.28	38.96
TTNS1.0	52.14	66.12	50.63	40.82
TTNS1.5	43.80	58.09	44.74	36.46
TTNS2.0	40.55	54.16	42.36	34.20

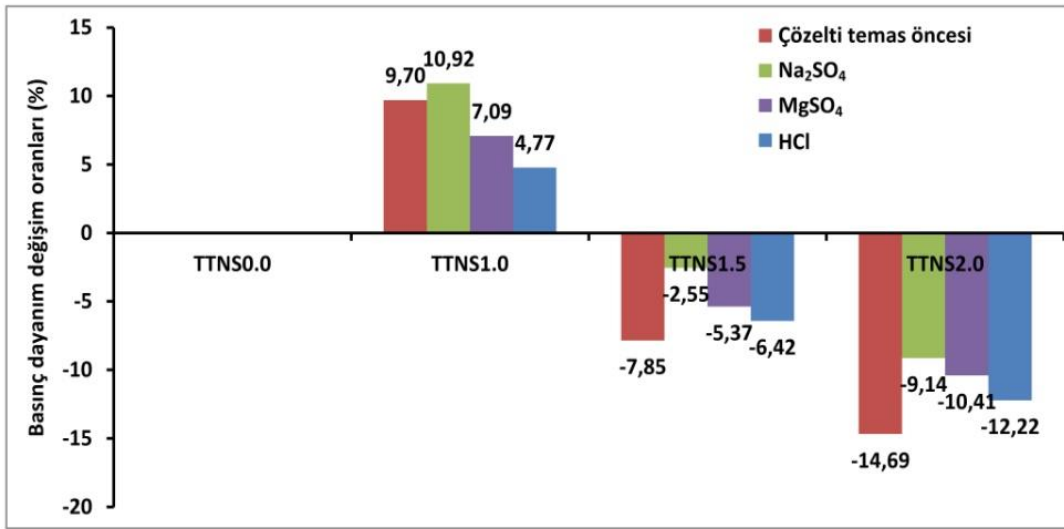
Geopolimer harçların eğilme dayanımı değişim oranları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'den; trakitik tuf esaslı geopolimer harçlara nano silisin %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında ilave edilmesi ile üretilen numunelerin eğilme dayanımlarının nano silis ilavesiz numunelere göre sırasıyla; çözeltili temas öncesinde %9.06 oranında arttığı ve %9.54 ve %17.05 oranında azaldığı; 360 gün Na₂SO₄ ortamında bekletildiğinde %9.77 oranında arttığı ve %4.03 ve %8.24 oranında azaldığı; MgSO₄ ortamında bekletildiğinde %6.58 oranında arttığı ve %11.49 ve %12.97 oranında azaldığı; HCl ortamında bekletildiğinde %2.63 oranında arttığı ve %14.40 ve %16.48 oranında azaldığı; anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Geopolimer harçların eğilme dayanımı değişim oranları
Figure 8. Flexural strength change rates of geopolimer mortars

Huang vd. (2021) tarafından $MgSO_4$ çözeltilisine maruz bırakılan numuneler üzerinde yapılan çalışmada, 36 ay sonunda eğilme mukavemet kayıpları önce azalmış, sonrasında nano silis dozajının artmasıyla birlikte artmıştır. (Arslan, 2014) geopolimerde eğilme dayanım kayıplarına bağlı gevrekliğe yol açmayacak şekilde %2'den düşük nano silis oranlarının tercih edilmesine işaret etmiştir. Literatür incelendiğinde ağırlıkça %5-8'den yüksek nano silis dozajlarının $MgSO_4$ çözeltilisine maruz kalan geopolimer harçlar üzerinde bozucu etkiyi şiddetlendirdiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada geopolimer üretiminde kullanılan %1.0 nano silis katkısının $MgSO_4$ saldırısının hafifletilmesinde etkili olması literatürle örtüşmektedir. 360 gün sülfat ortamında bekletilen geopolimer harçların performansının düşük nano silis dozajlarında en iyi olduğu görülmektedir.

Geopolimer harçların basınç dayanımı değişim oranları Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'dan; traktitik tüf esaslı geopolimer harçlara nano silisin %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında ilave edilmesi ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarının, nano silis ilavesiz numunelere göre sırasıyla; çözelti temas öncesinde %9.70 oranında arttığı ve %7.85 ve %14.69 oranında azaldığı; 360 gün Na_2SO_4 ortamında bekletildiğinde %10.92 oranında arttığı ve %2.55 ve %9.14 oranında azaldığı; $MgSO_4$ ortamında bekletildiğinde %7.09 oranında arttığı ve %5.37 ve %10.41 oranında azaldığı; HCl ortamında bekletildiğinde %4.77 oranında arttığı ve %6.42 ve %12.22 oranında azaldığı; anlaşılmaktadır.



Şekil 9. Geopolimer harçların basınç dayanımı değişim oranları
Figure 9. Compressive strength change rates of geopolimer mortars

Orhan (2022) çalışmasında %5 Na_2SO_4 çözeltilisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerlerinin %5 $MgSO_4$ çözeltilisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerlerinden daha fazla olduğunu bulmuştur. Yazıcı (2022) yüksek sıcaklık+HCl sonrasında tüm numunelerin basınç dayanımlarında azalma olurken yüksek sıcaklık+ Na_2SO_4 sonrasında artış olduğunu ifade etmiştir. Diğer taraftan Koç (2021) Na_2SO_4 etkisindeki numunelerin 30. günde basınç dayanımının 75,14 MPa, $MgSO_4$ etkisindeki numunelerin ise 64,31 MPa olduğunu bildirmiştir. Akbulut (2020) tarafından %10, %20 ve %30 oranında yüksek fırın cürufu (YFC) içeren perlit esaslı geopolimer karışımlarda; %5 HCl çözeltilisine maruz bırakılan numunelerin asit çözeltilisine maruz bırakılmayan numunelere göre dayanım kayıpları sırasıyla %11,19 %30,77 ve %31,35; %5 $MgSO_4$ çözeltilisine maruz bırakılan numunelerin sülfat çözeltilisine maruz bırakılmayan numunelere göre dayanım kayıpları sırasıyla %4,56 %19,38 ve %18,02 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada 360 gün %5 Na_2SO_4 ortamında bekletilen geopolimer harçların basınç dayanım kayıplarının %5 $MgSO_4$ ortamında bekletilen geopolimer harçlara göre daha az ve 5 HCl ortamında bekletilen geopolimer harçlarda ise diğer sülfat çözeltililerine göre en fazla olması literatüre benzer sonuçlar vermiştir. Buna göre hidroklorik asit etkisi altında çimentolu sistemde CSH jelinin bozulmasının diğer sülfat etkilerinden daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Özcan (2018) %5 $MgSO_4$ ve %5 Na_2SO_4 çözeltililerinin geopolimer betonların basınç dayanımlarını azaltıcı etkisi olduğunu bildirmiştir. Sülfat saldırısının betondaki Ca bileşenleri ile etkileşerek etrenjit ve alçıtaşı oluşturacağını açıklamıştır. Bu bağlamda geopolimer beton karışımındaki artan yüksek fırın cürufu (%32.45 CaO içerikli) oranlarının, Elazığ ferrokrom cürufuna (%1.1 CaO içerikli) göre basınç dayanımını azalttığını aynı zamanda çok daha fazla CaO içeriğine sahip yüksek fırın cürufunun sülfat saldırılarından daha fazla

etkilendiğine dikkat çekmiştir. Çimentolu sistemlerde SiO₂ bakımından zengin düşük CaO içeren puzolan kullanımı, puzolanik reaksiyon sonucu Ca(OH)₂'inin bağlanmasına ve sülfat bileşikleriyle reaksiyona girmesine engel olmaktadır. Benzer şekilde Ren vd. (2017) geopolimerik malzemelerin mükemmel sülfat direnç nedenini, kaynak malzemelerindeki düşük Ca içeriğine ve daha kararlı çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapılarına bağlamıştır. Bu çalışmada geopolimer üretiminde kullanılan düşük CaO (%2.21) içeriğine sahip trakitik tüfle birlikte %1.0 nano silis ilavesinin 360 gün %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen geopolimer harçların basınç dayanımlarını çözelti temas öncesi kontrol numunelerine göre arttırdığı görülmektedir. Basınç dayanımında görülen bu artışın nedeninin sülfat çözeltisinde geopolimerizasyon reaksiyonunun devam etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Çalışmada kullanılan trakitik tuf numunesine ait kayaç parçaları puzolanlarda incelik sınırlarına ASTM C618-19 (2019) göre 45µ elekten geçen numune miktarı %64.2 olacak şekilde öğütülmüştür. Trakitik tufün XRF analizine göre kızdırma kaybının %7.84 olduğu, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ toplamının %83.5 olduğu, CaO'un %2.21 oranında, MgO'un %0.39 oranında ve diğer bileşenlerin (K₂O, Na₂O, SO₃ vd.) %5.78 oranında olduğu tespit edilmiştir.

Nano silis katkılı ve katkısız tüm geopolimerlerin bekletildiği çözeltilerin pH değerlerinin; MgSO₄ ve Na₂SO₄ çözeltilerinde 28 günde arttığı sonrasında 90, 180 ve 360 günlerde azaldığı; HCl çözeltisinde 28, 90, 180 ve 360 günlerde azaldığı görülmüştür.

%1.0 Nano silis katkılı geopolimerlerin tüm günlerde pH değerleri en büyük; Na₂SO₄ çözeltisi içerisinde 13.2-11.8; MgSO₄ çözeltisi içerisinde 11.6-8.5; HCl çözeltisi içerisinde 3.5-2.6 aralığında ölçülmüştür.

Tüm kür ortamlarında geopolimerler incelendiğinde; %1.0 nano silis katkılı numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının en iyi olduğu, nano silis ilave oranı arttıkça dayanımlarda azalmalar olduğu görülmüştür. Na₂SO₄ çözeltisinde 360 gün bekleyen geopolimer numunelerin eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla MgSO₄ ve HCl ortamında bekleyen numunelere göre daha yüksek olmuştur.

Trakitik tuf esaslı geopolimer harçlara nano silisin %1.0 oranında ilave edilmesi ile üretilen numunelerin; eğilme dayanımlarının nano silis ilavesiz numunelere göre çözelti temas öncesinde, 360 gün %5 Na₂SO₄, %5 MgSO₄ ve %5 HCl ortamında bekletildiğinde sırasıyla; %9.06; %9.77; %6.58 ve %2.63 oranında arttığı; basınç dayanımlarının ise %9.70; %10.92; %7.09 ve %4.77 oranında arttığı; görülmüştür.

Günümüzde çimentolu sistemlerdeki sülfat etkisine bağlı hasarların karmaşık süreçleri nedeni ile sadece sülfatların hidrate çimento bileşenleriyle yaptıkları reaksiyonlar sonucu oluşmadığı tartışılmaktadır. Çimento kimyası üzerinde değişik etkilere sahip farklı mikro ve nano katkıların geopolimer kompozit üretiminde de kullanılması, iç ve dış sülfat etkileri üzerine araştırmaların çok yönlü olarak yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde geopolimer üretiminde kullanılan düşük CaO içeriğine sahip trakitik tüfle birlikte %1.0 nano silis kullanımının tüm kür ortamlarında mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu çalışmada başka bir yazar katkısı yoktur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim.

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- ASTM C618-19. (2019). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1012M-18b. (2019). *Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C267. (2020). *Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Alcamand, H.A., Borges, P. H. R., Silva, F. A., & Trindade, A. C. C. (2018). The effect of matrix composition and calcium content on the sulfate durability of metakaolin and metakaolin/slag alkali-activated mortars. *Ceramics International*, 44(5), 5037-5044. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.102>.
- Adak, D., Sarkar, M., & Mandal, S. (2017). Structural performance of nano-silica modified fly ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.111>.
- Akbulut, F. (2020). *Kırmızı çamur ve yüksek fırın cürufunun perlit esaslı geopolimer beton özelliklerine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Al Bakri, M., Kamarudin, H., BinHussain M., Nizar, I., Zarina, Y., & Rafiza, A.R. (2011). The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers. *Physics Procedia*, 22, 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.045>.
- Arslan, K.M. (2014). *Sülfat etkisine maruz kalmış mineral ve nano katkılı harçların durabilitesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2010). *Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite)*. DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bernal, S.A., Provis, J.L., Myers, R.J., San Nicolas, R.S., & Van Deventer, J.S.J. (2015). Role of carbonates in the chemical evolution of sodium carbonate-activated slag binders. *Material and Structure*, 48, 517-529. <https://doi.org/10.1617/S11527-014-0412-6>.
- Bian, Z., Jin, G., & Ji, T. (2021). Effect of combined activator of Ca(OH)₂ and Na₂CO₃ on workability and compressive strength of alkali-activated ferronickel slag system. *Cement and Concrete Composites*, 123, 104179. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104179>.
- Bilgin, A., Köseoğlu, M., & Özkan, G. (1990). Isparta-Gölcük yöresi kayaçlarının mineraloji, petrografi ve jeokimyası. *Doğa, Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, 14(2), 342-361.
- Bingöl, Ş. (2018). *Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması* [Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Deb, P.S., Sarker, P.K., & Barbhuiya, S. (2016). Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, 72, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.017>.
- Elyamany, H.E, Abd Elmoaty, A.E.M., & Elshaboury, A.M. (2018). Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 184, 111-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.212>.

- Ercan, T., (1985). *Orta Anadolu'daki Senozoyik Volkanizması*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi Yayınları, 119-140.
- Görmüş, M., & Sagular, E.K. (2003). SDÜ 20. Yıl Jeoloji Sempozyumu. *Bildiri Özleri Kitabı*, 14-16 Mayıs, 330-351.
- Huang, Q., Zhu, X., Xiong, G., Zhang, Deng, J., Zhao, M., & Zhao, L. (2021). Will the magnesium sulfate attack of cement mortars always be inhibited by incorporating nanosilica?. *Construction and Building Materials*, 305, 124695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124695>.
- Ilıca, T. (2008). *Farklı çimentolarla üretilen betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimliliği* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Jeon, D., Jun, Y., Jeong, Y., & Oh, J.E. (2015). Microstructural and strength improvements through the use of Na₂CO₃ in a cementless Ca(OH)₂-activated class F fly ash system. *Cement and Concrete Research*, 67, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.001>.
- Jin, F., & Al-Tabbaa, A. (2015). Strength and drying shrinkage of slag paste activated by sodium carbonate and reactive MgO. *Construction and Building Materials*, 81, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.082>.
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review. *Journal of the Material Science*, 42, 729-746. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>
- Ke, X., Bernal, S.A., & Provis, J.L. (2016). Controlling the reaction kinetics of sodium carbonate-activated slag cements using calcined layered double hydroxides. *Cement and Concrete Research*, 81, 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.012>.
- Kibici, Y., Dinç, D., & Uçar, A. (2012). Afyonkarahisar yöresi volkanik kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Aralık, Sayı 29, 53-59.
- Koç, H. (2021). *Silis dumanı katkılı uçucu kül ile üretilen alkali aktive edilmiş harçların farklı sülfatlar altındaki fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Kwasny, J., Aiken, T.A., Soutsos, M.N., McIntosh, J.A., & Cleland, D.J. (2018). Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 166, 537-553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.129>.
- Orhan, T.Y. (2022). *Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların donma çözülme ve sülfat direncine ince lastik atışının etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Özcan, A. (2018). Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması [Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Raj, R.S., Arulraj, G.P., Anand, N., Kanagaraj, B., Lubloy, E., & Naser, M.Z. (2023). Nanomaterials in geopolymer composites: A review. *Developments in the Built Environment*, 13, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100114>.
- Ren, D., Yan, C., Duan, P., Zhang, Z., Li, L., & Yan, Z. (2017). Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 134, 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.103>.
- Santhanam, M., Cohen, M.D.V., & Olek, J. (2001). Sulfate Attack Research-Whither Now?. *Cement and Concrete Research*, 31(6), 845-851. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00510-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00510-5).
- Sert, M. (2010). *Isparta ve Nevşehir yöresi volkanik kökenli taşların fiziko mekanik özelliklerinin belirlenerek kullanım alanlarının irdelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010). Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of engineering science and technology review*, 3(1), 36-40. <https://doi.org/10.25103/JESTR.031.07>.
- TS EN 196-1. (2009). *Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini*. TSE, Ankara.

- Van Aardt, J.H.P., & Visser S. (1975). Thaumasite formation: a cause of deterioration of portland cement and related substances, in the presence of sulfates. *Cement and Concrete Research*, 5(3), 225-232. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(75\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(75)90004-6).
- Walling, S.A.; Bernal, S.A.; Gardner, L.J., Kinoshita, H., & Provis, J.L. (2018). Blast furnace slag-Mg(OH)₂ cements activated by sodium carbonate. *RSC Advances*, 8, 23101-23118. <https://doi.org/10.1039/c8ra03717e>.
- Wang, Y.S, Tae, S.H., Lin, R.S., & Wang, X.Y. (2022). Effects of Na₂CO₃ on engineering properties of cement-limestone powder-slag ternary blends. *Journal of Building Engineering*, 57, 104937. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104937>.
- Yang, T., Zuhua, Z., Zhu, H., Zhang, W., Gao, Y., Zhang, X., & Wu, Q. (2019). Effects of calcined dolomite addition on reaction kinetics of one-part sodium carbonate-activated slag cements. *Construction and Building Materials*, 211, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.245>.
- Yazıcı, N. (2022), Yüksek sıcaklıktan sonra asit, sülfat ve tuz etkisine maruz kalan geopolimer betonların özelliklerinin araştırılması [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].