

# Sodyum Hidroksit ile Aktive Edilmiş Farklı Volkanik Orijinli Kayaç Esaslı Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri

## Mechanical Properties of Different Volcanic Origin Rock Based Geopolymer Mortars Activated with Sodium Hydroxide

Hadaan Pehlivan 

Dr. Öğr. Üyesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
Kilis, Türkiye

\* Corresponding author: [hadaantaban@kilis.edu.tr](mailto:hadaantaban@kilis.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 03.03.2023  
Kabul Tarihi / Accepted: 24.03.2023

Araştırma Makalesi/Research Article  
DOI: 10.5281/zenodo.7771748

### ÖZET

Çimento sektöründe sürdürülebilir çimento üretimini sağlamak için farklı puzolanlar kullanılmaktadır. Killeşen veya zeolitleşen yapıda olabilen önemli bir doğal puzolan kaynağı olan piroklastik kayalar, volkanik olaylar sırasında patlamalı volkandan çıkan her çeşit kırıntılı malzemenin bir depolanma alanında birikmesiyle oluşurlar. Volkan külü ve volkan tozunun pekişmesi ile oluşan kayalara "volkanik tüf" adı verilmektedir. Bazı bileşimdeki volkan camlarından oluşan kayalara "volkan cürufu" denilmektedir. Piroklastik kayaların en önemli özelliği kolayca bozularak zeolit minerallerine dönüşebilmesidir. Özellikle Türkiye'de klinoptilolit minerali içeren zeolit yatakları bu şekilde oluşmuştur. Zeolit mineralleri bakımından zengin hidrolik özelliklere sahip bu piroklastikler doğal puzolan olarak tanınmaktadır. Bu çalışmada "volkanik cüruf" özelliğine sahip Antakya ve "volkanik tüf" özelliğine sahip Manisa Gördes yörelerinden temin edilen sırasıyla "VC" ve "VT" olarak adlandırılan volkanik orijinli kayaların geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Volkanik orijinli kayaların alkali aktivasyonu için %8 sodyum konsantrasyonlarındaki sodyum hidroksit kullanılarak 40x40x160mm boyutlarında geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Volkanik orijinli kayalar ASTM-C618 puzolanik incelik sınırına göre öğütülmüştür. Üretilen geopolimer harç numuneleri 36, 72 ve 96 saat 80°C'lik ısı kürüne tabi tutulmuştur. 80°C kür sıcaklığında 96 saat etüvde ısı kür uygulaması yapılan geopolimer harçlarda en yüksek eğilme dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (7.8 MPa) olduğu ve en yüksek basınç dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (44.3 MPa) olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Volkanik tüf, volkanik cüruf, geopolimer, alkali aktivasyon, sodyum hidroksit

### ABSTRACT

Different pozzolans are used in the cement industry to ensure sustainable cement production. Pyroclastic rocks, which are an important natural source of pozzolana, which can be in argillized or zeolized structure, are formed by the accumulation of all kinds of clastic materials from eruptive volcanoes in a storage area during volcanic events. The rocks formed by the consolidation of volcanic ash and volcanic dust are called "volcanic tuff". Rocks composed of volcanic glass in basic composition are called "volcanic slag". The most important feature of pyroclastic rocks is that they can easily decompose into zeolite minerals. Especially in Turkey, zeolite deposits containing clinoptilolite mineral were formed in this way. These pyroclastics with hydraulic properties rich in zeolite minerals are known as natural pozzolans. In this study, the usability of volcanic origin rocks named "VC" and "VT", respectively, obtained from Antakya with "volcanic slag" feature and Manisa Gördes region with "volcanic tuff" feature, in geopolymer mortar production was investigated. 40x40x160mm geopolymer mortar samples were produced by using sodium hydroxide at 8% sodium concentration for alkali activation of rocks of volcanic origin. The rocks of volcanic origin were ground according to ASTM-C618 pozzolan fineness limit. The produced geopolymer mortar samples were subjected to heat curing at 80°C for 36, 72 and 96 hours. It was observed that the highest flexural strength value was found in VT12.5 sample (7.8 MPa) and the highest

compressive strength value was found in VT12.5 sample (44.3 MPa) in geopolimer mortars that were thermally cured in an oven at 80°C curing temperature for 96 hours.

**Keywords:** Volcanic tuff, volcanic slag, geopolimer, alkali activation, sodium hydroxide

## 1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe en fazla kullanılan yapı malzemesi çimentodur. Bu nedenle çimento üretimine bağlı çevresel sorunlar da son yıllarda hızla artmaktadır. Yüksek üretim kapasitelerine sahip çimento sektörü; sera gazı salınımı, enerjinin yoğun kullanımı ve artan doğal hammadde ihtiyacı gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Çimento esaslı malzemelerin iyileştirilmesi ve söz konusu sorunların azaltılması için katkı maddelerinden. günümüzde ise geopolimer uygulamalardan faydalanılabilmektedir.

Dünya üzerinde toplam CO<sub>2</sub> salınımının %7'sinin sadece Portland çimentosu üretimi esnasında açığa çıkmaktadır ve birkaç yıl içerisinde bu oranın %17 olacağı tahmin edilmektedir. 1 ton klinker üretimi ile doğaya yaklaşık 1 ton karbondioksit gazı salınmaktadır (Nisbet,1996).

Portland çimentosunun sebep olduğu diğer bir sorun ise, çimento hammaddesi olan klinker üretiminin yüksek enerji gerektiren bir süreç olmasıdır. Bu nedenle puzolan kullanımı önemli olmaktadır. Çimento üretiminde birim enerji tüketimi 89 kWs/t ile 130 kWs/t arasında değişmektedir (IEA, 2015). Çimento üretimi aşamalarında harcanan enerji dünyanın toplam enerji tüketiminin %2'sini oluşturmaktadır (Norholm 1995, Villa ve Spada 2005).

Puzolanlar kimyasal, mineralojik ve jeolojik orijini farklı olan çok geniş yelpazeye sahip malzemeleri içerdiğinden sınıflandırılmasında zorluklar ortaya çıkmaktadır. Puzolanların sınıflandırılmasında çok fazla yöntem olsa da en çok tercih edileni Massazza'nın puzolanların kökenlerini esas alan sınıflandırma sistemidir. Massazza'ya göre doğal puzolanlar açısından önemli bir kaynak olan piroklastik kayalar; gevşek yapı (killeşen) ve sıkı yapı (zeolitleşen) kayalar olmak üzere ikiye ayrılır.

Volkanizma alanlarındaki volkanik püskürmeler sonucu oluşan volkanik kaya türleri; piroklastikler, lav akıntıları, otoklastik çökeller, tekrardan işlenmiş ve çökelmiş volkanik tortullar (epiklastikler) olmak üzere dörde ayrılır. Lavlar, magmanın kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişik morfoloji, geometri, hareketlilik, iç yapı ve akma davranışı gösterirler (Helvacı ve Erkül 2001).

Eski çalışmalarda kırıntılı volkanik kaya kökenli piroklastiklerin, sadece patlamalı bir volkanizma sonucu oluştuğu düşünülürken, son çalışmalarda daha farklı kökene sahip olabilecekleri anlaşılmıştır. Örneğin, otoklastik kayalar patlamaya bağlı değil, su dokanağında ani soğumayla parçalanma veya lav akıntısı sırasında breşleşme sonucu oluşmaktadır. Volkanik bölgelerde dikkat çekici durum fazla miktarda epiklastik veya sedimanter orijinli volkanik kayaların bulunmasıdır. Oluşum şekillerine veya kökenlerine bakılmaksızın tüm kırıntılı volkanik kayalar "volkanoklastik kayalar" olarak adlandırılmaktadır. Volkanoklastik kayalar lavlara göre yaygın ve hacim olarak daha fazla oluşları nedeni ile paleo-ortamı çok daha fazla temsil eden özelliklere sahiptir. Volkanik kayaların çeşitliliğinin çok fazla olmasından dolayı, bu kayaların stratigrafik özellikleri ve yapılarındaki değişik kaya türlerinin tanımlanabilmesi için sedimantoloji büyük ölçüde fayda sağlamaktadır (Helvacı ve Erkül 2001).

Volkanik ve sedimanter kayalara benzeyen piroklastik kayaları oluşturan tane bileşenleri boyut olarak; blok (>64 mm), lapilli (2-64 mm) ve kül (<2 mm) olarak adlandırılır (Fisher, 1961a ve Schmid, 1981).

"Tefra" olarak da bilinen piroklastik malzemeler. volkanik patlamalar sırasında soğumuş magma kökenli kaya, mineraller ve volkanik cam parçalarından oluşur (Rose ve Durant, 2009).

Volkan külü ve volkan tozunun pekişmesi ile oluşan kayalara "volkanik tuf" adı verilmektedir. Piroklastik kayaların en önemli özelliği kolayca bozunmaya uğramasıdır. Feldispat ve feldispatoid

mineralleri ve asit-intermedier bileşimli volkan camı parçaları içeren tüfler zeolit minerallerine de dönüşebilir. Özellikle Türkiye'de klinoptilolit minerali içeren zeolit yatakları bu şekilde oluşmuştur. Kabazit, analsim gibi zeolit minerallerine dönüşmüş volkan camı bakımından zengin tüflere Almanya'da "tras" denilmektedir. Zeolit mineralleri bakımından zengin, hidrolik özelliklere sahip bu piroklastikler doğal puzolan olarak tanınmaktadır. Kalsiyum hidroksit ve su ile karıştırıldıklarında duraylı silikat mineralleri olduğu için çimento katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Erkan, 1997).

Volkanik faaliyetler dünya çapında yaygın olduğu için, volkanik kül, volkanik cürufur ve pumice (pomza/bims/süngertaşı) gibi piroklastik malzemeler, Avrupa (İtalya, Yunanistan, Türkiye ve İspanya), Orta Amerika, Çin, Güneydoğu Asya, Doğu ve Orta Afrika (Eritre, Cibuti, Kenya, Etiyopya ve Kamerun), İran ve Suudi Arabistan'ı içine alan bölgelerde bulunur (Alemayehu ve Lennartz, 2009; Wadge, 1984)

Türkiye'de zeolit kaynaklarının büyük bir kısmı volkanik kayaların olduğu bölgelerde toplanmıştır. Volkanik tüfler İç Anadolu Bölgesi başta olmak üzere birçok volkanik aktiviteye maruz kalmış Türkiye'nin birçok yerinde yaygın olarak bulunmaktadır.

Farklı tane boyutuna sahip piroklastik malzeme içerisinde bol miktarda gaz boşluğuna sahip camsı volkan cürufu (scoria) ve pumice (pomza/bims/süngertaşı) parçalarına oldukça fazla rastlanır. Bazik bileşimdeki volkan camlarından oluşan bu kayalara "volkan cürufu" denilmektedir.

Piroklastik kayaların bazı özel türlerine örnek olarak; perlit, pumice (pomza/bims/süngertaşı) ve ignimbirit verilebilir. Magmanın ani bir şekilde soğumasıyla tamamen volkanik camdan oluşan perlit ve pumice gibi kayalara "volkan camı" denir. Perlit asidik karakterli volkanik camdır. Isıl işlem uygulandığında bileşimindeki suyu kaybeder ve büyük hacim artışları yapar. Pumice (pomza/bims/süngertaşı) ise asit-intermedier bileşime sahip çok az miktarda su içeren boşluklu bir volkanik camdır. Asidik karakterli olanlarda gözenek fazla, "bazaltik cüruf (scoria)" da denilen bazaltik pomza ise daha az gözeneklidir. Pumice kolayca bozularak zeolit veya başka killere dönüşebilirler. Piroklastik akıntı çökeli olan ignimbiritler ise riyolitlerin kimyasal bileşimine sahiptir. Bazı durumlarda dasitik, trakitik ve fonolitik bileşimde de olabilir.

Türkiye volkanik cüruf oluşumları bakımından özellikle Ege ve Akdeniz bölgesinin bazı illeri önemli bir yere sahiptir. Bu volkanik cürufurun süngerimsi yapıda ve birbirinden bağımsız gözenekleri ısı ve ses izolasyonunda çözümler sunmaktadır.

Volkanik cürufurun ortalama olarak kimyasal bileşiminde; % 45.66 SiO<sub>2</sub>, % 15.70 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 10.73 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 8.84 CaO, % 11.92 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O, % 5.90 MgO ve %0.04 SO<sub>3</sub> bulunmaktadır. Volkanik cürufur renk olarak kırmızıya çalan, kahverengi ve siyah tonlarında olabilir (Venuat, 1980).

Çimento üretim süreçleri incelendiğinde çevresel sorunlar dikkat çekmektedir. Bu kapsamda alkaliler ile aktive edilmiş bağlayıcıların ele alınması gerekli olmaktadır. Alkali ile aktive edilmiş çimento tarihi 1940'larda Purdon tarafından "Alkali cüruf kombinasyonları" olarak başlamıştır. 1950'li yıllarda. Glukhovsky ve Krivenko kalsiyum sulu silikat (CSH) ve alümina-silikat fazlarından oluşan alkali aktive çimento sistemi geliştirmiştir. "Geopolimer" tanımı 1972'de Davidovits tarafından kısa sürede, düşük sıcaklıkta, doğal süreçlerle oluşmuş, amorf ve yarı kristal üç boyutlu alümina silikat yapılardan oluşan yüksek mukavemetli inorganik alümino silikat jel bağlayıcı olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 1991).

Literatürde ürün ve üretim özellikleri bakımından geopolimer tipi malzemeler için "düşük sıcaklık alümina silikat camlar", "alkali aktive çimentolar", "geoçimentolar", "alkali bağlı seramikler", "inorganik polimerler" ve "hidroseramikler" gibi çeşitli isimlendirmeler de yapılmaktadır (Komnitsas vd., 2007).

Geopolimerler esas olarak alüminosilikat materyallerin yüksek konsantrasyonda sulu alkali ortamda reaksiyona sokulmasıyla hazırlanan inorganik polimerlerdir (Santa v.d., 2013).

Geopolimer üretiminde kullanılabilen alüminosilikat içerikli malzemeler; zeolitik tüfler, kaolinit grubu ve smektit grubu (montmorillonit, bentonit) kil mineralleri, doğal puzzolanlar, perlit, çeşitli endüstriyel atıklar (silis dumanı, uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu, kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü) olabilir.

Geopolimerler, kimyasal bileşim olarak zeolitlere benzeyen farklı olarak amorf mikro yapı gösteren inorganik polimer malzemelerdir. Alümina silikat esaslı geopolimerlerin temel birimi birer adet  $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4$  tetrahedrandan oluşan "sialat (S)" molekülüdür. Oksijen köprüleri vasıtasıyla sialat monomerlerin birleşerek iki veya üç boyutlu büyük moleküler yapılara dönüşmesine sialat geopolimerizasyon süreci denir.(Davidovits, 2008).

Jun ve Oh (2014) çalışmasında 6 farklı uçucu kül, alkali aktivatör olarak derişimi 5M olan sodyum hidroksit ve  $60^\circ\text{C}$ 'de 24 saat kür metodu kullanmıştır. Numuneler 7 ve 28 gün kür sonucu ve basınç dayanımları tayin edilmiştir. 28 günlük numunelere XRD ve SEM/EDS analizleri yapılmıştır. En yüksek basınç dayanımının 28 günlük numunelerde 9.93MPa olduğu görülmüştür. XRD analizlerine göre amorf yapı ile birlikte quartz, mullit ve hematit kristalleri tespit edilmiştir. SEM analizlerine göre ise morfolojik yapının homojen olmadığı, reaksiyona girmemiş uçucu kül ve fark edilir gözeneklerin bulunduğu görülmüştür (Jun ve Oh, 2014).

Kürleme sıcaklığındaki artışın geopolimer mukavemetini iyileştirdiği fark edilmiştir (Mo v.d., 2014; Nagral v.d. 2014). En yüksek basınç dayanımı açısından optimum sıcaklık  $60^\circ\text{C}$  olarak bildirilirken (Ekaputri v.d., 2014), başka bir çalışmada optimum sıcaklık sırasıyla  $80^\circ\text{C}$  ve  $90^\circ\text{C}$  olarak ifade edilmiştir. Ancak uzun kürlenme süresinin geopolimer oluşumunu olumsuz etkilediği de gözlenmiştir (Ekaputri v.d., 2017).

Bu çalışma Türkiye'de volkanik kayaların zengin olduğu bölgelerdeki yöresel malzemelerin geopolimer harç üretiminde kullanım olanaklarının araştırılmasını amaçlamaktadır. Çimento üretiminde hammadde ihtiyacı noktasında puzzolanların verimli kullanımı önemli olmaktadır. Sera gazı salınımı, enerjinin yoğun kullanımı ve artan hammadde ihtiyacı çimento sektöründe ekolojik uygulamaları zorunlu duruma getirmektedir. Bu kapsamda ekolojik kriterlere uygun alternatif yapı malzemesi geopolimerler ve geopolimer üretmek için gerekli doğal kaynak olanakları kapsamlı bir şekilde araştırılmalıdır. Literatür incelendiğinde az sayıda çalışma olan alkali aktive özelliği düşük "volkanik cüruf" özelliğine sahip Antakya ve "volkanik tuf" özelliğine sahip Manisa Gördes yörelerinden temin edilen sırasıyla "VC" ve "VT" olarak adlandırılan kayaların geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliği kür sıcaklığı derecesi ve süresi açısından araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### *Materyal*

Bu çalışmada iki farklı volkanik orijinli kayaç, CEM I 42.5R çimentosu, CEN standart kumu, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve su kullanılmıştır.

### *Volkanik orijinli kayaçlar*

Bu çalışmada "volkanik cüruf" özelliğine sahip Antakya ve "volkanik tuf" özelliğine sahip Manisa Gördes yörelerinden temin edilen kayaçlar sırasıyla "VC" ve "VT" olarak adlandırılmıştır. Volkanik kayaç parçaları önce etüvde  $105\pm 5^\circ\text{C}$  de 24 saat süreyle kurutulmuş, daha sonra bilyalı değirmende (ASTM C618-19) standardına göre puzzolanik incelik sınırları içerisinde öğütülmüştür.

Çalışmada kullanılan volkanik malzemelerin (VC,VT) kimyasal özelliklerini incelemek için X-Işını Floresans (XRF) analizi uygulanmıştır. Tablo 1'de verilen XRF analiz sonuçları incelendiğinde; VC kızdırma kaybının %0.38 olduğu. VC içerisinde %51.45 oranında  $\text{SiO}_2$ , %15.76 oranında  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %13.39 oranında  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , %8.84 oranında CaO, %4.31 oranında MgO ve %6.25 diğer bileşenlerin ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ , vd. ) olduğu, VT kızdırma kaybının %8.90 olduğu. VT içerisinde %70.39 oranında  $\text{SiO}_2$ , %11.72 oranında

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %1.79 oranında Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %3.15 oranında CaO, %0.89 oranında MgO ve %12.06 diğer bileşenlerin (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub> vd. ) olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 1.** Volkanik malzemelere ait XRF analiz sonuçları

Rapor Adı	VC Miktar (%)	VT Miktar (%)
SiO <sub>2</sub>	51.45	70.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.76	11.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.39	1.79
CaO	8.84	3.15
MgO	4.31	0.89
K <sub>2</sub> O	1.44	2.55
Na <sub>2</sub> O	0.93	0.24
SO <sub>3</sub>	0.03	0.04
Kızdırma Kaybı	0.38	8.90

Volkanik malzemelere ait fiziksel özellikler Tablo 2’de verilmiştir. VC'nin özgül ağırlığının 2.90, özgül yüzey değerinin 3964 cm<sup>2</sup>/g, VT'nin özgül ağırlığının 2.30, özgül yüzey değerinin 3650 cm<sup>2</sup>/g, 45 µ elekten geçen % değerlerine göre öğütülerek volkanik malzeme numunesi hazırlanmıştır.

**Tablo 2.** Volkanik malzemelere ait fiziksel özellikler

Fiziksel Özellik	VC	VT
Yoğunluk( g/cm <sup>3</sup> )	2.90	2.30
Özgül yüzey (Blaine- cm <sup>2</sup> /g)	3964	3650

### Çimento

Bu çalışmada TS EN 197-1 standardına uygun Kahramanmaraş Çimko Çimento ve Beton Fabrikasından sağlanan CEM I 42.5 R tipi Portland Çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Çalışmada kullanılan CEM I 42.5R çimentosuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Kimyasal Özellikler (%)		TS EN 197-1 sınırları	Fiziksel özellikler		TS EN 197-1 sınırları
SiO <sub>2</sub>	20.35		Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3.1	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.98		Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3200	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.06		Hacim genişmesi(mm)	3	En çok 10
CaO	63.35		Priz başlangıcı (dak)	200	En az 60
MgO	1.89	En çok 5.0	Priz sonu (dak)	310	En çok 600
Na <sub>2</sub> O	0.58				
K <sub>2</sub> O	0.88				
SO <sub>3</sub>	2.89	En çok 3.5			

### Sodyum hidroksit (NaOH)

Alkali aktivatör olarak Tablo 4’de kimyasal özellikleri verilen sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır.

**Tablo 4.** Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri

Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül formülü	NaOH
Molekül ağırlığı (g/mol)	39.99
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.13
Safılık	99 %
Erime Noktası (°C)	318
Kaynama Noktası (°C)	1388

### CEN Standart Kumu

Agrega bileşeni olarak TS EN 196-1’e göre CEN standart kumu kullanılmıştır.

### Yöntem

#### Karışım oranları

Bu çalışmada geopolimer harç numuneleri üretiminde volkanik orijinli malzemeler (VC, VT) %0, %12.5, %25, %50 ve %100 oranlarında CEM I 42.5 R çimentosunun yerine kullanılmıştır. Geopolimer harç karışımları; 450 g bağlayıcı, 1350 g kum ve aktive edilecek volkanik malzemenin ağırlıkça miktarına göre %8 Na konsantrasyonundaki NaOH kullanılarak (TS EN 196-1, 2016) standardına göre üretilmiştir. NaOH çözeltileri hazırlanması sırasında ekzotermik bir reaksiyon ortaya çıktığı için geopolimer harç üretimlerinden 24 saat önce hazırlanmış ve oda sıcaklığında bekletilmiştir. NaOH kullanılarak aktive edilen harçlar **Tablo 5.’e** göre karışım oranlarında üretilmiştir.

**Tablo 5.** Geopolimer harçların karışım oranları

Numune Adı	Volkanik Malzeme (g)	Çimento (g)	NaOH Miktarı (g)	Su (g)	s/b	Kum (g)
VC12.5	56.25	393.75	7.83	225	0.50	1350
VC25	112.50	337.50	15.65	235	0.52	1350
VC50	225.00	225.00	31.30	240	0.53	1350
VC100	450.00	0.00	62.61	253	0.56	1350
VT12.5	56.25	393.75	7.83	225	0.50	1350
VT25	112.50	337.50	15.65	235	0.52	1350
VT50	225.00	225.00	31.30	240	0.53	1350
VT100	450.00	0.00	62.61	253	0.56	1350

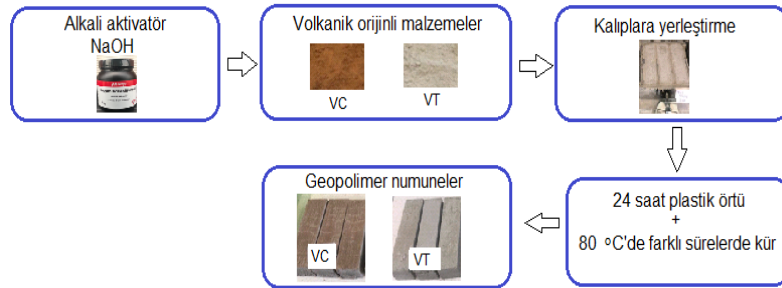
### Numunelerin hazırlanması

Geopolimer harç karışımları (ASTM C187-16) referans alınarak sabit su/bağlayıcı oranında değil, sarsma tablasında **Şekil 1.’de** görüldüğü gibi yayılma çapı 110±5 olacak şekilde (ASTM C1437-20) ’ye göre üretilmiştir.



**Şekil 1.** Geopolimer taze harç kıvamının belirlenmesinde kullanılan yayılma tablası

Geopolimer harçların hazırlanmasında iki farklı volkanik orijinli malzeme sırasıyla VC ve VT bağlayıcıları, NaOH alkali çözeltisi karıştırılmış daha sonra agrega olarak standart kum ilave edilmiştir. Sonrasında geopolimer harç karışımları Şekil 2’de verilen işlem basamaklarına göre 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilerek üretilmiştir.



**Şekil 2.** Geopolimer numunelerin üretim işlem basamakları

Geopolimer malzemenin oda sıcaklığında yeterli mukavemete ulaşması için uzun sürelerde kürlenmesi gerektiğinden geopolimerizasyon için tercih edilen bir sıcaklık değildir. 50°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda külendiğinde ise geopolimerizasyon süreci hızlanır ve sıcaklık arttıkça kür süresinde azalmalar meydana gelmektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda uzun süre kürlenme işlemi de nem kaybı dolayısıyla kırık ve çatlaklara neden olabilir. Dolayısıyla mukavemette tekrar bir düşüş meydana gelebilmektedir (Khale ve Chaudhary, 2007). Yapılan araştırmalarda en uygun kür sıcaklığının ortalama 40°C-70°C’de olduğu bildirilmiştir (Al Bakri vd., 2011).

Geopolimerlerin mekanik özellikleri araştırılırken kür sıcaklığı ve kür zamanı ilişkisinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yüksek sıcaklıklarda uzun kür süreleri sonucunda geopolimerin kristal yapısında her hangi bir sorun olmazken, geopolimerin granül yapısı kırılır, geopolimer jelde aşırı su kaybı ve büzülme oluşur (Khale ve Chaudhary, 2007).

Geopolimer sentezi için numuneler 24 saat kalıplarda plastik örtü ile bekletilmiştir. Sonrasında önceki çalışmaların ışığında 80°C kür sıcaklığı seçilerek ve 36, 72, 96 saat Şekil 3’de görüldüğü gibi kalıplarla birlikte etüvde ısıl kür uygulanmıştır.



Şekil 3. Geopolimer numunelere 80°C'de farklı sürelerde kür uygulaması

Kür süresini tamamlayan numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiş Şekil 4'de görüldüğü gibi eğilme dayanım deneyi yükleme kapasitesi 50 kN ve basınç dayanım deneyi yükleme kapasitesi 200 kN olan test presi kullanılarak yapılmıştır (TS EN 196-1).



Şekil 4. Geopolimer numunelerin mekanik testleri

### 3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

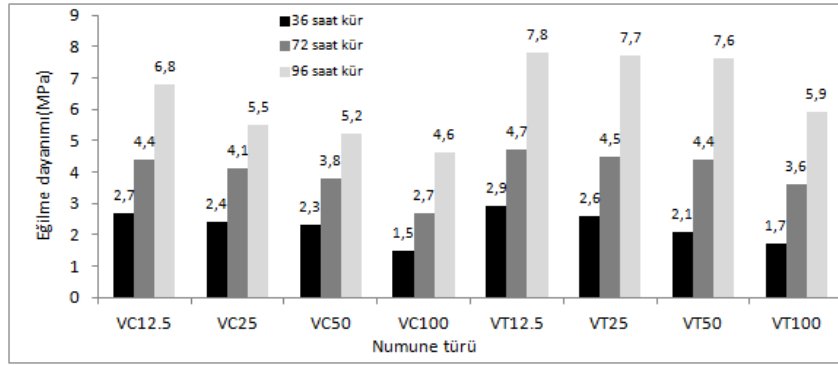
Çalışmada, VC ve VT bağlayıcıları NaOH ile alkali aktive ederek hazırlanan 40x40x160 mm geopolimer harç numunelere belirlenen koşullarda etüvde kür uygulaması sonrasında eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Geopolimer numunelerin mekanik özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Farklı sürelerde ıslıl kür edilmiş geopolimer harçların mekanik özellikleri

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )			Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )		
	36 saat kür	72 saat kür	96 saat kür	36 saat kür	72 saat kür	96 saat kür
VC12.5	2.7	4.4	6.8	14.9	28.6	35.3
VC25	2.4	4.1	5.5	12.8	25.2	32.9
VC50	2.3	3.8	5.2	10.3	20.7	29.1
VC100	1.5	2.7	4.6	8.5	15.3	22.4
VT12.5	2.9	4.7	7.8	17.8	30.2	44.3
VT25	2.6	4.5	7.7	15.9	28.1	42.1
VT50	2.1	4.4	7.6	13.3	22.6	40.5
VT100	1.7	3.6	5.9	11.4	17.8	34.3



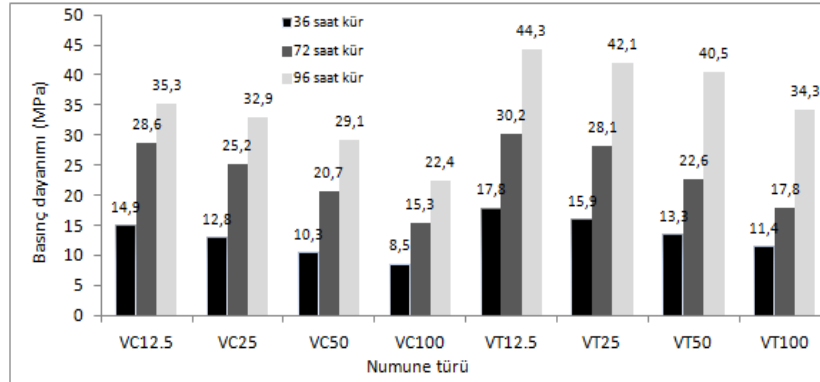
Geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanım grafikleri Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanım sonuçları (MPa)

Şekil 4’de verilen geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanım grafikleri incelendiğinde; 36 saatlik etüv kürü sonrasında en yüksek eğilme dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (2.9 MPa) olduğu, en düşük eğilme dayanımı değerinin ise VC100 numunesinde (1.5MPa) olduğu belirlenmiştir. 72 saatlik etüv kürü sonrasında en yüksek eğilme dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (4.7 MPa) olduğu, en düşük eğilme dayanımı değerinin ise VC100 numunesinde (2.7 MPa) olduğu belirlenmiştir. 96 saatlik etüv kürü sonrasında en yüksek eğilme dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (7.8 MPa) olduğu, en düşük eğilme dayanımı değerinin ise VC100 numunesinde (4.6 MPa) olduğu belirlenmiştir.

Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım grafikleri Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım sonuçları (MPa)

Şekil 5’de verilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım grafikleri incelendiğinde; 36 saatlik etüv kürü sonrasında en yüksek basınç dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (17.8 MPa) olduğu, en düşük basınç dayanımı değerinin ise VC100 numunesinde (8.5 MPa) olduğu belirlenmiştir. 72 saatlik etüv kürü sonrasında en yüksek basınç dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (30.2 MPa) olduğu, en düşük basınç dayanımı değerinin ise VC100 numunesinde (15.3 MPa) olduğu belirlenmiştir. 96 saatlik etüv kürü sonrasında en yüksek basınç dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (44.3 MPa) olduğu, en düşük basınç dayanımı değerinin ise VC100 numunesinde (22.4 MPa) olduğu belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Geopolimer harç ve beton konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde; genellikle uçucu kül ve silis dumanı (Ergeshov, 2021), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (Karadağ, 2021), uçucu kül (Görhan vd., 2016), yüksek fırın cürufu gibi (Altan ve Erdoğan, 2012) alkali ile aktive edilen endüstriyel atıklar olduğu görülmüştür. Bu kapsamda daha kısıtlı çalışmanın olduğu volkanik tüf ve volkanik cürufun geopolimer mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve literatürle kıyaslanmıştır.

Çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırma amacı ile yapılan çalışmada iki farklı volkanik tüf örneği ve Kula cürufu %10, %20, %30 ve %40 oranlarında klinkere ikame edilerek farklı çimentolar üretilmiştir. Volkanik tüf ve cüruf katkılı çimentoların, sadece volkanik tüf katkılı çimentolara göre daha düşük basınç dayanımları görülmesine rağmen genel olarak tüm numunelerde basınç dayanımları referans değerlerinin üzerinde çıkmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre Kula cürufunun volkanik tüflerle birlikte çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Okucu, 2000).

Bu çalışmada, volkanik tüf (VT) ve volkanik cüruf (VC) ayrı ayrı kullanılarak elde edilen geopolimer harçların 36, 72, 96 saat süre ile kür sonrasında eğilme ve basınç dayanımlarına incelendiğinde; tüm VT numunelerin, VC numunelere göre daha yüksek dayanım değerleri görülmüştür. Özellikle alkali aktive özelliği düşük olan volkanik tüf (VT) ve volkanik cüruf (VC) gibi malzemelerden geopolimer sentezi için oda sıcaklığında kür yerine geopolimerde deformasyona neden olmayacak şekilde 80°C ve 96 saat uygun sonuç vermiştir.

Belirli sıcaklık ve sürede kalsine edilmiş amorf tras ve zeolit kullanılarak yapılan çalışmada; 28 günlük su kürü yapılan çimento harç numunelerinde eğilme dayanımı 5.7 MPa olarak bulunurken, 90°C sıcaklıkta 3 günlük kür yapılan geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı 7.2 MPa olarak bulunmuştur. Harçların basınç dayanım sonuçları 41MPa civarında birbirine benzer olmalarına rağmen, eğilme dayanım sonuçlarının farklı olduğu görülmüştür. Geopolimer harçların eğilme basınç dayanımı oranı %18 olarak belirlenirken, çimento harçlarının eğilme basınç dayanımı oranı %14 olarak belirlenmiştir. Ayrıca tras katkılı geopolimer harçların konvansiyonel çimento harçlarına göre daha yüksek eğilme dayanımı göstermesinin başka bir nedeni de gözenekli tras yapısının ara yüzeyleri daha güçlü duruma getirmiş olabileceğine işaret edilmiştir (Başçık, 2019).

Bu çalışmada, 80°C kür sıcaklığında 96 saat etüvde ısı kür uygulaması yapılan geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanım değerlerinin, 28 günlük normal kür uygulaması yapılan çimento harçlarının dayanım değerlerine yakın olduğu görülmüştür. Tüm geopolimer harçlarda en yüksek eğilme dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (7.8 MPa) olduğu ve en yüksek basınç dayanımı değerinin VT12.5 numunesinde (44.3 MPa) olduğu görülmüştür.

#### KAYNAKLAR

Altan, E., Erdoğan, S.T., (2012), Alkali activation of a slag at ambient andbelevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 34(2):131-139pp.

Al Bakri, M., Kamarudin, H., BinHussain M., Nizar, I., Zarina, Y. and Rafiza, A.R., (2011), The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers. *Physics Procedia*, 22, 286-291.

Alemayehu, E., Lennartz, B., (2009), Virgin volcanic rocks: kinetics and equilibrium studies for the adsorption of cadmium from water. *J. Hazard. Mater.* 169 (1-3) 395-401, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.109>.

ASTM C1437-20, (2020), Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. ASTM International, West Conshohocken, PA.

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 C187-16, (2016), Standard test method for amount of water required for normal consistency of hydraulic cement paste. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Başçık, H.İ., (2019), Kalsine edilmiş doğal puzolan esaslı geopolimer harç geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD.
- Davidovits, J., (2008), Geopolymer chemistry and applications. Geopolymer Institute, ISBN: 2-951-48201-9, p 585, 255-275.
- Davidovits, J., (1991), Geopolymers: inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis, 37, 1633-1656.
- Ergeshov, Z., (2021), Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarda silis dumanı ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD.
- Ekaputri, J. J., Junaedi, S., Wijaya, (2017), Effect of curing temperature and fiber on metakaolin-based geopolymer. Procedia Eng. 171 572 -583 .
- Fisher, R. V., (1961), Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. Geol. Soc. Amer. Bull. 72, 1409-1414.
- Helvacı, C., ve Erkül, F., (2001), Volkaniklastik Kayaçlar: oluşumu, genel özellikleri ve sınıflaması. DEÜ, Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, 93 sayfa, İzmir.
- IEA, (2015), Energy Technology Perspectives-Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action.
- Jun Y., Oh E.J. (2014), Mechanical and microstructural dissimilarities in alkali activation for six Class F Korean fly ashes. Construction and Building Materials, 52, 396-403.
- Karadağ, S., (2021), Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruf bazlı geopolimer betonların %5 sülfürik asit ortamında mekanik özelliklerinin ve kimyasal durabilitesinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD.
- Khale, D., Chaudhary, R., (2007), Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review. Journal of the Material Science, 42, 729-746.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D. and Perdikatsis, V., (2007), Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags. Journal of the Material Science, 42, 3073-3082.
- Mo, B., Zhu, H., Cui, X., He, Y., Gong, S., (2014), Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin - based geopolymers. Appl. Clay Sci. 99 144-148 .
- Nagral, M. R., Ostwal, T., Chitawadag, M., (2014), Effect of curing temperature and curing hours on the properties of geopolymer concrete. Int. J. Comput. Eng. Res. 4 ( 9 ) 1-11.
- Nisbet, M. A., (1996), Information the reduction of resource input and emissions achieved by addition of limestone to portland cement. Portl. Cem. Assoc., c. 9781, sayı 847, ss. 0-10.
- Norholm, A., (1995), Notes on energy conservation. FL Smidth and Co. Seminar, Istanbul, Turkey.
- Okucu, A., (2000), Volkanik tüflerle birlikte cürufun çimento katkı maddesi olarak kullanılabilirliği. Balıkesir Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Balıkesir, 73-80 s.
- Rose, W.I., Durant, A.J., (2009), Fine ash content of explosive eruptions. J. Volcanol. Geotherm. Res. 186 (1-2) 32-39, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.010>.
- Santa, R.A.A.B., Bernardin, A.M., Riella, H.G., Kuhnen, N.C., (2013), Geopolymer synthesized from bottom coal ash and calcined paper sludge. J. Clean Prod. 57 302-307, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.017>.

Schmid, R., (1981), Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the IUGS Subcommision on the Systematics of Igneous rocks. *Geology*, 9, 41-3.

TS EN 196-1, (2009), Çimento Deneý Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini. TSE, Ankara.

Villa, M. S. E., Spada, F., (2005), İtalcementi Group Crushing and Grinding Course.

Venuat, M., (1980), Lightweight Agregates-an Uptading Survey of Materials. Production Technology, Innovations and Inventions, Lightweight Concrete, The Concrete Society, The Construction Pres, Lancaster London Newyork.

Wadge, G., (1984), Comparison of volcanic production rates and subduction rates in the Lesser Antilles and Central America. *Geology* 12 (9) 555–558, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1984\)122.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1984)122.0.CO;2).