



## GEOPOLİMER HARÇLARDA ZEOLİT KATKISININ ETKİSİ

Mehmet Cemal ACAR<sup>1</sup>, Ahmet ŞENER<sup>2</sup>, Ahmet ÖZBAYRAK<sup>3</sup>, Ali İhsan ÇELİK<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Kayseri Üniversitesi, Kayseri Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Kayseri, Türkiye

<sup>3</sup>Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Geopolimer Harç,  
Zeolit Katkısı,  
Alüminosilikat,  
Alkali Aktivatör,  
Eğilme Dayanımı,  
Basınç Dayanımı.*

### Öz

Çimento üretiminde bacalardan atmosfere salınan CO<sub>2</sub> gazı, küresel ısınmaya neden olmakta ve çevreyi tehdit etmektedir. Bu nedenle bilim insanları, karbon emisyonunu en aza indirmek ve inşaat endüstrisindeki Portland çimentosuna olan ihtiyacı azaltmak için uçucu kül bazlı polimerler üzerinde çalışmaktadırlar. Günümüzde, çimentolu harçların yerine, geopolimer harçların kısmi alternatif bir malzeme olarak kullanımı araştırılmaktadır. Bu çalışmada, 40x40x160 mm'lik prizma kalıplara dökülen alkali ve ısı (90°C) ile aktifleştirilmiş uçucu kül bazlı geopolimer harçlarda zeolit katkısının mekanik özelliklere olan etkisi araştırılmıştır. Öncelikle "İsken Su gözü Enerji Santrali"nden alınan F tipi uçucu kül, aktivatör olarak NaOH (%98 saflıkta) ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (%50 saflıkta) ile Rilem-Cembureau Standart kumu çeşitli oranlarda karıştırılarak dayanımı en yüksek olan zeolitsiz geopolimer karışım oranları tespit edilmiştir. Ardından en yüksek dayanıma sahip geopolimer harç içindeki uçucu külün ağırlıkça çeşitli oranlarında zeolit katkısı yapılmıştır. Farklı miktarlardaki zeolit katkısı ile eğilme ve basınç dayanımlarını arttırabilmek için karışımdaki alkali aktivatör ve alümina silikat miktarları da değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Araştırma sonunda tüm numunelerin bir günlük eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiş ve geopolimer harç içine katkı olarak zeolit ilave edilmesi dayanımı arttırıcı mukavemet parametrelerini vermese de zeolitlerin, ağır metal iyonlarını yok etme özelliklerinden dolayı çimentoya göre daha düşük çevresel zararlı etki barındıran yeşil yapı harçları olarak kullanılabilirliği bulunmuştur.

## THE EFFECT OF ZEOLITE ADDITIVE ON GEOPOLYMER MORTARS

### Keywords

*Geopolymer Mortar,  
Zeolite Contribution,  
Aluminosilicate,  
Alkaline Activator,  
Flexural Strength,  
Compressive Strength.*

### Abstract

The CO<sub>2</sub> gas released from the chimneys to the atmosphere during cement production causes global warming and threatens the environment. Therefore, scientists work on fly ash-based polymers to minimize carbon emissions and reduce the need for Portland cement in the construction industry. Today, the use of geopolymer mortars as a partial alternative material to replace cementitious mortars is being investigated. In this study, the effect of zeolite admixture on the mechanical properties of fly ash based geopolymer mortars which are poured into 40x40x160 mm prism molds activated with alkali and heat (90°C) was investigated. Firstly, F type fly ash from "Isken Sugözü Power Plant", NaOH (98% purity) and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (50% purity) and Rilem-Cembureau Standard Sand were mixed in various proportions and zeolite-free geopolymer mixture ratios with the highest strength were determined. Then, the zeolite additive was applied in various proportions of the fly ash in the geopolymer mortar with the highest strength. In order to increase flexural and compressive strengths with different amounts of zeolite additives, experiments were made by changing the amount of alkali activator and alumina silicate in the mixture. At the end of the research, one-day bending and compressive strengths of all samples were determined, and although adding zeolite as an additive into geopolymer mortar does not give strength-increasing strength parameters, it was found that zeolites can be used as green building mortars with lower

\* İlgili yazar / Corresponding author: acelik@kayseri.edu.tr, +90 533 221 7635

environmental harmful effects than cement due to their heavy metal ions removal properties.

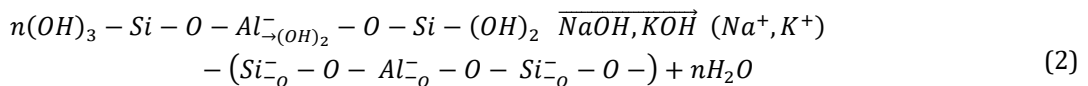
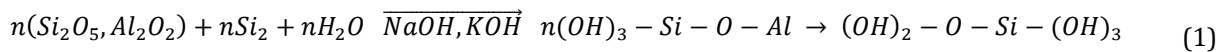
#### Alıntı / Cite

Acar, M. C., Şener, A., Özbayrak, A., Çelik A.İ., (2020). Geopolimer Harçlarda Zeolit Katkısının Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(3), 820-832.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. C. Acar, 0000-0002_3241-5353	Başvuru Tarihi / Submission Date	13.07.2020
A. Şener, 0000-0001-7562-7631	Revizyon Tarihi / Revision Date	12.08.2020
A. Özbayrak, 0000-0002-8091-4990	Kabul Tarihi / Accepted Date	24.08.2020
A. İ. Çelik, 0000-0001-7233-7647	Yayın Tarihi / Published Date	24.09.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Beton, dünya çapında inşaat sektöründe kullanılan ve önem arz eden bir malzemedir (Shaikh, 2016). Düşük fiyatı, hammaddelerinin kolay temini, dayanımı, istenilen şeklin verilebilmesi gibi nedenlerle günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir (Shaikh, 2016; Basha ve Reddy 2016). Aralıksız artan çimento üretiminin sebep olduğu CO<sub>2</sub>'in atmosfere salınması; çevre üzerinde olumsuz bir etkisi olan küresel ısınma sorununu daha da ağırlaştırmaktadır. Kireçtaşı kalsinasyonu ve fosil yakıtın yanması nedeniyle çimento üretimi sırasında açığa çıkan karbondioksit miktarı üretilen her ton çimento için bir ton civarındadır. Dünya çapında beton tüketiminin yılda yaklaşık 11,5 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir ve 2050 yılında yılda 18 milyar ton beton talebi beklenmektedir. Portland çimentosunun üretimi, sera etkisine önemli bir katkı sağlayan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salgılar. Bununla birlikte, geleneksel beton asitlere ve tuzlara karşı düşük kimyasal direnç, özellikle 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda düşük termal ve yangın direnci gibi bazı dezavantajlara sahiptir (Nikolov ve vd., 2017). Bu nedenle, Portland çimentosuna alternatif bir malzemenin bulunması an meselesidir (Palomo ve vd. 1999). Portland çimentosu üretiminin ve atık malzemenin artmasının neden olduğu çevre kirliliğini (karbondioksit) azaltmanın yollarından biri de alternatif bağlayıcılara yönelmektir. Bu nedenle, daha sürdürülebilir bir yaklaşım ve geleneksel betonun yerini almak için kullanılan mevcut katkıların dikkatli bir şekilde gözden geçirilmesi son derece zorunlu hale gelmiştir. Bu amaçla, konvansiyonel betona kıyasla benzer veya daha iyi dayanıklılık ve yüksek mukavemet gösteren geopolimer beton üzerinde birçok çalışma çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Geopolimer beton aslında uçucu kül gibi endüstriyel katı atıkların yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi ile üretilmektedir. Termik santrallerden elde edilen ve kömürün yan ürünü olan uçucu kül, dünya çapında bolca miktarda bulunmaktadır. Ayriyeten, uçucu kül beton üretiminde katkı malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Geopolimer beton, sıradan betona göre birçok avantajı olan nispeten yeni, yenilikçi ve sürdürülebilir bir mühendislik malzemesidir. Örnek olarak, daha yüksek erken dayanım kazanması, daha düşük doğal kaynak tüketimi, düşük maliyet ve çeşitli yapısal şekiller oluşturma yeteneği olarak sıralanabilir. Geopolimer beton, beton bina onarımlarında, karayolu ulaşım altyapısının bakımında ve olumsuz çevresel etkilerin azaltılması için kullanılacak önemli bir malzemedir. Geopolimerlerin üretimi için gerekli olan ana hammadde (öncü) alümino-silikat malzemedir. Bu öncüler kaolin, zeolit, volkanik kül veya doğal puzolanlar gibi doğal kaynaklı olabilirler, fakat aynı zamanda metakaolin, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, kalsine edilmiş maddeler veya diğer endüstriyel kalıntılar gibi termal olarak işlenmiş malzemeler de olabilirler. Uçucu kül içerisinde bulunan kurşun, nikel, baryum, vanadyum, kobalt ve molibden benzeri ağır metallerin zararları çimento sektöründe kullanılarak zararları ihmal edilebilir. Bu ihmal kabiliyeti, çimentonun su ile reaksiyonu sonucu ortaya çıkan hidrasyon ürünlerindeki ağır metalleri bağlama özelliğinden kaynaklanmaktadır (Kaplan ve vd. 2020). Alümino-silikat malzeme, genel olarak alkalın çözeltisi olarak adlandırılan ikinci bir hammadde tarafından aktive edilmelidir. Yaygın kullanılan aktivatörler sodyum ve potasyum hidroksit, sodyum ve potasyum silikat çözeltileri ve sodyum karbonattır. Geopolimerizasyon, alümina ve silikaların karıştırılır karıştırılmaz hammaddelerden çözülmesi ile başlar. Geopolimerizasyon, yüksek düzeyde alkalın koşullarda katı alüminosilikat oksitler ve alkali metal silikat çözeltileri arasında ve Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarından oluşan üç boyutlu amorf yarı kristal polimerik ve halka yapılara üç boyutlu şekil vermeyen heterojen bir kimyasal reaksiyon içerir (Robina ve Khadwal, 2015).



Polikondensasyon maddesinin alkali ile poli (sialatesilokso) oluşturması, (1) ve (2) denklemlerinde aıklanđı gibi gösterilebilir. (2) denklemindeki son terim, suyun geopolimerlerin oluşumunda meydana gelen kimyasal reaksiyon sırasında salındığını gösterir. Bu su, krleme işlemi sırasında karışımdan atılır ve matristeki süreksiz nano gözenekleri geride bırakarak geopolimerlerin meydana gelmesine katkı sağlar (Aleem, 2012). Bir geopolimer karışımındaki su, meydana gelen kimyasal reaksiyonda hiçbir rol oynamaz; sadece manipülasyon sırasında karışıma işlenebilirliği sağlar. Bu, hidrasyon işlemi sırasında bir Portland imentosu betonu karışımındaki suyun kimyasal reaksiyonuna benzemektedir (Rangan, 2008). Geopolimerler, 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda sertleşen gcl ve dayanıklı çimentolu malzemeler grubunda bulunur (Robina ve Khadwal, 2015). Zeolitin atık malzemesi hazır yer döşeme taşlarında kullanım için çok uygun bir malzemedir. Hafif asfalt beton karışımları üretmek için pomza ve zeolit atıklarının agrega malzemeleri olarak kullanılması, genel olarak, pomza ve zeolit agrega karışımlarına kıyasla kireçtaşı agrega karışımlarında daha düşük stabilite sağlamaktadır. Bu atık maddeler çok düşük ağırlıklara sahip olduklarından, kaldırım ve park alanları ile yollarda ağır olmayan araç trafiğinde aşınma tabakası olarak kullanılabilirler. Zeolitin hafif agregalarla birlikte kullanılması, önemli çevresel etkiler meydana getirmiştir (Terzi ve Bykdoğa, 2018; Yılmaz ve vd. 2018). Bu çalışmada, literatürdeki referanslarda dikkate alınarak, geopolimer harçlarda zeolit katkısının dayanım üzerine olan etkilerini belirleyebilmek için 21 deney, 7 farklı parametre ile 160x40x40 mm prizma Őeklindeki kalıplara dökülmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç, Portland çimentosuna alternatif daha çevreci ve daha yeşil bir imento üretimi için alternatifler sunmaktır. Dünyadaki evre ve sağlık ilgli gelişmeler bu tür çalışmaların önemini ve gerekliliğini artırmaktadır.

### 1.1. Zeolitler (Zeolites)

Zeolit atomik düzeyde gözenekli yapıya sahip doğal ya da yapay olmak üzere sulu alümina silikat bileşiklerine verilen isimdir. Kelime anlamı kaynayan taş olan Zeolit'i ilk defa 1756 yılında İşveli mineralog Fredrick Cronstedt keşfetmiştir. Isıtıldığında, su buharlaşır ve zeolitin hızlı su kaybına bağlı mineral buharının serbest kalmasıyla kaynayan taş görünümü ortaya çıkar, bundan dolayı kaynayan taş denmiştir. Genel manada silikat olarak tanımlanan zeolit, alkali ve toprak alkali katyonları içeren sulu bir alüminadır. Zeolitler, moleküllerin çevresel dezenfektasyon ve kimyasal reaksiyonları kolaylaştırmak için adsorbe edilebildiği, mikro-gözenekleri katyon ve su ile dolu olan bir petek yapısını taşıyan kristal katılardır (Zeolyst, 2020). 1750'den bu yana mineral türü olarak bilinmekle beraber kristal yapıları, x-ışınları etkisindeki kırınımı, I.R. emilimi, nükleer manyetik rezonans (NMR) ve elektron spin rezonans (ESR) gibi yöntemlerin geliştirilmesi ile ancak 1930'larda analiz edilebilmiştir. İskelet yapısındaki Si/Al oranları ile katyon cinsi muhtevası ve miktarındaki bazı farklılıklara rağmen; (M+, M+2) O.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.9SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O genel formülü ile gösterilebilir (Gülen, 2012). Zeolitik kayalar, Kazakistan topraklarında yaygın olarak bulunmaktadır. Benzersiz iyon değişimi sayesinde absorbsiyon oluşturmak için ekonomik ve ekolojik olarak düşük maliyetli bir hammaddedir. Doğal zeolit modifikasyon yöntemlerinin geliştirilmesi, sentetik analogları ikame edebilen kimyasal olarak modifiye edilmiş inorganik emicilerin amaca uygun bir Şekilde inşa edilmesi ve iyon değişirme özelliği sayesinde hafif, açık renk, doğal gözenekli yapıyla endüstrinin çok önemli alanlarında kullanılmaktadır (Komisyon, 2001). Doğal zeolitlerin yaygın kullanım alanlarına sahip olması ve büyük pazar potansiyeline rağmen, günümüzde daha yeni yeni kabul görmeye başlamıştır. 1940'lı yıllarda zeolitlerin endüstriyel alanlarda kullanılabilirdiğinin ortaya konulmasına rağmen tali mineral olarak sadece volkanik kayaçların boşluk ve çatlaklarında bulunduğu bilgisi kullanım alanlarını sınırlamıştır. Ancak 1950'li yıllardan sonra deniz ve gllerde bulunan tüflerin de zeolit içerdiği bilgisi zeolitlerin kullanım alanlarını hızla arttırmıştır. Alminosilikatın alkali aktivasyonu olarak da bilinen Geopolimerizasyon, kaolin, yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi yüksek Al ve Si içerikli mineral kaynakları yüksek alkalın ortamlara maruz kaldığında senkronize bir ayrışma davranışı gösteriler (Panagiotopoulou ve vd., 2007). Son zamanlarda betonun sülfat direncini artırmak amaçıyla yapılan çalışmada zeolitin, hem eğilme hem de basınc performansını %10 civarında arttırdığı gözlemlenmiştir (Bingöl, Balaneji (2019). Zeolitik tf ve mermer atıklarıyla üretilen alkali aktifleştirilmiş kompozitin özellikleri üzerine yapılan deneysel çalışmada, geopolimerlerin yüksek basınc dayanımı ve termal iletkenlik sergiledikleri belirlenmiştir (Tekin ve vd.,2020).

### 1.2. Literatür (Literature of Zeolite and Geopolymer)

Alcntara ve ekibi, doğal zeolit (klinoptilolitleri) hidratlamak için kalsiyum hidroksit kullanarak elde edilen materyalin maksimum 38,7 MPa basınc dayanımı gösterdiğini bildirmişlerdir (Ortega ve vd., 2000).

Villa ve arkadaşları tarafından, sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı çoğunlukla klinoptilolit içeren doğal zeolitin aktivasyonu için kullanılmıştır. Bu karışım, hafif yükseltilmiş sıcaklıkta (40°C) bir gün sertleştirilmiş ve oda sıcaklığında bekledikten sonra 28. günde test edilmiştir. 33 MPa kadar olan yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Basınc dayanımı ve sıcaklık arasında gösterilen bağımlılık, iyi basınc dayanımı özelliklerine sahip bir geopolimer elde etmek için hammaddenin termal aktivasyona duydugunu gösterir. Ayrıca, kısa kürlenme süreleri ile yüksek sıcaklıklarda (60 ve 80 C) de basınc dayanımını destekler. Düşük sıcaklıklar (25 ve 40 C), mukavemette önemli bir artış oluşturmak için uzun krleme süreleri gerektirir. (Villa ve vd., 2010). Bondar ve

diğerleri, geopolimerler üretmek için bazı klinoptilolitlerden oluşan Shahindej dacite adlı İran doğal puzolanını kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar, çalışma için kullanılan optimum suda çözünür cam modülünün ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı) 2,1'e eşit olduğunu göstermektedir. Ham maddenin en iyi aktivasyonu, potasyum hidroksit ve sodyum cam suyu karıştırılarak elde edilmiştir (Bondar ve vd., 2010). Nikolov ve diğerleri araştırma yapmak için Bulgaristan'ın Doğu Rodop bölgesindeki Beli Plast yatağındaki doğal zeoliti kullanmışlardır. Kullandıkları doğal zeolit mineral bileşimi %70-75 Klinoptilolit, %10 Cristobalit, %5-10 amorf durum ve %5'in altında sanidin, kalsit ve dolomit içerdiğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında, 20 °C de kürlenmiş sodyum silikat ile aktive edilmiş zeolit karışımından 40x40x40 mm ölçülere sahip küp numunelerde 28 günlük en yüksek basınç dayanımı elde edildiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca sodyum karbonat ile aktive edilen zeolitlerde çiçeklenme tespit etmişlerdir. Doğal zeolit farklı tiplerdeki alkalın aktivatörleri ile karıştırılmasının, niteliksel olarak farklı bir yapıya sahip katı bir madde oluşumuna yol açtığı sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, sentezlenen geopolimer malzemenin fiziksel özellikleri çoğunlukla alümino-silikat malzemenin türüne, numunenin hazırlama yöntemine, sertleştirme koşullarına, partikül büyüklüğü dağılımına ve alkalın aktivatörünün konsantrasyonuna ve tipine bağlı olduğunu bildirmişlerdir (Nikolov ve vd., 2017). Başka bir çalışmada ise Nikolov ve arkadaşları 900 °C ye kadar ısıtılarak kalsinasyon yapılan doğal zeolite, metazeolit adını verdikleri malzemenin potasyum silikat ile aktive edilmesiyle oluşturulan geopolimer malzemenin, h=40 mm ve  $\varnothing=30$  mm silindir numunelerde basınç dayanımının doğal zeolite oranla 3 katına çıktığını belirtmişlerdir (Nikolov ve vd., 2020). Nakshatra geopolimerizasyon sürecini etkileyen parametreleri şöyle sıralamıştır: Alümino-silikat içeren hammadde türü, katı hammaddelerin yüzey alanı, hammadde içindeki camsı faz içeriği, alüminyum ve reaktif silikon miktarı, uçucu küldeki demir, kalsiyum ve inert parçacıkların varlığı, sertleşme sıcaklığı ve basıncı, kürlenme süresi, sertleştirme tipi (geleneksel ısıtma veya mikrodalga ısıtma), alkalilerin türü ve konsantrasyonu, alkali sıvı-hammadde oranı,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  mol oranı, s 560u miktarının geopolimer katı ağırlığına oranı,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  oranı ve  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranıdır (Singh, 2018). Shinde ve ekibi, 80°C sıcaklıkta 24 saat kürlenmiş 70,6 mm boyutlarında olan küp numunelerde 7 günlük basınç dayanımı testleri yapmışlardır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH la aktive edilen uçucu kül ile hazırladıkları geopolimer harcın etüv kürlenmesi öncesi ortam sıcaklığında 4 güne kadar beklemesinin dayanımı artırdığını belirlemişlerdir. 4 günden sonraki süreçte ise dayanımın düştüğünü tespit etmişlerdir (Bhushan ve vd., 2015).

## 2. Malzeme ve Yöntemler (Material and Methods)

Bu bölümde, harç malzemesini oluşturan bileşenler kullanılarak, maksimum dayanımı elde etmek için kullanılan yöntemler alt başlıklarda ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

### 2.1. Malzemeler (Materials)

Deneysel çalışmada maksimum dayanımı elde etmek için harç malzemesini oluşturan bileşenlerden çeşitli karışım oranları denenmiştir. Geopolimer harç üretmek için kullanılan malzemeler, tanecik yoğunluğu  $2240 \text{ kg/m}^3$ ,  $45 \mu\text{m}$ 'dan küçük tanecik boyutu %80-85 civarında ve blaine özgül yüzey alanı  $3185 \text{ cm}^2/\text{g}$  olan İskan Sugözü Termik Santralleri'nden temin edilen F tipi Uçucu Kül, Zülfikarlar Grubu Akça Kimyadan temin edilen %98 saflıkta Payet Kostik (sodyum Hidroksit) çözeltisi, Asit Kimya'dan temin edilen %50 saflıkta Sodyum Silikat çözeltisi, Gördes Zeolit A.Ş'den elde edilen tanecik yoğunluğu  $1980-2180 \text{ kg/m}^3$ , blaine özgül yüzey alanı  $4079 \text{ cm}^2/\text{g}$  ve boyutu  $50 \mu\text{m}$  olan Zeolit, tane boyutu 0-2 mm olan Rilem kumundan oluşmaktadır. Uçucu Külün kimyasal bileşimi Tablo 1'de verildiği gibidir.

**Tablo 1.** Uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri (Chemical composition and physical properties of fly ash)

Bileşenler	%
$\text{SiO}_2,1$	57,34
$\text{Al}_2\text{O}_3,2$	24,91
$\text{Fe}_2\text{O}_3,3$	6,05
1, 2, 3 Toplamı	88,3
CaO	3,98
$\text{SO}_3$	0,47
$\text{Na}_2\text{O}$	1,24
Cl-	0,05
LOI (Kızdırma kaybı)	2,24
İncelik ( $>45 \mu\text{m}$ )	17,4

Sodyum Silikat sıvısı ile alkalın aktivatör çözeltisi yapmak için 14 molar Sodyum Hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Alkalın aktivatör olarak kullanılan Sodyum Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ise sıvı formda, karışım oranları  $\text{Na}_2\text{O} = \%13,5-15$ ,  $\text{SiO}_2 = \%27-30$ ,  $\text{H}_2\text{O} = \%48-50$  ve özgül ağırlığı  $1510 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Rilem Cembureau Standart kumu TSE EN 196-1'e uygun olarak hazır paketlerde temin edilmiştir. Akışkanlaştırıcı olarak crystal superplasticizer kullanılmıştır. Zeolit kimyasal bileşimi Tablo 2'de verildiği gibidir.

**Tablo 2.** Zeolit kimyasal bileşimi (Chemical composition of zeolite) (Gordes,2020)

Bileşenler	%
$\text{SiO}_2$	71,6
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11,3
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,39
$\text{MnO}$	0,02
$\text{TiO}_2$	0,08
$\text{MgO}$	0,86
$\text{SrO}$	0,03
$\text{CaO}$	2,27
$\text{Na}_2\text{O}$	0,86
$\text{K}_2\text{O}$	3,67

## 2.2. Yöntemler (Methods)

Geopolimer karışım harcındaki değişken parametreler Uçucu Kül ve Zeolit miktarı, Sodyum Hidroksit ve Sodyum Silikat çözeltilerinin miktarları, varsa ekstra su ve akışkanlaştırıcı miktarlarıdır. Karışım malzemeleri ve oranlarının belirlenmesinde literatürdeki bilgilerden faydalanılmış ve araştırma öncesi yapılan ön deneylerden elde edilen tecrübeler ışığında, zeolit kullanılmadan elde edilebilecek yüksek dayanımlı geopolimer harçlar tespit edilmiştir. Daha sonraki süreçte bu geopolimer harçlara zeolit katkısının etkisi deneysel olarak ~~ler yapılarak~~ araştırılmıştır.

Çalışmada 21 adet karışım üzerine çalışılarak, elde edilen en yüksek dayanımlı sonuçların doğrulaması ilave deneylerle tekrar edilmiştir. Deneylerde kullanılan karışım miktarları Tablo 3'te verildiği gibidir.

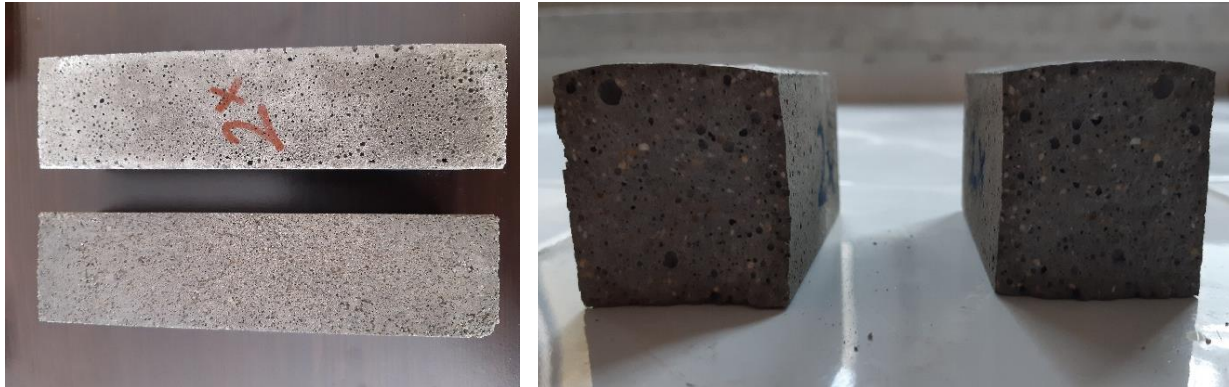
**Tablo 3.** Karışım malzemeleri ve miktarları ( Mixture materials and quantities)

Deney Adı	Uçucu Kül (gr.)	Sodyum Silikat Çözeltisi (gr.)	Sodyum Hidroksit Çözeltisi (gr.)	NaOH Çözelti (Su) (gr.)	NaOH Çözelti (NaOH) (gr.)	Zeolit (gr.)	Rilem Kumu (gr.)	Akışkanlaştırıcı (gr.)
GP1	312,0	108	31,2	20	11,2	-	936	-
GP2_1	312,0	82	32,8	21	11,7	15,6	982	-
GP2_2	312,0	86	34,3	22	12,3	31,2	1029	-
GP2_3	312,0	90	35,9	23	12,8	46,8	1076	-
GP2_4	312,0	94	37,4	24	13,4	62,4	1123	-
GP3_1	312,0	108	31,2	20	11,2	-	936	9,00
GP3_2	296,4	108	31,2	20	11,2	15,6	936	9,00
GP3_3	280,8	108	31,2	20	11,2	31,2	936	13,00
GP3_4	265,2	108	31,2	20	11,2	46,8	936	17,00
GP3_5	249,6	108	31,2	20	11,2	62,4	936	21,00
GP3_6	234,0	125	36,2	23	12,9	78,0	936	25,00
GP4_1	312,0	78	31,2	20	11,2	-	936	4,68
GP4_2	265,2	78	31,2	20	11,2	46,8	936	9,68

Tablo 3. Devamı (Continued)

Deney Adı	Uçucu Kül (gr.)	Sodyum Silikat Çözeltisi (gr.)	Sodyum Hidroksit Çözeltisi (gr.)	NaOH Çözelti (Su) (gr.)	NaOH Çözelti (NaOH) (gr.)	Zeolit (gr.)	Rilem Kumumu (gr.)	Akışkanlaştırıcı (gr.)
GP4_3	265,2	78	31,2	36	11,2	46,8	936	-
GP4_4	265,2	88	35,2	23	12,6	46,8	936	-
GP4_5	265,2	78	46,8	30	16,8	46,8	936	-
GP4_6	265,2	94	31,2	20	11,2	46,8	936	-
GP5_1	265,2	78	31,2	20	11,2	46,8	936	9,68
GP5_2	265,2	108	31,2	20	11,2	46,8	936	5,00
GP6_1	312,0	108	31,2	20	11,2	-	936	-
GP6_2	312,0	108	31,2	20	11,2	46,8	936	17,00

Deneylerde yapılan harç karışımları TS EN 12390-1 tanımlanan 40x40x160 mm'lik numune boyutlarında üretilmiştir (TS EN, 2020). Her deneyden 3 adet numune üretilerek eğilme ve basınç deneylerine tabii tutulmuştur (Şekil 1). Prizma numuneler kırılmadan önce 90°C'de 24 saat fırında kürlenmiştir. Karıştırma işlemi sırasında önce Rilem Kumumu, Uçucu Kül ve Zeolit 5 kg'lık harç mikserinde 1 dakika karıştırıldıktan sonra NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri ilave edilerek en son olarak akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Toplam karıştırma süresi 3 dakikadır. Karışımda ve Rilem Kumumunda herhangi bir su muhtevası yoktur. Çalışmada ekstra bir su ilavesi de yapılmamıştır. Sadece çözeltilerde bulunan kadarı ile karışım su içermektedir.



Şekil 1. Deneysel numuneler (Experimental samples)

- İlk grup deneylerde literatürdeki bilgilerden faydalanılarak karışım malzemeleri ve oranları belirlenirken öncelikle zeolit kullanılmadan elde edilebilecek en yüksek dayanımlı geopolimer harç tespit edilmiştir. Araştırma öncesi yapılan ön deneylerden elde edilen tecrübeler ışığında su ilavesinin dayanıma olumsuz etkideği görülmüştür. Dolayısıyla kıvam ayarlamak için çalışmadaki hiçbir deneyde su ilavesi yapılmamıştır.
- İkinci grup deneylerde farklı oranlardaki zeolit katkısının dayanıma olan etkisi araştırılmıştır. Uçucu kül ve zeolit toplam ağırlığı alüminosilikat grubu olarak kumun 1/3'ü olacak şekilde deneylerde belirlenmiştir. Uçucu külün %5'i, %10'u, %15'i ve %20'si oranında zeolit katkısı ile kum miktarı da arttırılmıştır. İlave zeolit ve kum katkısının kıvama olan olumsuz etkisini gidermek için NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri de aynı oranda arttırılmıştır.
- Üçüncü grup deneylerde Uçucu külün %5'i, %10'u, %15'i ve %20'si oranında Zeolit katkısı yapılarak katkı miktarınca uçucu kül ağırlığı azaltılmıştır. Karışımdaki alüminosilikat toplam ağırlığı değişmediği için NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltilerinin oranları da değiştirilmemiştir. Fakat zeolit miktarının artmasına bağlı olarak kıvamdaki akışkanlığı sağlamak için üçüncü grup deneylerde zeolit miktarının ağırlıkça %3-6 oranında akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir.
- Dördüncü grup deneylerde daha önce belirlenen zeolit miktarı 46,8 gram olarak sabitlenerek, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri oranları, dayanıma olan etkisinin belirlenmesi amacıyla değiştirilmiştir. Önceki deneyde akışkanlaştırıcı ilavesinin basınç dayanımına olumsuz etki ettiği görülmüştür. Dolayısıyla, bu gruptaki deneylerin bir kısmında akışkanlaştırıcı ilavesi zeolite oranla %1-2 seviyesine azaltılarak yapılmasına karşın diğer bir kısmında yapılmamıştır.

- Beşinci grupta GP4\_2 numunesi GP5\_1 olarak tekrar kontrol edilmiştir. GP5\_2 numunesinde ise akışkanlaştırıcı ilavesi azaltılarak kıvamı korumak için  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltisi miktarı arttırılmıştır. 2. numunede akışkanlaştırıcının dayanıma olan etkisi kontrol edilmek istenmiştir.
- Altıncı grupta ise GP6\_1 numunesi ile ilk deneyi (GP1) doğrulamak ve GP6\_2 numunesi ile uçucu külün artması durumunda GP3\_4 numunesine göre dayanımdaki değişiklik araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar sırasında imal edilen harçlar oda sıcaklığında dinlendirilmeden, önceden ısıtılmış fırında, döküldüğü kalıplarla birlikte kürlenmiştir. Eğilme ve basınç deneyleri ise fırından çıkarıldığı gün veya ertesi gününde gerçekleştirilmiştir.

### 3. Bulgular (Findings)

Bu bölümde, geopolimer harç numunelerine zeolit katkısının eğilme ve basınç dayanımına etkisi ve Alüminosilikat ile alkali aktivatör karışım oranlarının dayanıma etkisini bulmak amacıyla yapılan testler ile ilgili bilgiler ve elde edilen önemli bulgular alt başlıklar altında çeşitli şekil, tablo ve grafikler ile ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

#### 3.1. Eğilme ve Basınç Dayanımları (Flexural and Compression Strengths)

Geopolimer harç numunelerine zeolit katkısının eğilme ve basınç dayanımına etkisini araştırmak amacıyla test yapılan numuneler sadece zeolit katkı oranına göre Tablo 4'de A ve B gruplarına ayrılmıştır. Eğilme ve basınç dayanımlarında her iki grup geopolimer harçlarda zeolit katkısının %5-10 aralığında mukavemeti artırıcı etki yaptığı, ancak zeolit katkı oranı artması durumunda eğilme ve basınç dayanımlarında büyük oranlarda azalmalar meydana gelmiştir. Basınç ve eğilme dayanım testleri Şekil 2'de verilen basınç test düzeneği ile TS EN 1015-11'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir (TS EN, 2020)



Şekil 2. Eğilme ve Basınç dayanımı deneyi (Experiment of Flexural and compression strength)

Zeolit katkısı olmadan, karışım oranları araştırma öncesindeki deneylerle belirlenen en yüksek dayanıma sahip deney numunesi GP1'dir. Bu nedenle zeolit katkısının dayanıma olan etkisi çalışmaya referans olarak belirlenen GP1 numunesinin mekanik özellikleri üzerinden değerlendirilmiştir.

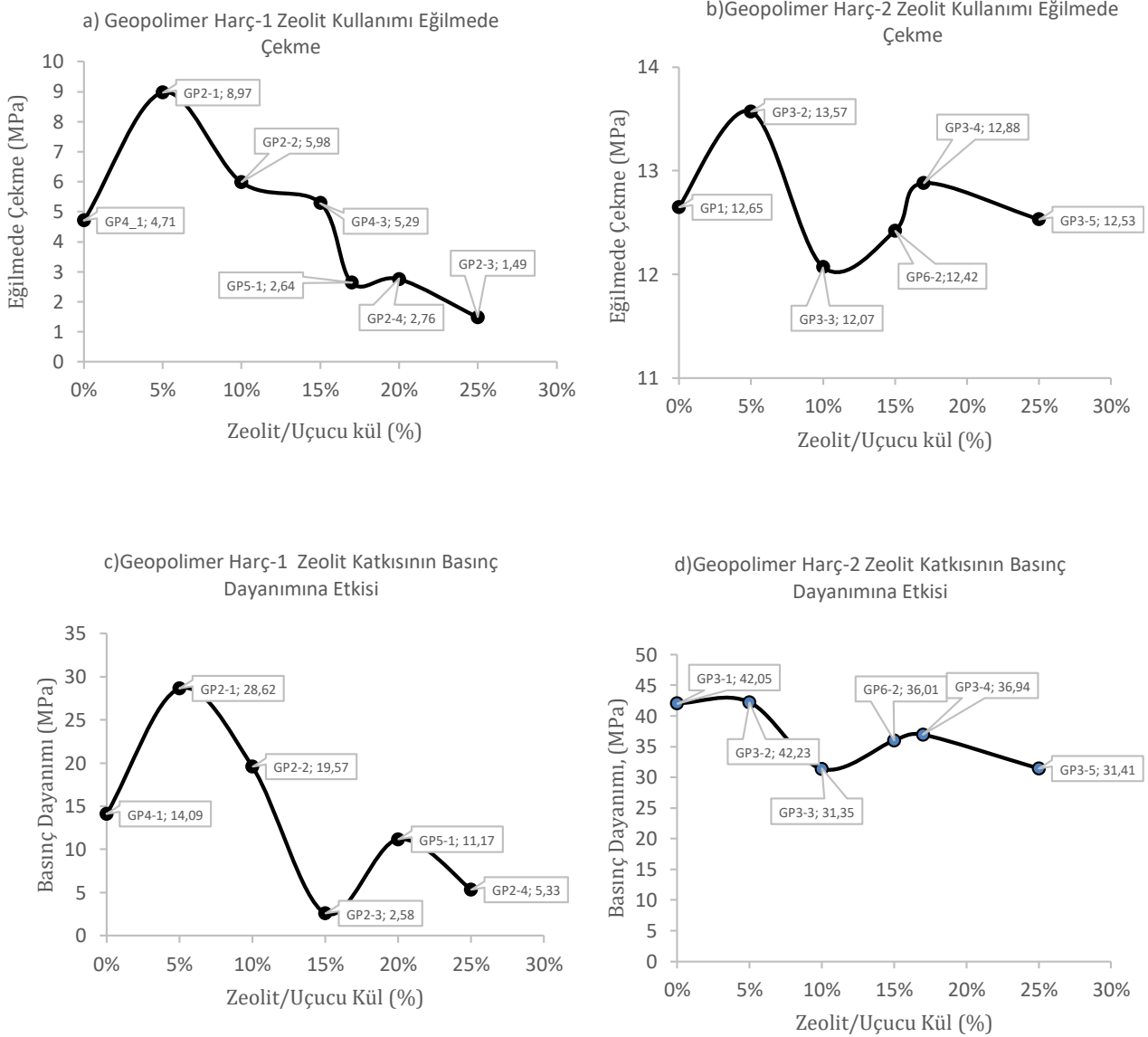
**Tablo 4.** Geopolimer harçlarda zeolit katkısının eğilme ve basınç dayanımına etkisi (The effect of zeolite additive on flexural and compressive strength in geopolimer mortars)

Zeolit/Uçucu Kül	Deney Adı	Alkali aktivatör /Alüminosilikat	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Eğilme Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa
Grup-A					
0%	GP4_1	0,35	2,50	4,71	14,09
5%	GP2_1	0,35	2,50	8,97	28,62
10%	GP2_2	0,35	2,50	5,98	19,57
15%	GP4_3	0,35	2,50	5,29	5,29
17%	GP5_1	0,35	2,50	2,64	11,17
20%	GP2_4	0,35	2,50	2,76	5,33
25%	GP2_3	0,35	2,50	1,49	2,58

Tablo 4. Devamı (Continued)

Zeolit/Uçucu Kül	Deney Adı	Alkali aktivatör /Alüminosilikat	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	Eğilme Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa
Grup-B					
0%	GP1	0,45	3,46	12,65	42,05
5%	GP3_2	0,45	3,46	13,57	42,23
10%	GP3_3	0,45	3,46	12,07	31,35
15%	GP6_2	0,39	3,46	12,42	36,01
17%	GP3_4	0,45	3,46	12,88	36,94
25%	GP3_5	0,45	3,46	12,53	31,41

Grup A ve Grup B olarak iki ayrı geopolimer harçta kullanılan kimyasal içerikler aynı kalmak şartıyla yani alkali aktivatörler ve toplam Alüminosilikat miktarı sabit tutularak farklı oranlarda ilave edilen zeolit katkısı sonucunda eğilmede çekme ve basınç dayanımlarındaki değişim Şekil 3'te grafik olarak gösterilmektedir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere %5-10 oranında zeolit kullanımı dayanımı artırıcı etki yapmıştır. Her iki harçta kullanılan zeolit oranı artırılması mukavemette azalmaya neden olmuştur.



Şekil 3. Eğilme/Basınç dayanımları değişimleri (Flexural/Compression strength changes)

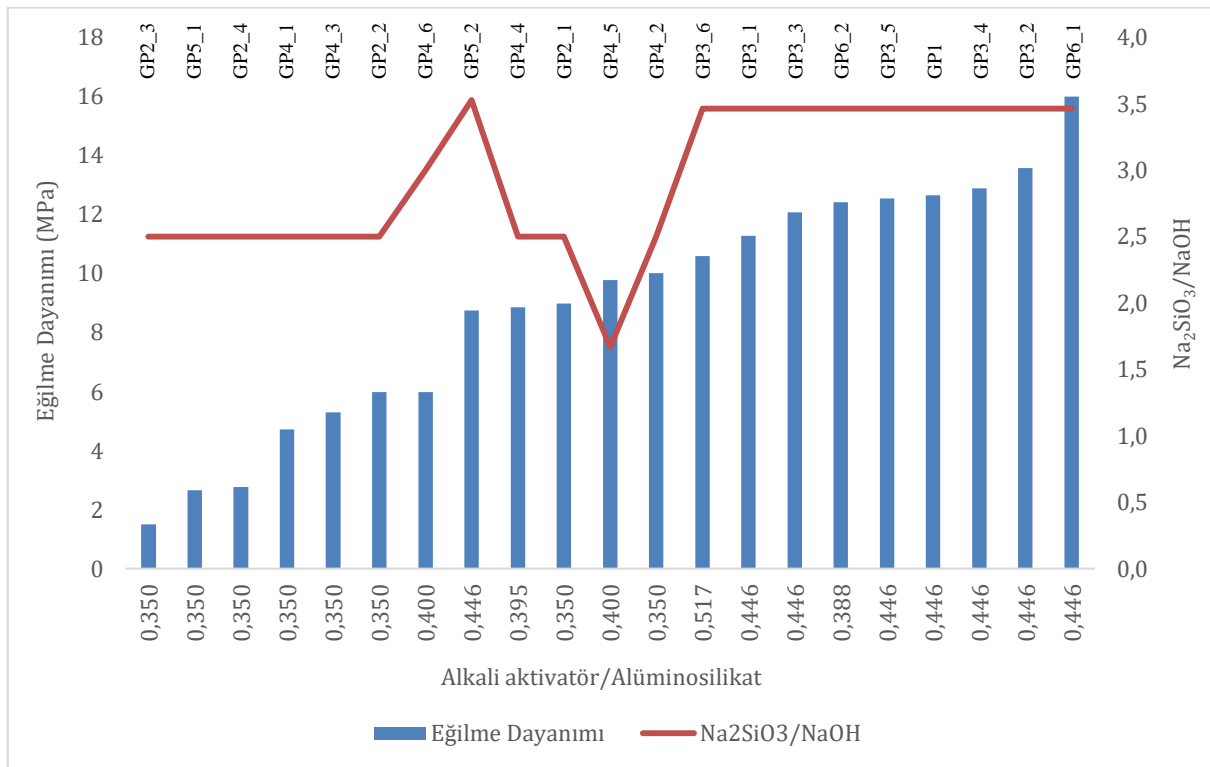


Eğilme dayanımlarında zeolit katkılı harçlardan referans numune dayanımına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ancak basınç ve eğilme dayanımları için bu fark büyüyerek daha da belirginlik kazanmıştır. Basınç ve eğilme dayanımında zeolit katkılı en iyi sonuç GP2\_1 ve GP3\_2 numunelerinden elde edilmiştir. Sonuç olarak, tüm numunelerin bir günlük eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Geopolimer harç içine katkı olarak zeolit koyulması önemli oranda dayanımı arttırıcı mukavemet parametrelerini vermese de zeolitlerin, ağır metal iyonlarını yok etme yetenekleri dolayısıyla çimentoya göre daha düşük çevresel zararlı etki barındıran yeşil yapı harçları olarak kullanılabilceği bulunmuştur.

$\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltisinin karışımdaki miktarının artırılması eğilme dayanımını arttırmakta basınç dayanımını ise azaltmaktadır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltisinin karışımdaki miktarının düşürülmesi ise eğilme dayanımının azalmasına basınç dayanımının artmasına neden olmaktadır. En iyi eğilme ve basınç dayanımı GP3\_2 numunesinden elde edilmiştir (Şekil 3).

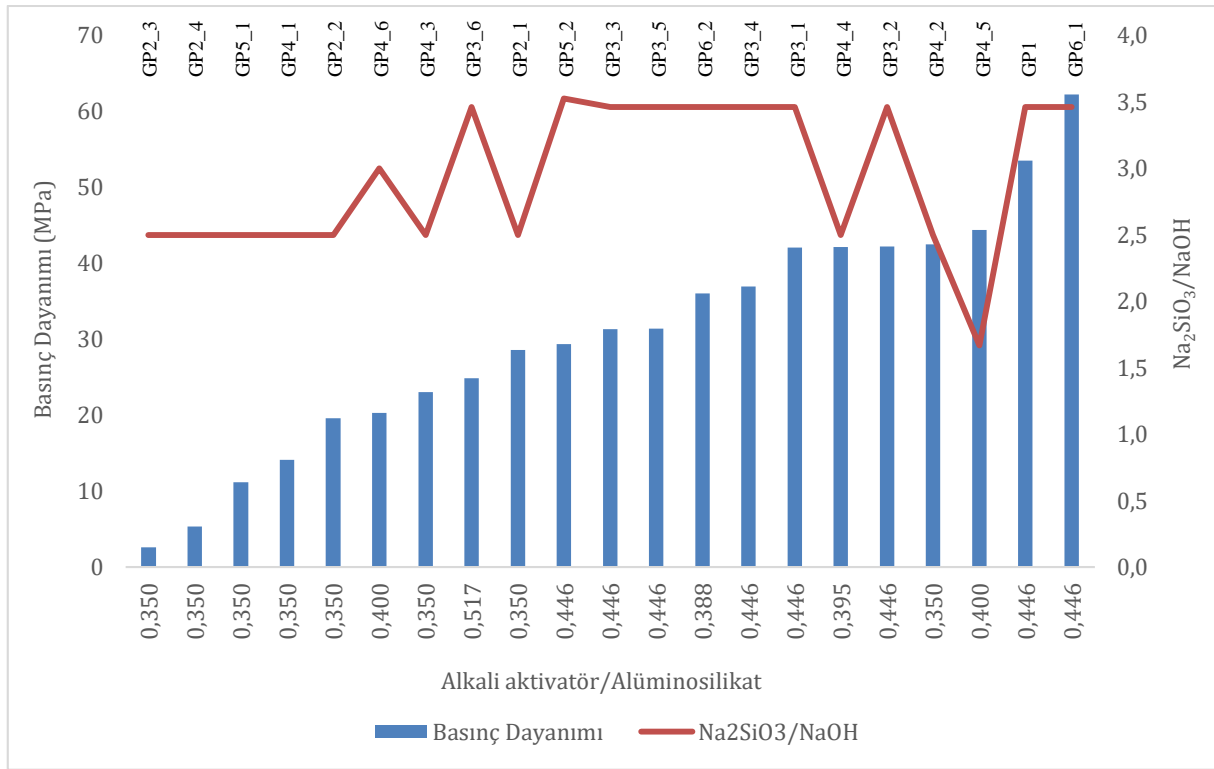
### 3.2. Alüminosilikat ve Alkali Aktivatör Karışım Oranlarının Dayanıma Etkisi (The effect of aluminosilicate and Alkaline Activator Mixture Ratios on Strength)

Alüminosilikat olarak kullanılan uçucu kül ve zeolit karışım miktarlarının alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözelti miktarlarına göre karışım oranları harç dayanımlarında belirleyici rol oynamaktadır. Eğilme dayanımı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının toplam Alkali\_aktivatör/Alüminosilikat oranına göre değişimi şekil 4'de verildiği gibidir.



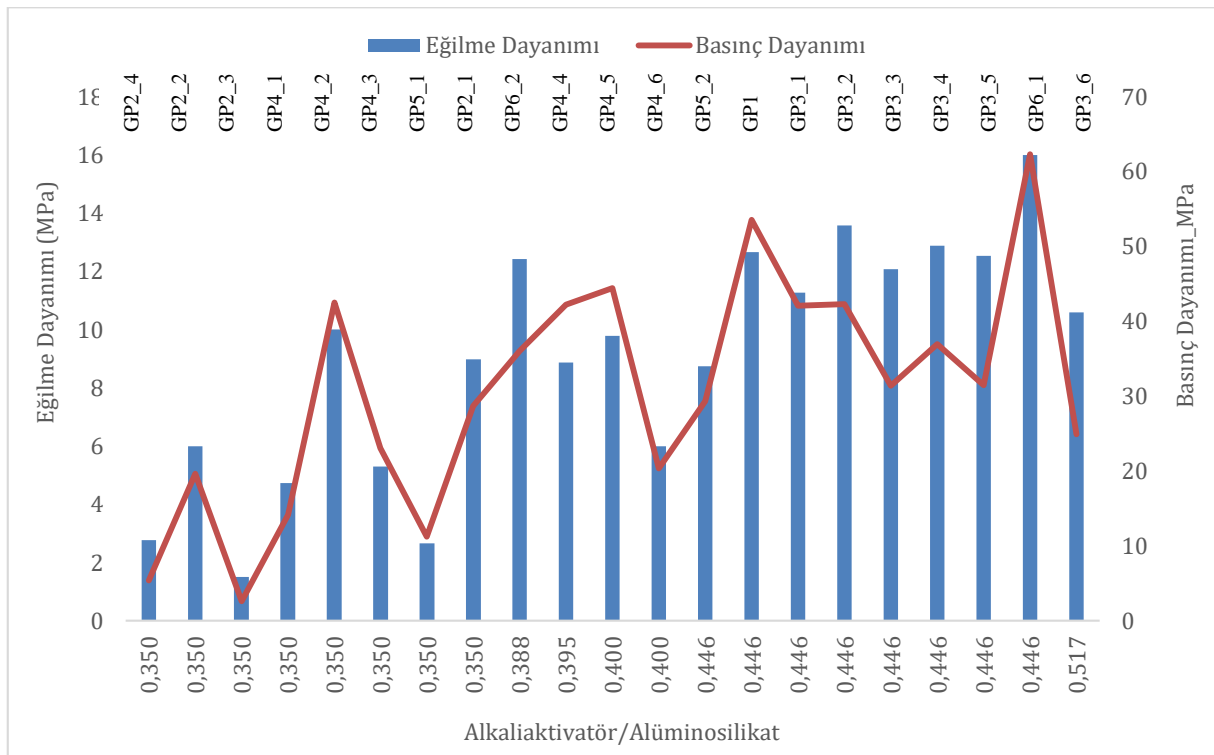
Şekil 4. Eğilme dayanımı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının toplam Alkali aktivatör/Alüminosilikat oranına göre değişimi (Flexural strength and variation of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ratio according to total alkaline activator / aluminosilicate ratio)

Genel olarak alkali aktivatörlerin toplam alüminosilikat miktarına göre azaltılması eğilme dayanımında olumlu sonuçlar verirken basınç dayanımının daha başkaca faktörler etkisi altında olduğu görülmektedir. Alüminosilikat gurubu içinde zeolitinin olup olmaması eğilme dayanımında belirleyici olmazken basınç dayanımında zeolit katkısının olması dayanımı düşürmektedir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek eğilme dayanımları Alkali aktivatör/Alüminosilikat oranının 0,446 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının 3,462 olduğu deneylerden elde edilirken maksimum eğilme dayanımı zeolit katkısı olmayan GP6\_1 deneyi sonucunda bulunmuştur. En yüksek basınç dayanımları Alkali aktivatör/Alüminosilikat oranının 0,446 ve zeolit katkısı olmayan deneylerden elde edilirken  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının basınç dayanımında etkisinin daha düşük olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının toplam Alkali aktivatör/Alüminosilikat oranına göre değişimi şekil 5'de verildiği gibidir.



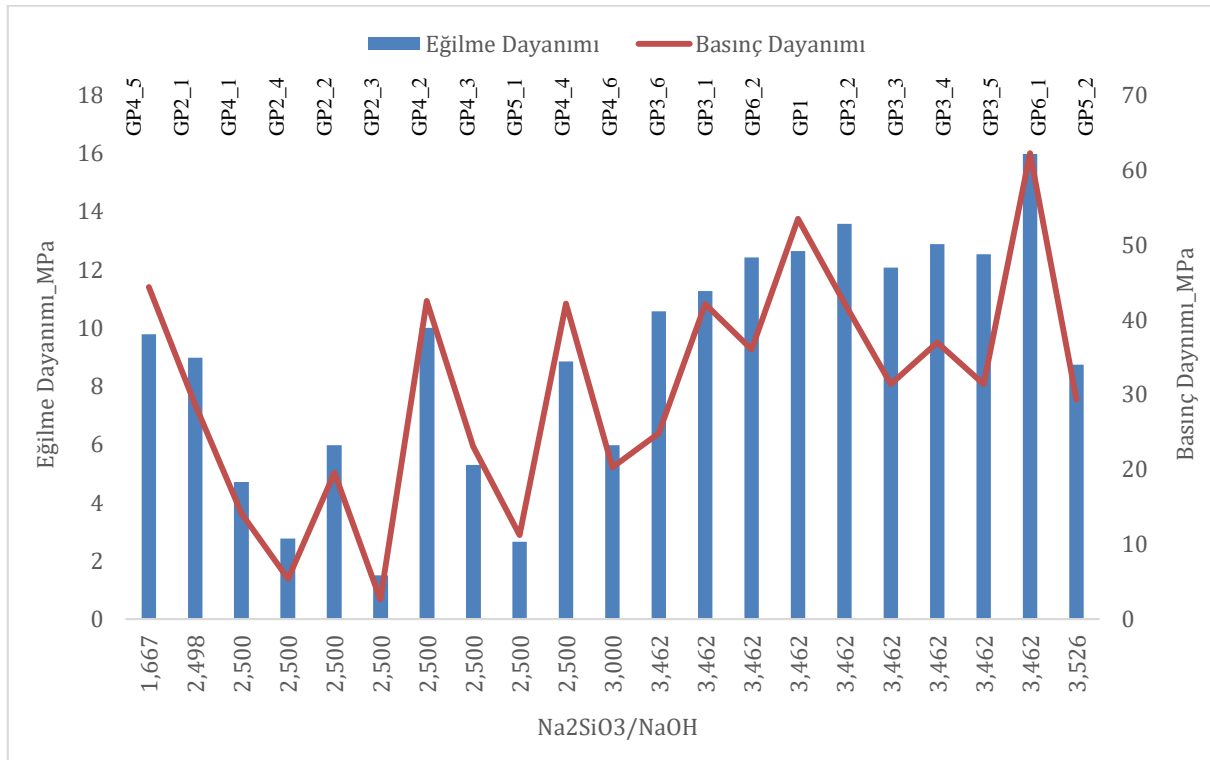
Şekil 5. Basınç dayanımı ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranının toplam Alkali aktivatör/Alüminosilikat oranına göre değişimi (Compressive strength and change of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH ratio according to total alkaline activator / aluminosilicate ratio)

Eğilme ve basınç dayanımının toplam alkali aktivatör/alüminosilikat oranına göre değişimi Şekil 6'da verildiği gibidir. Zeolit katkılı numunelerde alkali aktivatör/alüminosilikat oranının 0,446 ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranının 3,462 olması durumunda eğilme dayanımının yükseldiği görülmektedir. Örnek olarak GP3-2, GP3-3 ve GP3-4 gösterilebilir. En yüksek dayanım GP1 ve GP6-1 ile alkali aktivatör/alüminosilikat oranının 0,446 olduğu zeolit katkısız deneylerden elde edilmiştir.



Şekil 6. Alkali\_aktivatör/Alüminosilikat oranlarına göre eğilme ve basınç dayanımları (Flexural and Compression strength according to alkali\_activator / aluminosilicate ratios)

Eğilme ve basınç dayanımının  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranına göre değişimi Şekil 7’de verildiği gibidir. Zeolit katkısının %5’in üstünde olduğu durumlarda en yüksek basınç dayanımı alkali aktivatör/alüminosilikat oranının 0,35-0,40 ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının 2,5 olması durumunda elde edildiği anlaşılmıştır. Örnek olarak GP4-2, GP4-4 ve GP4-5 gösterilebilir. En yüksek dayanım GP1 ve GP6-1 ile  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının 3,462 olduğu zeolit katkısız deneylerden elde edilmiştir.



Şekil 7.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranlarına göre eğilme ve basınç dayanımları (Flexural and Compression strength according to  $\text{na}_2\text{sio}_3 / \text{NaOH}$  ratios)

Çalışmadaki malzeme karışım oranları ve bunlara göre elde edilen dayanım değerleri Tablo 5’te verildiği gibidir. Zeolit katkısı olmayan deneyler GP1, GP3-1, GP4-1 ve GP6-1’dir. GP4-1’deki malzeme karışım oranlarının zeolit katkısız diğer deneylerden farklı olması sonucu eğilme ve basınç dayanımı değerleri de buna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. %15 zeolit katkılı deneylerde en yüksek basınç dayanımı GP4-5, en yüksek eğilme dayanımı ise GP3-4 deneyinden elde edilmiştir. Buna göre malzeme karışım oranlarına bağlı olarak eğilme dayanımının artarken basınç dayanımı düşmekte, basınç dayanımı artarken ise eğilme dayanımı azalmaktadır. Eğilme ve basınç dayanımı açısından en iyi zeolit katkılı deney uçucu külün %5’i oranında zeolit katkısı yapılan GP3-2 deneyidir. Ancak her hâlükârda en yüksek dayanımlar zeolit katkısız GP6-1 deneyinden elde edilmiştir.

Tablo 5. Alkali Aktivatör ve Alüminosilikat oranlarının dayanıma etkisi (Effect of alkaline activator and aluminosilicate ratios on strength)

Deney Adı	Alkali aktivatör / Alüminosilikat	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$	Eğilme Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa
GP1	0,446	3,462	12,65	53,50
GP2_1	0,350	2,498	8,97	28,62
GP2_2	0,350	2,500	5,98	19,57
GP2_3	0,350	2,500	1,49	2,58
GP2_4	0,350	2,500	2,76	5,33
GP3_1	0,446	3,462	11,27	42,05
GP3_2	0,446	3,462	13,57	42,23
GP3_3	0,446	3,462	12,07	31,35
GP3_4	0,446	3,462	12,88	36,94

Tablo 5. Devamı (Continued)

Deney Adı	Alkali aktivatör / Alüminosilikat	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / NaOH	Eğilme Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa
GP3_5	0,446	3,462	12,53	31,41
GP3_6	0,517	3,462	10,58	24,85
GP4_1	0,350	2,500	4,71	14,09
GP4_2	0,350	2,500	10,00	42,50
GP4_3	0,350	2,500	5,29	23,02
GP4_4	0,395	2,500	8,85	42,17
GP4_5	0,400	1,667	9,77	44,37
GP4_6	0,400	3,000	5,98	20,28
GP5_1	0,350	2,500	2,64	11,17
GP5_2	0,446	3,526	8,74	29,32
GP6_1	0,446	3,462	15,98	62,26
GP6_2	0,388	3,462	12,42	36,01

#### 4. Tartışma ve Sonuç (Result and Conclusion)

Bu çalışmada üretilen geopolimer harç numunelerinde zeolit katkısının dayanım üzerindeki etkileri ortaya çıkarılmıştır. Eğilme dayanımı açısından zeolit katkılı deneyler ile alimünosilikat olarak sadece uçucu külün kullanıldığı deneyler arasında benzer sonuçlar elde edilmesine rağmen basınç dayanımı açısından zeolit katkılı deneylerden daha olumsuz sonuçlar elde edilmiştir. Basınç dayanımını arttırmak için Alkali\_aktivatör/Alüminosilikat oranları ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranları değiştirilmiştir. Bu oranların değişmesi sonucu basınç dayanımlarında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak basınç dayanımının iyileştirilmesi eğilme dayanımında düşüşe neden olmuştur. Ayrıca zeolit katkılı deneylerin basınç dayanımlarından elde edilen en iyi sonuçlar bile alimünosilikat olarak sadece uçucu külün kullanıldığı deneylerden daha düşük mertebede kalmıştır. Alümino silikat olarak uçucu külün yanında zeolitinde kullanıldığı deneylerde eğilme ve basınç dayanımları arasında ters bir orantı ortaya çıkmıştır. Eğilme dayanımının yüksek olduğu durumda basınç dayanımı düşmüş, basınç dayanımının yükselmesi durumunda ise eğilme dayanımı düşük çıkmıştır. Ayrıca bu eğilme ve basınç dayanımları hiçbir zaman zeolit katkısı olmadan üretilen numunelerden elde edilen eğilme ve basınç dayanımlarına ulaşamamıştır. Zeolit katkısı ile alkali aktivatör ve alüminosilikat oranlarının değiştirilmesi sonucu bir takım farklı dayanımlar elde edilmesine rağmen bu dayanımlar hiçbir zaman zeolit katkısız deneylerden daha üstün bir düzeye erişememiştir. Araştırma sonunda geopolimer harç içine katkı olarak zeolit ilave edilmesi dayanımı önemli oranda arttırmamış ve hatta biraz düşürmüş olsa dahi zeolitlerin, ağır metal iyonlarını yok etme özelliklerinden dolayı çimentoya göre daha düşük çevresel zararlı etki barındıran yeşil yapı harçları olarak kullanılabilirliği bulunmuştur.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

#### Kaynaklar (References)

- Basha S, M., ve Reddy Ch, B., K, V., (2016). Strength behaviour of geopolymer concrete replacing fine aggregates by M- sand and E-waste. International Journal of Engineering Trends and Technology 40(7): 401-7, Doi: 10.14445/22315381/IJETT-V40P265.
- Bhushan H. Shinde., Dr. Kshitija N. Kadam., (2015). Properties of Fly Ash based Geopolymer Mortar. International Journal of Engineering Research And V4(07), Doi: 10.17577/IJERTV4IS070750.
- Bingöl, A , Balaneji, H . (2019). Yüksek Fırın Cürufu Ve Zeolit Katkılı Betonların Sülfat Direncinin Belirlenmesi . Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi , 7 (2) , 254-264 . DOI: 10.21923/jesd.454132
- Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N., Ramezani-pour, A.A., (2010). Engineering properties of alkali activated natural pozzolan concrete. 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies: 1093-102, Doi: 10.14359/51664217.

- Gordes Zeolite., n.d. Clinoptilolite Technical data sheet, (2020).  
[http://zeoproducts.com/assets/catalogues/tech\\_data\\_sheet/en/clinoptilolite.pdf](http://zeoproducts.com/assets/catalogues/tech_data_sheet/en/clinoptilolite.pdf).
- Gülen, J., Zorbay, F., Arslan Yıldız Teknik Üniversitesi, S., Fakültesi, K.-M., Mühendisliği Bölümü, K., (2012). Zeolitler ve Kullanım Alanları. vol. 2.
- Kaplan, G., Öztürk, A.U., Uğur Kaplan A.B. (2020). Çimento ve Uçucu Kül Bünyesindeki Ağır Metallerin Etkilerinin Hidratasyon ve Çevre Sağlığı Açısından İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 305-313
- Komisyon., (2001). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri II (Mika-Zeolit-Lületaşı) Çalışma Grubu Raporu.
- M. I. Abdul Aleem, P.D.A., 2012. geopolymer concrete a review 1(2): 20–6, Doi: 10.7323/ijeset/v1.
- Nikolov, A., Nugteren, H., Rostovsky, I., (2020). Optimization of geopolymers based on natural zeolite clinoptilolite by calcination and use of aluminate activators. Construction and Building Materials 243: 118257, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118257.
- Nikolov, A., Rostovsky, I., Nugteren, H., 2017. Geopolymer materials based on natural zeolite. Case Studies in Construction Materials 6: 198–205, Doi: 10.1016/j.cscm.2017.03.001.
- Ortega, E.A., Cheeseman, C., Knight, J., Loizidou, M., 2000. Properties of alkali-activated clinoptilolite. Cement and Concrete Research 30(10): 1641–6, Doi: 10.1016/S0008-8846(00)00331-8.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T., 1999. Alkali-activated fly ashes. Cement and Concrete Research 29(8): 1323–9, Doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9.
- Panagiotopoulou, C., Kontori, E., Perraki, T., Kakali, G., (2007). Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media. Journal of Materials Science 42(9): 2967–73, Doi: 10.1007/s10853-006-0531-8.
- Rangan, B.V., 2008. Studies on fly ash-based geopolymer concrete. Malaysian Construction Research Journal 3(2): 1–20.
- Robina Kouser Tabassum, I., Khadwal, A., 2015. A Brief Review on Geopolymer Concrete. International Journal of Advanced Research in Education Technology (IJARET) 2(3): 70–3.
- Shaikh, F.U.A., (2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. International Journal of Sustainable Built Environment 5(2): 277–87, Doi: 10.1016/j.ijsbe.2016.05.009.
- Singh, N.B., (2018). Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. Minerals 8(7), Doi: 10.3390/min8070299.
- Tekin, I., Gencel, O., Gholampour, A., Oren, O. H., Koksall, F., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Recycling zeolitic tuff and marble waste in the production of eco-friendly geopolymer concretes. Journal of Cleaner Production, 122298.
- Terzi, S , Büyükdoğaç, E . (2018). Evaluation of Zeolite And Pumice Waste as Mineral Aggregate and Filler for Producing Lightweight Asphalt Concrete Mixtures . Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi , 6 (1) , 118-123 . DOI: 10.21923/jesd.311826
- Türk Standartları Enstitüsü., n.d. TS EN 1015-11 (2020). Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, n.d.
- Türk Standartları Enstitüsü., n.d. TS EN 12390-3 ,(2020). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin, n.d.
- Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R., Gómez, L., (2010). Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. Construction and Building Materials 24(11): 2084–90, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052.
- Yılmaz, H , Sallı Bideci, Ö , Bideci, A . (2018). Pomza Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Etkisi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi , 6 (1) , 154-160 . DOI: 10.21923/jesd.400770
- Zeolyst International., (2020). Zeolite FAQ's. <https://www.zeolyst.com/about-us/faqs.html>. [accessed February 28, 2020].