



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Kalsine edilmiş doğal zeolit ikameli harçların mühendislik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the engineering properties of mortars with calcined natural zeolite replacement

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa KOP¹, Salih YAZICIOĞLU²

ORCID¹: 0000-0002-9834-4690

ORCID²: 0000-0002-6767-2026

To cite to this article: Kop M. ve Yazıcıoğlu S., “Kalsine edilmiş doğal zeolit ikameli harçların mühendislik özelliklerinin incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 28(2): 453-459, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Kop M. ve Yazıcıoğlu S., “Kalsine edilmiş doğal zeolit ikameli harçların mühendislik özelliklerinin incelenmesi” *Politeknik Dergisi*, 28(2): 453-459, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1481264

Kalsine Edilmiş Doğal Zeolit İkameli Harçların Mühendislik Özelliklerinin

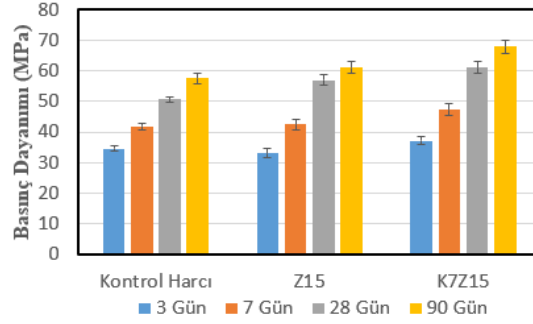
Investigation of the Engineering Properties of Mortars with Calcined Natural Zeolite Replacement

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Harç numunelerinde çimentoya ikame olarak doğal ve kalsine edilmiş zeolit kullanımı. / Use of natural and calcined zeolite as a replacement for cement in mortar specimens.
- ❖ Doğal ve kalsine edilmiş zeolit ikameli harç numunelerinin mikroyapı, dayanıklılık ve mekanik özellikleri. / Microstructure, durability, and mechanical properties of natural and calcined zeolite replaced mortar specimens.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Harç numunelerinde çimentoya ikame olarak kullanılan zeolitin kalsinasyon işlemi ve ince öğütülmesi, mekanik özellikleri önemli ölçüde değiştirmektedir. / The calcination process and fine grinding of zeolite used as a replacement for cement in mortar specimens significantly alter their mechanical properties.



Şekil. Harç numunelerinin basınç dayanımı /Figure. Compressive strength of mortar specimens

Amaç (Aim)

Klinoptilolit zeolitinin mikronize seviyede öğütülmesi ve kalsine edilmesi suretiyle harç numuneleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. / The effects of micronizing and calcining clinoptilolite zeolite on mortar specimens have been determined.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Harç numunelerine çimentoya ikame olarak %15 oranında doğal ve kalsine edilmiş zeolit eklenmiştir. / Natural and calcined zeolite was added to the mortar specimens at a 15% replacement rate for cement.

Özgünlük (Originality)

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada zeolit hem mikron seviyesinde öğütülmüş hemde kalsinasyon işlemi uygulanarak harçlara eklenmiştir. / Unlike the studies in the literature, in this study, zeolite was both ground at micron level and added to the mortars by calcination process.

Bulgular (Findings)

Kalsinasyon işlemi uygulanan zeolit ikameli harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinde belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. / Significant changes in the physical and mechanical properties of zeolite-replaced mortars subjected to calcination have been observed.

Sonuç (Conclusion)

700 °C'de kalsine edilmiş %15 zeolitin çimento yerine ikame edilmesi, harcın özelliklerini iyileştirmiş ve kontrol harcına göre daha olumlu sonuçlar sağlamıştır. / Replacing cement with 15% zeolite calcined at 700 °C improved the properties of the mortar and provided more favorable results compared to the control mortar.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kalsine Edilmiş Doğal Zeolit İkameli Harçların Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa KOP^{1*}, Salih YAZICIOĞLU²

¹Kara Harp Okulu, İnşaat Müh. Bölümü, Milli Savunma Üniversitesi, Türkiye

¹Teknoloji Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 10.05.2024 ; Kabul/Accepted : 01.08.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 06.08.2024)

ÖZ

Bu çalışmada, ülkemizde bol miktarda bulunan zeolit rezervlerinin, doğal ve kalsine edilmiş hallerinin çimento yerine ikame edilerek hazırlanan harç numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, %15 oranında doğal ve kalsine edilmiş zeolit, çimento yerine ikame edilerek 50x50x50 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı deneyleri; ayrıca kapiler su emme, ultrasonik geçiş hızı, ıslanma kuruma deneyleri ve mikroyapı özelliklerini incelemek amacıyla SEM analizleri yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, çimento yerine ikame edilen kalsine zeolit, harcın özelliklerini iyileştirdiği ve kontrol harcına göre daha olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kalsine edilmiş zeolit ikameli harçların kontrol harçlarına kıyasla daha geçirimsiz olduğu ve dayanıklılık açısından daha olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zeolit, Kalsinasyon, Fiziksel özellikler, Mekanik özellikler

Investigation of the Engineering Properties of Mortars with Calcined Natural Zeolite Replacement

ABSTRACT

In this study, the physical and mechanical properties of mortar specimens prepared by substituting natural and calcined forms of zeolite, abundant in reserves in our country, for cement have been investigated. In this study, specimens measuring 50x50x50 mm were produced by substituting 15% natural and calcined zeolite for cement. On the prepared specimens, compressive strength tests at 3, 7, 28, and 90 days were conducted; additionally, capillary water absorption, ultrasonic pulse velocity, wetting-drying tests, and microstructure properties were examined using SEM analyses. According to the results obtained from the study, it was observed that calcined zeolite, when substituted for cement, improved the properties of the mortar and yielded more favorable results compared to the control mortar. It has been observed that mortars containing calcined zeolite are more impermeable compared to the control mortars and provide more favorable results in terms of durability.

Keywords: Zeolite, Calcination, Physical properties, Mechanical properties

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton ve harç karışımlarında çimentoya ikame olarak mineral katkı maddelerinin kullanılması nihai dayanım ve dayanıklılık açısından birçok avantaj sağlamaktadır. Doğal puzolanlar (volkanik tuf, volkanik kül, diatomlu toprak, pişirilmiş kil ve zeolit) ve yapay puzolanlar (silis dumanı, pirinç kabuğu külü, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu) çimentoya ikame olarak kullanılan malzemeler arasındadır.

Doğal zeolit, farklı uygulamalar için uygun olan petek yapıları bir alüminosilikat mineralidir. "Zeolit" terimi, İsveçli mineralog A. F. Cronstedt tarafından 1756'da önerilmiş olup, kökeni Yunanca "zeo" (kaynamak) ve "lithos" (taş) kelimelerine dayanmaktadır. Bu nedenle, "zeolit" kelimesinin tam anlamıyla "kaynayan taş" olduğu ve bu ismin Cronstedt'in gözlemlerine dayanarak, bu mineralin hızlı ısınması sonucu önceden emilmiş olan sudan buhar oluşturduğu için verildiği kabul edilmektedir [1]. Günümüzde, doğal zeolit türlerinin 50'den fazla ve sentetik zeolit türlerinin ise 150'den fazla

olduğu bilinmektedir. Bu zeolit türleri farklı endüstrilerde çeşitli uygulamalara sahiptir. İnşaat endüstrisinde, özellikle çimento esaslı malzemelerde, doğal zeolitler genellikle puzolanik özellikleri nedeniyle Portland çimentosunun yerine ikame olarak kullanılmaktadır. Zeolitlerde bulunan yüksek oranda SiO₂ ve Al₂O₃, çimento hidrasyon süreci sırasında oluşan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) fazlarını oluştururlar [2-4]. Bu durum, çimento matrisinin daha yoğun bir yapıya sahip olmasına ve malzemenin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin gelişmesine katkıda bulunur [5]. Birçok araştırmaya göre, inşaat endüstrisinde en çok kullanılan doğal zeolit türleri klinoptilolit, heulandit ve fozajit'tir [6].

Doğal zeolitler, kil minerallerine benzer kimyasal bileşime sahip kristalin alüminosilikat minerallerdir; ancak, düz katmanlı yapıya sahip kil minerallerine karşılık üç boyutlu bir yapıya sahiptirler. Doğal zeolitler, önemli miktarda puzolanik aktiviteye sahip oldukları bilinmektedir. Farklı araştırmacılar, doğal zeolitin katkılı

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mustafa-kop@hotmail.com

çimentolar ve beton karışımlarında sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır [7-16].

Kalsinasyon işlemleri daha önce su arıtma ve kataliz gibi endüstrilerde zeolitlerin özelliklerini geliştirmek için kullanılıyordu [17-19]. Yapılan çalışmalarda kalsinasyon işlemi sonucunda zeolitlerde kristal yapının azaldığı ve amorf yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir [20-25]. Bu durum kalsine edilmiş zeolitlerin puzolanik aktiviteyi artıracağını [26] ve beton karışımlarında kullanılabileceğini göstermektedir [27].

Burris vd. zeoliti bilyalı değirmende 0-6 saat arasında farklı sürelerde öğütürerek altı farklı tane boyut dağılımına sahip zeolit elde etmiş ve bu zeolitleri %0-20 oranında portland çimentosuna ikame ederek harçlar hazırlamışlardır. Çalışmalarında, zeolit çimentonun hidratasyon sürecine ve harcın basınç dayanımına olan etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, öğütülmemiş zeolitin basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkisi bulunmazken, bilyalı değirmende öğütmenin, zeolitin puzolanik aktivitesini artırdığı ve bu nedenle çimento harcının 28 ve 90 günlük basınç dayanımını öğütme süresine bağlı olarak %10-25 oranında artırdığını tespit etmişlerdir [28].

Küçükyıldırım ve Uzal yaptıkları çalışmada, 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarında 2 saat boyunca kalsine edilmiş zeolitin, yüksek performanslı puzolanik katkı çimentolarda kullanımını araştırmışlardır. Kalsine zeolitlerin, doğal zeolite kıyasla daha düşük su talebi olduğunu ve daha iyi dayanım performansı sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, sertleştirilmiş çimentolu sistemin azaltılmış gözenekliliği nedeniyle daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir [29].

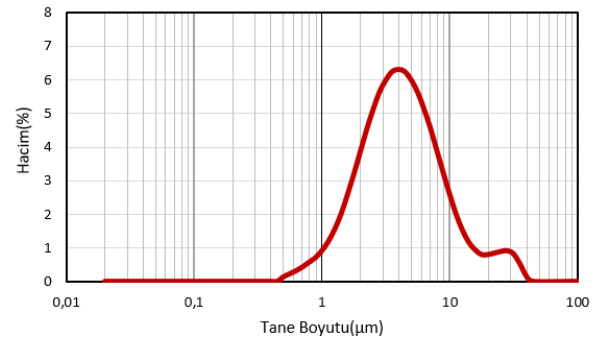
Dayı vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, karışım içinde çeşitli oranlarda zeolit, uçucu kül, atık cam ve portland çimentosu klinkeri kullanılarak üretilen kompoze çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş ve bu malzemelerin kompoze çimento üretiminde kullanımı araştırılmıştır. Genel olarak deney sonuçları değerlendirildiğinde, üretilen çimentoların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin standartlara uygun olduğu ve zeolit, atık cam tozu ve uçucu külün %5 ve %10 oranında portland kompoze çimento üretiminde kullanılabileceği tespit edilmiştir [30].

Bu çalışmanın amacı, ülkemizde bol miktarda rezervi bulunan klinoptilolit zeolitinin mikronize seviyede öğütülmesi ve ayrıca kalsine edilmesi suretiyle harç numuneleri üzerindeki üstünlüklerini tespit etmektir. Klinoptilolit zeolitinin beton teknolojisinde kullanılabilirliğinin araştırılması çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, klinoptilolit zeolitinin mikronize ve kalsine edilmiş hallerinin harç numuneleri üzerinde deneysel olarak dayanım ve durabilite özellikleri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Materyal(Material)

Deneylerde, TS EN 197-1 [31] standardına uygun olarak CEM I 42.5R Portland çimentosu ve Gördes, Manisa'dan temin edilen klinoptilolit türünde zeolit kullanılmıştır. Çimento ve zeolit örneğinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Mikronize zeolitin lazer partikül boyutu dağılımı, Şekil 1'de gösterildiği gibi Mastersizer cihazı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 1. Zeolit lazer parçacık boyut dağılımı (Zeolite laser particle size distribution)

Mikronize edilmiş zeolitin elde edilen lazer tane boyut dağılımına göre malzemenin %86.25'i 10 mikronun altında olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 1. Portland Çimentosu ve Zeolit(Gördes) fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical properties of Portland Cement and Zeolite(Gördes))

Bileşen(%)	Çimento	Zeolit(Gördes)
SiO ₂	19.05	70
CaO	60.91	3.44
Al ₂ O ₃	5.31	8.64
Fe ₂ O ₃	3.08	2.14
MgO	2.15	1.2
SO ₃	3.56	1.2
Na ₂ O	0.87	1.14
K ₂ O	1.35	2.04
K.K	3.6	9-14
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.11	2.3
Özgül Yüzey, Blaine (cm ² /g)	3640	19340

Zeolit katkısının kıvam üzerinde oluşturabileceği potansiyel olumsuz etkileri azaltmak ve işlenebilirliği sabit tutabilmek amacıyla, harç karışımlarında bağlayıcı ağırlığının %1.5 oranında akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu kapsamda, sodyum naftalin sülfonat esaslı likit süper akışkanlaştırıcının kimyasal özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Süper akışkanlaştırıcı özellikleri(Superplasticizer properties)

Özellik	Değer
Katı Madde Oranı	Min. 38%
pH (%2 çözelti)	6.5 – 9
Sodyum Sülfat İçeriği	0,50%
Viskozite	Max 150 cP (25°C)
Özgül Ağırlık	1.20 gr/cm ³ ± 0.05

İnce agrega olarak CEN standart kumu[31] tüm harç numunelerinde kullanılmıştır. Harç numunelerinin hazırlanmasında Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Metot(Method)

Kalsinasyon işlemi, 1200°C sıcaklık kapasitesine ve 20°C/dk sıcaklık artış hızına sahip kül fırınında gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon için hazırlanan zeolitler, seramik kaplara yerleştirilerek 1 saat boyunca ısıtılmıştır. Süre tamamlandıktan sonra numuneler

fırından çıkarılarak, havada hızlı bir şekilde soğumalarını sağlamak amacıyla geniş metal tablalara yayılmıştır. Laboratuvar ön deney aşamasında yapılan çalışmalar doğrultusunda, ağırlıkça %15 zeolit ikamesi ve 700°C'de gerçekleştirilen kalsinasyon işlemi, basınç dayanımı açısından en olumlu sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar temel alınarak, %15 zeolit içeren ve 700°C'de kalsine edilmiş zeolit kapiler su emme, ultrasonik geçiş hızı, ıslanma kuruma deneyleri ve SEM analizleri yapılmıştır.

Harç karışımlarında su/bağlayıcı oranı 0.50 ve bağlayıcı/agrega oranı 1/3 olarak sabit tutulmuştur. Zeolitler gözenekli yapıları nedeniyle yüksek su emme kapasitesine sahiptirler. Bu durum harç karışımlarında kullanılan suyun bir kısmının zeolit tarafından emilmesine ve dolayısıyla harcın işlenebilirliğinin azalmasına neden olur. İşlenebilirlik özelliği süper akışkanlaştırıcı ile sabit tutulmaya çalışılmıştır. Çalışmada toplamda 3 adet deney grubu hazırlanmıştır. Karışım oranlarına ait çizelge Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Süper akışkanlaştırıcı özellikleri(Superplasticizer properties)

Seri	Portland Çimento (g)	Zeolit (g)	Kalsine Zeolit (700°C) (g)	Kum (g)	Su / Bağlayıcı	Su (g)	Süper Akışkanlaştırıcı (g)
Z0	450	0	0	1350	0.5	225	0
Z15	382.5	67.5	0	1350	0.5	225	5.7
K7Z15	382.5	0	67.5	1350	0.5	225	5.7

Çimento yerine doğal ve kalsine zeolit ikamesi yapılan 50x50x50 mm boyutundaki numunelere TS EN 196-1 [32] standardına uygun olarak basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş olup, her deney serisi için 5 adet numune test edilmiştir. TS EN 196-1 standardına uygun olarak, harçların basınç dayanımı testinde yükleme hızı 2400 N/sn olarak alınmıştır.

Ultrases geçiş hızlarının ölçümü ASTM C597-02 [33] standardına uygun yapılarak denklem (1) yardımıyla hesaplanmıştır. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği Şekil 2'de verilmiştir.

$$V = \frac{S}{t} \times 10^3 \quad (1)$$

Burada;

V= Ultrases geçiş hızı (km/sn),

S= Ses dalgaları arasındaki uzaklık(m),

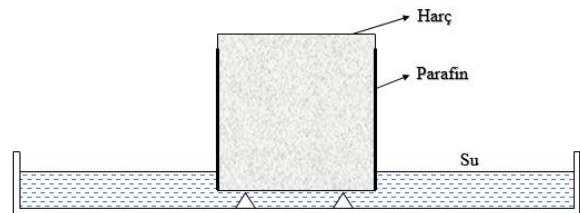
t= Dalganın iletim süresi (µs).

Kapiler su emme deneyinde, numunelerin kılcallık katsayısı TS 4045'e [34] uygun olarak hesaplanmıştır. Öncelikle numunelerin ağırlıkları sabit kalıncaya kadar 105°C'de etüvde kurutulmuştur. Numuneler sadece alt yüzeyden su emmesi için yan tarafları 10 mm'lik bir parafin ile kaplanmıştır.

Kapiler su emme deney düzeneği Şekil 3'te verilmiştir. Deney süresince, harç numunelerinin tabanından itibaren su seviyesi 3±1 mm olarak sabit tutulmuştur.

**Şekil 2.** Ultrases geçiş hızı deney düzeneği(Ultrasonic pulse velocity test setup)

Numuneler belirli sürelerde (1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196, 225, 256, 289, 324, 354, 1440 dk.) ağırlıkları tartılıp kılcallık katsayıları denklem (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

**Şekil 3.** Kapiler su emme deney düzeneği (Capillary water absorption test setup)

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (2)$$

Burada;

Q= Emilen su miktarı (cm³),

A= suya temas eden yüzey alanı (cm²),

k= Kılcallık katsayısı (cm/s^{1/2}),

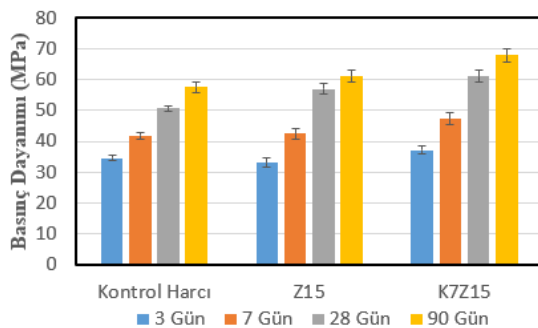
t= Zaman (sn)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Basınç Dayanımı (Compressive Strength)

Z15 karışımı üzerinde yapılan deneylerde, kontrol numunesine kıyasla 3 günlük basınç dayanımı değerlerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Ancak, 7 günlük basınç dayanımı değerleri kontrol numunesiyle benzer sonuçlar vermiştir. Doğal zeolit ile ikame edilen numunelerde erken dönemde kontrol numunesine göre daha düşük dayanımlar elde edilmiştir. Ancak, 28 ve 90 günlük süreçlerde bu numunelerin dayanımı kontrol numunesine kıyasla daha yüksek seviyelere ulaşmıştır.

Kalsine zeolit ikameli harçlar, doğal zeolit ikameli harçlara kıyasla daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olmuştur. Kalsine edilmiş zeolitinin ince öğütülmüş olması ve amorf yapıya dönüşmesinden kaynaklı hazırlanan harç numunelerinde puzolanik aktivitenin artmasıyla birlikte gözenekler ve mikro çatlaklar azalmaktadır. Bunun sonucu olarak kalsine edilmiş zeolit ikameli harçlar basınç dayanımıyla doğru orantılı olarak daha yüksek ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. Florez vd. yapmış oldukları çalışmada öğütme inceliğinin basınç dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir [35]. 700 °C’ de kalsine edilmiş %15 zeolit ikameli harç karışımı erken ve nihai dayanımlarda kontrol numunesine göre daha yüksek dayanım değerleri göstermiştir. Elde edilen 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Ramezaniyanpour vd. [16] ve Küçükyıldırım ve Uzal [29] yapmış oldukları çalışmayla benzerlik göstermiştir. Bu karışımın 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları 47.264 MPa, 61.06 MPa ve 67.88 MPa olarak ölçülmüştür. Numunelere ait basınç dayanımları Şekil 4’te sunulmuştur.



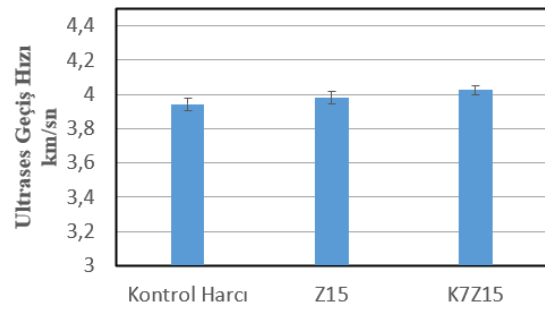
Şekil 4. Basınç dayanımı (Compressive strength)

3.2. Ultrases Geçiş Hızı (Ultrasonic Pulse Velocity)

Harç ve beton numunelerinde ölçülen dalga hızlarının, ilgili numunenin kompasitesi hakkında önemli bir fikir

sağlamaktadır. Harç ve beton numunelerinde yüksek ses geçiş hızı azalan boşluk oranı ile ilişkilendirilirken, azalan geçiş hızı artan boşluk içeriği ile ilişkilendirilir. Ses dalgaları, az boşluk içeren numunelerde daha hızlı ilerlediğinden, buna bağlı olarak daha yüksek değerler elde edilir.

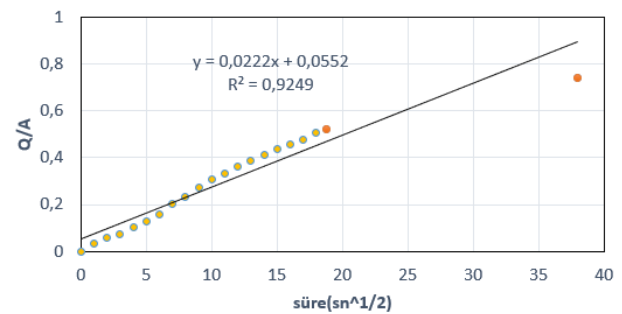
Kontrol numunesinin ultrases geçiş hızı 3,94 km/sn, %15 zeolit ikameli numunenin 3,98 km/sn ve kalsine edilmiş zeolit ikameli numunenin 4,03 km/sn olarak ölçülmüştür. Zeolitinin ince öğütülmesi ve amorf yapıya dönüşmesinden dolayı kalsine edilmiş zeolit ikameli harçlarda gözenekler azalmaktadır. Bu yüzden kalsine edilmiş zeolit ikameli harç numuneleri, kontrol ve doğal zeolit ikameli harç numunelerine göre ultrases geçiş hızı daha yüksek olarak ölçülmüştür. Numunelere ait ultrases geçiş hızları Şekil 5’te verilmiştir.



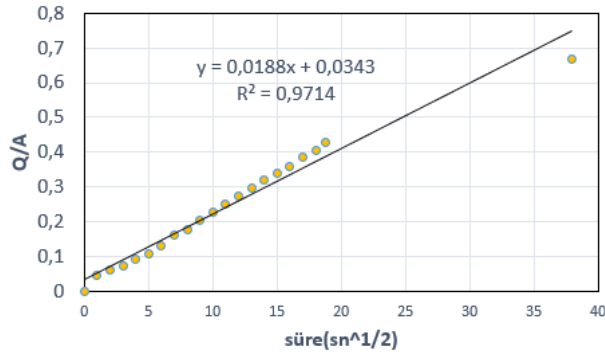
Şekil 5. Ultrases geçiş hızı (Ultrasonic pulse velocity)

3.3. Kapiler Su Emme Deneyi (Capillary Water Absorption Test)

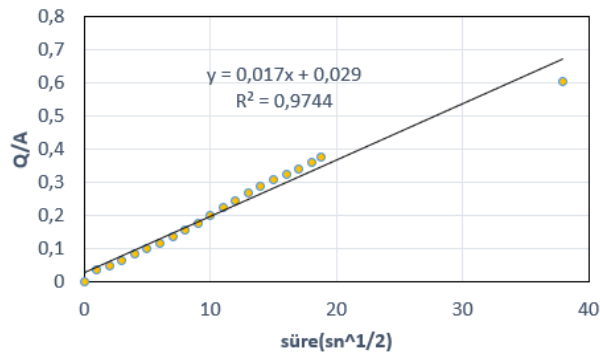
Her karışımından 5 adet 28 günlük numuneler belirtilen zamanlarda ağırlıkları tartılarak kılcallık katsayıları bulunmuştur. Kalsine edilmiş zeolit ikameli harç numunelerindeki boşluk oranının ve mikro çatlakların kontrol ve doğal zeolit ikameli harç numunelerine göre daha düşük olması, kılcallık katsayısının daha düşük olmasına neden olmuştur. Deney sonuçlarına ait grafikler Şekil 6-9’da yer almaktadır. Benzer olarak Ceylan vd. [7] yapmış oldukları çalışmada %15 mikronize zeolit ikameli betonların hidrasyon ürünlerinin beton arayüzeyini ve boşlukları doldurmasından dolayı kılcallık ve su emme değerlerinde daha olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Ayrıca Ahmadi ve Shekarchi [2] yapmış oldukları çalışmada da %15 zeolit ikameli beton numuneler kontrol numunesine göre daha düşük su emme değerlerine sahip olduğu bulunmuştur.



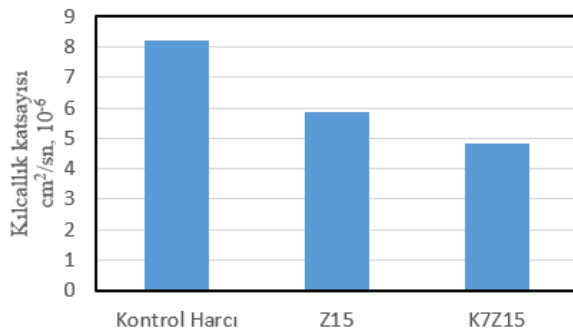
Şekil 6. Kontrol numunesi kapiler su emme deneyi (Capillary water absorption test of control specimen)



Şekil 7. %15 zeolit ikamelı harcın kapiler su emme deneyi (Capillary water absorption test of 15% zeolite substituted mortar)



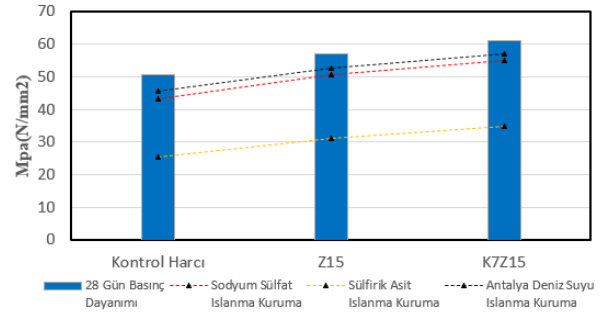
Şekil 8. K7Z15 harcın kapiler su emme deneyi (Capillary water absorption test of K7Z15)



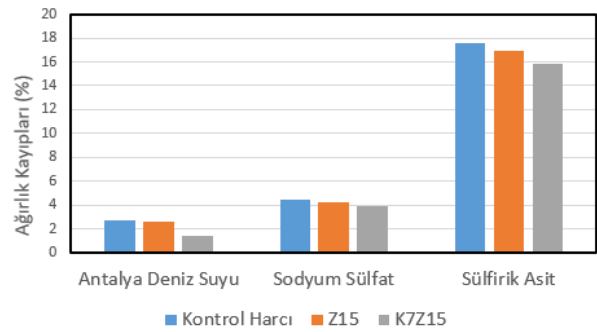
Şekil 9. Kılcallık katsayıları (Capillary coefficients)

3.4. Islanma Kuruma Deneyi (Wetting Drying Test)

Islanma kuruma deneyi, 50x50x50 mm boyutundaki numunelerin üzerinde 24 saat boyunca 105°C'lik bir etüvde kurutulması ve ardından ayrı ayrı %15 NaSO₄ (Sodyum Sülfat), %5 H₂SO₄ (Sülfirik Asit) ve Antalya deniz suyu ortamlarında bekletilmesiyle toplamda 10 ıslanma kuruma döngüsü uygulanarak basınç dayanımları ve ağırlık kayıpları ölçülmüştür. [36,37]. Harçların 28 günlük ve ıslanma kuruma çevrimi sonrası basınç dayanımları Şekil 10'da verilmiştir. Islanma kuruma çevrimi sonucunda ağırlık kayıpları Şekil 11'de verilmiştir. Ayrıca doğal zeolit ikamelı harç numuneleri kontrol harç numunelerine göre daha az ağırlık ve dayanım kaybına uğramıştır.

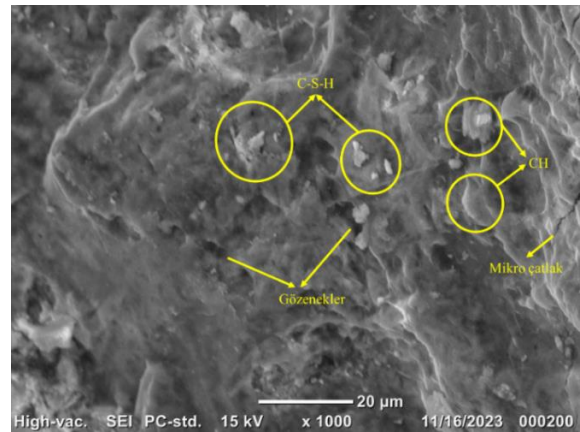


Şekil 10. Harçların 28 günlük ve ıslanma kuruma çevrimi sonrası basınç dayanımları (Compressive strength of mortars after 28 days and wetting-drying cycles)

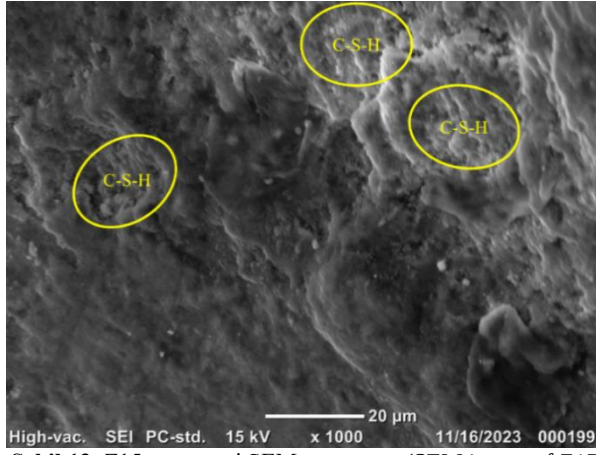


Şekil 11. Islanma kuruma çevrimi sonrası ağırlık kayıpları (Weight losses after wetting-drying cycle)

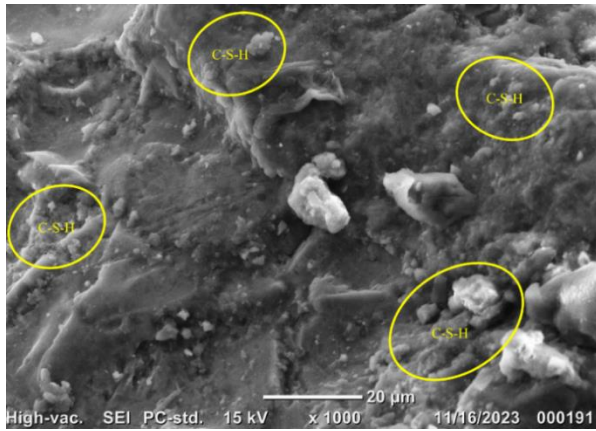
Şekil 12-14'te 28 günlük SEM analizleri incelenen numunelerde, çimentonun başlıca hidratasyon ürünlerinden kalsiyum hidroksit (portlandit) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) meydana geldiği görülmüştür. İnceleme sonuçlarına göre kontrol harçlarında daha fazla gözenek, mikro çatlak ve boşluklar olduğu gözlemlenmiştir ayrıca kalsine edilmiş zeolit ikamelı harçlarda C-S-H jellerinde arttığı görülmüştür. Bu nedenle kalsine edilmiş zeolit ikamelı harç numuneleri ıslanma kuruma deneylerinde bütün ortamlarda en iyi sonuçları vermiştir.



Şekil 12. Kontrol numunesi SEM görüntüsü (SEM image of control specimen)



Şekil 13. Z15 numunesi SEM görüntüsü (SEM image of Z15 specimen)



Şekil 14. K7Z15 numunesi SEM görüntüsü (SEM image of K7Z15 specimen)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Portland çimentosuna göre tanecik boyutunun daha küçük olması ve kalsinasyon işlemi uygulanması pozolanik aktiviteyi artırarak harçlarda; basınç dayanımı ve durabilite özellikleri açısından kontrol numunesine göre daha olumlu sonuçlar sağlamıştır.
- Zeolitin yüksek SiO₂ bulundurması, ince öğütülmüş ve amorf yapıda olması sebebiyle hidrasyon ürününden biri olan CH (kalsiyum hidroksit), C-S-H jeline dönüşerek harçlarda dayanım ve durabilite özelliklerini iyileştirdiği değerlendirilmektedir.
- Ultras ses geçiş hızı deneyine göre, kalsine edilmiş zeolit ikameli harçlarda daha yüksek geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, kalsine edilmiş zeolit ikameli harçların boşluk içeriğinin daha az olduğunu göstermektedir.
- Kapiler su emme deneyi sonuçlarına göre, kılcalık katsayısı en düşük değerler kalsine edilmiş zeolit ikameli harçlarda gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre, kalsine edilmiş zeolit ikameli harçların daha az geçirirli olduğu ve kılcal boşlukların daha düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir.
- Deniz suyuyla yapılan ıslanma kuruma çevriminde kontrol harcı basınç dayanımının %10,12'sini, zeolit ikameli harç %7,35'ini ve kalsine zeolit ikameli harç

%6,45'ini kaybetmiştir. %15 NaSO₄ içerikli suyla yapılan ıslanma kuruma çevriminde kontrol harcı basınç dayanımının %14,44'ünü, zeolit ikameli harç %11,05'ini ve kalsine zeolit ikameli harç %9,85'ini kaybetmiştir. %5 H₂SO₄ içerikli suyla yapılan ıslanma kuruma çevriminde Portland çimentolu harç basınç dayanımının %49,95'ini, zeolit ikameli harç %45,37'ini ve kalsine zeolit ikameli harç %43,11'ini kaybetmiştir.

- Islanma kuruma döngüsü sonucu ağırlık kayıpları basınç dayanımlarıyla doğru orantılı olarak gerçekleşmiştir. En fazla ağırlık kayıpları sülfürik asitteki ıslanma kuruma döngüsü sonrası oluşmuştur. Deniz suyu, sülfat ve asit ıslanma kuruma çevrimlerinde kalsine edilmiş zeolit, kontrol harcı ve ham zeolite göre daha az ağırlık kayıpları oluşmuştur. Durabilite açısından kalsine zeolit ikameli harçlarda daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak; zeolitin kalsinasyon işlemi sonucunda amorf yapıya dönüşmesi, mikron inceliğinde öğütülmesi ve yüksek SiO₂ içeriğine sahip olması pozolanik aktiviteyi artırarak harç numunelerinde dayanım ve durabilite özelliklerini iyileştirmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mustafa KOP: Literatür taramasını, deneylerin yapımını, sonuçların analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Salih YAZICIOĞLU: Literatür taramasını, sonuçların analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Iijima, A., "Geology of natural zeolites and zeolitic rocks", *Pure and Applied Chemistry Fifth*, 52(9), 2115-2130, (1980).
- [2] Ahmadi, B., Shekarchi, M., "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 134-141, (2010).
- [3] Islam, M. S., Mohr, B. J., VandenBerge, D., "Performance of natural clinoptilolite zeolite in the cementitious materials: A comparative study with metakaolin, fly ash, and blast furnace slag", *Journal of Building Engineering*, 53, 104535, (2022).
- [4] Toma, I. O., Stoian, G., Rusu, M. M., Ardelean, I., Cimpoeşu, N., Alexa-Stratulat, S. M., "Analysis of Pore

- Structure in Cement Pastes with Micronized Natural Zeolite”, *Materials*, 16(13), 4500, (2023).
- [5] Kazemian, M., Shafei, B., “Internal curing capabilities of natural zeolite to improve the hydration of ultra-high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, 340, 127452, (2022).
 - [6] Gottardi, G.; Galli, E., “Natural Zeolites”, *Springer*, Berlin/Heidelberg, Germany, Volume 18, ISBN 978-3-642-46520-8, (1985).
 - [7] Ceylan, S., Yazıcıoğlu, S., Turanlı, L., “Usage of micronized zeolite in high performed concrete”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 163-176, (2021).
 - [8] Kitsopoulos, K. P., Dunham, A. C., “Heulandite and mordenite-rich tuffs from Greece: a potential source for pozzolanic materials”, *Mineralium Deposita*, 31, 576-583, (1996).
 - [9] Janotka, I., Krajči, L. U., Dzivák, M. “Properties and utilization of zeolite-blended Portland cements”, *Clays and Clay Minerals*, 51(6), 616-624, (2003).
 - [10] Perraki, T., Kakali, G., Kontoleon, F. “The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement”, *Microporous and mesoporous materials*, 61(1-3), 205-212, (2003).
 - [11] Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M. M., Sümer, M., Yurdusev, M. A., “Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production”, *Cement and concrete research*, 34(5), 731-735, (2004).
 - [12] Martínez-Ramírez, S., Blanco-Varela, M. T., Ereña, I., Gener, M., “Pozzolanic reactivity of zeolitic rocks from two different Cuban deposits: Characterization of reaction products”, *Applied Clay Science*, 32(1-2), 40-52, (2006).
 - [13] Kontori, E., Perraki, T., Tsivilis, S., & Kakali, G., “Zeolite blended cements: evaluation of their hydration rate by means of thermal analysis”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96, 993-998, (2009).
 - [14] Snellings, R., Mertens, G., Hertsens, S., Elsen, J., “The zeolite-lime pozzolanic reaction: Reaction kinetics and products by in situ synchrotron X-ray powder diffraction”, *Microporous and mesoporous Materials*, 126(1-2), 40-49, (2009).
 - [15] Perraki, T., Kontori, E., Tsivilis, S., Kakali, G., “The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements”, *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 128-133, (2010).
 - [16] Ramezani pour, A. A., Kazemian, A., Sarvari, M., Ahmadi, B., “Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low Portland cement content and high durability”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(5), 589-596, (2013).
 - [17] Beers, A. E., van Bokhoven, J. A., De Lathouder, K. M., Kapteijn, F., Moulijn, J. A., “Optimization of zeolite Beta by steaming and acid leaching for the acylation of anisole with octanoic acid: a structure-activity relation”, *Journal of Catalysis*, 218(2), 239-248, (2003).
 - [18] Pérez-Ramírez, J., Kapteijn, F., Groen, J. C., Doménech, A., Mul, G., Moulijn, J. A., “Steam-activated FeMFI zeolites. Evolution of iron species and activity in direct N₂O decomposition”, *Journal of Catalysis*, 214(1), 33-45, (2003).
 - [19] Tao, Y., Kanoh, H., Abrams, L., Kaneko, K., “Mesopore-modified zeolites: preparation, characterization, and applications”, *Chemical reviews*, 106(3), 896-910, (2006).
 - [20] Duvarcı, Ö. Ç., Akdeniz, Y., Özmihçı, F., Ülkü, S., Balköse, D., Çiftçioglu, M., “Thermal behaviour of a zeolitic tuff”, *Ceramics International*, 33(5), 795-801, (2007).
 - [21] Ates, A., Hardacre, C., “The effect of various treatment conditions on natural zeolites: Ion exchange, acidic, thermal and steam treatments”, *Journal of colloid and interface science*, 372(1), 130-140, (2012).
 - [22] Habert, G., Choupay, N., Montel, J. M., Guillaume, D., Escadeillas, G., “Effects of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity”, *Cement and Concrete Research*, 38(7), 963-975, (2008).
 - [23] Perraki, T., Kakali, G., Kontori, E., “Characterization and pozzolanic activity of thermally treated zeolite”, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 82(1), 109-113, (2005).
 - [24] Liebig, E., Althaus, E., “Pozzolanic activity of volcanic tuff and suevite: effects of calcination”, *Cement and concrete research*, 28(4), 567-575, (1998).
 - [25] Johnson, M., O'Connor, D., Barnes, P., Catlow, C. R. A., Owens, S. L., Sankar, G., Stephenson, R., “Cation exchange, dehydration, and calcination in clinoptilolite: In situ X-ray diffraction and computer modeling”, *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(4), 942-951, (2003).
 - [26] Snellings, R., Mertens, G., Elsen, J., “Supplementary cementitious materials”, *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 74(1), 211-278, (2012).
 - [27] Seraj, S., Ferron, R. D., Juenger, M. C., “Calcining natural zeolites to improve their effect on cementitious mixture workability”, *Cement and Concrete Research*, 85, 102-110, (2016).
 - [28] Burris, L. E., Juenger, M. C., “Milling as a pretreatment method for increasing the reactivity of natural zeolites for use as supplementary cementitious materials”, *Cement and Concrete Composites*, 65, 163-170, (2016).
 - [29] Küçükıyldırım, E., Uzal, B., “Characteristics of calcined natural zeolites for use in 4 high-performance pozzolan blended cements”, *Construction and Building Materials*, 73(5), 229-234, (2014).
 - [30] Dayi, M., Aruntaş, H. Y., Çavuş, M., Şimşek, O., “Zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3), (2013).
 - [31] TS EN 197-1, “Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, (2012).
 - [32] TS EN 196-1, “Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini”, (2016).
 - [33] ASTM C597-02, “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, American Society for Testing And Materials, Philadelphia, (2009).
 - [34] TS 4045, Yapı Malzemelerinde Kapiler Su Emme Tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (1985).
 - [35] Florez, C., Restrepo-Baena, O., Tobon, J. I., “Effects of calcination and milling pre-treatments on natural zeolites as a supplementary cementitious material”, *Construction and Building Materials*, 310, 125220, (2021).
 - [36] Öner, A., Direr, S., Sevgül, T., “İslenme Kuruma Çevrimi-Dinamik Elastisite Modülü İlişkisi”, İzmit, Kocaeli Üniversitesi, (2014).
 - [37] Sefidehkhani, H. P., Şimşek, O., “Farklı oranlarda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonun bazı mühendislik özelliklerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 21(1), 83-91, (2018).