



Öğütülmüş Perlit Tozunun Alternatif Pozolan Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Investigation of the Usability of Ground Perlite Powder as an Alternative Pozzolan

Beyza Erkek^{1*}, Halit Yazıcı², Bayram Tutkun³

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

³ TU Wien, Institute of Material Technology, Building Physics, and Building Ecology Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vienna, AUSTRIA

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: beyzaerkek2@gmail.com

Öz

Yapı üretiminde yaygın olarak kullanılan çimentonun, yüksek maliyeti ve çevreye olumsuz etkileri dikkate alındığında alternatif pozolanik malzemelerin kullanılabilirliğinin araştırılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Alternatif bileşenlerin kullanımı, betonun maliyetini düşürmesine ek olarak mekanik, fiziksel ve mikro yapısı gibi birçok özelliğini geliştirmektedir. Betonun temel ve en pahalı bileşeni olan çimentonun, beton tasarımında tüketiminin azaltılması hem ekonomik hem de çevresel kazanımlar sağlamaktadır. Bu çalışmada Pomza Export firmasına ait genleştirilmiş perlit, bilyalı değirmende öğütülerek kullanılmıştır. Perlit tozu 45 µm elekten elenerek incelik hakkında fikir sahibi olunmuştur. Çimento yerine ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında perlit tozu ikame edilerek pozolan olarak kullanılabilirliği gözlemlenmiştir. Pozolanik aktivite, mukavemet deneyleriyle incelenmiştir. Kontrol numunesi ve dört farklı ikame oranı için harç karışımları hazırlanmıştır. Her bir numune için 7, 28 ve 90 günlük su kürü sonunda eğilme dayanımı deneyi ve eğilme dayanımı deneyi sonrası basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Ek olarak, 90 gün kür süreli numunelere birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır. Çimento yerine, ağırlıkça %40 oranına kadar öğütülmüş perlit ikamesiyle CEM I çimentosunun maliyetini düşürmek ve çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımını azaltmak mümkün gözükmektedir.

Anahtar Kelimeler: Pozolan, Perlit, Pozolanik aktivite

Abstract

Considering the high cost and negative environmental effects of cement, which is widely used in buildings, it is necessary to investigate the possibility of using alternative pozzolanic materials. In addition to reducing the cost of concrete, the use of alternative components improves many properties of concrete such as mechanical, physical, and microstructure. Since concrete is the main and most expensive component of concrete, reducing the consumption of cement in concrete design provides both economic and environmental advantages. In this study, expanded perlite from Pomza Export company was used by grinding in a ball mill. Perlite powder was sieved with a 45 µm sieve to get an idea of the fineness. Portland cement was replaced with 10%, 20%, 30%, and 40% by weight of ground perlite powder, and perlite substituted mortars were prepared. The usability of perlite powder as pozzolan was observed. The pozzolanic activity was investigated by strength tests. Mortar mixtures were prepared for the control sample and four different replacement rates. Flexural strength test and compressive strength test after flexural strength test were applied for each sample at the end of water curing for 7, 28, and 90 days. In addition, unit weight test was applied to the samples with 90 days of curing time. It seems possible to reduce the cost of CEM I cement and reduce the CO₂ emissions from cement production by replacing ground perlite up to 40% by weight instead of cement.

Keywords: Pozzolan, Perlite, Pozzolan activity

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Carbon dioxide released into the atmosphere in the production of cement used in the concrete industry and the environmental problems it brings have been the subject of study for alternative materials. The cement manufacturing industry is estimated to produce around 1.5 billion tons of greenhouse gases annually [1]. Reducing the use of Portland cement will help to develop sustainable concrete that is less costly and has better mechanical and durability properties [3]. Pozzolans are defined as silica and

aluminous materials that gain binding properties by combining with water and calcium hydroxide in a fine-grained structure. Pozzolans are defined as silica and aluminous materials that gain binding properties by combining with water and calcium hydroxide in a fine-grained structure [6]. Natural pozzolans are the product of volcanic activities. Artificial pozzolans are released during industrial production. Depending on the type and quantity, the use of mineral additives can provide advantages such as reduced consumption of Portland cement, improved

workability, lower permeability, higher durability, and strength [9]. Furthermore, pozzolanic materials can improve the sustainability of construction activities, and reduce maintenance costs and heat of hydration [10]. Perlite is a dense and glassy volcanic rock that becomes porous by expanding to approximately 7 to 25 times its original volume when heated at temperatures between 900 and 1100 °C [14]. The color of raw perlite can vary from light gray to shiny black, and when it expands, its color becomes completely white. Raw perlite shows hydraulic activity by chemical reaction with calcium-based binders, thanks to the siliceous and aluminum compounds it contains [15]. Perlite provides good heat and sound insulation thanks to its numerous micropores. Thus, perlite is used as aggregate in the production of lightweight mortars, concretes and insulation products [16]. In a study in which raw perlite was ground in a ball mill, Kaya stated that 5% and 10% raw perlite can be used as pozzolanic material in cement and it may be possible to reduce the cost of CEM I cement [18]. In another study, the specific surface area of perlite powder was increased from 3100 cm²/g to 3900 cm²/g, and the results showed that increasing the fineness of natural perlite can be an effective method to reactivate natural perlite powder and significantly improve its transport properties [3].

Materials and Methods

The CEM I 42.5 R cement used was obtained from Soma Cement Factory. Crushed limestone of 0-5 mm size with a specific gravity of 2.62 g/cm³ and a water absorption rate of 1.92% was used as fine aggregate. Expanded perlite from Pomza Export Company was used as mineral additive. The specific gravity of the ground perlite powder used in the study was 1.9 g/cm³. The perlite powder used in the study was obtained by grinding 3 kg of expanded perlite in a ball mill at 10000 cycles. In this study, expanded perlite was ground in a ball mill and its usability as pozzolan was investigated. Perlite powder was used as a pozzolanic additive by replacing 10%, 20%, 30% and 40% by weight to cement. The water/binder ratio of the mortars is 0.5. In the mortar mixtures, 1 unit of cement (binder), 3 units of sand and 0.5 units of water were used. The prepared mixtures were placed in 40x40x160 mm metal molds. The pozzolanic activity of perlite powder was investigated by strength tests. Flexural strength and compressive strength tests were performed according to TS EN 196-1. Flexural strength test and compressive strength test after flexural strength test were applied for each sample at the end of water curing for 7, 28, and 90 days. Additionally, a unit weight test was applied to the samples cured for 90 days. The mixtures were named P0, P10, P20, P30 and P40, respectively, according to the increasing ground perlite powder replacement rate. Five different mix recipes were prepared, including a control mix. Three flexural strength specimens were used for each replacement ratio. The values for flexural and compressive strength tests were averaged. The ground perlite powder (200 g) was wet sieved with a 45 µm sieve. At the end of the sieving, 8 grams (4%) of the powder remained on the sieve.

Results and Discussion

As the replacement of ground perlite powder in the mixtures increased, the spreading diameter of the mortars decreased. As the replacement ratio increased from P0 to P40, the spreading diameter decreased from 186 mm to 156 mm. Therefore, as the replacement rate of ground perlite powder increased, a decrease in workability was observed.

Specimens containing ground perlite powder had lower flexural strength values than the control specimen at early ages. According to the 7-day graph in Figure 1, this difference became

more pronounced as the replacement rate increased. From 7 days to 28 days, the highest strength increase was 66% and 95% in the P30 and P40 series, respectively. It can be said that the flexural strength averaged the same value as the control specimen up to 10% and 20% replacement at 28 days. Among the 90-day samples, the sample with 20% ground perlite powder replacement had the highest value. The lowest strength was given by the control and 40% replacement samples. All mortar mixtures showed an increase in strength compared to 28 days. There was a 15%, 33%, 38%, 12% and 14% strength increase in P0, P10, P20, P30 and P40 samples in 90 days compared to 28 days, respectively. Compared to the control sample, the highest strength increase was 14% in the P30 sample at 28 days and 20% in the P20 sample at 90 days.

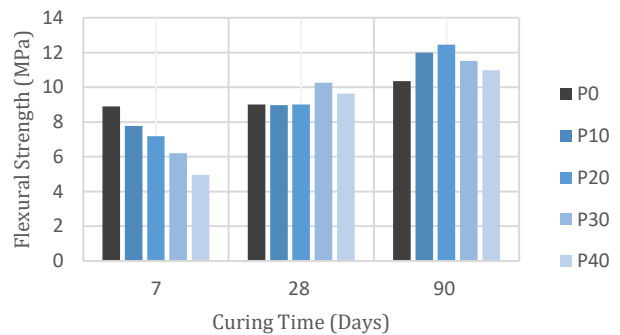


Figure 1. Effect of perlite replacement ratio on flexural strength

In Figure 2, all values in the 7th-day graph were below the control specimen. In addition, the compressive strength decreased as the replacement rate of ground perlite powder increased. When Figure 2 is analyzed, the amount of strength gain of the series between 7 days and 28 days is higher than that between 28 days and 90 days. P40 was the series with the highest strength increase from 7 days to 90 days. All mortar samples showed an increase in compressive strength values at 90 days compared to 28 days. The strengths of P0, P10, P20, P30 and P40 specimens increased by 14%, 5%, 15%, 17% and 26% respectively.

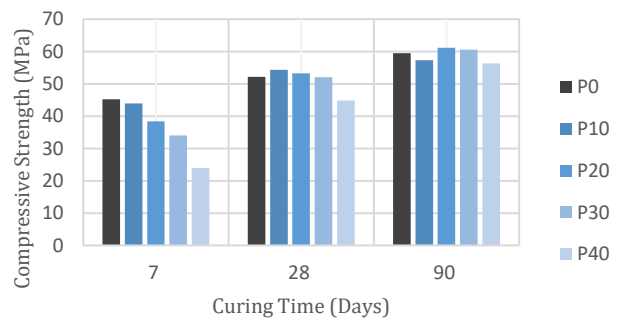


Figure 2. Effect of perlite replacement ratio on compressive strength.

While all series give unit weight values close to each other, lower unit weight values were obtained in the P40 series. The specific gravity of ground perlite powder is lower than the specific gravity of cement. Therefore, the unit weight decreased as the replacement ratio increased.

Conclusion

At early ages, the control samples, which used only cement, showed higher strengths than the samples containing ground perlite powder. At later curing times, the samples containing

ground perlite powder overtook control samples. Mortar mixtures incorporating ground perlite powder had almost the same compressive strength and flexural strength as the control mixtures, especially at the age of 90 days. When the values for flexural strength at 7 and 90 days were examined, it was observed that the use of ground perlite powder increased the strength at later ages. In the early age graphs of compressive strength, all values were below the values of the control samples. At later ages, P20 and P30 samples reached almost the same level as the control samples. The P20 series showed the best compressive strength results in both 28 and 90 days. The compressive strengths of the P40 samples were lower at all curing times. The samples showed good results in terms of compressive strength up to 20% replacement at 7 days, 30% replacement at 28 days, and 40% replacement at 90 days. In the flexural strength results, similar results to the control sample

were obtained at all replacement rates at 28 and 90 days. While ground perlite powder's effect on the strength gain of mortars was generally lower at early ages, the strength increased at later ages. There are some factors in the positive development of substituted mortar strengths. It is seen that the ground perlite powder has a pozzolanic reaction. It should be noted that the most important factor is the high SiO₂ content of perlite. It is thought that the ground dry perlite powder may have an effect on the strength development by locally reducing the water/binder ratio by absorbing the mixing water in the fresh state, and by the internal curing effect over time with the water it absorbs. In addition to these effects, the binder volume in the mixture increased slightly due to the lower specific gravity of the ground perlite powder replacement by weight instead of cement. This volume increase also positively affected strength development.

1. Giriş

Her yıl, normal Portland çimentosu üretimi dünya çapında %9 artmaktadır ve bu artış oranı, çimento üretim sürecinde atmosfere salınan büyük miktardaki karbondioksit nedeniyle çevre için çok büyük bir risk oluşturmaktadır [1]. Çimento üretimi, dünyadaki CO₂ emisyonunun %8'inden sorumludur [2]. Çimento üretim endüstrisinin yılda yaklaşık 1.5 milyar ton sera gazı ürettiği tahmin edilmektedir [1]. Beton endüstrisinin önemli çevresel etkilerini azaltmaya yardımcı olacak olası bir çözüm, beton karışım tasarımında kullanılan Portland çimentosunun bir kısmının ek çimentolu malzemelerle değiştirilmesidir [3]. Bunların yanı sıra çimento endüstrisinde enerji kullanımı, durabilite sorunları, çevresel etki ve beton yapıların ömür boyu maliyeti açısından puzolanik malzemelerin kullanımı önem taşımaktadır [4]. Bu nedenle, doğal puzolanlar gibi mevcut olan ve düşük fiyatlı ek çimentolu malzemelerin yerel kaynaklarını bulmak, beton endüstrisinin geleceği için çok önemlidir [5]. Portland çimentosu tüketiminin azaltılması, daha az maliyetli, daha iyi mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olan sürdürülebilir betonun geliştirilmesine yardımcı olacaktır [3].

Puzolanlar, doğal halde bağlayıcılığı olmayan veya çok az bağlayıcılık gösteren, ince taneli yapıda ise su ve kalsiyum hidroksitle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanan silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanırlar [6]. Puzolanlar, doğal ve yapay kategoriler olarak sınıflandırılırlar. Doğal puzolanlar volkanik faaliyetlerin ürünüdür ve kil, şeyl, laterit, boksit, kaolinit, volkanik cam, pomza, riyolit, tüf, zeolit, diatomit ve volkanik kül gibi doğal kayalar veya volkanik tortuları içerir [5]. Yapay puzolanlar ise endüstriyel üretim sırasında ortaya çıkan uçucu kül, silis dumanı ve cüruf gibi yan ürünlerdir [7]. Ancak bu puzolanlarla ilgili sorun, bazı bölgelerde ya nadiren bulunmaları ya da maliyetli olmalarıdır [5]. Volkanik lavların hızlı soğuması sonucu oluşan cam yapıya (kristal) sahip perlit gibi bazı doğal puzolanların kaynakları bol miktarda mevcuttur ve endüstriyel projelerde başarıyla kullanılmaktadır [5]. Puzolanlar, günümüzde düşük hidratasyon ısı, alkali silika reaksiyonu, geçirimsizlik ve sülfat dayanımı gibi avantajları sayesinde harç ve beton karışımlarında kullanılmaktadır [4]. Sonuç olarak, çimentoaya eklenen mineral katkıları; sera gazı salınımının azaltılması ile doğal kaynakların ve çevrenin korunması, ekonomi ve enerji tasarrufu sağlanması, hidratasyon ısısının azalması ve dayanımın zamanla artması gibi faydalar sağlayabilmektedir ve ayrıca erken dayanımlarda görülebilen azalma, çimentoyu daha ince öğütürük veya klinker özelliklerini değiştirerek çözülebilmektedir [8].

Literatürde çimento ve beton endüstrisinde mineral katkıların kullanımının faydalarını tartışan çok sayıda yayın bulunmaktadır. Türüne ve miktarına bağlı olarak katkıların kullanımları ile Portland çimentosu tüketiminde azalma, iyileştirilmiş işlenebilirlik, daha düşük geçirgenlik, daha yüksek dayanıklılık ve mukavemet gibi avantajlar elde edilebilir [9]. Ayrıca, puzolanik malzemeler betonun dayanıklılığını artırabilir, inşaat faaliyetlerinin sürdürülebilirliğini geliştirebilir, bakım maliyetlerini azaltabilir ve son olarak, hidratasyon ısısını azalttığı için puzolanik çimento kullanılarak termal çatlama önenebilir [10]. Erken dayanımın düşük olması ve soğuk havalarda priz süresinin gecikmesi dikkat edilmesi gereken önemli hususlardandır [6]. Çimento üretimi sırasında toplam elektrik enerjisi tüketiminin %50'sinden fazlası hammadde ve klinkerin öğütülmesi için kullanıldığından, Portland çimentosu tüketimindeki azalma, kalsinasyon ve öğütme sırasında daha düşük enerji tüketimi sayesinde CO₂ salınımını ve maliyeti azaltmaya yardımcı olacaktır [9]. Puzolanik etkisi olmayan katkıların bile ince öğütülmüş halde harç ve betonda su ihtiyacını azalttıkları, hidratasyonu hızlandırdıkları ve gözenekleri tıkayarak dayanıklılığı artırdıkları bildirilmiştir [8].

Puzolanlar, Portland çimentosunun kalsiyum-silikat bileşiklerinin hidratasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girebilen alüminosilikat malzemelerdir. İnce öğütülmüş puzolan, Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda meydana çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girer ve bu reaksiyon sonucunda bağlayıcı özelliği olan C-S-H jelinin miktarı artmış olur [11].

Malzemenin puzolanik aktivitesi, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girme kabiliyetidir. Bu reaksiyon sonunda portlandit (Ca(OH)₂) miktarı azalır, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) artar [12]. Puzolanik malzemenin birleşebileceği toplam kalsiyum hidroksit miktarı, puzolandaki reaktif fazın doğasına ve içeriğine, reaktif fazların SiO₂ içeriğine, kalsiyum hidroksit ve puzolan oranına ve kürlenme süresine bağlıdır [13]. Puzolanik malzemenin kalsiyum hidroksit ile reaksiyon hızı, puzolanın özgül yüzey alanına, su/katı oranına ve Portland çimentosundaki alkali içeriğine ve sıcaklığa bağlıdır [13].

Perlit doğal olarak oluşan yoğun, camsı, 900 ile 1100 °C arasındaki sıcaklıklarda ısıtıldığında, orijinal hacminin yaklaşık 7 ile 25 katına kadar genişleyerek gözenekli yapı kazanan volkanik bir kayadır [14]. Genleşen bu taneler bir köpük agregasına dönüşür ve bu ürüne genleşmiş perlit denir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişebilmektedir ve genleştiğinde rengi tamamen beyazlaşır [15]. Ham perlit,

bünyesinde bulundurduğu silisli ve alüminyumlu bileşikler sayesinde kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik aktivite gösterir ve bu özelliği sayesinde inşaat sektöründe birçok alanda kullanılmaktadır [15]. Perlitteki çok sayıda mikro gözenek hafiflik, ısı ve ses yalıtımı gibi özellikleri sağlar ve bu sayede geliştirilmiş perlit yapı endüstrisinde hafif harçlar, betonlar ve yalıtım ürünleri vb. üretiminde agrega olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [16].

Genleştirilmiş perlit; sahip olduğu fiziksel esneklik, düşük ses geçirgenliği, düşük yoğunluk, kimyasal sabitlik ve ateşe karşı dayanım gibi yapısal özellikleriyle birçok kullanım alanı sağlamıştır [17]. Genleştirilmiş perlit, başlıca inşaat sektörü olmak üzere izolasyon malzemelerinde, perlitli sıvalarda, perlit agregalı hafif yalıtım betonlarında, perlit agregalı hafif yapı elemanlarında, gevşek dolgu malzemelerinde, yüzey döşemelerinde ve özel amaçlı yapılarda kullanıldığı gibi tarım ve sanayi sektöründe de kullanılmaktadır [17].

Kaya [18], ham perlitli bilyalı değirmende öğütürerek kullandığı bir çalışmada %5 ve %10 ham perlitin çimentoda puzolanik malzeme olarak kullanılabilmesini ve CEM I çimentosundan kaynaklı maliyeti düşürmenin mümkün olabileceğini belirtmiştir. Bir başka çalışmada doğal perlitin öğütülmesinin etkinliği araştırılmış, bu bağlamda perlit tozunun özgül yüzey alanı 3100 cm²/gr'den 3900 cm²/gr'ye çıkarılmıştır ve sonuçlar, doğal perlitin inceliğini artırmanın, doğal perlit tozunu yeniden etkinleştirmek için etkili bir yöntem olabileceğini ve taşıma özelliklerini önemli ölçüde geliştirebileceğini göstermiştir [3]. Karışımların 28 ve 91 günlük yaşlar arasındaki taşıma özelliklerinde önemli bir gelişme olması, perlit tozunun puzolanik etkisinin daha uzun yaşlarda spesifik yüzey alanının artmasıyla daha önemli hale geldiğini göstermiştir [3]. Erdem vd. [9] yaptığı çalışmada perlit ikame edilmiş çimentolar, Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında özellikle erken yaşlarda dayanım kayıplarına neden olabildiğini ancak, katkılı çimentolarda perlitin devam eden puzolanik reaksiyonları nedeniyle farkların ilerleyen yaşlarda küçüldüğünü belirtmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilmiş perlit, bilyalı değirmende öğütülerek puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Puzolanik madde olarak çimentoya ağırlıkça belli oranlarda ikame yoluyla kullanılmıştır. Perlit tozunun puzolanik aktifliği mukavemet deneyleriyle yorumlanmıştır. Perlitin puzolanik aktivitesini etkileyen kriterlerin geliştirilmesi ve puzolanik kullanımının yaygınlaşması amaçlanmıştır. Böylece, beton endüstrisindeki çimento kullanımının ve çimentonun neden olduğu CO₂ salınımının azaltılmasında çözüm olabileceği düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Malzemeler

2.1.1 Çimento

Bu çalışmada Soma Çimento Fabrikası'nda üretilen CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de, fiziksel özellikleri ise Tablo 2'de sunulmuştur.

2.1.2 Perlit

Bu çalışmada Pomza Export firmasına ait geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan öğütülmüş perlit tozunun özgül ağırlığı 1.9 g/cm³'tür. Malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri, malzemenin temin edildiği firmadan alınmıştır. Çalışmada kullanılan perlit tozu, 1.5 kg geliştirilmiş perlitin bilyalı değirmende 10000 devir öğütülmesiyle elde edilmiştir.

Tablo 1. Çimento ve perlitin kimyasal özellikleri.

Table 1. Chemical properties of cement and perlite.

Kimyasal Bileşim (%)	Çimento	Perlit
SiO ₂	19.79	73.46
Al ₂ O ₃	4.78	12.00
Fe ₂ O ₃	3.39	1.19
TiO ₂	-	0.092
CaO	63.71	0.62
MgO	1.78	0.06
Na ₂ O	0.32	2.60
K ₂ O	0.78	5.14
P ₂ O ₅	-	0.01
SO ₃	2.84	-
Cl	0.0089	-
Kızdırma kaybı	2.09	-

2.1.3 Agregada ve su

Çalışmada ince agrega olarak, özgül ağırlığı 2.62 g/cm³ ve su emme oranı %1.92 olan 0-5 mm boyutunda kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Elek analizi Tablo 3'teki gibidir. Laboratuvardaki tüm çalışmalar boyunca İzmir şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 2. Çimentonun fiziksel özellikleri.

Table 2. Physical properties of cement.

	Miktar
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3954
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.10
Priz başlangıcı (dk)	185
28 günlük dayanım (MPa)	49.8

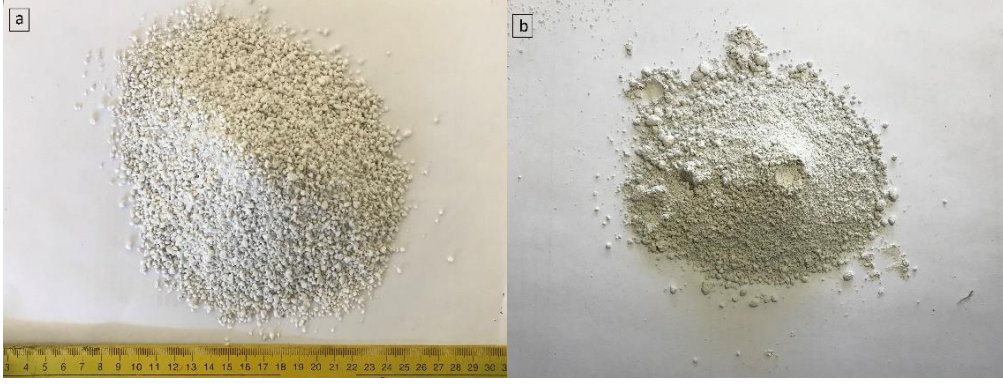
Tablo 3. Agregada elek analizi.

Table 3. Sieve analysis of fine aggregate.

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
4	94
2	65
1	46
0.5	34
0.25	25
Elek altı	0

2.2. Deneysel çalışma

Hazırlanan harç numunelerinin puzolanik aktivitesini gözlemlemek için eğilme dayanımı ve eğilme sonrası basınç dayanımı deneyi yapılmıştır (Şekil 4). Puzolan olarak kullanabilmek için 1.5 kg perlit, hızı 60 devir/dk olan bilyalı değirmende 10000 devir öğütülmüştür. Perlit, öğütülmeden önce



Şekil 1. a) Genleştirilmiş perlit, b) öğütülmüş perlit.

Figure 1. a) Expanded perlite, b) ground perlite.

100 °C etüvde 24 saat beklemiştir. Ayrıca perlit tozu da harç numunelerinin dökümünden önce aynı şekilde etüvde kalmıştır. Karışımlarda çimento, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında öğütülmüş perlit tozu ile yer değiştirmiştir. Kontrol numunesi ve artan öğütülmüş perlit tozu ikame oranına göre karışımlar sırasıyla P0, P10, P20, P30 ve P40 olarak adlandırılmıştır. Kontrol karışımı da dahil olmak üzere beş farklı karışım reçetesi elde edilmiştir (Tablo 4). Her bir ikame oranı için üç adet eğilme dayanımı numunesi kullanılmıştır. Eğilme dayanımından sonra ikiye parçaya ayrılan tüm numunelere basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için değerlerin ortalaması alınmıştır. Öğütülmüş perlit tozu içeren harç numunelerinin ortalama dayanımını, kontrol harç numunelerinin ortalama dayanımına bölünerek yüzde cinsinden bağıl dayanım grafiği elde edilmiştir. Ayrıca öğütülen perlit 200 g tartılarak 45 µm elek ile ıslak eleme yapılmıştır. Eleme sonunda alınan tozun 8 gramı yani %4'ü elek üstünde kalmıştır.

Harçların hazırlanmasında su/toplam bağlayıcı oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur. 1 birim çimento (bağlayıcı), 3 birim kum ve 0.5 birim su kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranını 0.5 tutabilmek için kullanılan 0-5 mm ince agreganın su emmesi de göz önünde bulundurulmuştur. Hazırlanan karışımlar, 40x40x160 mm'lik metal kalıplara yerleştirilmiş ve üstleri kapalı şekilde bir gün laboratuvar ortamında bekledikten sonra kalıplar sökülerek kür havuzuna yerleştirilmiştir. Numuneler, kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün boyunca kür sürecini tamamlamıştır. Günü gelen numunelere, kuru yüzey doygun haldeyken önce eğilme dayanımı deneyi ardından basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Aynı boyutlarda hazırlanan 90 gün kür süreli numunelerin, kuru haldeki birim hacim ağırlıkları verilmiştir (Tablo 5). Şekil 2'de 40x40x160 mm boyutlarında öğütülmüş perlit tozu ikameli harç karışım örneklerinin görseli bulunmaktadır.



Şekil 2. Harç örnekleri.

Figure 2. Mortar samples.

Tablo 4. Harç bileşenleri ve miktarları.

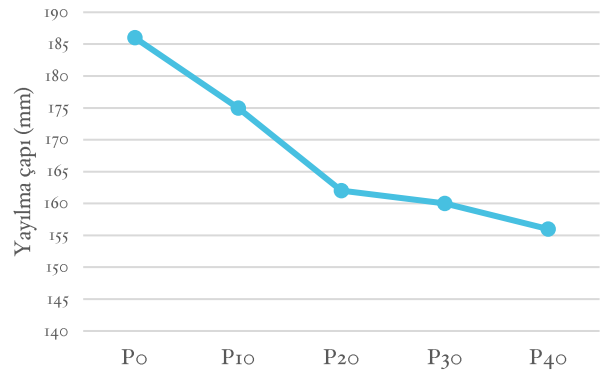
Table 4. Quantity of mortar components.

Bileşen (g)	P0	P10	P20	P30	P40
Çimento	450	405	360	315	270
Perlit Tozu	-	45	90	135	180
Agrega	1350	1350	1350	1350	1350
Su	251	251	251	251	251

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yayılma çapı

Yayılma çapı, yayılma tablası ile toplam 15 düşürme yapılarak ölçülmüştür. Karışımlarda öğütülmüş perlit tozu ikamesi arttıkça harçlarda yayılma çapında azalma olmuştur. Şekil 3'e göre, P0'dan P40'a ikame oranı arttıkça yayılma çapı 186 mm'den 156 mm'ye düşmüştür. Dolayısıyla öğütülmüş perlit tozu ikame oranı arttıkça işlenebilirlikte bir miktar azalma görülmüştür.

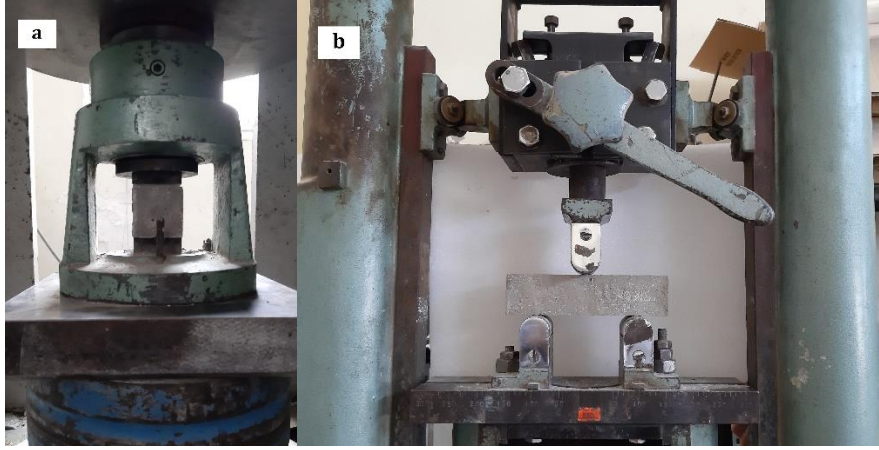


Şekil 3. Karışımların yayılma çapı değerleri

Figure 3. Flow diameter of mortar mixtures

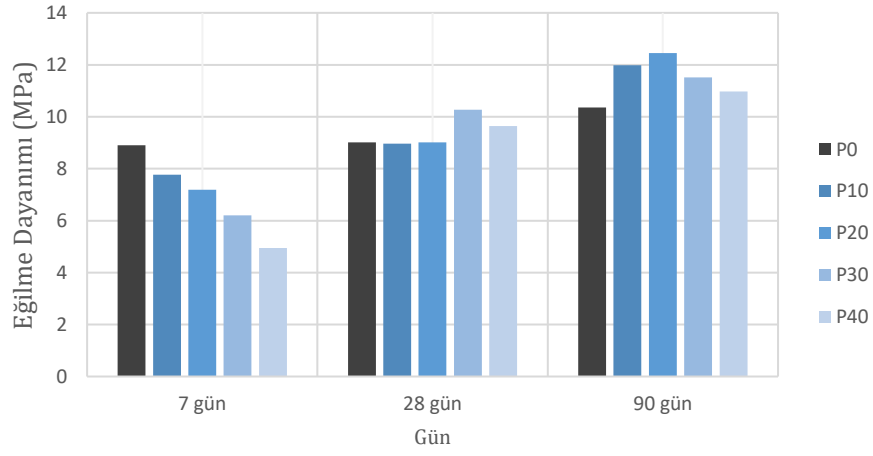
3.2. Eğilme dayanımı deneyi

Her bir harç karışım serisinden üç adet numuneye TS EN 196-1'e göre eğilme dayanımı testi yapılmıştır. Beklendiği üzere öğütülmüş perlit tozu ikameli numuneler erken yaşlarda kontrol numunesine göre daha düşük eğilme dayanımı değerleri vermiştir. Şekil 5'te 7 günlük grafiğe göre ikame oranı arttıkça bu fark belirginleşmiştir. 7 günlük kür süresinden 28 güne geçerken en yüksek dayanım artışı P30 ve P40 serilerinde sırasıyla %66 ve %95 olmuştur. Eğilme dayanımının, 28 günde %10 ve %20



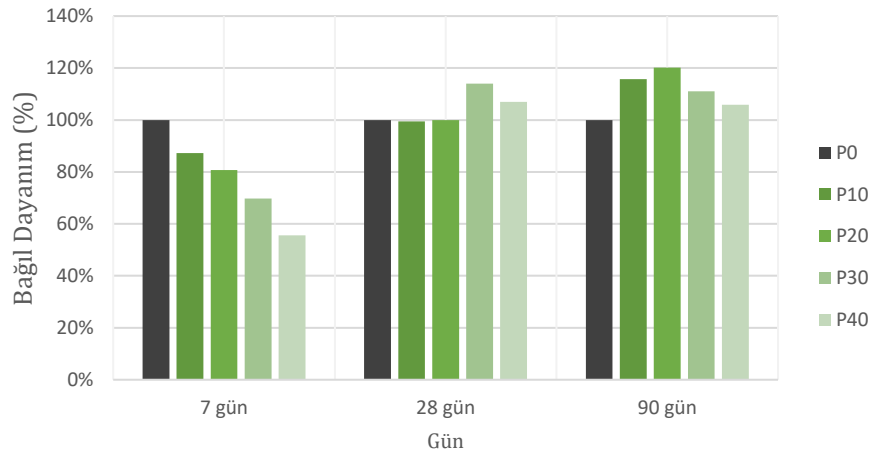
Şekil 4. a) Basınç dayanımı deneyi, b) üç noktali eğilme dayanımı deneyi.

Figure 4. a) Compressive strength test, b) three-point flexural strength test.



Şekil 5. Perlit ikame oranının eğilme dayanımına etkisi.

Figure 5. Effect of perlite replacement ratio on flexural strength.

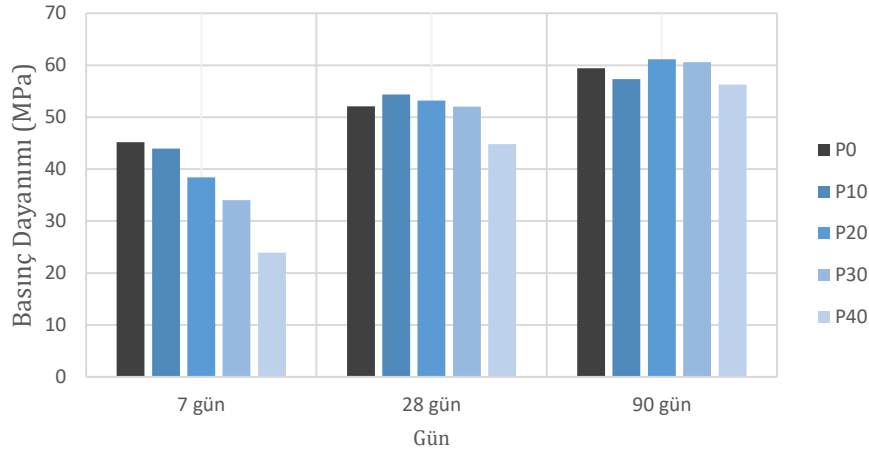


Şekil 6. Kontrol numunesine kıyasla eğilme dayanımı gelişimi.

Figure 6. Improvement of flexural strength compared to the control sample.

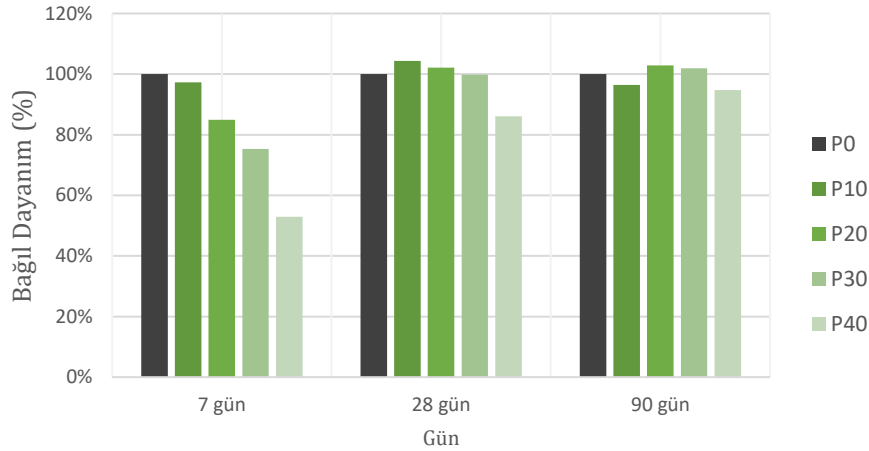
ikameye kadar kontrol numunesiyle aynı değer ortalamasında olduğu söylenebilir. P30 serisi, 28 günde kontrole kıyasla %14 daha fazla eğilme dayanımı göstermiştir ve P40 serisi 9.64 MPa dayanımla kontrol ile P30 serisi arasında bir değer vermiştir. Kontrol numunesi, 90. günde 28 güne kıyasla %15 dayanım artışı göstermiştir. 90 günlük numuneler içinde en yüksek değeri %20 öğütülmüş perlit tozu ikameli numune vermiştir. En düşük dayanımı ise birbirine yakın değerlerle kontrol ve %40 ikameli

numuneler vermiştir. Tüm harç karışımları 28 güne kıyasla dayanımlarda artış göstermiştir. Sırasıyla P0, P10, P20, P30 ve P40 numuneleri 28 güne kıyasla 90 günde %15, %33, %38, %12 ve %14 dayanım artışı olmuştur. Şekil 6'daki bağlı grafiğe bakıldığında kontrole kıyasla 28 günde en yüksek dayanım artışı %30 ikameli numunede %14, 90 günde ise %20 ikameli numunede %20 olmuştur.



Şekil 7. Perlit ikame oranının basınç dayanımına etkisi.

Figure 7. Effect of perlite replacement ratio on compressive strength.



Şekil 8. Kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımı gelişimi.

Figure 8. Improvement of compressive strength compared to the control sample.

3.3. Basınç dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı deneyinden sonra iki parçaya ayrılan numunelere TS EN 196-1'e göre basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Şekil 7'de, 7. gün grafiğinde görüldüğü üzere tüm değerler kontrol numunesinin altında kalmıştır ve öğütülmüş perlit tozu ikame oranı arttıkça dayanım azalmıştır. Kontrol numunesi ise 28 günde 6.9 MPa ve 90 günde 7.3 MPa dayanım kazanmıştır. Şekil 7 incelendiğinde serilerin 7 gün ile 28 gün arası dayanım kazanma miktarı 28 gün ile 90 gün arasındakine göre daha fazladır. P40, 7 günden 90 güne geçişte en yüksek dayanım artışı gösteren seri olmuştur ve 23.9 MPa'dan 56.3 MPa'ya iki kattan fazla dayanım artışı göstermiştir. Şekil 8'de, eğilme dayanımına kıyasla basınç dayanımı değerlerinde 28 günde P40 numunesi kontrol numunesine göre bağlı olarak %14 altında

kalmıştır. P10, P20 ve P30 numuneleri ise kontrol numunesine yakın basınç dayanımı değerleri vermişlerdir. Yine aynı şekilde tüm harç karışımı örnekleri 28 güne kıyasla 90 günde basınç dayanımı değerlerinde artış göstermişlerdir. Sırasıyla P0, P10, P20, P30 ve P40 numunelerinin dayanımları %14, %5, %15, %17 ve %26 oranlarında artmıştır.

3.4. Birim hacim ağırlık

Tablo 5'te göre tüm seriler birbirine yakın BHA değerleri verirken, P40 serisi ile daha düşük değerler elde edilmiştir. Öğütülmüş perlit tozunun özgül ağırlığı çimentonunkine kıyasla daha düşük olduğu için ikame oranı arttıkça BHA değerleri düşmüştür.

Tablo 5. 90 gün kür süreli numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları.**Table 5.** Dry unit weights of samples with 90 days of curing period.

	BHA (g/cm ³)
P0	2.11
P10	2.12
P20	2.13
P30	2.10
P40	2.04

4. Sonuçlar

Erken yaşlarda sadece çimento kullanılan kontrol numuneleri, öğütülmüş perlit tozu içeren numunelere kıyasla daha yüksek dayanımlar verirken ilerleyen kür sürelerinde öğütülmüş perlit tozu içeren numuneler kontrol numunelerini yakalayarak geçmiştir. Öğütülmüş perlit tozu içeren harç karışımları, özellikle 90 günde, kontrol karışımları ile neredeyse aynı basınç ve eğilme dayanımına sahiptir. Eğilme dayanımı için 7 ve 90 günde değerler incelendiğinde öğütülmüş perlit tozu kullanımının ileriki yaşlarda dayanımı artırdığı görülmüştür. Basınç dayanımı erken yaş grafiklerinde, tüm değerler kontrol numunesinin altında kalmıştır. İleriki yaşlarda yani 90 günde P20 ve P30 numuneleri, kontrol numunesiyle neredeyse aynı seviyeye gelmişlerdir. P20 serisi hem 28 hem 90 günde en iyi basınç dayanımı sonuçlarını vermiştir. P40 numunelerinin basınç dayanımları tüm kür sürelerinde daha düşük seyretmiştir. Numuneler, 7 günde %20, 28 günde %30 ve 90 günde %40 ikameye kadar basınç dayanımı açısından iyi sonuçlar vermişlerdir. Bu durum ikame oranı arttıkça ileri yaşlardaki dayanım gelişiminin önemini göstermektedir. Eğilme dayanımı sonuçlarında ise 28 ve 90 günde tüm ikame oranlarında kontrol numunesine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Öğütülmüş perlit tozunun, harçların dayanım kazanımına olan etkisi genel olarak erken yaşlarda daha düşükken, sonraki yaşlarda dayanımlar artmıştır. İkameli harç dayanımlarının, olumlu yönde gelişmesinde bazı etkenler bulunmaktadır. Öğütülmüş perlit tozunun puzolanik reaksiyon yaptığı görülmektedir. Burada en önemli faktörün, perlitin sahip olduğu yüksek SiO₂ içeriği olduğu belirtilmelidir. Öğütülmüş kuru perlit tozunun, taze halde karışım suyunu bir miktar emmesiyle su/bağlayıcı oranını lokal azaltarak ve bünyesine çektiği su ile zamanla içsel küreleme etkisiyle de dayanım gelişimine etkisi olabileceği düşünülmektedir. Bu etkilerin yanı sıra çimento yerine ağırlıkça ikame edilen öğütülmüş perlit tozunun özgül ağırlığının daha düşük olması sebebiyle karışım da bağlayıcı hacmi bir miktar artmıştır. Bu hacim artışı da dayanım gelişimini olumlu yönde etkilemiştir. Sonuç olarak öğütülmüş perlit tozunun çimentoya ağırlıkça ikamesiyle harçların işlenebilirliğinde ve birim hacim ağırlığında azalma, basınç ve eğilme dayanımında ise kayda değer bir gelişme görülmüştür. Öğütülmüş perlitin ileri yaşlardaki puzolanik aktivitesi göz önünde bulundurulduğunda, 10000 devir öğütülmüş ve %96'sı 45 µm elekten geçen perlitin, çimentoya katkı malzemesi olarak kullanılmasının dayanım açısından iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Erdem vd. [9], yaptıkları çalışmada aynı incelikte perlit içeren harçların dayanımları karşılaştırıldığında %20 ikamenin %30 ikameye göre daha yüksek dayanımlar elde ettiğini belirtmişlerdir. 80 µm'de eleme perlit tozunun kullanıldığı başka bir çalışmada ise betonun mekanik özelliklerini iyileştirmede çimentonun en iyi ikame oranlarının %10 ve %20 söylenmiştir [19]. Dolayısıyla,

öğütülmüş perlit tozu ikamesiyle CEM I çimentosundan kaynaklı maliyeti düşürmek ve CO₂ salınımını azaltmak mümkün olacaktır. Puzolan kullanımının çeşitlendirilmesi ve yaygınlaştırılması ile çimento kullanımında tasarruf ile hem çevreci hem de ekonomik yapılar inşa edilebilecektir. Öğütülmüş perlit tozu ikamesinin, olumlu yönlerine karşı durabilite sorunlarına yol açmadığı incelenmeye devam edilmelidir. Portland çimentosunun bir kısmının doğal puzolanlar ile ikame edilmesi, beton endüstrisinin karbon ayak izini ve inşaat maliyetlerini azaltmak ve genel anlamda beton dayanıklılığını artırmak için etkili bir çözüm olabilir [3].

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, perlit temini için Pomza Export Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ve Ümit ÜRÜN'e, ayrıca çimento ve agrega temini için Dere Beton'dan Raif EVLEK'e teşekkürlerini sunar. Bu çalışma, yazarlardan Beyza ERKEK'in Alternatif Puzolanik Malzemelerin Kullanımının Araştırılması başlıklı yüksek lisans tezinin bir parçasıdır ve son olarak Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür edilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Alqarni, A.S. 2022. A Comprehensive Review on Properties of Sustainable Concrete Using Volcanic Pumice Powder Ash as a Supplementary Cementitious Material, Construction and Building Materials, Cilt. 323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126533
- [2] Ulusu, H., Aruntas, H.Y., Gencel, O. 2016. Investigation on Characteristics of Blended Cements Containing Pumice, Construction and Building Materials, Cilt. 118, s. 11-19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.030
- [3] Karein, S.M.M., Vosoughi, P., Isapour, S., Karakouzian, M. 2018. Pretreatment of Natural Perlite Powder by Further Milling to Use as a Supplementary Cementitious Material, Construction and Building Materials, Cilt. 186, s. 782-789. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.012
- [4] Bulut, Ü. 2007. Perlitin Puzolanik Aktivitesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 162s, İstanbul.
- [5] Karein, S.M.M., Joshaghani, A., Ramezaniyanpour, A.A., Isapour, S. 2018. Effects of the Mechanical Milling Method on Transport Properties of Self-Compacting Concrete Containing Perlite Powder as a Supplementary Cementitious Material, Construction and Building Materials, Cilt. 172, s. 677-684. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.205
- [6] Aslan, M.G. 2015. Mikronize Filtre Perlitin Betonda Mineral Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı. Avrasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Trabzon.
- [7] Erdoğan, T.Y. 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., Ankara, 757s.
- [8] Yeğinobalı, A. 2011. Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 48s.
- [9] Erdem, T.K., Meral, Ç., Tokyay, M., Erdoğan, T.Y. 2007. Use of Perlite as a Pozzolanic Addition in Producing Blended Cements, Cement & Concrete Composites, Cilt. 29, s. 13-21. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.07.018
- [10] Páez-Flor, N.M., Rubio-Hernández, F.J., Velázquez-Navarro, J.F. 2019. Microstructure-at-rest Evolution and Steady Viscous Flow Behavior of Fresh Natural Pozzolanic Cement Pastes, Construction and Building Materials, Cilt. 194, s. 360-371. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.009
- [11] Dolgun, O. 2010. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Öğütülmüş Pomza Kullanabilirliğinin Araştırılması. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 88s, Niğde.
- [12] Çoban, Ö., Sancak, E. 2013. Krom Atığı Katkılı Harçların Puzolanik Aktivite ve Kilçallıklarına Farklı Kür Sularının Etkisi. Beton 2013 Kongresi Bildirileri, 21-23 Şubat, İstanbul, 313-323.
- [13] Singh, M. 2018. Coal Bottom Ash. ss 3-50. Siddique, R., Cachim, P. 2018. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Woodhead Publishing, GB, 640s.
- [14] Davraz, M., Koru, M., Akdağ, A.E., Kılınçarslan, Ş., Delikanlı, Y.E., Çabuk, M. 2020. Investigating the Use of Raw Perlite to Produce Monolithic Thermal Insulation Material, Construction and Building Materials, Cilt. 263. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120674
- [15] Maden Tetkik ve Arama. Perlit. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/perlit> (Erişim Tarihi: 12.02.2023)

- [16] Xu, F., Peng, C., Zhu, J., Chen, J. 2016. Design and Evaluation of Polyester Fiber and SBR Latex, *Construction and Building Materials*, Cilt. 127, s. 751-761. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.060
- [17] Ramazanođlu, B. 2020. Yaıtım Şaplarında Bitlis Yöresi Pomza Taşıının Perlit ile Birlikte Kullanımının İncelenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Bitlis.
- [18] Kaya, E. S. 2019. Ham Perlit ve Genleştirilmiş Perlitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s, Balıkesir.
- [19] Fodil, D., Mohamed, M. 2018. Compressive Strength and Corrosion Evaluation of Concretes Containing Pozzolana and Perlite Immersed in Aggressive Environments, *Construction and Building Materials*, Cilt. 179, s. 25-34. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.190