



## Characterization, pozzolanic activity of natural pileki and calcined pileki and effect to mechanic properties of cement mortars

İlknur Bekem Kara\*<sup>ID</sup>

Artvin Çoruh University, Borçka Acarlar Vocational School, Department of Construction, 08400, Artvin, Turkey

### Highlights:

- Analysis of natural Pileki (P) and calcined Pileki (CP)
- Pozzolanic activity tests of P and CP
- Mortar production by replacing cement up to 20% with P and CP

### Keywords:

- Pileki
- Calcined pileki
- Pozzolan
- Mortar
- Strength

### Article Info:

Research Article  
Received: 25.03.2021  
Accepted: 26.07.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.903255

### Correspondence:

Author: İlknur Bekem Kara  
e-mail: ilknurbekem@artvin.edu.tr  
phone: +90 466 215 1070 / 3222

### Graphical Abstract

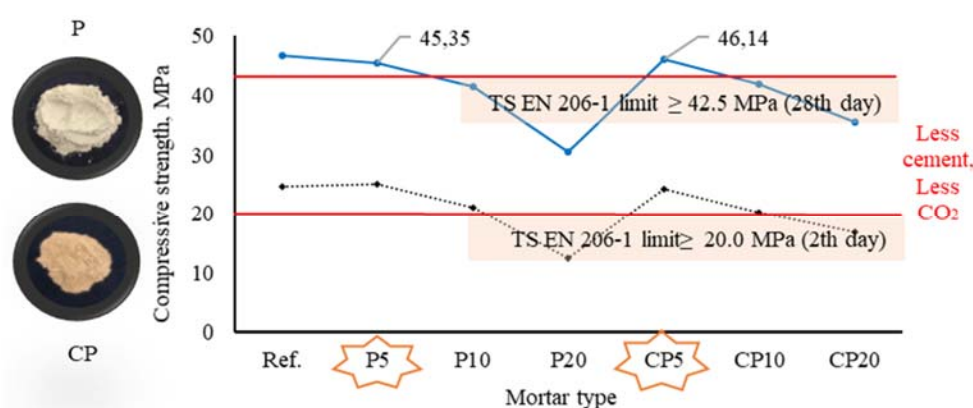


Figure A. Compressive strength values of the mortars prepared with P and CP

**Purpose:** The aim of this study is to determine the usability of natural and calcined Pileki instead of cement in mortars as pozzolan.

### Theory and Methods:

Thin section was taken from Pileki stone and examined petrographically. P was obtained by crushing and grinding the Pileki stone. After grinding, it was calcined at 850 °C and CP was obtained. P and CP were analyzed in detail. Pozzolanic activities of P and CP were determined. Mortar mixtures were prepared by replacing P and CP up to 20% by weight with cement. Standard consistency water, initial and final setting times and Le Chatelier expansion values of cement pastes substituted 5, 10, 20 P and CP were determined. Compressive strength, flexural strength and ultrasonic pulse velocity tests of mortar mixtures were carried out at 2<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup> and 28<sup>th</sup> days.

### Results:

It can be found that the total content of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is 69.76% in P. It is 71.91% in CP. With calcination, the amorphous structure increased from 26.2% to 35.6%. While the mass loss of P at 900 °C is 13.56%, it is seen that the mass loss of KP at the same temperature is 1.26%. P has no pozzolanic character, while CP does. At 2<sup>th</sup> day, the highest compressive strengths belong to mixtures of P5 > Ref > CP5, respectively. Except for 20% substitutions, other mixtures yielded results above 20 MPa. The positive effect of calcination process on compressive strength has been observed at all ages in 20% substituted mixtures. The compressive strength of P5 and CP5 mixtures is above 42.5 MPa at 28<sup>th</sup> day.

### Conclusion:

The calcination process changed the particular size distribution and chemical composition of P. CP has pozzolanic activity. CP can be used as pozzolan. The optimum replacement rate is 5%.



## Doğal ve kalsine pilekinin karakterizasyonu, puzolanik aktivitesi ve çimento harçlarının mekanik özelliklerine etkisi

İlknur Bekem Kara\*<sup>ID</sup>

Artvin Çoruh Üniversitesi Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, Borçka, Artvin, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Doğal pileki (P) ve kalsine pileki (KP) analizi
- P ve KP puzolanik aktivite deneyi
- P ve KP çimento ile %20'ye kadar yer değiştirerek harç üretimi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.03.2021

Kabul: 26.07.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.903255

#### Anahtar Kelimeler:

Pileki,  
kalsine pileki,  
puzolan,  
harç,  
dayanım

#### ÖZ

Çimentoda puzolan kullanılması fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirmekte, ekonomik olarak fayda sağlamaktadır. Ayrıca daha az çimento kullanımı sonucu çevresel etkiler azaltılmaktadır. Bu çalışmada Pileki taşının (İyidere/Rize) öğütülmüş halde doğal ve kalsine olarak çimento harçlarının içinde puzolan olarak değerlendirilebilirliğine odaklanılmıştır. Pileki taşı petrografik açıdan incelenmiştir. Öğütülmüş pileki ise doğal ve kalsine edilmiş halde fiziksel, kimyasal, mineralojik, termal gravimetrik ve morfolojik açıdan analiz edilmiştir. Doğal pileki ve kalsine pilekinin puzolanik aktivitesi belirlenmiştir. Harç üretiminde %0, %5, %10 ve %20 oranlarında çimento yerine kullanılmıştır. Doğal ve kalsine pileki  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamının sırasıyla %69.78 ve %71.91 olduğu, kalsine işlemi ile doğal pileki bünyesindeki suyun dehidratasyona uğradığı, kalsine pilekiye ait kızdırma kaybı ve 900°C'de ağırlık kaybının böylelikle azaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak pileki taşının öğütülerek kalsine halde çimento harçlarında doğal puzolan olarak %5 ikame ile başarıyla kullanılabileceğini kanaatine varılmıştır. Puzolan olarak kalsine pileki kullanımı çimento üretimi için gerekli olan enerji miktarının dolayısıyla CO<sub>2</sub> salınımının azalmasına destek olabilecektir.

## Characterization, pozzolanic activity of natural pileki and calcined pileki and effect to mechanic properties of cement mortars

### H I G H L I G H T S

- Analysis of natural Pileki (P) and natural calcined Pileki (CP)
- Pozzolanic activity tests of P and CP
- Mortar production by replacing cement up to 20% with P and CP

#### Article Info

Research Article

Received: 25.03.2021

Accepted: 26.07.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.903255

#### Keywords:

Pileki,  
calcined Pileki,  
pozzolan,  
mortar,  
strength

#### ABSTRACT

The use of pozzolan in cement improves the physical and mechanical properties and provides economic benefits. In addition, environmental impacts are reduced as a result of using less cement. This study focuses on the use of Pileki stone (Iyidere / Rize) as a pozzolan in cement mortars in ground form, natural and calcined. Pileki stone has been studied petrographically. The ground Pileki was analyzed in its natural and calcined form in terms of physical, chemical, mineralogical, thermal gravimetric and morphology. The pozzolanic activity of natural Pileki and calcined Pileki was determined. In the production of mortar, 0%, 5%, 10% and 20% are used instead of cement. It was determined that the sum of  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  in natural and calcined Pileki was 69.78% and 71.91%, respectively, the water in the natural Pileki was dehydrated by calcined process, the loss of glow in the calcined Pileki and the weight loss at 900°C were thus reduced. As a result, it has been concluded that the Pileki stone can be successfully used as a natural pozzolan in cement mortars by grinding and calcined with 5% substitution. The use of calcined Pileki as pozzolan may support the reduction of the amount of energy required for cement production, thus CO<sub>2</sub> emission.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi betondur. Bileşenlerine bakıldığında en pahalı ve en çok enerji tüketen malzemenin ise çimento olduğu bilinmektedir. Portland çimento klinkerinin küresel üretimi 3,5 milyar tonun biraz üzerindedir ve sonuç olarak küresel çimento endüstrisi CO<sub>2</sub> emisyonlarının %6-7'sinden sorumludur [1]. Fazla miktarda enerji tüketimi ve atmosfere salmış olduğu CO<sub>2</sub> miktarı nedeniyle, dünyada tartışılan ve çözüm arayışının yoğun olduğu bir konudur [2]. Bu bağlamda çimentonun yerine kullanılabilir puzolanik malzeme arayışı halen sürmektedir. Puzolanik malzemeler silika veya silika-alümina bazlı malzemelerdir ve betona kısmen çimento ikamesi olarak dâhil edilebilir. Puzolanlar endüstriyel yan ürünler veya doğal malzemeler olabilir [3]. Doğadaki puzolanik maddeler üzerine çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [4, 5]. Bazı doğal puzolanlar fiziksel özelliklerinden dolayı sorun yaratabilir; örneğin diatomlu toprak, köşeli ve gözenekli formu nedeniyle yüksek su içeriği gerektirir. Bu nedenle bazı doğal puzolanların malzemeye bağlı olarak 550-1100°C aralığında kalsinasyon ile aktivitelerini iyileştirilir [6]. Kalsinasyon (ısı işlem), kristal yapıyı değiştirerek puzolanik özellik sağlamak için puzolanik reaktivitesi çok az olan veya hiç olmayan killere uygulanır [7]. Kalsine puzolanlar atık veya endüstriyel yan ürünler olmadıkları için üretmek için enerji gerektirir. Ancak bunların üretimi için gereken enerji çimento için kullanılanlardan çok daha azdır [3].

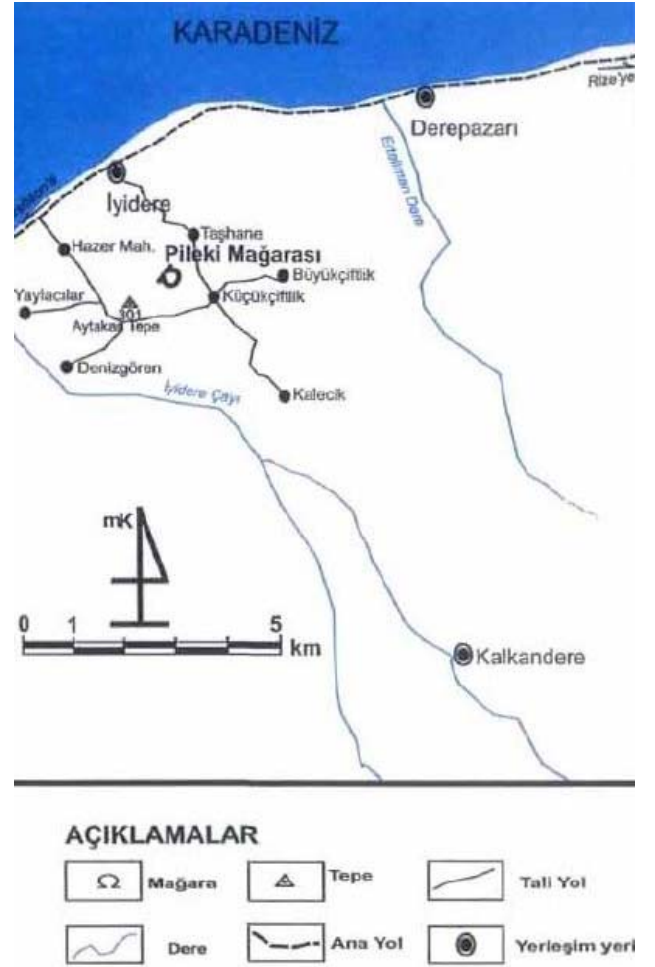
Pileki Türkiye Karadeniz bölgesinde ekme pişirme kaplarına verilen isimdir. Bu kaplar ismini elde edildikleri kayalardan almıştır. Pileki; kayalardan bloklar çıkarılıp, el yordamıyla oyulup işlenerek hazırlanmaktadır [8]. Bu kullanıma yönelik olarak Rize'nin İyidere ilçesinin Köşklü Köyü civarında bulunan insan yapımı pek çok taş ocağı bulunduğu bilinmektedir [9]. Kazancı ve Gürbüz (2014)' göre, pileki porfirik dokulu bazalttır. Koyu renkli hamur içinde göreceli iri feldspat kristallerinin saçılı halde olması, bu bazaltın kısmen andezit görüntüsü kazanmasına yol açmıştır [10]. Çalışma kapsamında incelenen pileki İyidere/Rize (Türkiye)'de bulunan Pileki mağarasından temin edilmiştir. Pileki mağarası Rize şehir merkezine 22 km uzaklıkta yer alan ve yapay olarak oluşturulmuş bir mağaradır. Koordinatları X: 45 38 553, Y: 06 15 672 ve Z: 230 m'dir. Mağaranın konum haritası Şekil 1'de görülmektedir. Pileki'nin Rize ve çevresinde yüksek miktarda rezervi olduğu bilinmektedir [9].

Pileki taşı inşaat malzemeleri kapsamında ele alındığında literatürde fazla bilimsel veriye rastlanmayan doğal bir maddedir. Yalnızca, pilekinin geopolimer üretimine uygun olduğu bildirilen tek bir çalışma mevcuttur [9]. Bu makale, harmanlanmış çimentolarda kullanılmak üzere alternatif puzolan olarak doğal pileki ve kalsine pileki üzerine yapılan deneysel bir araştırmanın sonuçlarını sunmaktadır.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Malzemeler (Materials)

Harç karışımlarının üretimi amacıyla CEM I 42.5 R portland çimentosu (PÇ), sönmüş kireç (Ca(OH)<sub>2</sub>), pileki taşı, öğütülmüş doğal pileki (P), öğütülmüş ve kalsine edilmiş pileki (KP), CEN standart kum ve şebeke suyu kullanılmıştır. Oyak çimento fabrikasından (Ordu/Türkiye) temin edilen yoğunluğu 3,11 g/cm<sup>3</sup>, özgül yüzey alanı ise 3208 cm<sup>2</sup>/g çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Pileki Mağarası konum haritası [11].  
(Location map of Pileki cave)

### 2.2. Metot (Method)

#### 2.2.1. Pileki taşının mikroyapısı (Microstructure of Pileki stone)

Pileki taşının mikroyapısı polarizan optik mikroskobu ile incelenmiştir. Biri ortam koşullarında (20±2°C) bekletilmiş doğal pileki taşından (Şekil 2(a)), diğeri ise 850°C sıcaklığa maruz bırakılarak kalsine edilmiş pileki taşından (Şekil 2(b)) alınmış iki adet ince kesit hazırlanmıştır. İnce kesitlerin

değerlendirilmesi sırasında örneklerin görüntüleri Touptek bilgisayar programı ile tek ve çift nikol olarak kayıt edilmiştir.



**Şekil 2.** (a) Doğal pileki taşı, (b) kalsine pileki taşı  
(a) Natural Pileki stone, (b) calcined Pileki stone)

### 2.2.2. Bağlayıcı malzemelerin hazırlanması ve karakterizasyon analizi

(Preparation of binder materials and characterization analysis)

Pileki taşı etüv kurusu hale getirildikten sonra, laboratuvar ortamında kırıcıdan geçirilerek boyutu küçültülmüş, ardından bilyeli değirmende öğütülerek toz haline getirilmiştir. Öğütülmüş doğal pileki (P) bir kısmı laboratuvar sıcaklığında bırakılmış, bir kısmı ise 850°C'de 2 saat kalsine edilerek KP olarak kodlanmıştır. Kristal yapıya sahip olan malzemelerin kalsinasyon işlemi ile amorf yapıya geçtiği, bu geçişin 500-900°C arasında olduğu ve malzemeye puzolanik özellik kazandırdığı literatürden bilinmektedir [12, 13]. Sepiyolit ile yapılan bir çalışmada en iyi kalsinasyon sıcaklığı 830°C olarak tespit edilmiştir [14]. Kastamonu ilinden temin edilen killerin 800°C kalsine edilmesi ile harçlarda en iyi performansın elde edildiği rapor

edilmiştir [15]. Bir diğer çalışmada ise kaolin kiline uygulanacak ideal sıcaklığın 900°C olduğu ve bu sıcaklıkta sinterlenmiş metakaolin örneklerinin en yüksek basınç dayanım değerlerini verdiği gözlenmiştir [16]. Literatür ışığında kalsinasyon sıcaklığı 850°C tercih edilmiştir. Harç üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan malzemeler Şekil 3'de görülmektedir.

Harç karışımlarında bağlayıcı olarak kullanılacak P'nin fiziksel, kimyasal, mineralojik, morfolojik ve termal özellikleri kalsinasyon öncesi ve sonrasında belirlenmiştir. Amaç, kalsinasyon işleminin P üzerindeki etkisinin görülmesidir. Bu bağlamda, P ve KP'nin yoğunlukları le cheletier balonu ile özgül yüzey alanları ise Blaine cihazı ile tespit edilmiştir. P ve KP'ye ait tane büyüklüğü dağılımı lazer parçacık boyutu analizörü (Malvern, model 'Mastersizer Hydro 2000 MU') ile belirlenmiştir. Malzemelerin morfolojik incelemeleri için SEM görüntüleri alınmıştır. X-ışını floresansı (XRF) yöntemi malzemelerin oksitli bileşenlerini belirlemek için kullanılmıştır. P ve KP kırınım desenleri X-ışını difraktometresi (XRD) ile oda sıcaklığında, Bruker marka Discover-D8 model toz difraktometre sisteminde ve bakır radyasyonu [ $\lambda$  (CuK $\alpha$ ) = 1,54056Å] kullanılarak  $2\theta = 5,0 - 80,0^\circ$  tarama aralığında elde edilmiştir. Perkin Elmer STA-6000 cihazında Termal gravimetrik ve diferansiyel termal analiz (TGA-DTA) yardımıyla P ve KP'nin termal özellikleri tespit edilmiştir.

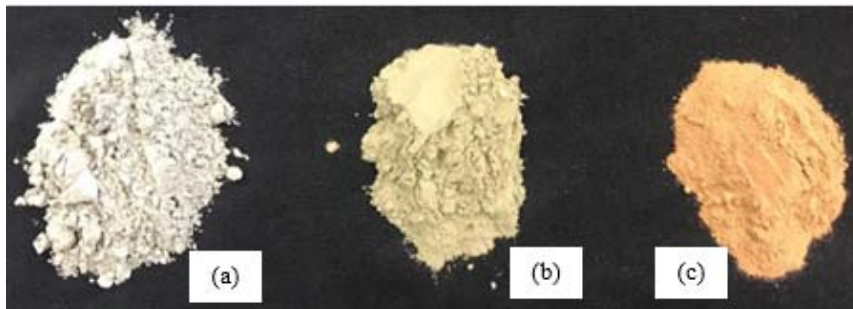
### 2.2.3. P ve KP'nin puzolanik aktivite deneyi (Pozzolanic activity of P and CP)

Öğütülmüş doğal puzolan, su, Ca(OH)<sub>2</sub> ve kumun karıştırılmasıyla hazırlanan harçla basınç dayanımı açısından belirlenen hidrolik özellik puzolanik aktivite olarak tanımlanmaktadır [17]. Çalışmada kullanılan P ve KP'nin puzolanik aktivitesi TS 25 standardına göre belirlenmiş olup Tablo 2'de gerekli malzeme miktarları görülmektedir. Hazırlanan harç numuneleri 40x40x160 mm<sup>3</sup> boyutlu kalıplara dökülmüş, ertesi gün kalıptan çıkarıldıktan sonra 6 gün 55 ± 2°C'de bekletilmiştir (Şekil 4). 7. gün ise basınç dayanımı ölçülmüştür [18].

**Tablo 1.** PÇ'ye ait kimyasal özellikler (Chemical properties of the PC)

Oksitler	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	KK
PÇ (%)	61,91	5,34	3,22	19,95	3,24	1,01	0,30	0,94	2,25

KK: Kızdırma kaybı



**Şekil 3.** (a) PÇ, (b) P ve (c) KP  
(a) PC, (b) P and (c) CP)



**Şekil 4.** Pozzolanik aktivite için hazırlanan P ve KP numuneleri  
(P and CP samples prepared for pozzolanic activity)

#### 2.2.4. Çimento pasta ve harçlarının hazırlanması (Preparation of cement pastes and mortars)

Bu çalışmada çimento %5, %10 ve %20 oranlarında P ve KP ile ağırlıkça yer değiştirmiştir. Üretilen çimento pastalarının kıvam için gerekli su miktarları, priz başlangıç-priz sonu süreleri ve hacim genleşme miktarları TS EN 196-3'e uygun olarak belirlenmiştir [19]. Harç numunelerinin üretimi için kullanılan malzeme miktarları Tablo 3'te verilmiştir. Karışımlarda kütlece 1 kısım bağlayıcı, 3 kısım CEN standard kumu ile 0,5 kısım su (su/bağlayıcı oranı 0,50) kullanılmıştır. Oluşan taze harcın yayılma miktarları belirlenmiş ve karışımlar 40x40x160 mm<sup>3</sup> boyutlarındaki prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Çalışmada mekanik karıştırıcı kullanılmış ve sarsma tablası ile sıkıştırılmıştır. Numuneler, rutubetli bir ortamda 24 saat boyunca bekletilmiş ve kalıptan çıkarıldıktan sonra, dayanım deneyine tabi tutuluncaya kadar su (20 ± 2°C) içinde kür edilmiştir. Harç numuneleri 2, 7 ve 28. günlerde ultrases geçiş hızı [20], eğilme dayanımı ve basınç dayanımı [18]

testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada izlenen yöntemlerin özeti Şekil 5'te verilmektedir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Pileki taşının Petrografik özellikleri (Petrographic properties of Pileki stone)

Pileki taşı altere volkanik kayaç olup, yastık bazalttır. Bazalt olmasından kaynaklı olivinlerde opasitleşme görülmüştür. Proksen minerali (Px) göze çarpmaktadır. Feldispat minerallerin de yoğun killeşme, bağlayıcı volkan camı ve mikrolitlerde çok ince taneli zeolitlenmeler mevcuttur. Kalsine pileki taşı ince kesit görüntülerine göre, zeolit minerallerinde açık yeşilimsi renkten koyu renge (kırmızı-kahverengi) dönüşüm olmuştur. Sıcaklıktan kaynaklı demir varlığından söz edilebilir. Kalsinasyondan dolayı analsim suyunu kaybetmiş ve zeolitin bir kısmı yıkılmıştır. Ayrıca kil minerallerinin kristal kaset yapısında yıkılmalar meydana gelmiştir. Bu bağlamda, amorf minerallere doğru dönüşüm olduğu görülmüştür.

#### 3.2. P ve KP karakterizasyonu (Characterization of P and CP)

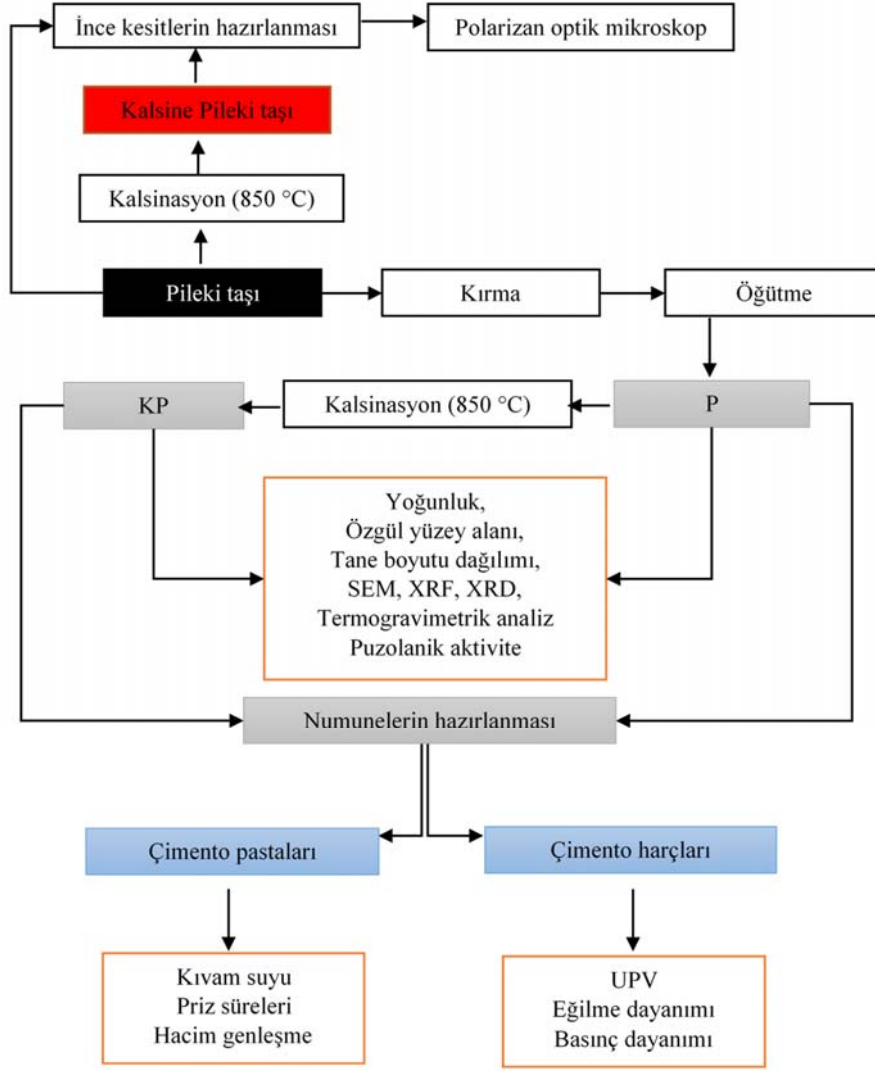
Kalsinasyon öncesi P yoğunluğu 2,49 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. KP yoğunluğu ise 2,55 g/cm<sup>3</sup>'dir. Özgül yüzey alanı 3016 cm<sup>2</sup>/g olan P'nin D90, D50 ve D10 değerleri 50,60 µm, 11,71 µm ve 2,01 µm, özgül yüzey alanı 3568 cm<sup>2</sup>/g olan KP'nin D90, D50 ve D10 değerleri 313,95 µm, 72,55 µm ve 3,23 µm bulunmuştur. Her iki malzemeye ilişkin tane boyut dağılımları PÇ ile karşılaştırılarak Şekil 7'de sunulmuştur. KP'nin tane boyutlarının P malzemesinden daha büyük olduğu görülmektedir. Isıl işlem görmüş malzemelerin daha yüksek boyutta parçacıklar sergilediği literatürden bilinmektedir [21]. Kalsinasyon sıcaklığının tane boyutuna etkisinin incelendiği Zhu vd. çalışmasında [22], nano kalsiyum karbonat 4 saat süre ile

**Tablo 2.** Ca(OH)<sub>2</sub> harçlarında kullanılan malzeme miktarları (Amounts of materials used in Ca(OH)<sub>2</sub> mortars)

Malzemeler	P (g)	KP (g)	TS 25 [17]
Ca(OH) <sub>2</sub>	150,00	150,00	150,00
Doğal puzolan	333,48	341,52	T= 2x150x(Puzolan yoğunluğu/ Ca(OH) <sub>2</sub> yoğunluğu)
Standart kum	1350,00	1350,00	1350,00
Su	321,74 (241,74+ilave 80)	295,76 (245,76+ilave 50)	0,5x(T+150)

**Tablo 3.** Çimento harçlarında kullanılan malzeme miktarları (Amounts of materials used in cement mortars)

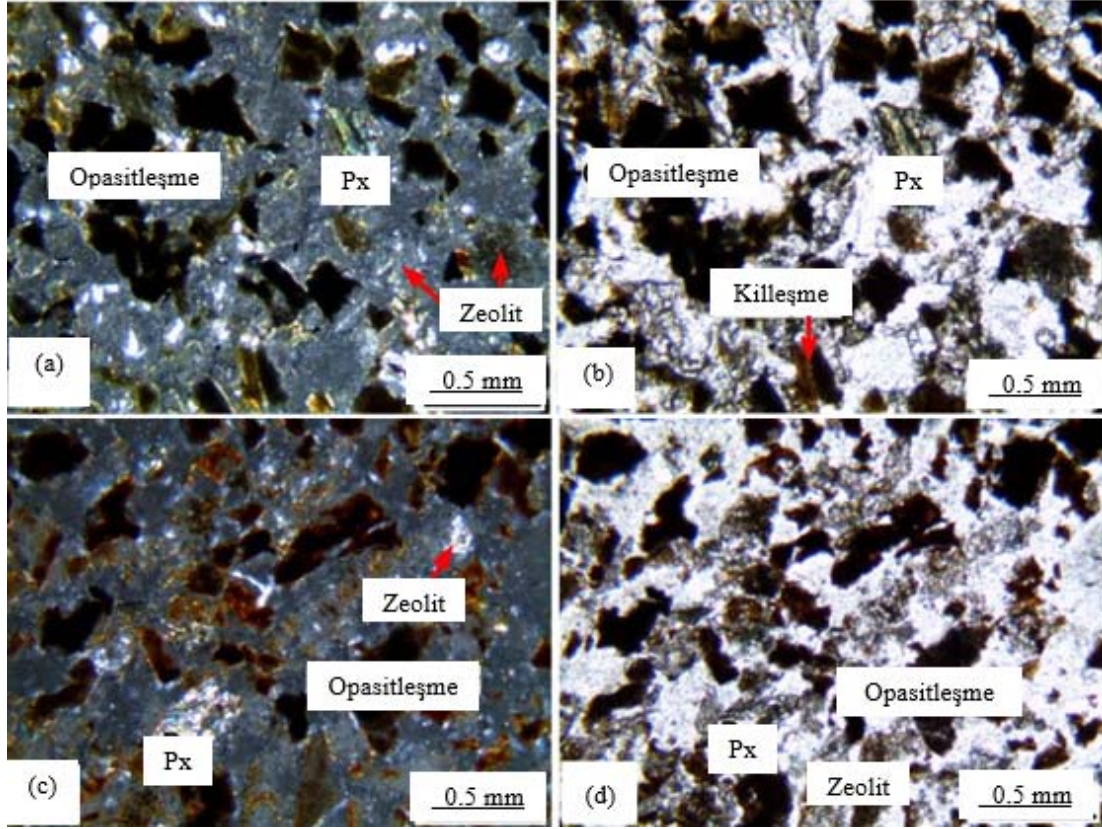
Karışım kodları	Bağlayıcı miktarları	PÇ (g)	P (g)	KP (g)	Kum (g)	Su (g)	Yayılma (mm)
Ref.	%100 PÇ	450,0	0	0	1350	225	145
P5	%95 PÇ + %5 P	427,5	22,5	0	1350	225	135
P10	%90 PÇ + %10 P	405,0	45,0	0	1350	225	134
P20	%80 PÇ + %20 P	360,0	90,0	0	1350	225	115
KP5	%95 PÇ + %5 KP	427,5	0	22,5	1350	225	155
KP10	%90 PÇ + %10 KP	405,0	0	45,0	1350	225	150
KP20	%80 PÇ + %20 KP	360,0	0	90,0	1350	225	137



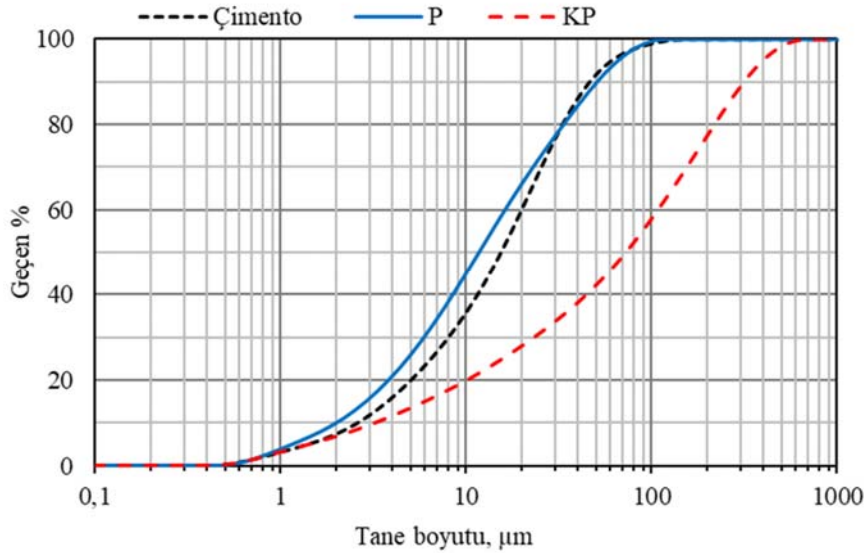
Şekil 5. Çalışmanın akış diyagramı (Flow chart of the study)

750°C’de kalsine edildiğinde üretilen kirecin tane boyutunun kalsiyum karbonata göre %64 arttığı, yine 4 saat süre ile 900°C’de kalsinasyon yapıldığında bu oranın %105 olduğu gözlemlenmiştir. Shah ve Rather (2020), TiO<sub>2</sub> ile yaptıkları çalışmada partikül boyutunun kalsinasyon sıcaklığı arttığında sabit bir artış gösterdiğini tespit etmişlerdir [23]. Bu durum kalsinasyon işlemi sırasında tanelerde sinterleme nedeniyle meydana gelen aglomerasyon oluşumu ile açıklanmaktadır [24]. P ve KP’nin SEM görüntüleri de bu durumu desteklemektedir. KP numunesi, P’ye göre daha büyük tane boyutuna sahiptir. Çalışmada kullanılan P ve KP’nin kimyasal analiz sonuçları çimentoların standart değerleri ile kıyaslanmıştır. Bunun sebebi malzemenin çimento ile yer değiştirilerek kullanılacak olmasıdır. Çimentolardaki SO<sub>3</sub> miktarının üretimde kullanılan alçıtaşından kaynaklandığı bilinmektedir [25]. Fazla miktarda olması etrenjit oluşumuna neden olmaktadır. CEM I 42.5 R çimentosu için 197-1 ye göre SO<sub>3</sub> oranı %4,0 ile sınırlanmıştır [26]. P’de SO<sub>3</sub> miktarı saptanamamıştır,

KP’deki SO<sub>3</sub> değeri ise standarda belirtilen değer altında olduğu belirlenmiştir. Çimentoda yer alan MgO su ile reaksiyonu sonucunda hacim genişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle EN 197-1’e göre çimentolarda MgO içeriği kütlece %5’ten fazla olmamalıdır [26]. Bu çalışmada MgO değeri P ve KP’de limit değerden fazla bulunmuştur. Ancak çimentoya ikame oranları (%5, %10 ve %20) ile üretilen karışımların (%80PÇ+%20P) teorik olarak MgO içeriği hesaplandığında %5’ten (~%2,40) küçüktür. Çimento için belirlenmiş TS EN 197-1 standardında kızdırma kaybının %5’i geçemeyeceği belirtilmiştir [26]. Bu çalışmada kullanılan P’nin kızdırma kaybı %10,66; KP’nin kızdırma kaybı ise %1,29 olarak tespit edilmiştir. Kalsinasyon işlemi kızdırma kaybının standart limitlerin altına inmesine neden olmuştur. TS 25’e göre [17] doğal puzolanlarda SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplamının kütlece en az %70 olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu toplamın değeri, P için %69,78, KP için ise %71,91 olarak tespit edilmiştir (Tablo 4).



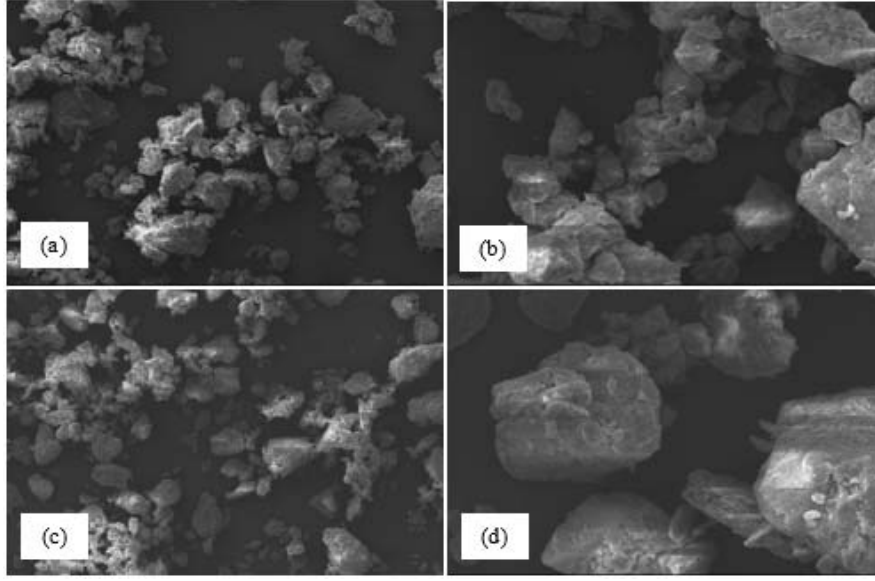
Şekil 6. İnce kesit görüntüleri (a, b) Pileki taşı, (c, d) kalsine Pileki taşı  
(Thin section images (a, b) Pileki stone, (c, d) calcined Pileki stone)



Şekil 7. PÇ, P ve KP tane boyutu dağılımları (Particle size distributions of PC, P and CP)

Şekil 9'da sunulan kırınım desenlerine göre, P'nin analisim, sanidin, zeolit ve magnezyum demir oksit bazlı bileşiklerden oluşmakta ve %73,8 kristal yapıdadır. KP kırınım desenlerine göre analisim dehidrasyona uğramış ve kristal faz miktarı %64,4'e düşmüştür. Yapılan bir çalışmada, bir malzemenin puzolanik bir katkı olup olamayacağını

değerlendirirken amorf yapının büyüklüğünün önemli bir parametre olduğu rapor edilmiştir [27]. Kalsinasyon ile amorf yapı %26,2'den %35,6'ya yükselmiştir. Bu artış KP'nin puzolan davranışına benzer bir davranış gösterebileceğine işaret etmektedir. Bu durum pileki taşı ve kalsine pileki taşına ait ince kesit görüntülerini de

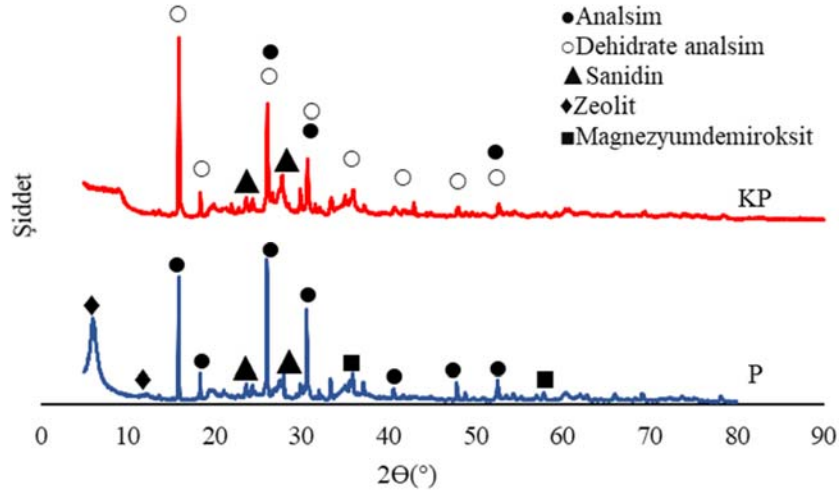


**Şekil 8.** Morfolojik görüntüler (a) P 1000X, (b) P 5000X, (c) KP 1000X, (d) KP 5000X  
(Morphological images (a) P 1000X, (b) P 5000X, (c) CP 1000X, (d) CP 5000X)

**Tablo 4.** P ve KP'ye ait kimyasal kompozisyonlar (Chemical compositions of P and CP)

Oksitler	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	KK
P (%)	3,56	41,93	16,13	11,72	2,28	1,97	-	7,96	0,23	0,15	0,70	10,66
KP (%)	4,88	45,06	17,13	9,72	3,39	2,71	0,10	6,10	0,32	0,15	0,72	1,29

KK: Kızdırma kaybı



**Şekil 9.** P ve KP kırınım desenleri (Diffraction patterns of P and CP)

desteklemektedir. Analsim, yapısında çok miktarda hidratlı sodyum aluminosilikat ( $(\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\cdot\text{H}_2\text{O})$ ) bulunan feldispatoit mineralidir ve doğal zeolit grupları içinde klinoptilolitten sonra ikinci değerli mineral olarak bilinmektedir [28]. Yapılan TGA sonucu, P'nin 900°C'de kütle kaybı %13,56 iken, KP'nin aynı sıcaklıktaki ağırlık kaybının %1,26 olduğu görülmektedir (Şekil 10). Elde edilen kütle kaybı değerleri, kimyasal kompozisyonda yer alan kızdırma kaybı değerleri ile uyumluluk göstermektedir. DTA eğrilerine göre 100°C altında P ve KP örnekleri için

oluşan endotermik pikler malzeme yapısında bulunan adsorbe suyun buharlaştığını ifade etmektedir. Ancak, P'nin bu sıcaklıktaki pikinin KP'ye kıyasla oldukça fazla olması analsimin dehidrasyon olayının gerçekleştiğinin göstergesi olabilir. KP'nin XRD sonucunda da analsimin dehidrasyonu görülmekte, XRD-DTA sonuçları birbirini desteklemektedir. Analsimin dehidratasyonun sırasında ortaya su çıkmaktadır. Bu durum başka çalışmalarda da gözlemlenmiştir [29, 30]. P için yaklaşık 500°C sıcaklıkta gözlenen ikinci endotermik pikin yapıya daha sıkı bağlanan su kaybını gösterdiği



düşünülmektedir. Faz değişimine göre P'nin daha düşük sıcaklıklarda kalsine edilmesi olası görülmektedir, ancak sıcaklık ile artan ağırlık kaybı göz ardı edilmemelidir.

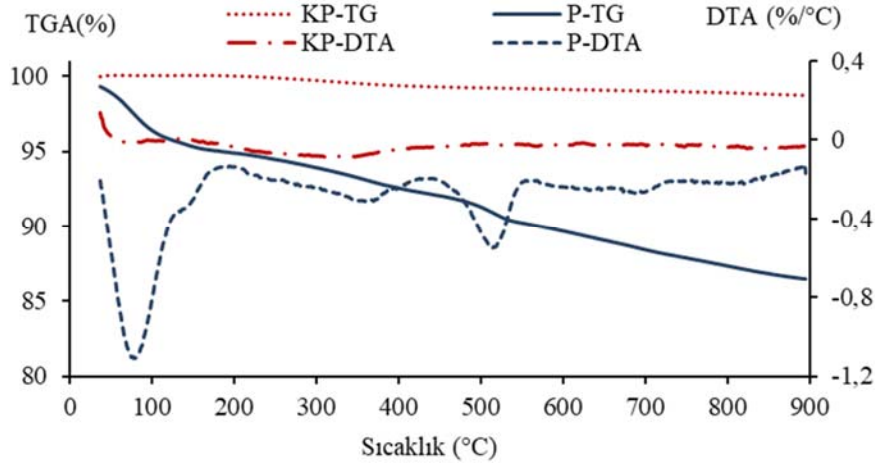
### 3.3. Standart kıvam suyu (Standard consistency water)

P ve KP ile üretilen çimento pastalarının standart kıvam için belirlenen su miktarları Şekil 11'de sunulmuştur. Harmanlanmış çimento pastalarının standart kıvam için gerekli su miktarı P malzemesinin %20 ikamesi ile belirgin olarak artmıştır. Ancak KP'nin tüm ikame oranlarında standart kıvam için gerekli su miktarını önemli ölçüde arttırmadığı görülmüştür. P ve KP'nin standart kıvama gelebilmesi için gerekli suyun ikame oranı ile aralarında güçlü bir ilişki varlığı mevcuttur. P'nin tane boyutunun çimentoya göre ince olması (Şekil 5) ikame oranının artmasıyla artan su ihtiyacının sebebi olarak açıklanabilir.

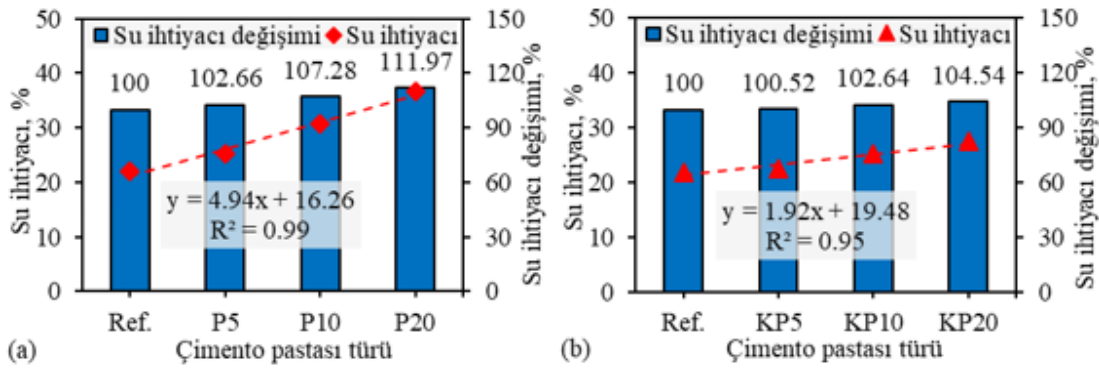
### 3.4. Priz süresi (Setting times)

Çimento pastalarında belirlenen priz süreleri Şekil 12'de görülmektedir. Priz sürelerinin P ikamesi azaldığı ancak KP ikamesi ile arttığı tespit edilmiştir. P ikamesi ile hızlanan

priz, P'nin tane boyutunun çimentodan küçük olması ile açıklanabilir [31]. Ayrıca P'nin yapısında bulunan alkalinlerin ( $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ) çimentoya göre yüksek olmasının da priz süresinde etkisinin olduğu bilinmektedir. Çünkü alkaliler çimento esaslı malzemelerin prizini hızlandırmaktadır [32]. KP'nin elde edilmesi P'nin kalsine edilmesine dayanmaktadır. Benzer alkali içeriğine sahip olmasına rağmen artan priz süreleri tane boyutun büyük olması ile açıklanabilir. Artan tane boyutu ile kimyasal reaksiyonun geç başladığı literatürden belirtilmektedir [33]. P ve KP'nin değişik oranlarda çimentoya ikame edilmesi ile elde edilen karışımların priz süreleri PÇ'ye farklılıklar göstermiştir. Tespit edilen değişimler neticesinde ilgili standartta [26] priz başlangıç süresinin uygunluk değeri 60 dakika ve üzeri olarak belirtilmiştir. Priz sonu için herhangi bir değer söz konusu değildir. P ve KP ikamesi ile elde edilmiş karışımların tümü belirtilen değerin üzerinde bir priz başlama süresine sahip olduğu tespit edilmiştir. İkame oranları ile değişen priz süreleri arasında ilişki varlığının belirlenmesi için regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen determinasyon katsayıları ( $R^2 \geq 0,86-0,95$ ) incelendiğinde güçlü bir ilişki varlığının olduğu söylenebilir.



Şekil 10. P ve KP'ye ait TGA-DTA analizi (TGA-DTA analysis of P and CP)



Şekil 11. Çimento pastalarının kıvam suyu miktarları (Consistency water amounts of cement pastes)

### 3.4. Hacim genleşme (Soundness)

Le Chatelier ile tespit edilen çimento pastalarının genleşme değerleri Tablo 5’de sunulmuştur. P ve KP ikame oranının artmasıyla birlikte karışımların genleşmeleri de artmaktadır. Karışımların genleşmelerinin artmasında MgO miktarının etkisi olduğu düşünülmektedir. Çimento esaslı malzemelerin genleşmesinde MgO etkin rol oynamaktadır [34]. Çimento pastalarının üretiminde kullanılan PÇ, P ve KP malzemelerin MgO içeriği sırasıyla %1,01, %7,96 ve %6,10 olarak ölçülmüştür. P ve KP’nin PÇ’ye göre yüksek MgO bulundurması ile elde edilen genleşme miktarlarını desteklemektedir. Ancak çalışmada elde edilen genleşme değerleri standartta belirtilen limit değerinin altındadır. Karışımların genleşme değerleri ref. çimento pastasına göre artmasına rağmen, tüm ikame oranlarında standardın belirttiği limiti aşmamaktadır.

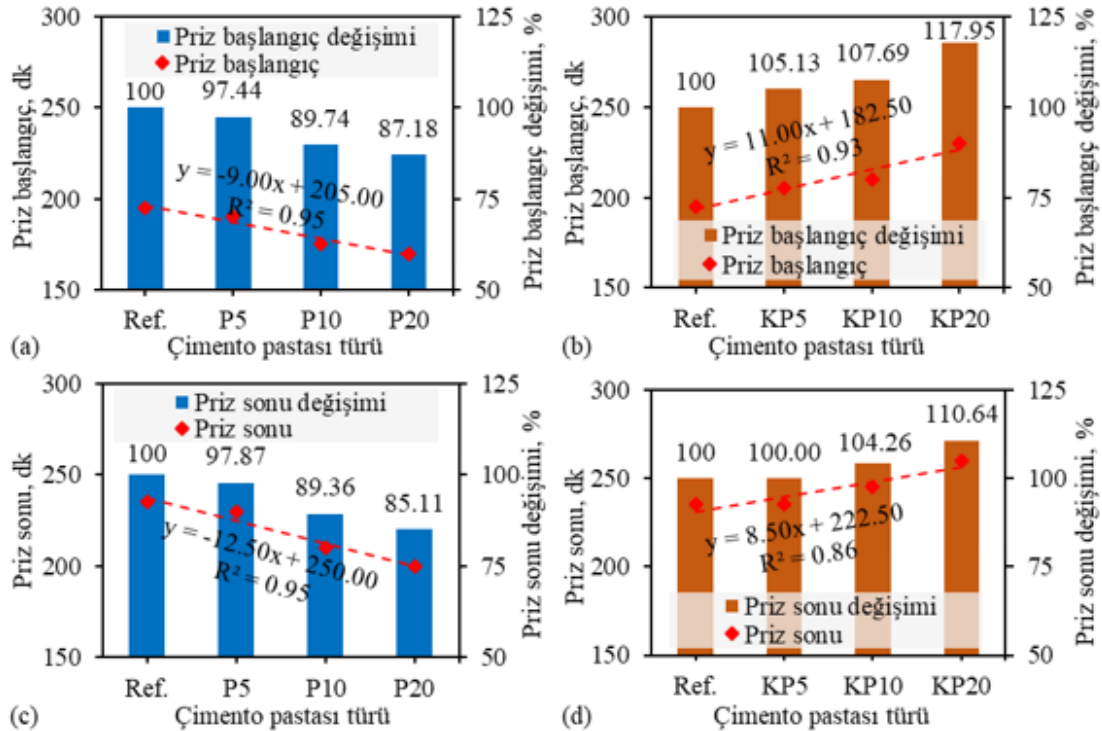
### 3.6. P ve KP’nin puzolanik aktiviteleri (Pozzolanic activity of P and CP)

Puzolanik özelliğini gösterebilmesi için kireç ve puzolan karışımından üretilen harcın basınç dayanımı 7. günde 4 MPa’ın üzerinde olmalıdır [17]. 7. gün P karışımı 1,40 MPa, KP karışımı ise 4,20 MPa dayanım göstermiştir. Bu bağlamda KP’nin puzolanik özellik gösterdiği söylenebilir. Kalsinasyon ile oluşan puzolanik özellik XRF analizinde

belirtilen  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamının %70 üzerinde olmasına ve XRD analizinde de belirtilen amorf yapı miktarının artmasına atfedilebilir.

### 3.7. Basınç dayanımı (Compressive strength)

Harç karışımlarına ait farklı yaşlarda ölçülen basınç dayanımı sonuçları Şekil 13’de sunulmuştur. 2. gün basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek üç basınç dayanımı sırasıyla P5>Ref>KP5 karışımlarına aittir. P5 numunesinin basınç dayanımı referansa kıyasla %1,55 daha fazladır. Bu durumun P numunesinin inceliğinin çimentodan biraz daha fazla olması nedeniyle boşluk doldurma etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. %10 P ikamesi Ref.’a kıyasla basınç dayanımı yaklaşık %15, %20 P ikamesi ise yaklaşık %50 azaltmıştır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir: P20 karışımı için yayılma miktarı Ref.’a kıyasla %20 daha azdır (Tablo 3). Su ihtiyacının arttığı standart kıvam suyu deneyinden de bilinmektedir. P20 harç örnekleri yeterli işlenebilirliğe sahip olmadığı için kalıplama/sıkıştırma esnasında boşluklar meydana gelmiş ve bu durum dayanımı olumsuz yönde etkilemiştir. %20 KP ikamesi Ref.’a kıyasla basınç dayanımı %30 azaltmıştır. Bu durum KP’nin kıvam suyunun P’ye kıyasla daha az olması ve harç karışımının işlenebilirliğinin P’ye göre daha iyi olması ile açıklanmaktadır. TS EN 197-1’e göre çimentolu harçların 2. günde sağlaması gereken minimum basınç dayanımı 20



Şekil 12. Çimento pastalarının priz süreleri (Setting times of cement pastes)

Tablo 5. Çimento pastalarına ait genleşme miktarları (Expansion amounts of cement pastes)

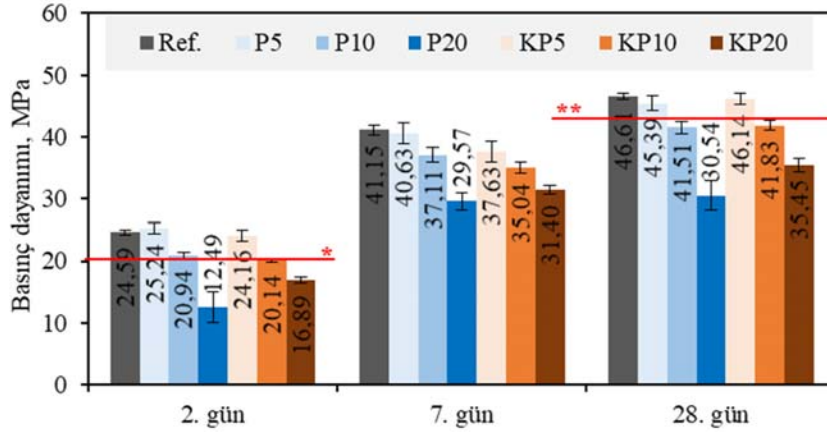
Karışım türü	Ref.	P5	P10	P20	KP5	KP10	KP20	TS EN 197-1
Genleşme (mm)	1,0	1,0	2,0	2,5	1,0	1,0	2,0	≤10

MPa'dır [26]. %20 ikameli (P20 ve KP20) karışımlar hariç diğer karışımlar limit değeri sağladığı belirlenmiştir. 7. günde 41,15 MPa ile Ref. karışım en yüksek basınç dayanımına sahiptir. P ve KP ikame oranları arttıkça dayanım değerlerinde azalma meydana gelmiştir. %5, %10 ve %20 P ikameleri Ref.'a kıyasla basınç dayanımı sırasıyla %2, %10 ve %29 azaltmıştır. KP ikamelerinde ise bu düşüşler %9, %15 ve %24 olarak hesaplanmıştır. 28. günde basınç dayanımları Ref>KP5>P5>KP10>P10>KP20>P20 şeklinde sonuç vermiştir. Tüm yaşlarda en düşük basınç dayanımı P20 karışımından elde edilmiştir. Ayrıca, P20 karışımının 7. günden 28. güne dayanım artış hızı hesaplandığında, yalnızca %3.28 olduğu görülmüştür. Bu durum harç matrisinde çimento miktarının azaltılmasına bağlı olarak yavaşlayan hidrasyon süreci ile açıklanabilmektedir [35, 36]. Çimentolu harçların 28. gün sağlaması gereken minimum basınç dayanımı 42,5 MPa'dır [26]. Ref. basınç dayanımı 46,61 MPa'dır. Bu bağlamda standartın gerekliliğini sağlayan ikameli karışımların yalnızca P5 ve KP5 olduğu görülmüştür. Bu durumun P'nin tane boyutu çimentoya yakın olduğu için boşluk doldurma etkisinden, KP ise iri tanelerine rağmen puzolanik etkisinden dolayı meydana geldiği kanaatine varılmıştır. Ayrıca, 2. ve 7. günlere kıyasla 28. günde nispi güç, esas olarak KP'nin puzolanik reaksiyonuna bağlı olarak açık bir artış göstermektedir. Birçok araştırmacı, puzolanik madde

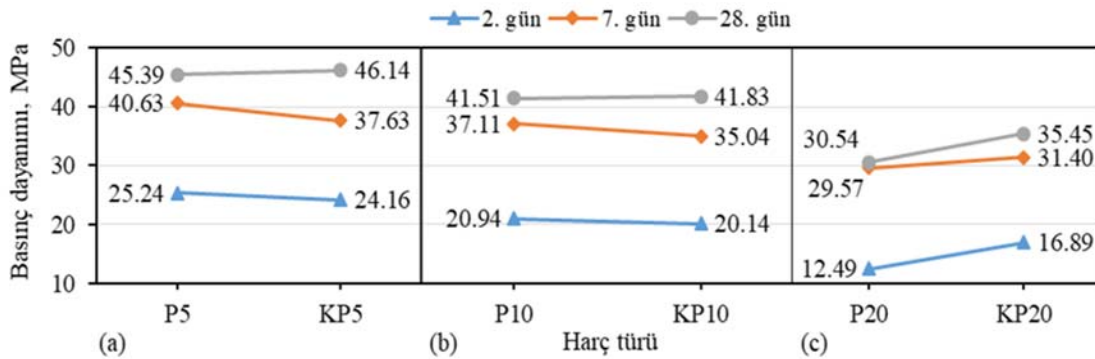
ilavesiyle erken numune yaşlarda dayanımın yavaşladığını bildirmişlerdir [37]. Bununla birlikte, hidrasyon süresi ilerledikçe KP ikameli karışımların dayanımlarının arttığı görülmüştür. Ref. karışımın 2. günden 7. güne dayanım artış hızı %67'dir. KP5, KP10 ve KP20 karışımları için dayanım artış hızları sırasıyla %56, %74 ve %86 olarak hesaplanmıştır. KP ikame oranı arttıkça dayanım hızı artmıştır. 7. günden 28. güne dayanım artış hızları incelendiğinde Ref. karışımın %13 artış hızına sahip olduğu, KP5, KP10 ve KP20 karışımlarının ise sırasıyla %23, %19 ve %13 artış hızına sahip olduğu belirlenmiştir. Kalsinasyon işleminin basınç dayanımları üzerindeki etkisinin görülmesi amacıyla Şekil 14 hazırlanmıştır. %5 ikameli karışımlarda (Şekil 14 (a)) kalsinasyon 2. ve 7. günlerde basınç dayanımını azaltırken, 28. gün arttırmıştır. %10 ikameli karışımlarda da bu durum aynıdır (Şekil 14 (b)). %20 ikameli karışımlarda ise tüm yaşlarda kalsinasyon işleminin basınç dayanımını üzerinde olumlu etkisi görülmüştür (Şekil 14 (c)). KP'nin çimentonun hidrasyonu sırasında çimento benzeri hidratlı ürünlerin oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir.

### 3.8. Eğilme dayanımı (Flexural strength)

Eğilme dayanımı sonuçlarının sunulduğu Şekil 15'de, 2. gün P5>KP5>KP10>Ref>P10>KP20>P20 sıralaması



Şekil 13. Harç karışımlarına ait basınç dayanımları (\*TS EN 197-1 limit 20 MPa, \*\*TS EN 197-1 limit 42,5 MPa) (Compressive strengths of mortar mixtures (\*TS EN 197-1 limit 20 MPa, \*\*TS EN 197-1 limit 42.5 MPa))



Şekil 14. Kalsinasyonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi (a) %5 (b) %10 (c) %20 (Effect of calcination on compressive strength (a) 5% (b) 10% (c) 20%)

görülmüştür. Basınç dayanımının aksine, KP5 karışımının 2. gündeki eğilme dayanımında Ref. karışımına kıyasla artış meydana gelmiştir. Dayanım sırasıyla %10 daha fazladır. Bu durum eğilme dayanımının gözenek yapısı ve agrega ile çimento arasındaki ara yüzey geçiş bölgesindeki değişikliklere daha duyarlı olmasına atfedilebilir [38, 39]. 7. gün ise en yüksek basınç dayanımı Ref. karışıma aittir. P5 ve KP5 karışımlarının dayanım artış hızlarının Ref.'a kıyasla daha küçük olduğu belirlenmiştir. 28. gün KP5 karışımının eğilme dayanımı P5'ten yüksektir. Bu durum basınç dayanımı ile paralellik göstermektedir. En düşük eğilme dayanım değeri basınç dayanımında olduğu gibi P20 karışımından elde edilmiştir.

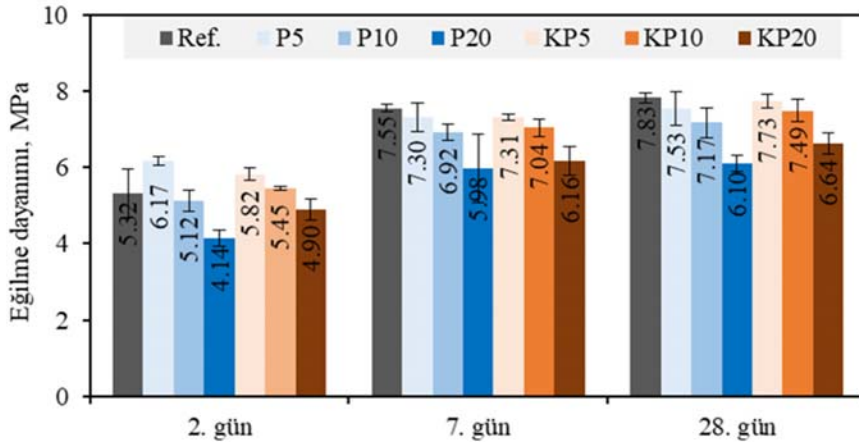
Bu çalışmada elde edilen eğilme dayanımları ile basınç dayanımları arasında kuvvetli ve doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. Hesaplanan determinasyon katsayıları P içeren karışımlar için 0,88 iken, KP içeren karışımlarda 0,92 olarak belirlenmiştir. Bu durum eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarının birbirlerini destekler nitelikte olduğunu göstermektedir (Şekil 16).

### 3.9. Ultrases geçiş hızı (Ultrasonic pulse velocity)

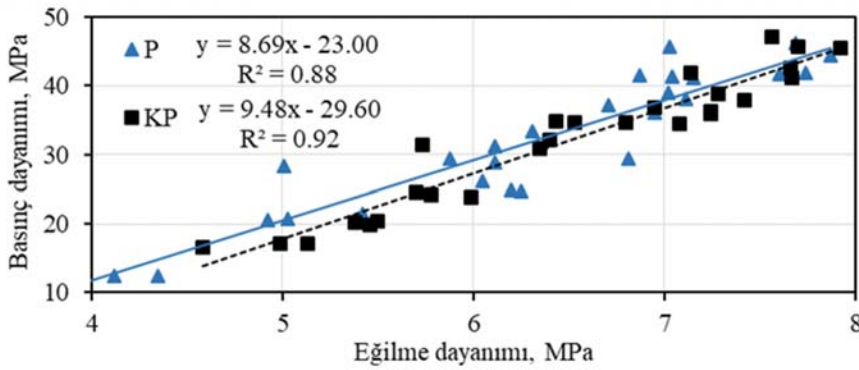
Ultrases geçiş hızı (UPV) genellikle çimento esaslı malzemelerin kalitesini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [40, 41]. Çatlak, gözeneklilik ve mikro yapı hakkında bilgi almak için UPV başka araştırmacılar tarafından kullanılmıştır [42-44]. Karışımda P ve KP kullanım miktarı arttıkça UPV'lerde düşüş olmasına rağmen, 2. ve 7. günde tüm harç numunelerinin kalitesinin iyi olduğu görülmektedir. 28. günde ise Ref. ve KP5 karışımlarının kalitesi mükemmel olarak nitelendirilmektedir (Tablo 6). Çimento harçları homojen bir şekilde üretilmiş ise UPV malzeme içinde hızlı bir şekilde ilerlemektedir. Bu bağlamda Ref. ve KP5 karışımlarının diğerlerine kıyasla daha homojen olduğu söylenebilir.

### 3.10. Dayanım ve UPV arasındaki ilişkinin incelenmesi (Relationship strength and UPV)

Harç numunelerinde dayanım ve UPV arasındaki ilişkiyi analiz etmek için regresyon analizi kullanılmıştır. (Şekil 17



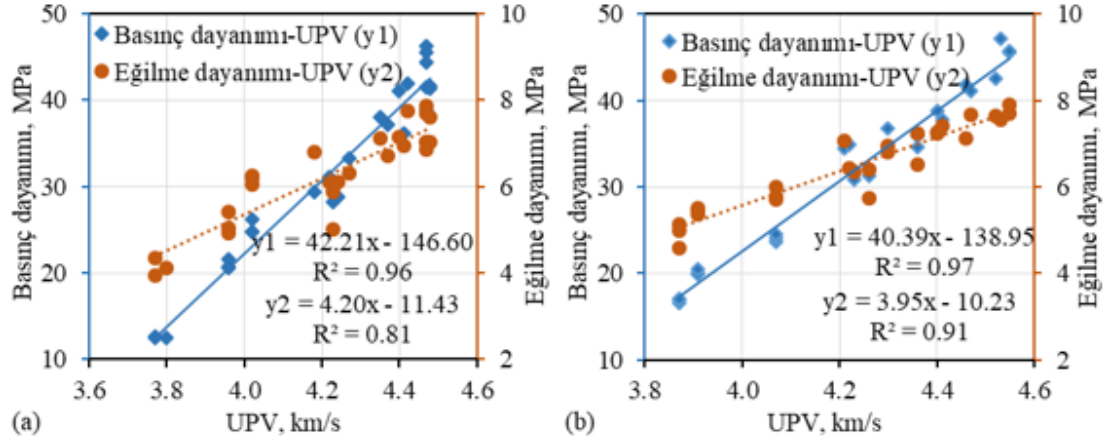
Şekil 15. Harç karışımlarına ait eğilme dayanımları (Flexural strengths of mortar mixes)



Şekil 16. Basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki (Relationship between compressive and flexural strengths)

Tablo 6. Harç karışımlarının UPV değerleri (UPV values of mortar mixtures)

Zaman	Ref.	P5	P10	P20	KP5	KP10	KP20
2. gün	4,03	4,02	3,96	3,78	4,07	3,91	3,87
7. gün	4,41	4,43	4,38	4,21	4,40	4,29	4,25
28. gün	4,55	4,47	4,48	4,25	4,54	4,48	4,29



Şekil 17. Dayanım ve UPV ilişkisi (a) P (b) KP (Relationship between strength and UPV (a) P (b) CP)

(a) ve (b)). KP içeren karışımların dayanımları ile UPV arasındaki ilişkinin P içeren karışımlara kıyasla daha kuvvetli olduğu görülmüştür. Elde edilen  $R^2$  değerleri P ve KP içeren çimento esaslı malzemelerin kalitesinin UPV testi ile değerlendirilebileceğini göstermektedir. Şekil 17 incelendiğinde, UPV ile basınç ve eğilme dayanımları arasında oldukça yüksek ve doğrusal ilişki varlığı söz konusudur.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Doğal puzolan olarak pileki taşının öğütülmesi ile hazırlanan P ve 850°C'de kalsine edilmesiyle hazırlanan KP'nin karakterizasyon özelliklerinin incelenmesi, puzolanik aktivite deneyleri ve %20'ye kadar çimento ile ikame edilerek harç karışımları üretilmesiyle elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Pileki taşının kalsine edilmesiyle kaset yapısında kırılmalar gözlenmiştir.
- Bağlayıcı olarak kullanılan doğal pilekinin kalsinasyon işlemi ile d10, d50, d90 değerlerinde artış meydana gelmiştir.
- $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  toplamı P için %69,78, KP için ise %71,91'dir.
- Kızdırma kaybı değeri kalsinasyon ile azalma göstererek, limit değer (TS EN 196-2) olan %5'in altına düşmüştür.
- P'nin kıvam suyu gereksinimi KP'ye kıyasla fazladır. Kalsinasyon işlemi ile su ihtiyacının azaldığı görülmüştür.
- TS 25'e göre KP'li karışımın 7. gün basınç dayanımı > 4MPa olup, puzolanik özellik göstermiştir.
- P ve KP kullanımı çimento pastalarının priz bitiş sürelerini kısaltmıştır.
- 2. günde %5 P ikamesi Ref. karışımından daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır.
- 28. günde KP içeren karışımlar P içeren karışımlara göre daha iyi mekanik dayanım sergilemiştir.
- 28. günde %5 P ve %5 KP ikameli harç karışımlarının basınç dayanımının TS EN 196-1 standardının öngördüğü limit değerler (42,5 MPa-62,5 MPa) aralığında olduğu belirlenmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda enerji tasarrufu bağlamında, doğal pilekinin farklı süreler ve daha düşük sıcaklıklarda kalsinasyon işlemine tabi tutularak ikame malzemesi olarak kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, doğal veya kalsine pileki ile üretilen çimentolu kompozitlerin dayanıklılık özelliklerinin de incelenmesi gereklidir. Pileki taşının bünyesindeki olivin ve killeşme eğilimi potansiyel bir ASR riski oluşturabilir. Bu nedenle, ileriki çalışmalarda Pileki taşının ASR hasarına neden olma potansiyeli detaylı incelenmelidir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Black, L., Low clinker cement as a sustainable construction material, Sustainability of Construction Materials, Editör: Jamal M. Khatib, Woodhead Publishing, Cambridge, United Kingdom, 415-457, 2016.
2. Korkmaz, A.V., Perlit ve traverten atıkları ile üretilen puzolanik çimentoların mühendislik özelliklerinin incelenmesi, MT Bilimsel, 17, 32-50, 2020.
3. Khatib, J.M., Baalbaki, O., ElKordi, A.A., Metakaolin, Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Editör: Rafat Siddique and Paulo Cachim, Woodhead Publishing, Cambridge, United Kingdom, 493-511, 2018.
4. Kasaniya, M., Thomas, M.D.A., Moffatt, E.G., Pozzolanik reaktivite of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes and implication of their incorporation on the chloride permeability of concrete, Cem. Concr. Res., 139, 106259, 2021.
5. 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.
6. Davraz, M., Gunduz, L., Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete, Cem. Concr. Res., 35, 1251-1261, 2005.
7. Küçükıldırım, E., Uzal, B., Characteristics of calcined natural zeolites for use in high-performance pozzolan blended cements, Constr. Build. Mater., 73, 229-234, 2014.

8. Dizman, S., Natural radioactivity levels in pileki stone and soil samples taken from pileki cave in rize province, *Adıyaman University Journal of Science*, 6 (2), 217-232, 2016.
9. Özen, S., Pileki taşı'nın (İyidere, Rize) geopolimer üretiminde kullanım potansiyelinin araştırılması, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9, 388-392, 2019.
10. Kazancı, N., Gürbüz, A., Jeolojik miras nitelikli Türkiye doğal taşları, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 57 (1), 19-44, 2014.
11. Nazik, L., Savaş, F., Kahraman, İ., Acar, C., Pileki mağarası (Taşhane) İyidere-Rize Araştırma Raporu, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2008.
12. Karakurt, C., Kaya, T., Yazıcıoğlu, S., Effect of calcined bentonite on the abrasion behavior of concrete. *Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 9 (2), 904-912, 2020.
13. Trümer, A., Ludwig, H.M., Schellhorn, M., Diedel, R., Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete, *Appl. Clay Sci.*, 168, 36-42, 2019.
14. He, C., Makovicky, E., Osbæck, B., Thermal treatment and pozzolanic activity of sepiolite, *Appl. Clay Sci.*, 10, 337-349, 1996.
15. Memiş, S., Kaplan, G., Yılmazoğlu, M.U., Yaprak, H., Mutevelli, I.G., Farklı sıcaklık ve sürelerde kalsine edilmiş killerin kireç harcına etkisi, *Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Türkiye-Trabzon*, 133-142, 2-3-4 Kasım, 2017.
16. Görhan, G., Kürklü, G., Farklı sınıf çimento harç üretiminde metakaolin katkısı kullanımının araştırılması, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 7, 7-14, 2015.
17. TS 25, Doğal Puzolan (Tras)-Çimento ve Betonda Kullanılan Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Yapı Malzemeleri Teknik Komitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
18. TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Teknik Kurul, Ankara, Türkiye, 2016.
19. TS EN 196-3, Çimento Deney Yöntemleri-Bölüm 3: Priz Süreleri ve Genleşme Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Teknik Kurul, Ankara, Türkiye, 2017.
20. TS EN 14579, Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Ses Hızı İlerlemesinin Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Maden Teknik Komitesi, Ankara, Türkiye, 2015.
21. Tryba, B., Piszcz, M., Morawski, A.W., Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub> composites, *Int. J. Photoenergy*, 2009, 1-7, 2009.
22. Zhu, Y., Wu, S., Wang, X., Nano CaO grain characteristics and growth model under calcination, *Chem. Eng. J.*, 175, 512-518, 2011.
23. Shah, A.H., Rather, M.A., Effect of calcination temperature on the crystallite size, particle size and zeta potential of TiO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized via polyol-mediated method, *Mater. Today Proc.*, In Press, 2020.
24. Zhou, D., Developing supplementary cementitious materials from waste London clay, Phd Thesis, Imperial College London, Department of Civil and Environmental Engineering Faculty of Engineering, Londra, 2016.
25. Erdoğan, T., Türkiye'de üretilen çimentolar, özellikleri ve kullanımları, *Çimento Sempozyumu, Türkiye-Ankara*, 67-80, 16-17 Kasım, 1995.
26. TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Teknik Kurul, Ankara, Türkiye, 2012.
27. Yiğit B., Salihoğlu G., Mardani-Aghabaglou A., Salihoğlu N.K., Özen S., Recycling of sewage sludge incineration ashes as construction material, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1647-1664, 2020.
28. Akgün, Y., Yazıcıoğlu, Ö.F., Analsimin puzolanik aktivitesi ve priz sürelerini belirlenmesi, *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 135-147, 2017.
29. Sakızcı, M., Investigation of thermal and structural properties of natural and ion-exchanged analcime, *Anadolu University Journal of Science and Technology. A: Applied Sciences and Engineering*, 17, 724-724, 2016.
30. Johnson, G. K., Flotow, H. E., O'hare, P. A. G., Thermodynamic studies of zeolites: analcime and dehydrated analcime, *Am. Mineral.*, 67, 736-748, 1982.
31. Bentz, D.P., Garboczi, E.J., Haecker, C.J., Jensen, O.M., Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials, *Cem. Concr. Res.*, 29 (10), 1663-1671, 1999.
32. Jawed, I., Skalny, J., Alkalies in cement: A review: II. Effects of alkalies on hydration and performance of Portland cement, *Cem. Concr. Res.*, 8 (1), 37-51, 1978.
33. Ginebra, M.P., Driessens, F.C.M., Planell, J.A., Effect of the particle size on the micro and nanostructural features of a calcium phosphate cement: A kinetic analysis, *Biomaterials*, 25 (17), 3453-3462, 2004.
34. Chatterji, S., Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt CaO and MgO, *Cem. Concr. Res.*, 25, 51-56, 1996.
35. Esmaeili, J., Aslani, H., Use of copper mine tailing in concrete: strength characteristics and durability performance, *J. Mater. Cycles Waste Manage.*, 21, 729-741, 2019.
36. Kundu, S., Aggarwal, A., Mazumdar, S., Dutt, K.B., Stabilization characteristics of copper mine tailings through its utilization as a partial substitute for cement in concrete: preliminary investigations, *Environ. Earth Sci.*, 75 (227), 1-9, 2016.
37. Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B., Sevinç, V., Kula cürufu, bentonit ve kolemanit atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi, *I. Uluslararası Bor Sempozyumu, Türkiye-Kütahya*, 259-266, 3-4 Ekim, 2002.
38. Nasr, M.S., Shubbar, A.A., Abed, Z.A.A.R., Ibrahim, M.S., Properties of eco-friendly cement mortar

- contained recycled materials from different sources, *J. Build. Eng.*, 31, 101444, 2020.
39. Zhang, H., Ji, T., He, B., He, L., Performance of ultra-high performance concrete (UHPC) with cement partially replaced by ground granite powder (GGP) under different curing conditions, *Constr. Build. Mater.*, 213, 469-482, 2019.
  40. Rehman, A., Kim, J.H., Kim, H.G., Qudoos, A., Ryou, J.S., Effect of leaching on the hardened, microstructural and self-cleaning characteristics of titanium dioxide containing cement mortars, *Constr. Build. Mater.*, 207, 640-650, 2019.
  41. Huang, G., Pudasainee, D., Gupta, R., Liu, W.V., Thermal properties of calcium sulfoaluminate cement-based mortars incorporated with expanded perlite cured at cold temperatures, *Constr. Build. Mater.*, 274, 122082, 2021.
  42. Polat, R., Demirboğa, R., Karagöl, F., The effect of nano-MgO on the setting time, autogenous shrinkage, microstructure and mechanical properties of high performance cement paste and mortar, *Constr. Build. Mater.*, 156, 208-218, 2017.
  43. Kara, C., Kütük-Sert, T., Kütük, S., Öğütülmüş kolemanit içeren betonlarda sodyum klorür etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 499-510, 2020.
  44. Çakır Ö., Topgül S.S., Physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete with ground granulated blast furnace slag, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 939-951, 2021.

