

Çimentoya mineral katkı olarak Kütahya Çayca Tüfünün kullanımı

Use of Kütahya Çayca Tuff as a mineral additive to cement

İbrahim KEÇEK¹ , Ahmet ÖZCAN¹ , Mehmet Uğur TOPRAK^{*} , Mehmet DEMİRBİLEK² 

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya

• Geliş tarihi / Received: 10.11.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 17.03.2023

Öz

Bu çalışmada Çayca/Kütahya'dan alınan tüflerin çimentoda mineral katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çayca tüfünün toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriği %85.34'tür. Çayca tüfünün volkanik birimleri riyodasitik tüf, dasitik tüf, andezitik tüf bileşimleridir. Kirli beyaz, sarımsı, grimsi, pembemsi ve bej renkler gösteren Çayca tüflerinin çok hızlı (10 saniyede $4476 \text{ cm}^2/\text{g}$) öğütülebildiği görülmüştür. Farklı tane boyutlarında öğütülen tüfler (4476 , 5017 ve $5175 \text{ cm}^2/\text{g}$) Portland çimentosu yerine ağırlıkça %25 oranında ikame edilerek hazırlanan katkılı çimento pastalarının kıvam ve priz süreleri incelenmiş, katkılı harçların 2, 7, 28 ve 56 günlük fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Harçlara standart su kürü ve otojen kür uygulanmıştır. Çayca tüfünün tane boyutu küçüldükçe priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamış, basınç dayanımları artmıştır. En yüksek basınç dayanımı otojen kür uygulanan katkısız harçlarda elde edilmiştir. Çayca tüfü içeren harç numunelerinin 2 ve 28 günlük basınç dayanımları TS EN 197-1 (2012)'de belirtilen seviyeye ulaşamamışlardır.

Anahtar kelimeler: Çayca tüfü, Mekanik özellikler, Otojen kür, Portland çimentosu

Abstract

In this study, the evaluation of tuffs taken from Çayca/Kütahya as a mineral additive in cement was investigated. The total $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ content of Çayca tuff was 85.34%. The volcanic units of the Çayca tuff were rhyodacitic tuff, dacitic tuff and andesitic tuff compositions. It was observed that the Çayca tuffs, which show off-white, yellowish, grayish, pinkish and beige colors, could be milled very quickly ($4476 \text{ cm}^2/\text{g}$ in 10 seconds). The consistency and setting times of the cement pastes prepared by substituting 25% by weight tuff milled in different grain sizes (4476 , 5017 and $5175 \text{ cm}^2/\text{g}$) by Portland cement were examined and the 2, 7, 28 and 56-day physical and mechanical properties of these mortars were determined. Standard water curing and autogenous curing were applied to the mortars. As the grain size of Çayca tuff decreased, the setting times of the pastes extended and the strength of the mortars increased. The highest compressive strength was obtained in autogenously cured additive-free mortars. The 2 and 28-day compressive strengths of the mortar samples containing Çayca tuff could not reach the level specified in TS EN 197-1 (2012).

Keywords: Çayca tuff, Mechanical properties, Autogenous curing, Portland cement

* Mehmet Uğur TOPRAK; mugur.toprak@dpu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Çimentoda endüstriyel atıklar veya doğal puzolanlar gibi katkı malzemelerinin kullanımı çimento maliyetlerini ve çimento üretimi kaynaklı CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır. Dolayısıyla katkı malzemelerinin özellikleri ve bu katkı malzemelerinin çimentonun özelliklerine etkisinin belirlenmesi önemlidir. Bu katkı maddeleri reaktif ve inert maddeler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Portland çimentosuna puzolanik reaksiyon yapan katkıların eklenmesi, çimento matrisini ve çimento agrega ara yüzeyini güçlendirerek çimentonun dayanım ve dayanıklılığını artırır. Ayrıca bu katkı boyutuna, parçacık boyutunun dağılımına ve özgül yüzey alanına bağlı olarak mikrodolgu etkisi ile çimento bağlayıcılı malzemelerin daha boşluksuz ve daha yüksek dayanımlı olmasını sağlamaktadırlar (Kubiliute vd., 2018).

Mineral katkı maddelerinin (zeolitler, SiO₂ tozu vb.) çimento üretiminde puzolan madde olarak kullanımı, yüksek performanslı betonlar, ağır metalleri emen veya radyoaktif radyasyonu bastıran özel betonlar gibi yeni yapı malzemelerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadırlar. Bu katkı maddeleri, Portland çimentosunun hidrasyon sürecini, fiziksel özelliklerini ve mekanik davranışını etkilemektedir. Yüksek oranda SiO₂ ve Al₂O₃ içeren zeolitler, Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek ilave C-S-H oluşturabilme nedeni ile beton dayanımını artırabilmektedirler (Nagrochienė vd., 2017).

Pereira-de-Oliveira vd. (2012) cam ve kırmızı kil seramik atıklarının puzolanik aktivitelerini araştırmışlardır. Bu atıklar 0-45µ, 45-75µ ve 75-150µ arasında öğütülmüştür. Cam ve kırmızı kil seramik atıkları kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin sonuçları incelendiğinde, bu atıkların beton üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Shi vd. (2015) süper incelikteki çelik cürufunun puzolanik aktivite değişiminin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmada, Portland çimentosuna farklı boyutlarda çelik cürufuları ikame edilmiştir. Yapılan çalışma ile çelik cürufunun inceliği arttıkça puzolanik aktivitenin artış gösterdiği, 2.52µ boyutundaki çelik cürufunun puzolanik aktivitesinin 13.3µ boyutundaki çelik cürufuna göre %95 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Zhao vd. (2020)'nin atık kil tuğla tozlarının çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılması ile çimentonun puzolanik aktivitesinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarında, farklı özgül yüzey alanlarına (253.3, 367.2, 554.4 ve 795.4 m²/kg) sahip olan tuğla tozlarının puzolanik aktivite değişimleri belirlenmiştir. Tuğla tozlarının özgül yüzey alanları arttıkça, harç numunelerinin basınç dayanımlarının artış gösterdiği belirlenmiştir. dos Santos ve Cordeiro (2021) farklı boyutlardaki diatomitlerin (7.2, 17.7, 21.5, 38.4, 58.6 ve 108.3µ) puzolanik aktivitelerini belirlemişlerdir. Diatomitlerin incelikleri arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımları artmıştır. Cordeiro vd. (2011) atık pirinç kabuğu külünün özgül yüzey alanı arttıkça, puzolanik aktivitesinin de arttığını belirtmişlerdir. Çullu vd. (2016) farklı türdeki volkanik kayaların puzolanik aktivitesini belirlemek için çimentoya %10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında volkanik kayaç ikame etmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde puzolanik aktive açısından çimentoya ikame edilecek en uygun puzolan miktarının çimento ağırlığının %10'u olduğunu bildirmişlerdir. Rodier vd. (2016) bambu sapı külünü çimentoya ikame ederek, puzolanik aktivitesini incelemişlerdir. 7 ve 28 günde, ağırlıkça %10 bambu sapı külü içeren harçların %75'in üzerinde bir dayanım aktivite indeksi sahip olduğu belirlenmiştir. Tseng vd. (2005) petrol şirketlerinin kullanılmış sıvı katalitik parçalama katalizörlerinden biri olan denge katalizörünün puzolanik aktivitesini incelemişlerdir. 650 °C sıcaklıkta kalsine edilen denge katalizörler içeren harçların basınç dayanımları, kontrol harcının basınç dayanımından daha yüksektir. Aynı zamanda denge katalizörünün daha fazla öğütülmesi, puzolanik aktiviteyi artırmıştır. Araújo vd. (2019) kırmızı renkteki seramik atıklarının puzolanik aktivitesini incelemişlerdir. %25 seramik atığı içeren harçların 28 günlük basınç dayanımları, %100 Portland çimentosu içeren harçların basınç dayanımlarından %11 daha yüksektir.

Yanardağların püskürttüğü kül, kum ve lav parçacıklarından oluşan, çoğunlukla açık renkli, hafif gözenekli bir tür çökelti taşı özelliği gösteren, tabakalaşan ve bazı durumlarda tabakalaşma karakteri göstermeyen kayaçlar jeoloji biliminde volkanik tüf olarak tanımlanır. Bunlar yanar dağ lavlarının (küllerinin) yine volkanik diğer kalıntılarla birlikte katılması ya da yığılıp sıkışmasıyla oluşan yeğni, gözenekli kayaç özellikleri gösteren yapılarıdır (Bayırlı & Pekin, 2013; Helvacı & Alaca, 1991). Tüfler kolay şekil verilebilme özellikleri ile yapı taşı olarak kullanılabilir özelliğine sahiptirler. Çok ince taneli ve pekleşmemiş toz halinde olması ve puzolanik aktivitelerinin yüksek olması nedeniyle katkılı çimento üretiminde kullanılabilirler (Kavas & Çelik, 2001; Kibici vd., 2012).

Atıl durumda olan Çayca tufunun Portland çimentosunda mineral katkı olarak kullanılması bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu amaçla Çayca bölgesinde farklı alanlarda riyodasitik, dasitik ve andezitik

bileşimli, kirli beyaz, sarımsı, grimsi, pembemsi ve bej renkler gösteren Çayca tüfü 10, 30 ve 60 s olmak üzere 3 farklı sürede öğütülmüş ve toz haline getirilmiştir. Toz halindeki tüflerin özgül yüzey alanları sırasıyla 4476, 5017 ve 5175 g/cm²'dir. Bu tozların puzolanik aktivitelerini belirlemek için Portland çimentosuna ağırlıkça %25 oranında ikame edilerek 40×40×160 mm harç numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere otojen kür (harç numuneleri test gününe kadar streç film ile sarılı bir şekilde laboratuvar ortamında bekletilmiştir) veya 23±1 °C suda kür uygulaması yapılmıştır. Bu numunelerin 2, 7, 28 ve 56 günlük ultrasonik ses hızı, basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiş ve bu değerler arasındaki ilişki incelenmiştir.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

2.1. Materyal

2.1. Material

Harç numunelerinde Çimsa markalı CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Puzolanik aktivitesinin belirlenmesi amacıyla, Kütahya il merkezine yaklaşık 18 km mesafede Çayca bölgesinde asidik karakterli, çökellerle geçişli, yer yer onlarla girik ve ardalı olan tüf, tüfit ile volkanoklastik çökeller Sabuncupınar formasyonu Çayca üyesi olarak tanımlanan Çayca tüfü, Kütahya'nın Çayca Köy'ü ve civarındaki litolojik birimlerden temin edilmiştir. Tüf mostralarından belli boyutlarda koparılarak temin edilen Çayca tüfü 3 farklı sürede öğütülerek toz haline getirilmiştir. 50 Hz hız değerine sahip olan halkalı değirmen kullanılarak Çayca tüfünün öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. 10, 30 ve 60 s öğütülen Çayca tüfünün özgül yüzey alanları sırasıyla 4476, 5017 ve 5175 cm²/g'dir. Taneler arası bağlar zayıf olduğu için çok kısa sürede ve çok az enerji ile öğütülebilmektedirler. Portland çimentosunun özgül yüzey alanı 3372 cm²/g'dir. Portland çimentosu ve Çayca tüfünün özgül ağırlıkları sırasıyla 3.05 ve 2.29 g/cm³'tür. Kirli beyaz, sarımsı, pembemsi renk gösteren tüf mostralarından derlenen numuneler, çeneli kırıcıda belli boyuta indirildikten sonra öğütülmüştür (Şekil 1). Kimyasal analizi yapılan Çayca tüfünün ve Portland çimentosunun kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir. ASTM C618-12a (2012)'da N sınıfındaki doğal puzolanların SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarının en az %70 ve SO₃ miktarının ise en az %4 olması gerektiği belirtilmektedir. Çayca tüfünün kimyasal kompozisyonundaki SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarı %85.34 ve SO₃ içeriği %0.03 olduğundan ASTM C618-12a (2012)'aya göre N sınıfındaki puzolan tanımına uymaktadır. Harç karışımlarında kum olarak Limak Batı Çimento markalı CEN standart kumu, karışımların bir kısmında ise karışım suyunu azaltıp aynı zamanda akışkanlığı arttıran Aragonit marka (UlfixAR 7002) süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 1. Portland çimentosu ve Çayca tüfünün kimyasal bileşimi

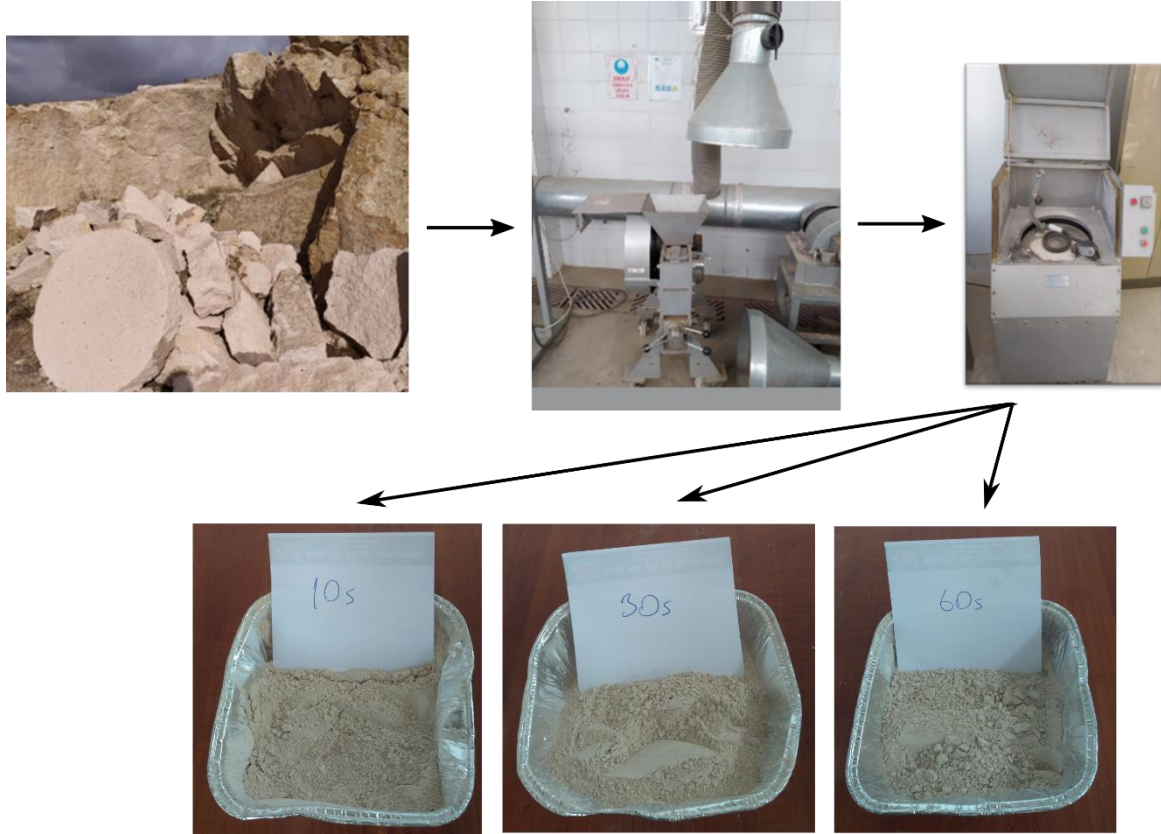
Table 1. Chemical composition of Portland cement and Çayca tuff

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	Cl	SO ₃	Kızdırma kaybı
Portland çimentosu	19.4	5.59	0.2	0.64	3.09	62.5	1.74	-	-	0.009	3.29	3.15
Çayca tüfü	69.31	14.48	1.85	5.27	1.55	1.18	0.7	0.07	0.17	0.1	0.03	5.24

2.2. Metot

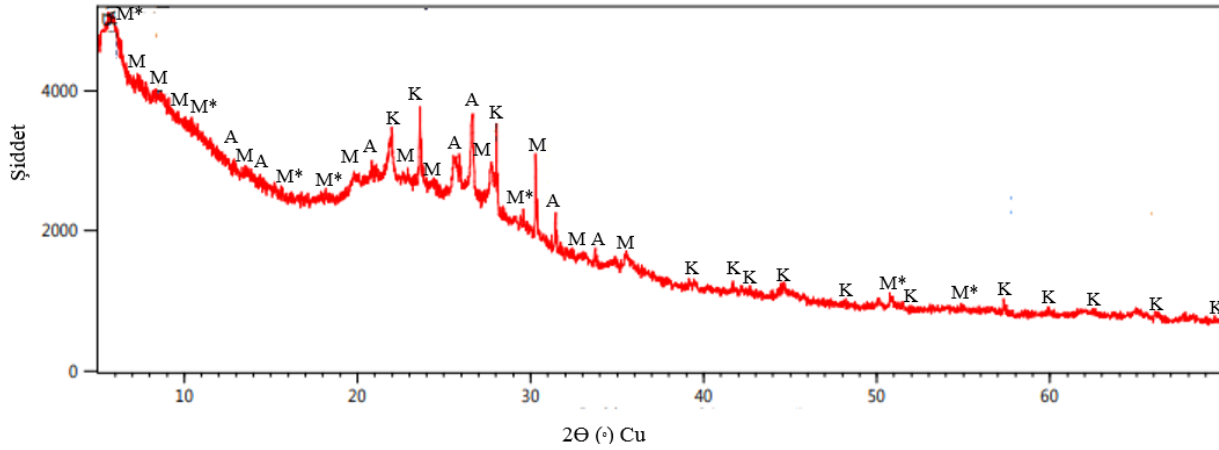
2.2. Method

Harç numuneleri hazırlanırken TS EN 196-1 (2016) standardındaki prosedürler uygulanmıştır. 7 farklı harç karışımı belirlenmiş ve bu karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Tablo 2'de verilmiştir. Bu karışımlara Portland çimentosu yerine ağırlıkça %25 oranında 3 farklı özgül yüzey alanına (4476, 5017 ve 5175 g/cm²) sahip Çayca tüfü ikame edilmiştir. Aynı zamanda karışımların bir kısmına bağlayıcı ağırlığının %1'i oranında süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Harç mikserine ilk olarak bağlayıcı ile su konulup karıştırılmıştır. Ardından karışıma kum eklenip, karıştırma işlemine devam edilmiştir. Daha sonra harç karışımı 40×40×160 mm³ boyutlarındaki prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. 24 saat kalıpta bekletilen numuneler, kalıptan çıkarıldıktan sonra su ve otojen kürü olmak üzere 2 farklı kür uygulamasına tabi tutulmuştur (Keçek, 2022). Harç numunelerinin hazırlanması ve yapılan deneylerin akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 1. Çayca tuffünün mostra ve 10, 30, 60 saniye öğütülmüş görünümleri
Figure 1. Mostra view of Çayca tuff and milled views of 10, 30, 60 seconds

Şekil 2’de X-ışınları difraktogramı verilen Çayca tuffünde esas mineral olarak kuvars ile birlikte alkali feldispat, montmorillonit, ve mordenit mineralleri görülmüştür.



Şekil 2. Çayca tuffü mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı (K: kuvars, A: alkali feldispat, M*: montmorillonit, M: mordenit)

Figure 2. X-ray diffractogram of the mineralogical composition of Çayca tuff (K: quartz, A: alkali feldspar, M*: montmorillonite, M: mordenite)

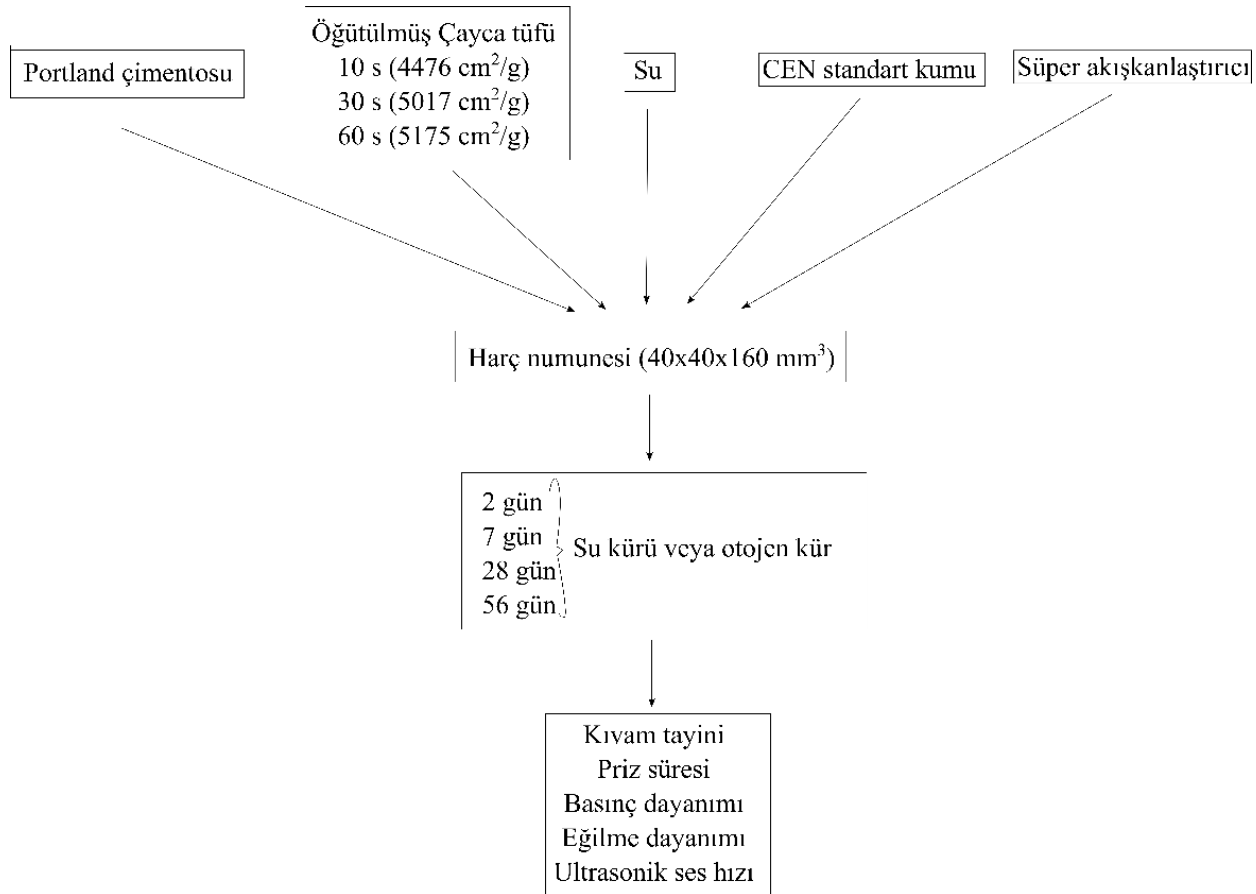
Çimento kıvamı ve priz süresi tayini deneylerinde TS EN 196-3 (2017) standardı kullanılmıştır. Vicat aleti kullanılarak standart kıvam için gerekli su miktarı belirlenmiştir. Priz süresinin tayininde Vicat iğnesi Vicat halkasındaki çimento hamuruna her 10 dakikada bir serbest düşüş ile batırılır. İğnenin batma derinliği 4 ± 1 mm oluncaya kadar işleme devam edilir. Bu mesafe sağlandığı an priz başlangıcı kabul edilir. Ardından 30 dakikalık süreler ile iğne hamur içine batırılmaya devam edilir ve priz sonu belirlenir. 2, 7, 28 ve 56 günlük numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve ultrasonik ses hızları incelenmiştir. Numunelerin

ultrasonik ses hızı değerlerinin belirlenmesinde ASTM C597 (2002) standardı kullanılmıştır. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının belirlenmesinde TS EN 196-1 (2016) standardı kullanılmıştır. 40×40×160 mm boyutlarındaki harç numuneleri eğilme deneyine tabi tutulduktan sonra, elde edilen iki kırık numuneye 40×40 mm boyutlarındaki bir başlık ile basınç deneyi uygulanmıştır. Numunelerin eğilme dayanımlarının belirlenmesinde her karışım grubu için 3 adet numune kullanılmış olup, bu sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenirken Denklem 1 ve 2 kullanılmıştır. Harç numunelerinin dayanım aktivite indekslerinin belirlenmesinde Denklem 3 kullanılmıştır (Erdoğan, 2016).

Tablo 2. Harç numunelerinde kullanılan malzeme miktarları (g)
Table 2. The amounts of the materials used in the mortar samples (g)

Karışım kodu	Portland çimentosu	Çayca tüfü (cm ² /g)			Standart kum	Su	Süper akışkanlaştırıcı	Kür metodu
		4476	5017	5175				
K	450				1350	225		Su kürü
K+SA	450				1350	225	4.5	Su kürü
K+SA+OK	450				1350	225	4.5	Otojen kür
T10+SA	337.5	112.5			1350	225	4.5	Su kürü
T30+SA	337.5		112.5		1350	225	4.5	Su kürü
T60+SA	337.5			112.5	1350	225	4.5	Su kürü
T60+SA+OK	337.5			112.5	1350	225	4.5	Otojen kür

Not: K kontrol numunesini, SA süper akışkanlaştırıcıyı, OK otojen kürü, T10 10 s öğütülen Çayca tüfü içeren numuneyi, T30 30 s öğütülen Çayca tüfü içeren numuneyi, T60 60 s öğütülen Çayca tüfü içeren numuneyi temsil etmektedir.



Şekil 3. Harç numunelerinin hazırlanma prosesleri ve incelenen özelliklerinin akış şeması

Figure 3. Flowchart of the preparation processes of the mortar samples and their investigated properties

$$R_f = 1.5 \left(F_f \frac{l}{b^3} \right) \quad (1)$$

R_f : Eğilmede çekme dayanımı, N/mm²
 b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (40 mm)
 F_f : Prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, N
 l : Destek silindirlerin arasındaki uzaklık, (100 mm)

$$R_c = F_c / b^2 \quad (2)$$

R_c : Basınç dayanımı, N/mm²
 F_c : Kırılmadaki en büyük kuvvet, N
 b : Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100 \quad (3)$$

A: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı, MPa
B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı, MPa

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Kıvam ve priz

3.1. Consistency and setting

Hamur numunelerinin kıvamları için gerekli kıvam suyu yüzdesi ve priz süreleri Tablo 3'te verilmiştir. Kontrol numunesinin kıvamı için belirlenen su miktarı %30 iken, T10+SA, T30+SA ve T60+SA kodlu numunelerin kıvamları sırasıyla %31, %33 ve %34'tür. Kontrol numunesinin prizi daha kısa sürede gerçekleşirken, Çayca tütünün inceliği arttıkça çimento hamurunun priz süresi de artmıştır. Bu durum tuf kullanılan serilerde daha az çimento kullanılması ve tüflerin su tutma özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kara (2022) çimentoya göre daha ince olan pilekinin hamur karışımlarındaki su ihtiyacını arttırdığını belirtmiştir.

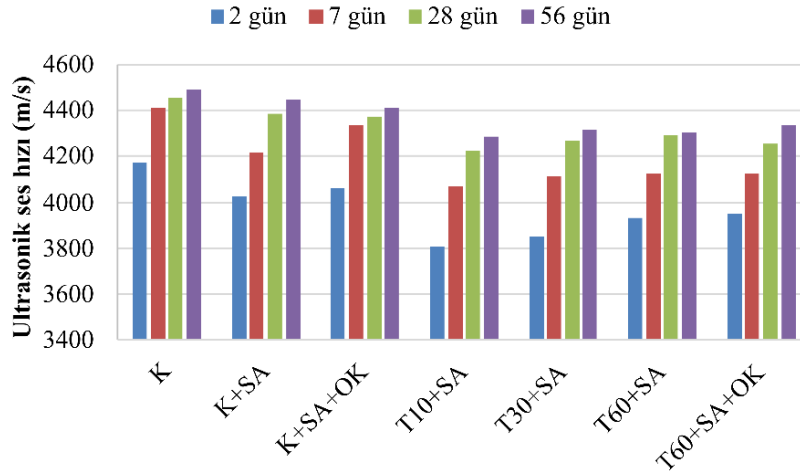
Tablo 3. Hamur numunelerinin kıvam ve priz süreleri
Table 3. Consistency and setting times of paste samples

Karışım kodu	Kıvam suyu yüzdesi (%)	Priz başlangıç süresi (dk)	Priz bitiş süresi (dk)
K	30	125	260
T10+SA	31	160	305
T30+SA	33	185	320
T60+SA	34	190	330

3.2. Ultrasonik ses hızı

3.2. Ultrasound pulse velocity

Harç numunelerinin ultrasonik ses hızı değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Numunelerin 28 günlük ultrasonik ses hızı değerleri incelendiğinde en yüksek değer 4457 m/s ile K kodlu numunede elde edilirken, en düşük değer 4224 m/s ile T10+SA kodlu numunede elde edilmiştir. Genel olarak Çayca tütünün tane boyu inceliği arttıkça, harç numunelerinin ultrasonik ses hızı değerleri de artmıştır.



Şekil 4. Harç numunelerinin ultrasonik ses hızı değerleri

Figure 4. Ultrasonic pulse velocity values of mortar samples

3.3. Basınç ve eğilme dayanımları

3.3. Compressive and flexural strengths

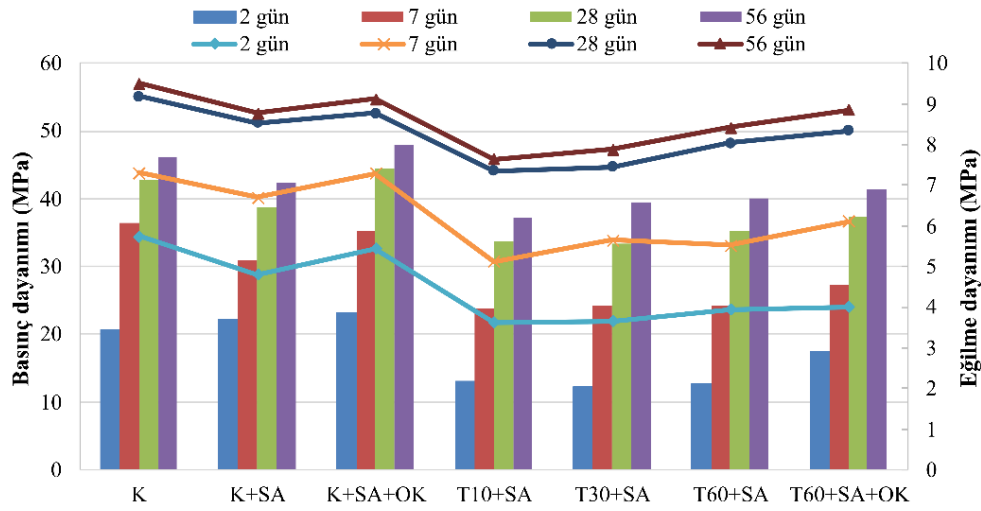
Harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil 5'te verilmiştir. Numunelerin zamana bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımı değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkısız harçların 2 günlük basınç dayanımlarını artırmış, ancak ilerleyen kür sürelerinde basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. Otojen kür bütün kür süreleri için katkısız ve katkılı harçların basınç dayanımlarını olumlu etkilemiştir. Kontrol numunesine göre aynı yaştaki numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen değişim yüzdeleri Tablo 5'te verilmiştir. Genel olarak Çayca tütünün tane boyu inceliği arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımlarında da artış olduğu tespit edilmiştir. Özellikle otojen kür uygulaması numunelerin basınç dayanımlarında artışa neden olmuştur. Çayca tütü içeren 28 ve 56 günlük numunelerin basınç dayanımlarında belirgin bir artışın gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Tablo 4. Harç numunelerinin zamana bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımları

Table 4. Compressive and flexural strengths of mortar samples depending on time

Karışım Kodu	Basınç dayanımları (MPa)				Eğilme dayanımları (MPa)			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
K	20.74	36.51	42.69	46.18	5.74	7.31	9.19	9.51
K+SA	22.15	30.93	38.81	42.43	4.80	6.70	8.53	8.78
K+SA+OK	23.16	35.26	44.47	47.87	5.44	7.29	8.77	9.13
T10+SA	13.04	23.90	33.71	37.18	3.63	5.13	7.36	7.64
T30+SA	12.29	24.11	33.45	39.50	3.66	5.65	7.45	7.88
T60+SA	12.62	24.13	35.23	40.14	3.94	5.53	8.04	8.43
T60+SA+OK	17.50	27.21	37.45	41.43	4.01	6.12	8.34	8.85

Şekil 5'te verilen harç numunelerinin eğilme dayanımları grafiğinde, 28 günlük sonuçların değerlendirilmesinde, 9.19 MPa ile en yüksek eğilme dayanımı K kodlu kontrol numunesinde elde edilmiştir. Çayca tütünün tane boyu inceliği arttıkça numunelerin eğilme dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda otojen kür uygulanan numunelerin eğilme dayanımlarında da artış olmuştur. Çayca tütü ikamesi ile birlikte numunelerin eğilme dayanımlarında azalma meydana gelirken, çayca tütünün tane boyu inceliği arttıkça azalma yüzdesinde düşüş meydana gelmiştir. [TS EN 197-1 \(2012\)](#)'e göre CEM I 42.5 R kullanılan numunelerin 2 günlük basınç dayanımlarının 20 MPa'dan, 28 günlük basınç dayanımlarının ise 42.5 MPa'dan büyük olması gerekmektedir. Bu bağlamda Çayca tütü içeren numunelerin 2 ve 28 günlük basınç dayanımları [TS EN 197-1 \(2012\)](#) standardında belirtilen yeterli seviyeye ulaşamamıştır.



Şekil 5. Harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları

Figure 5. Compressive and flexural strengths of mortar samples

Kara (2022) Portland çimentosuna %5, 10 ve 20 oranlarında doğal ve kalsine pileki ikame etmişlerdir. Çimento harçlarının 28 günlük basınç dayanımlarının pileki oranı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Bu azalma oranları %20 doğal ve kalsine pileki içeren numuneler için sırasıyla %34.5 ve %23.9'dur. Sonuçlar incelendiğinde TS EN 197-1 (2012)'de belirtilen gerekli en az basınç dayanımları sadece %5 doğal ve kalsine pileki içeren harçlarda elde edilmiştir. Bu durum doğal pilekinin tane boyutunun çimentoya yakın olup boşlukları doldurması, kalsine pilekinin ise puzolanik etkisi ile ilişkilendirilmiştir. Yu vd. (2017) Portland çimentosuna ikame edilen %10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarındaki volkanik tüfün harçların basınç ve eğilme dayanımlarına etkisini incelemişlerdir. Volkanik tüf oranı arttıkça, numunelerin basınç ve eğilme dayanımları azalmıştır. Basınç dayanımındaki kayıplar %4.8 ile %32.1 arasında değişirken, eğilme dayanımındaki kayıplar %3.4 ile %37.5 arasındadır. Basınç dayanımları incelendiğinde, sadece %10 tüf içeren karışım TS EN 197-1 (2012)'deki şartları sağlamıştır. Yukarıdaki çalışmalarda incelendiğinde genel olarak Portland çimentosuna ikame edilen puzolanik malzemelerin ikame oranları arttıkça, harçların dayanımları azalmıştır. İkame oranları %10'u aştığında TS EN 197-1 (2012)'deki limitleri sağlamamıştır.

Harç numunelerinin dayanım aktivite indeksleri Tablo 6'da verilmiştir. ASTM C618-12a (2012)'da puzolan içeren harç numunelerinin 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indekslerinin en az %75 olması gerektiği belirtilmiştir. T10+SA, T30+SA ve T60+SA kodlu harç numunelerinin sadece 28 günlük dayanım aktivite indeksleri %75'ten fazla iken, T60+SA+OK kodlu harç numunesinin hem 7 hem de 28 günlük dayanım aktivite indeksleri %75'ten fazladır. Otoklav kürün harç numunesinde dayanım kazanımını hızlandırması ve dayanımda bir miktar artışa sebep olması nedeniyle T60+SA+OK kodlu numune hem 7 hem de 28 günlük dayanım aktivite indeksi açısından alt limit değerinin üzerinde olmuştur. Demir vd. (2016) volkanik tüflerin 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indekslerini %85.60 ve %84.99, uçucu kül içeren harçların 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indekslerini %62.49 ve %66.41 olarak belirlemişlerdir. Bu sonuçlar volkanik tüflerin dayanım aktivite indekslerinin uçucu küle oranla daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Tablo 5. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişim yüzdeleri

Table 5. Percentage of change in compressive and flexural strengths of samples

Karışım Kodu	Basınç dayanımı değişimi (%)				Eğilme dayanımı değişimi (%)			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
K	-	-	-	-	-	-	-	-
K+SA	6.80	-15.28	-9.09	-8.12	-16.38	-8.34	-7.18	-7.68
K+SA+OK	11.67	-3.42	4.17	3.66	-5.23	-0.27	-4.57	-4.00
T10+SA	-37.13	-34.54	-21.04	-19.49	-36.76	-29.82	-19.91	-19.66
T30+SA	-40.74	-33.96	-21.64	-14.47	-36.24	-22.71	-18.93	-17.14
T60+SA	-39.15	-33.91	-17.47	-13.08	-31.36	-24.35	-12.51	-11.36
T60+SA+OK	-15.62	-25.49	-12.27	-10.29	-30.14	-16.28	-9.25	-6.94

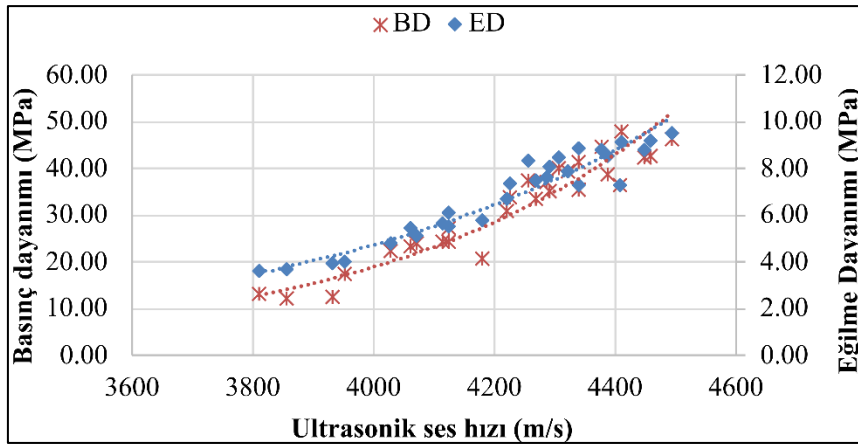
Tablo 6. Çayca tüfü içeren harçların dayanım aktivite indeksleri (%)
Table 6. Strength activity indexes of mortars containing Çayca tuff (%)

Karışım Kodu	7 gün	28 gün
T10+SA	65	79
T30+SA	66	78
T60+SA	66	83
T60+SA+OK	75	88

3.4. Ultrasonik ses hızı, basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler

3.4. Relationships between ultrasound pulse velocity, compressive and flexural strengths

Harç numunelerinin ultrasonik ses hızı değerleri ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki Şekil 6’da verilmiştir. Bu ilişkiler üstel olup, ultrasonik ses hızı değerleri ile basınç dayanımları ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkinin korelasyon katsayıları sırasıyla %91 ve %92’dir. USH ultrasonik ses hızını, BD basınç dayanımını ve ED eğilme dayanımını temsil etmekte olup, bu ilişkilerin denklemleri Denklem 4 ve 5’te verilmiştir. Kara (2022) harç numunelerinin basınç dayanımları ile ultrasonik ses hızı değerleri arasındaki ilişkinin korelasyon katsayılarının 0.96 ve 0.97, eğilme dayanımları ile ultrasonik ses hızı değerleri arasındaki ilişkinin korelasyon katsayılarının 0.81 ve 0.91 olduğunu bildirmiştir. Çullu vd. (2016) harçların basınç dayanımları ile ultrasonik ses hızı değerleri arasındaki ilişkilerin korelasyon katsayılarının 0.85 ile 0.99 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Bu değerler mevcut çalışmadaki değerler ile tutarlı olup tahribatsız bir yöntem olan ultrasonik ses hızı testinin harçların dayanım özelliklerinin belirlenmesinde dikkate alınabilecek bir yöntem olduğunu göstermiştir.



Şekil 6. Harç numunelerinin ultrasonik ses hızı ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkileri gösterir grafik

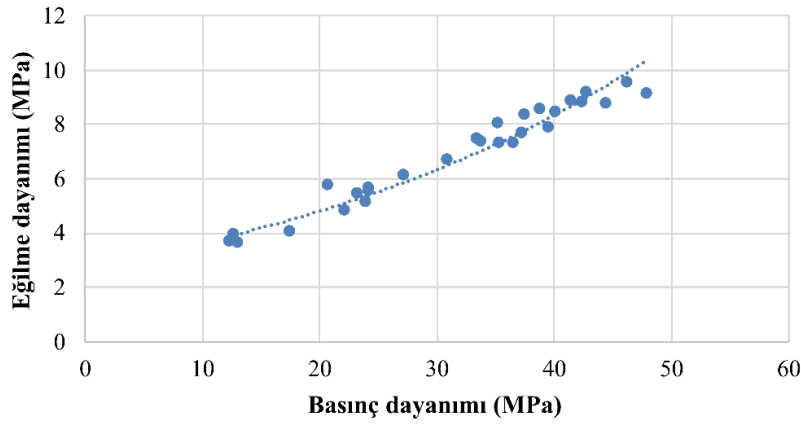
Figure 6. Graphic showing the relationship between ultrasonic pulse velocity with compressive and flexural strengths of mortar samples

$$USH=3709.4e^{0.004BD} \quad (4)$$

$$USH=3589.4e^{0.0232ED} \quad (5)$$

Harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları arasında tespit edilen üstel bir ilişkiyi gösterir grafik Şekil 7’de verilmiştir. İlişkinin korelasyon katkısı %95 olup, bu ilişkinin denklemi Denklem 6’da verilmiştir. Bu eşitlikte ED eğilme dayanımını, BD basınç dayanımını temsil etmektedir.

$$ED = 2.7725e^{0.0276BD} \quad (6)$$



Şekil 7. Harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkinin gösterildiği grafik

Figure 7. Graphic showing the relationship between compressive and flexural strengths of mortar samples

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu deneysel çalışmada Portland çimentosu yerine ağırlıkça %25 oranında üç farklı incelikteki Çayca tüfü ikame edilerek çimento harçları üretilmiştir. Üretilen bu harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş ve bu sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- I. Kirlili beyaz, sarımsı, pembemsi renk gösteren Çayca tufünün kısa sürede öğütülerek $4400 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'ın üzerinde özgül yüzey alanına sahip olması ve $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam içeriğinin %85.34 olması sebebiyle, Portland çimentosuna ikame malzeme olarak kullanılabilceği görülmüştür.
- II. Kontrol numunesinin kıvamı için belirlenen su/bağlayıcı miktarı %30 olurken, Portland çimentosuna ikame edilen Çayca tufünün tane boyu inceliği artarken kıvamı için gereken su miktarı artmıştır. Aynı zamanda çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça hamur numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri de gecikmiştir.
- III. 28 günlük harç numunelerinde en yüksek ultrasonik ses hızı değeri 4457 m/s ile K kodlu numunede elde edilirken, Çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça numunelerin ultrasonik ses hızı değerleri de artmıştır. Numunelerin ultrasonik ses hızı değerleri ile basınç ve eğilme dayanımları arasında üstel ilişki olup, bu ilişkilerin korelasyon katsayıları sırasıyla %91 ve %92'dir.
- IV. K kodlu kontrol numunesinin 28 günlük basınç dayanımı 42.69 MPa olup süper akışkanlaştırıcı içeren kontrol numunenin dayanımı 38.81 MPa , otoklav kürü uygulanan kontrol numunenin dayanımı ise 44.47 MPa 'dır. Çayca tüfü içeren numunelerin basınç dayanımları ise 33.45 ile 35.23 MPa arasındadır.
- V. Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, T10+SA kodlu numune ile T30+SA ve T60+SA kodlu numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında, değişimler sırasıyla -0.77 ve 4.51 , 56 günlük basınç dayanımlarında ise sırasıyla 6.23 ve 7.96 'dır. Genel olarak Çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımlarında da artış olduğu tespit edilmiştir.
- VI. Harç numunelerinin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları incelendiğinde otojen kürün basınç ve eğilme dayanımlarında artışa neden olduğu görülmüştür. Çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları da artmıştır. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında üstel bir ilişki olduğu belirlenmiş ve bu ilişkinin korelasyon katsayısı %95'tir.

Yazar katkısı*Author contribution*

İK deneysel çalışmayı gerçekleştirmiştir. AÖ ve MUT makalenin yazımını, sonuçların değerlendirmesini yapmışlardır. MD Çayca tufunun mineralojik ve jeolojik özelliklerini belirlemiş ve makaleye bu kısımlarda destek sağlamıştır.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Araújo, R. A., de Menezes, A. L. R., Cabral, K. C., Nóbrega, A. K. C., Martinelli, A. E., & Dantas, K. G. M. (2019). Evaluation of the pozzolanic activity of red ceramic waste using mechanical and physicochemical methods. *Cerâmica*, 65, 461-469. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752649>
- ASTM C597 (2002). Standart test method for pulse velocity through concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C0597-02>
- ASTM C618-12a (2012). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C0618-12A>
- Bayırlı, M., & Pekin, A. (2013). Volkanik tuf yüzeyi gözeneklerinin özelliklerinin birikinti geometrisi kullanarak incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(2), 66-72.
- Cordeiro, G. C., Filho, R. D. T., Tavares, L. M., Fairbairn, E. M. R., & Hempel, S. (2011). Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 529-534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.005>
- Çullu, M., Bolat, H., Vural, A., & Tuncer, E. (2016). Investigation of pozzolanic activity of volcanic rocks from the northeast of the Black Sea. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(3), 315-323. <https://doi.org/10.1515/secm-2014-0092>
- Demir, İ., Başpınar, M. S., Görhan, G., & Kahraman, E. (2016). Seyitömer Uçucu Külü ve Afyonkarahisar Yöresi Volkanik Tüflerinin puzolanik özelliklerinin belirlenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(1), 39-46.
- dos Santos, A. A. M., & Cordeiro, G. C. (2021). Investigation of particle characteristics and enhancing the pozzolanic activity of diatomite by grinding. *Materials Chemistry and Physics*, 270, 124799. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124799>
- Erdoğan, T. Y. (2016). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Helvacı C., & Alaca O. (1991). Bigadiç borat yatakları ve çevresinin jeolojisi ve mineralojisi. *Bulletin of The Mineral Research and Exploration*, 113, 61-92.
- Kara, İ. B. (2022). Doğal ve kalsine pilekinin karakterizasyonu, puzolanik aktivitesi ve çimento harçlarının mekanik özelliklerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 555-570. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.903255>
- Kavas, T., & Çelik, M. Y. (2001). Ayazını (Afyon) Tüflerinin çimento sanayiinde tras olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Madencilik Dergisi*, 40(2-3-4), 39-46.

- Keçek, İ. (2022). *Kütahya Çayca tüfünün çimentoda mineral katkı olarak kullanımının araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Kibici, Y., Dinç, D., & Uçar, A. (2012). Afyonkarahisar yöresi volkanik kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 29, 53-70.
- Kubiliute, R., Kaminskas, R., & Kazlauskaitė, A. (2018). Mineral wool production waste as an additive for Portland cement. *Cement and Concrete Composites*, 88, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.003>
- Nagročkienė, D., Girskas, G., & Skripkiūnas, G. (2017). Properties of concrete modified with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 135, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.215>
- Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Santos, P. M. S (2012). The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, 31, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>
- Rodier, L. Bilba, K., Onésippe, C., & Arsène, M. A. (2016). Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement. *Materials and Structures*, 50(87), 1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0958-6>
- Shi, Y., Chen, H., Wang, J., & Feng, Q. (2015). Preliminary investigation on the pozzolanic activity of superfine steel slag. *Construction and Building Materials*, 82, 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.062>
- TS EN 196-1 (2016). *Çimento deney metotları- Bölüm 1: dayanım tayini*. T.S.E., Ankara.
- TS EN 196-3 (2017). *Çimento deney yöntemleri-Bölüm 3: priz süreleri ve genleşme tayini*. T.S.E., Ankara.
- TS EN 197-1 (2012). *Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. T.S.E., Ankara.
- Tseng, Y. S., Huang, C. L., & Hsu, K. C. (2005). The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 782-787. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.026>
- Yu, L., Li, L., & Zhou, S. (2017). Evaluation of pozzolanic activity of volcanic tuffs from Tibet, China. *Advances in Cement Research*, 29 (4), 137-146. <https://doi.org/10.1680/jadcr.15.00075>
- Zhao, Y., Gao, J., Liu, C., Chen, X., & Xu, Z. (2020). The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118521. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118521>