

Sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilmiş karo atıklı geopolimer harçların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesi

Evaluation of some mechanical and physical properties of sodium hydroxide (NaOH) activated tile waste geopolymer mortars

Ömer ÇOBAN^{1*} , Tahir AKGÜL² 

¹İnşaat Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye.

omer.coban@bilecik.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.

tahirakgul@subu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 20.06.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 23.08.2023

doi: 10.5505/pajes.2024.00258

Kabul Tarihi/Accepted: 21.03.2024

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada öncelikle Bien Seramik Fabrikası'ndan temin edilen kusurlu karo atıkları öğütülerek 212 µm elekten elenmiştir. Elde edilen karo atık tozları, kırma kum ve 10M, 12M, 14M'lık derişimlerde NaOH çözeltisi ile harç numuneleri hazırlanmıştır. Elde edilen harç numuneleri taze haldeyken prizini alması için 90 °C'de 24 sa. süreyle etüv ortamında bekletilerek geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Numuneler 3, 7 ve 28 günlük hava küüne tabi tutulmuştur. Geopolimer harç numunelerine birim ağırlık, yoğunluk, su emme, görünür porozite, ultrases geçiş hızı ve basınç mukavemeti deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, su emme değerleri, görünür porozite değerlerinin NaOH derişiminin artmasıyla azaldığı, birim ağırlık, ultrases ve basınç mukavemeti değerlerinin arttığı, yoğunluğun ise belirgin bir değişikliğe uğramadığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Endüstriyel atıklar, Geopolimer harçlar, Sürdürülebilirlik, Karo atığı.

Abstract

In this study, first of all, defective tile wastes obtained from Bien Ceramic Factory were ground and sieved through a 212 µm sieve. Mortar samples were prepared with the obtained tile waste powders, crushed sand and NaOH solution at concentrations of 10M, 12M, 14M. Geopolymer mortar samples were produced by keeping the obtained mortar samples in an oven environment at 90°C for 24 hours in order to set them while fresh. The samples were subjected to air curing for 3, 7 and 28 days. Unit weight, density, water absorption, apparent porosity, ultrasound penetration rate and compressive strength tests were applied to the geopolymer mortar samples. As a result of the experiments, it was determined that the water absorption values and the apparent porosity values decreased with the increase in the NaOH concentration, the unit weight, ultrasound and pressure strength values increased, and the density did not undergo a significant change.

Keywords: Industrial Waste, Geopolymer Mortars, Sustainability, Tile waste.

1 Giriş

Çimento betonda ve harç üretiminde yaygın bir biçimde kullanılan yapı malzemesi olup atmosfere salınan CO₂'nin %10'u çimentonun üretimi esnasında ortaya çıkmaktadır. Atmosfere salınan CO₂'nin yaklaşık %7'si 900 °C'de CaCO₃'den CO₂'nin ayrışmasıyla oluşmaktadır [1]-[3]. Bu sebepten araştırmalar çimentosuz bağlayıcı olan geopolimerler üzerinde yoğunlaşmaya başlamıştır. Geopolimer terimi yaklaşık 30 yıl önce Fransız bilim adamı Davidovitch tarafından alkali ortamda oluşan polimerler için kullanılmıştır. Geopolimerler klasik çimentolar gibi CSH bağları oluşturarak mukavemet kazanan malzemeler olmayıp, mukavemet elde etmek için silika ve alüminanın polimerleşmesi sonucunda yapısal mukavemet kazanırlar [4]. Geopolimerler, kalsine kil, metakaolin, kaolin, smektit gibi doğal veya silika alüminatça zengin uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi yapay hammaddelerle üretilebilirler [4],[5].

Teknolojinin gelişmesi ve üretimin hızlanması çeşitli sektörlerde endüstriyel atıkların oluşmasına, bunların depolama ve bertaraf edilme sorunlarını ortaya çıkmasına neden olmakla birlikte üretim yapılırken daha az enerji harcama anlayışı endüstriyel alanda ortaya çıkan atıkların

sektörlerce yeniden değerlendirilebilirliğini gündemde tutmaktadır [6]. Yıllık, 320.000 ton ve 21.3 milyon adet üretimin yapıldığı, %60'ının yurt dışına ihraç edildiği bir sektörden elde edilen atıkları bu kapsamda ele almak gerekmektedir [7]. Bu bağlamda endüstriyel atıkların geopolimer harç üretiminde kullanımı araştırmacıların ilgisini çekmekte ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmaya devam etmektedir.

Kaur ve diğ. 2018 yılında yaptıkları çalışmada uçucu külü 12M, 14M ve 16M oranlarında NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive etmek üzere kombine bir biçimde 2:1 oranda kullanmış ve harç numuneleri üretmişlerdir. Harç örneklerini 80 °C'de 24 sa. etüvde beklettikten sonra oda sıcaklığında 3, 7, 14, 28 gün kürleyerek geopolimer harç örneklerinin basınç dayanımlarını belirlemişlerdir. Uçucu küllü geopolimer harç örneklerinin dayanımlarının molarite ve kür süresinin artışına paralel arttığını bildirmişlerdir [8].

Saeli ve diğ. 2020 yılında kağıt endüstrisinden elde edilen ve kalkerli çamurun geopolimer harç üretiminde alternatif bir malzeme olabileceğini araştırmışlardır. Bu atığın ağırlıkça %10 kullanımı geopolimer harçlarda dolgu malzemesi olarak etkili olduğunu, yaklaşık %30 oranında da geopolimer harçların mekanik özelliklerini iyileştirdiğini bildirmişlerdir [9].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Mahmut ve Emiroğlu 2016 yılında Elazığ ferrokrom tesisi çürufunu çimento inceliginde öğütürerek geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Harç numunelerini üretirken NaOH ve Na_2SiO_3 'yi karışımlar 6M, 9M ve 12M olacak şekilde aktifleştirici kullanarak üretmiş ve 45 °C, 60 °C ve 90 °C etüv ortamında 1, 4 ve 7 gün bekletmişler ve geopolimer harç örneklerini birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutmuşlardır. Elde ettikleri veriler neticesinde Elazığ ferrokrom çürufunun 15 MPa üzeri dayanıma sahip olan örneklerin geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğini bildirmişlerdir [10].

Atabay ve Öztürk 2022 yılında yapmış oldukları çalışmada seramik sağlık gereci atıklarını öğütürerek geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada 0.45 ve 0.50 likit/bağlayıcı oranlarında 10M, 12M, 14M ve 16M'lık NaOH çözeltisini alkali aktivatör olarak kullanmışlar, 24 sa. 80°C'de etüvde prizini alan geopolimer harç numunelerine işlenebilirlik, birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı, su emme ve boşluk oranı deneylerini uygulamışlardır. Elde ettikleri veriler ışığında ekonomik anlamda 0.45 likit/bağlayıcı oranında 12M'lık NaOH çözeltisinin geopolimer harç üretiminde kullanımının uygun olduğunu bildirmişlerdir [11].

Chen ve diğ. 2023 yılında yaptıkları çalışmada, evsel atık yakma külünden elde edilmiş uçucu küllü geopolimer tuğla numuneleri hazırlamak için, metakaolin ve yıkanmış uçucu kül ve alkali aktivatör (NaOH ile $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2.5\text{SiO}_2$ belli oranlarda) kullanmışlardır. Uygun formülasyonla elde edilen numunelerinin mukavemetleri 15 MPa'nın üzerinde performans sergilerken, maksimize edilenler ise (bağlayıcı ve aktivatör oranı artırılanlar) 30 MPa'nın üzerinde performans sergilemiştir. Ayrıca Cr, Mn, Cu, As, Pb, Zn ve Cd gibi ağır metallerin %92'den fazla bağlanma oranına sahip olduğunu; As, Pb ve Zn gibi ağır metallerin ise neredeyse tamamen bağlanarak hareketsiz hale getirildiğini bildirmişlerdir. Böylelikle evsel atıklardan elde edilen uçucu küllü geopolimer malzemelerin çevre sorunlarına katkıda bulunabileceğini belirtmişlerdir [12].

Kumar ve diğ. 2023 yılında petrol rafinerisinden elde edilen petrol çamuru atığını uçucu küle %5-20 arasında ikame etmek suretiyle NaOH ve Na_2SiO_3 ile alkali aktif ederek geopolimer harç numuneler üretmişlerdir. Petrol çamuru atığıyla %10 uçucu küllün yer değiştirilmesiyle elde edilen geopolimer harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımlarının 38.17 MPa ile en yüksek olduğunu bildirmişlerdir. [13].

Öztürk ve Çam'ın 2023'de yaptıkları çalışmada kırmızı ve sarı taş kesme atıklarını %10- %40 oranlarında ağırlıkça F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer harçlara ikame edilmesiyle oluşan mekanik ve fiziksel özellikleri incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak NaOH kullanmışlar ve numuneleri 90 °C'de 24 sa. küre maruz bırakmışlardır. Ürettikleri geopolimer harçları işlenebilirlik, birim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, gözeneklilik, yüksek sıcaklık deneylerine (400 °C, 600 °C, 800 °C) tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak, taş kesme atıklarının %40'a kadar uçucu kül yerine ikameli kullanımının uçucu kül esaslı geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini iyileştirdiğini bildirmişlerdir [14].

Çelik 2023 yılında yapmış olduğu çalışmasında, bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül yerine %25, %50 ve %70 atık bazalt ve mermer tozu ikamesiyle geopolimer numuneler üretmiştir. Hatta bazı geopolimer numuneleri sadece atık mermer ve atık

bazalt tozlarını kullanarak hazırlamıştır. Çalışma sonucunda yalnızca uçucu külden üretilen numunelerin mukavemeti 30 MPa iken, %25 bazalt ve mermer tozuyla elde ettiği numunelerin ortalama mukavemeti 31 MPa ile en iyi dayanımı sağladığını tespit etmiştir. Ayrıca diğer ikame oranlarının da uçucu küle göre daha iyi mukavemet sağladığı sonucuna da ulaşmıştır [15].

Yukarıda verilen çalışmalarda, farklı bir atık veya atık grubunun geopolimer yapı malzemesi üretiminde kullanımının genellikle aynı yöntemler kullanılarak araştırıldığı görülmektedir. Bu çalışmalardan yola çıkılarak diğer çalışmalardan ayrı olarak, daha farklı derişimlerde ve likit/bağlayıcı oranlarında, farklı kür sıcaklığı ve farklı atık malzeme olan karo atıklarının kullanımı bu çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır.

Ayrıca bu çalışmada Bien Seramik Fabrikası'ndan üretim esnasında kusurlu olan karoların öğütülerek 212µm'lik elekten elenmesiyle, 10M, 12M, 14M'lık derişimlere sahip NaOH ile aktifleştirilerek geopolimer harç üretiminde kullanılmasının araştırılması hedeflenmiştir.

2 Materyal ve yöntem

2.1 Materyal

Bu çalışmada karo atığı bağlayıcı, NaOH çözeltisi aktivatör, standarta uygun hale getirilmiş granüle kum materyal olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.1.1 Karo atığı

Çalışmada kullanılan karo atığı Bilecik ilinde yer alan Bien Seramik Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Üretim kaynaklı kusurlu olan ve atık olarak depolanan karolar öğütülerek 212 µm'lik elekten elenmiş, 24 sa. 105±5 °C'de etüv kurusu haline getirilerek çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Geopolimer harç yapımında kullanılan öğütülmüş, elenmiş etüv kurusu haline getirilmiş karo atığı ve 10M, 12M ve 14 M, 225 g NaOH çözeltileri.

Figure 1. Ground, sieved oven-dried tile waste and 10M, 12M and 14M, 225 g NaOH solutions used in making geopolimer mortar.

Karo atığının kimyasal analiz değerleri aynı fabrikadan temin edilen atık karolar olduğundan, Poyraz ve Ural'ın 2022 yılında yapmış oldukları çalışmadan alınarak Tablo 1'de verilmiştir.

2.1.2 Aktivatör

Çalışmada, pelet halinde sodyum hidroksit saf suda çözdürülerek 10M, 12M ve 14M derişime sahip NaOH çözeltileri hazırlanmış ve aktivatör olarak kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan NaOH'nın özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Karo atığının kimyasal bileşimi [16].

Table 1. Chemical composition of tile waste.

Bileşen	Karo Atığı Sırlı (%)
Al ₂ O ₃	14.2
SiO ₂	55.5
K ₂ O	6.81
CaO	6.14
TiO ₂	3
Fe ₂ O ₃	8.5
ZnO	1.7
ZrO ₂	2.6
BaO	0.5
SrO	0.2
Rb ₂ O	0.2
MnO	0.3
P ₂ O ₅	0.1
MgO	-

Tablo 2. Alkali aktivatörün özellikleri.

Table 2. Properties of alkaline activator.

Molekül Formülü	Saflık (%)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Renk	pH
NaOH	96	39.99	Beyaz	13.5

2.1.3 Kum

Çalışmada, granülometrik olarak standart kum formuna getirilmiş kırma taş kum kullanılmıştır. Kullanılan kumun elek analizi değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kırma taş granül kumunun elek analizi değerleri.

Table 3. Sieve analysis values of crushed stone granule sand.

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
2	100
1.6	94
1	66
0.5	38
0.16	18
0.08	5

2.2 Yöntem

2.2.1 Karışımların hazırlanması

Harç karışımları TS EN 196-1'e uygun olarak 0.50 likit/bağlayıcı oranına sahip olarak 10M, 12M ve 14M'in her birinden 3'er adet 3, 7 ve 28 günlük birim ağırlık, yoğunluk, su emme, porozite, ultases geçiş hızı ve basınç dayanımlarına bakılmak üzere toplam 18 adet olarak hazırlanmıştır. Harç karışım oranları Tablo 4'te verilmiştir[17].

Tablo 4'ten de görüleceği gibi karışımlarda TS EN 196-1' uygun olarak 450 g karo atığı, 10M, 12M ve 14M'lik derişime sahip 225 g aktivatör ve 1350 g kum kullanılmıştır. Harçlar hazırlanırken önce yavaş devirde çözelti ile karo atığı 30 sn. boyunca karıştırılmış ve geopolimer harç pastası oluştuktan sonra, harç pastasına 30 sn. boyunca kum ilave edilmiş ve 30 sn de hep birlikte toplamda 90 sn. karıştırılmışlardır. 90 sn.'nin sonunda

cihaz hızlı devire getirilerek 60sn. boyunca hızlı devirde karışım yapılmıştır. Karışımlar 40x40x160 mmxmmxmm'lik kalıplara kuru kıvamda olduklarından sıkıştırma yapılarak ve sıkıştırmaya ek olarak sarsma tablasında 60 vuruş yapılarak yerleştirilmiştir (Şekil 2). Kalıplara yerleştirilen numuneler 90 °C etüvde 24 sa. küre tabi tutulmuştur. 24 sa. etüvde kür edilip prizini tamamlayan geopolimer harç numuneleri 3, 7 ve 28 gün olmak üzere hava küründe bekletilmişlerdir.



Şekil 2. 10M,12M ve 14 M NaOH'lı karo atıklı geopolimer harç numunelerinin taze ve sertleşmiş halleri.

Figure 2. Fresh and hardened samples of geopolymer mortar with tile waste with 10M, 12M and 14 M NaOH.

2.2.2 Birim ağırlık değerlerinin belirlenmesi

Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin etüv kürü sonrası, 3, 7 ve 28 günlük hava kürü sonrası ağırlıklarının hacmine oranlanması ile birim ağırlıkları tespit edilmiştir [18].

Tablo 4. Farklı NaOH derişimlerinde hazırlanmış karo atıklı geopolimer harç karışım oranları.

Table 4. Mixing ratios of geopolymer mortar with tile waste prepared at different NaOH concentrations.

Geopolimer Harç Derişimleri	Saf Su (g)	NaOH (g)	Likit (g)	Karo Atığı (g)	Kum (g)	Likit/Bağlayıcı
10M	160.7	64.3	225	450	1350	0.50
12M	152.03	72.97	225	450	1350	0.50
14M	144.23	80.77	225	450	1350	0.50

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (1)$$

γ = Birim ağırlık (kg/m³),

P= Hava kurusu ağırlık (kg),

V= Harç numunelerinin hacmi (m³).

2.2.3 Sertleşmiş geopolimer harç numunelerinin yoğunluğunun belirlenmesi

Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin yoğunluğu TS EN 12390-7'ye uygun olarak Arşimet terazisiyle belirlenmiştir. Aşağıda yer alan eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Şekil 3), [19].



Şekil 3. Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin su emme, porozite ve yoğunluğunun belirlenmesi.

Figure 3. Determination of water absorption, porosity and density of tile waste geopolimer mortar samples.

$$V = \frac{ma - [(mst + mw) - mst]}{\rho_w} \quad (2)$$

$$D = \frac{M}{V} \quad (3)$$

V : Numune hacmi (m³),

m_a : Numunenin havadaki ağırlığı (kg),

m_{st} : Kefenin su içindeki görünür kütlesi (kg),

ρ_w : Suyun 20 °C'deki yoğunluğu (998 kg/m³),

D : Numunenin nem durumuna bağlı birim hacim kütlesi (kg/m³),

m : Harç numunelerinin ağırlığı (m³).

2.2.4 Su emme ve görünen porozite değerlerinin belirlenmesi

Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin kütlece su emme yüzdeleri ve görünen porozite değerleri aşağıda yer alan eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$W_w = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (4)$$

$$GP = \frac{W_1 - W_0}{W_1 - W_2} \times 100 \quad (5)$$

W_w= Kütlece su emme yüzdesi (%),

W₀= Numunenin etüv kurusu ağırlığı (kg),

W₁= Numunenin suya doymuş ağırlığı (kg),

W₂= Numunenin su içinde asılı ağırlığı (kg),

GP= Görünen porozite yüzdesi (%) [20],[21].

2.2.5 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi

3, 7 ve 28 gün havada kür edilen karo atıklı geopolimer harç numunelerinin ASTM C 597'ye uygun olarak ultrases geçiş

hızları belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır [22].

$$v = \frac{l}{t} \quad (6)$$

v= Ultrases geçiş hızı, (km/sn.),

l= Ölçülen noktalar arası mesafe, (km),

t= Ses geçiş süresi, (sn.).

2.2.6 Basınç Mukavemetinin Belirlenmesi

3, 7 ve 28 gün havada kür edilen karo atıklı geopolimer harç numunelerinin TS EN 196-1'e uygun olarak basınç mukavemetleri belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Şekil 4), [23].

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (7)$$

R_c= Basınç mukavemeti, (N/mm²),

F_c= Kırılma anındaki en büyük kuvvet, (N),

b= Basınç plakasının kenar uzunluğu, (mm²).



Şekil 4. Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin ultrases geçiş hızlarının ölçülmesi ve basınç dayanımlarının belirlenmesi.

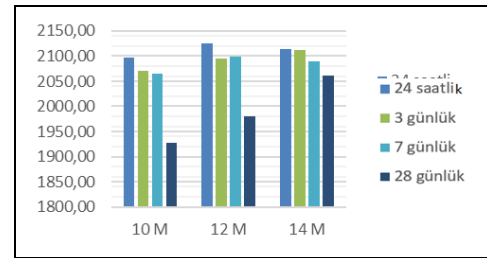
Figure 4. Measurement of ultrasound transmission velocities and determination of compressive strength of geopolimer mortar samples with tile waste.

3 Bulgular

10 M, 12 M, 14 M derişimli NaOH ile aktifleştirilmiş karo atıklı geopolimer harçlara uygulanan deneyler sonucunda elde edilen bulgular bu bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.1 Birim ağırlık bulguları

24 sa. etüv sonrası, 3, 7 ve 28 günlük harç numuneleri üzerinde yapılan birim ağırlık hesaplamalarından elde edilen bulgular Şekil 5'te verilmiştir.



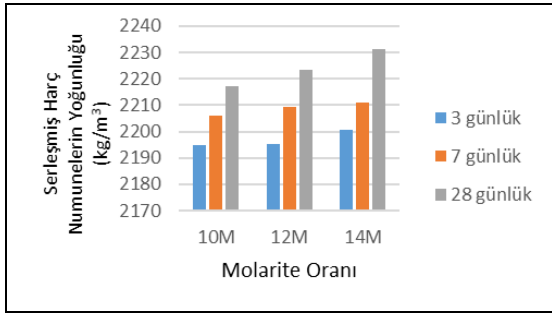
Şekil 5. Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin birim ağırlık değerleri.

Figure 5. Unit weight values of geopolimer mortar samples with tile waste.

Şekil 5 incelendiğinde birim ağırlık değerleri 24 sa. etüv sonrası için 10M'a göre 12M'lık ve 14M'lık numunelerde sırasıyla %1.42'lik ve %0.85'lik bir artış; 3 günlük hava kürü uygulanmış numuneler için 10M'a göre 12M'lık ve 14'lük numunelerde sırasıyla %1.19'lik ve %2.03'lük bir artış; 7 günlük hava kürü uygulanmış numuneler için 10M'a göre 12M'lık ve 14'lük numunelerde sırasıyla %1.65'lik ve %0.05'lik bir artış; 28 günlük havada kür edilmiş numuneler için 10M'a göre 12M'lık ve 14'lük numunelerde sırasıyla %2.74'lük ve %7.02'lik bir artış göstermiştir. Derişimin artması birim ağırlığı artırırken havada kürü süresi arttıkça birim ağırlıklar tüm derişimlerde azalmıştır. 10, 12, 14 M'lık numunelerin birim ağırlıkları 24 sa. 28 güne kadar sırasıyla %8.11, %6.90, %2.46 oranlarında azalmıştır. Bu azalmanın, zamanla harç içerisinde geopolimerleşme sonucunda reaksiyona girmeyen fazla suyun ortamdan buharlaşmasıyla oluşan boşluklar sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir.

3.2 Sertleşmiş geopolimer harç numunelerinin yoğunluk bulguları

Sertleşmiş karo atıklı 3, 7 ve 28 günlük geopolimer harç numuneleri üzerinde yapılan yoğunluk hesaplamalarından elde edilen bulgular Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin yoğunluk değerleri.

Figure 6. Density values of geopolimer mortar samples with tile waste.

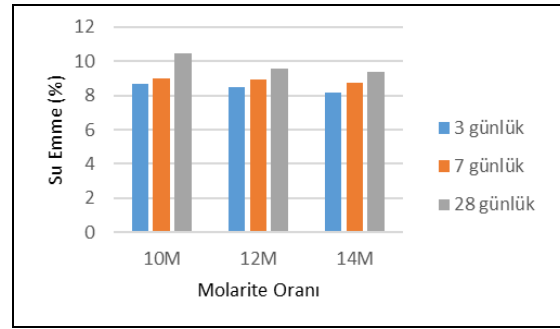
Şekil 6 incelendiğinde sertleşmiş harç numunelerinin yoğunluk değerleri derişim oranı ve hava kürü süresi arttıkça artış göstermiş olmasına rağmen oransal oranda çok belirgin bir değişiklik meydana getirmemiştir. 3 günlük hava kürü uygulanan numunelerin yoğunluğu 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %0.008 ve %0.26; 7 günlük hava kürü uygulanan numunelerin yoğunluğu 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %0.14 ve %0.23; 28 günlük hava kürü uygulanan numunelerin yoğunluğu 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %0.28 ve %0.63'lük bir artış göstermiştir. Numune kür gününe bağlı olarak 10, 12, 14M'lık harç numuneleri için 3-28 günlük hava kürü aralığında bekletilen numuneleri yoğunluklarında sırasıyla %1.02, %1.29 ve %1.38 oranlarında artış meydana gelmiştir.

3.3 Su emme ve porozite değerlerinin bulguları

Sertleşmiş karo atıklı 3, 7 ve 28 günlük geopolimer harç numuneleri üzerinde yapılan kütlece su emme, porozite deneylerinden elde edilen bulgular Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.

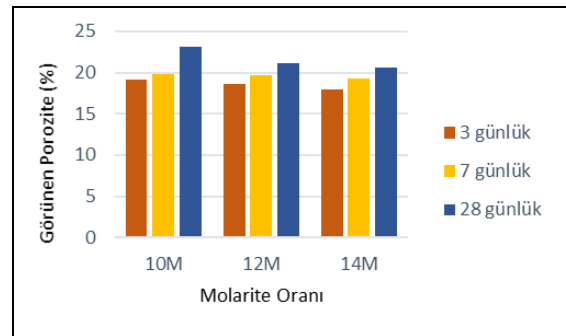
Şekil 7 incelendiğinde sertleşmiş harç numunelerinin kütlece su emme yüzdeleri derişim oranı arttıkça azalmış, hava kürü süresi arttıkça artış göstermiştir. 3 günlük hava kürü uygulanan numunelerin kütlece su emme yüzdeleri 10M'a göre 12 ve

14 M'lık numunelerde sırasıyla %2.72 ve %6.10; 7 günlük hava kürü uygulanan numunelerin kütlece su emme yüzdeleri 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %0.7 ve %2.68; 28 günlük hava kürü uygulanan numunelerin kütlece su emme yüzdeleri 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %8.82 ve %10.34'lük bir azalış göstermiştir. Numune kür gününe bağlı olarak 10, 12, 14M'lık harç numuneleri için 3-28 günlük hava kürü aralığında bekletilen numunelerin kütlece su emme yüzdelerinde sırasıyla %20.13, %12.9 ve %14.7 oranlarında artış meydana gelmiştir. Bu durumun da geopolimerleşme esnasında reaksiyona girmeyen fazla suyun ortamı terketmesinden dolayı oluşan boşluklar sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 7. Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin su emme yüzdeleri.

Figure 7. Water absorption percentages of tile waste geopolimer mortar samples.



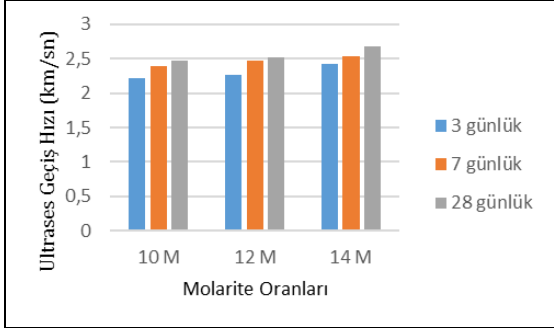
Şekil 8. Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin görünen porozite yüzdeleri.

Figure 8. Percentage of apparent porosity of tile waste geopolimer mortar samples.

Şekil 8 incelendiğinde sertleşmiş harç numunelerinin görünen porozite değerleri derişim oranı arttıkça azalmış, hava kürü süresi arttıkça artış göstermiştir. 3 günlük hava kürü uygulanan numunelerin görünen porozite yüzdeleri 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %2.86 ve %6.8; 7 günlük hava kürü uygulanan numunelerin görünen porozite değerleri 10M'a göre 12 ve 14M'lık numunelerde sırasıyla %0.65 ve %2.62; 28 günlük hava kürü uygulanan numunelerin görünen porozite değerleri 10M'a göre 12 ve 14M'lık numunelerde sırasıyla %8.5 ve %10.7'lik bir azalış göstermiştir. Numune kür gününe bağlı olarak 10, 12, 14M'lık harç numuneleri için 3-28 günlük hava kürü aralığında bekletilen numunelerin görünen porozite yüzdelerinde sırasıyla %20.09, %13.13 ve %13.51 oranlarında artış meydana gelmiştir. Bu durumun da geopolimerleşme esnasında reaksiyona girmeyen fazla suyun ortamı terketmesinden dolayı oluşan boşluklar sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir.

3.4 Ultrases geçiş hızı bulguları

Sertleşmiş karo atıklı 3, 7 ve 28 günlük geopolimer harç numuneleri ultrases geçiş hızından elde edilen bulgular Şekil 9'da verilmiş ve elde edilen bulgular Tablo 5'te göre kalite açısından değerlendirilmiştir.



Şekil 9. Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri.

Figure 9. Ultrasound transmission velocity values of geopolimer mortar samples with tile waste.

Şekil 9 incelendiğinde sertleşmiş harç numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri derişim oranı arttıkça ve hava kürü süresi arttıkça artış göstermiştir. 3 günlük hava kürü uygulanan numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %2.71 ve %9.95; 7 günlük hava kürü uygulanan numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri 10 M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %3.3 ve %5.83; 28 günlük hava kürü uygulanan numunelerin ultrases geçiş hızının 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %2.02 ve %8.5'lik bir artış göstermiştir. Numune kür gününe bağlı olarak 10, 12, 14 M'lık harç numuneleri için 3-28 günlük hava kürü aralığında bekletilen numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla %11.76, %11.01 %10.29 oranlarında artış meydana gelmiştir.

Tablo 5. Ses hızı ile harç numunelerin kalite değerleri [18].

Table 5. Quality values of mortar samples with sound velocity [18].

Ses Hızı (km/sn.)	Harç numunesi kalitesi
> 4.5	Mükemmel
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Şüpheli
2.0-3.0	Zayıf
< 2.0	Çok Zayıf

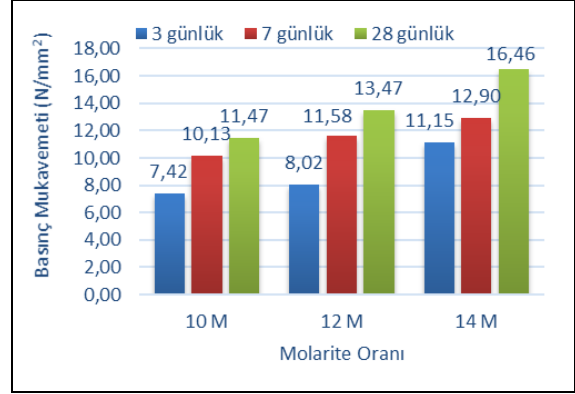
Tablo 5 incelendiğinde karo atıklı geopolimer harçların 3-7-28 günlükler 2.0-3.0 aralığında kalite olarak zayıf çıkmıştır.

3.5 Basınç mukavemeti bulguları

Sertleşmiş karo atıklı 3, 7 ve 28 günlük geopolimer harç numuneleri basınç mukavemetlerinden elde edilen bulgular Şekil 10'da verilmiştir.

Şekil 10 incelendiğinde sertleşmiş harç numunelerinin basınç mukavemeti değerleri derişim oranı arttıkça ve hava kürü süresi arttıkça artış göstermiştir. 3 günlük hava kürü uygulanan numunelerin basınç mukavemeti değerleri 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %8.09 ve %50.27; 7 günlük hava kürü uygulanan numunelerin basınç mukavemeti değerleri 10M'a göre 12 ve 14 M'lık numunelerde sırasıyla %14.31 ve %27.34; 28 günlük hava kürü uygulanan numunelerin basınç mukavemeti 10M'a göre 12 ve 14 M'lık

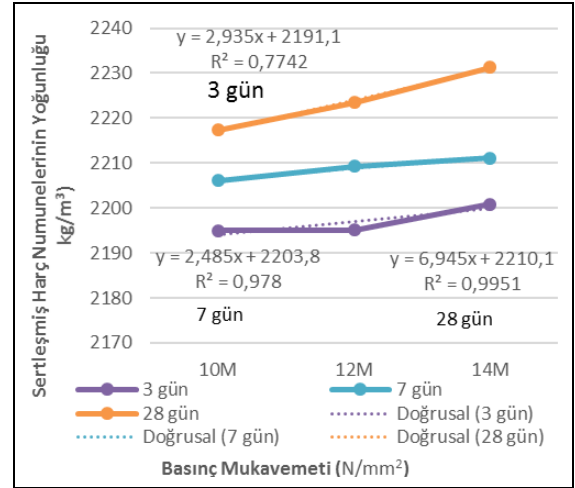
numunelerde sırasıyla %17.44 ve %43.5'lik bir artış göstermiştir. Numune kür gününe bağlı olarak 10, 12, 14 M'lık harç numuneleri için 3-28 günlük hava kürü aralığında bekletilen numunelerin basınç mukavemeti değerleri sırasıyla %54.58, %67.96, %47.62 oranlarında artış meydana gelmiştir.



Şekil 10. Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin basınç mukavemetleri.

Figure 10. Compressive strengths of geopolimer mortar samples with tile waste.

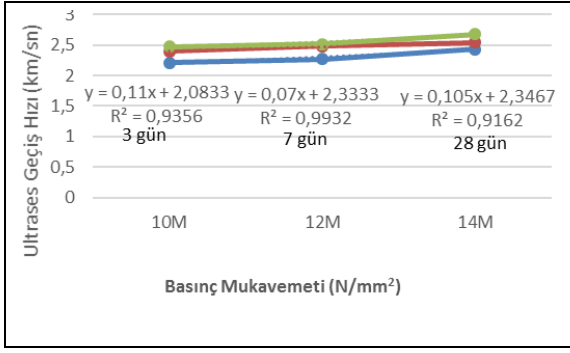
Şekil 11 incelendiğinde sertleşmiş harç numunelerinin yoğunlukları ile basınç dayanımlarının kür süresi ve molarite artışına paralel olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca, kür sürelerine bağlı olarak geopolimer sertleşmiş harç numunelerinin basınç mukavemetleri ile yoğunlukları 3 günlük, 7 günlük ve 28 günlüklerde molaritenin artışıyla sırasıyla, 0.77, 0.98 ve 0.99 oranlarında yüksek ilişkili olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Karo atıklı geopolimer sertleşmiş harç numunelerinin basınç mukavemetleri ile yoğunluk ilişkisi.

Figure 11. The relationship between compressive strength and density of tile waste geopolimer hardened mortar samples.

Şekil 12 incelendiğinde sertleşmiş harç numunelerinin ultrases geçiş hızı ile basınç dayanımlarının kür süresi ve molarite artışına paralel olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca kür sürelerine bağlı olarak geopolimer sertleşmiş harç numunelerinin basınç mukavemetleri ile ultrases geçiş hızları 3 günlük, 7 günlük ve 28 günlüklerde molaritenin artışıyla sırasıyla, 0.94, 0.98 ve 0.92 oranlarında yüksek ilişkili olduğu görülmektedir.



Şekil 12. Karo atıklı geopolimer sertleşmiş harç numunelerinin basınç mukavemetleri ile ultrases geçiş hızı ilişkisi.

Figure 12. Relationship between compressive strength and ultrasound transmission velocity of tile waste geopolymer cured mortar samples.

4 Tartışma ve sonuçlar

Çalışmanın bulgularından elde edilen veriler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- ✓ Karo atıklı geopolimer harç numunelerin 24 sa.'lik, 3, 7, 28 günlük birim ağırlık değerleri incelendiğinde en düşük derişim oranı olan 10M'a kıyasla derişim miktarının artmasıyla birim ağırlık değerleri artarken, kür süresinin artmasıyla birim ağırlıkta azalma meydana gelmiştir. Bu durumun geopolimerleşme sonucunda reaksiyona girmeyen suyun ortamdan uzaklaşması sonucunda oluşan boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Mahmut ve Emiroğlu 2016 yılında Elazığ ferrokrom çürufunun geopolimer harç kullanım potansiyelini araştırmış, yapmış oldukları çalışmada kür süresinin artmasıyla birim ağırlık değerlerinde azalma olduğunu ve molarite derişiminin artmasıyla birim ağırlık değerlerinin arttığını bildirmişlerdir,
- ✓ Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük yoğunluk değerleri derişim oranı ve kür süresinin artmasıyla artış eğilimi göstermesine rağmen yoğunluklarında çok belirgin bir değişiklik meydana gelmemiştir. En düşük artış 3 günlük geopolimer harçlarda 10M'a göre 12M da %0.008, en yüksek olarak 28 günlük numunelerde 10M'a göre 14M'da %0.63 olmuştur,
- ✓ Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin su emme ve görünen porozite değerleri derişim oranının artmasıyla azalırken kür süresinin 3 günden 28 güne doğru artmasıyla artış göstermiştir. Derişimin artmasıyla geopolimerleşme ve oluşan bağlarda artış meydana gelmesi sebebiyle bu oranlarda azalma meydana geldiği düşünülmektedir. Her bir molarite içerisinde ise kür süresinin artmasıyla birlikte su emme ve görünen porozite değerlerinde artış meydana gelmesi, ise hava kürüne tabi tutulan numunelerde bağ yapımına girmeyen suyun ortamdan uzaklaşması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. Atabay ve Öztürk 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada su emme ve görünen porozite değerlerinin molarite derişiminin artmasıyla azaldığı sonucunu tespit etmişleridir,
- ✓ Karo atıklı geopolimer harç numunelerinin ultrases geçiş hızı ve basınç mukavemeti değerleri derişim oranının ve kür süresinin artmasıyla artış sergilemiştir. Derişimin artmasıyla geopolimerleşme ve oluşan bağlarda artışın yapısal olarak dayanımı olumlu etkilediği düşünülmektedir. Atabay ve Öztürk 2021; Sevinç 2021 yılında yapmış

oldukları çalışmada ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerlerinin molarite derişiminin artmasıyla arttığı sonucunu tespit etmişleridir[21],[24],

- ✓ Genel anlamda yukarıda verilenlerden yola çıkılarak karo atıklı geopolimer harçların 0.50 S/B oranlı 10M, 12M ve 14M NaOH ile aktifleştirilmesiyle birlikte TS EN 998-1'ye 28 günlük basınç dayanımı açısından CSIV ($\geq 6\text{N/mm}^2$) sınıfında olduğu ve bu alanda duvar kaplama işlerinde harç olarak kullanılabilmesi görülmektedir. Şapçı, 2021 yılında yaptığı çalışmada çimento ve polimer esaslı kompozit elemanlar üretmiş TS EN 998-1'e göre dayanım sınıflandırmasında bulunmuştur. Çalışmanın deneysel yaklaşımı dayanım sınıflandırması çalışmayı destekler niteliktedir [25],[26]. Ayrıca harç numunelerinin üretiminde 1 seri için 450 g karo atığı kullanılmaktadır. Yüzey kaplama işlemlerinde 1m^3 harç üretiminde yaklaşık 1.76 ton atığın kullanılabilmesi ve böylelikle atık bertarafına da katkı sağlayabileceği de düşünülmektedir,
- ✓ Sonraki çalışmalarda daha farklı mol derişimleri, S/B oranları ve Na_2SiO_3 gibi farklı aktivatörlerle karo atıklarının kullanımı çalışmaya derinlik kazandıracığı yazarlar tarafından önerilmektedir.

5 Discussion and conclusion

As a result of the data obtained from the findings of the study, the following conclusions were reached.

When the 24-hour, 3, 7, 28 day unit weight values of the tile waste geopolymer mortar samples were examined, it was observed that the unit weight values increased with the increase in the concentration amount compared to the lowest concentration ratio, 10M, while the unit weight decreased with the increase in the curing time. It is thought that this situation arises from the voids formed as a result of the removal of water that did not react as a result of geopolymerization. Mahmut and Emiroğlu investigated the geopolymer mortar usage potential of Elazığ ferrochrome slag in 2016 and reported that the unit weight values decreased with the increase of the curing time and the unit weight values increased with the increase in the molarity concentration.

Although the 3, 7 and 28 day density values of the tile waste geopolymer mortar samples tended to increase with the increase in the concentration ratio and curing time, there was no significant change in their density. The lowest increase was 0.008% at 12 M compared to 10 M in 3 day geopolymer mortars, and the highest increase was 0.63% at 14 M compared to 10 M in 28 day samples.

While the water absorption and apparent porosity values of the tile waste geopolymer mortar samples decreased with the increase in the concentration ratio, they increased with the increase of the curing time from 3 days to 28 days. It is thought that these ratios decrease due to the increase in the geopolymerization and the bonds formed with the increase in the concentration. It is thought that the water absorption and apparent porosity values increase with the increase of the curing time in each molarity, and that the water that does not enter the bond formation in the samples subjected to air cure is removed from the environment. Atabay and Öztürk, in their study in 2021, determined that the water absorption and apparent porosity values decreased with increasing molarity concentration.

Ultrasound transmission rate and compressive strength values of geopolymer mortar samples with tile waste increased with increasing concentration ratio and curing time. It is thought that the increase in the geopolymerization and the bonds formed with the increase in the concentration affect the structural strength positively. Atabey and Öztürk 2021; Sevinç determined in their study in 2021 that the rate of ultrasound penetration and compressive strength values increased with the increase of molarity concentration.

In general terms, starting from the above, tile waste geopolymer mortars are in CSIV ($\geq 6\text{N/mm}^2$) class in terms of 28 day compressive strength according to TS EN 998-1 with the activation of 0.50 S/W ratio 10M, 12M and 14M NaOH. It is seen that it can be used as a mortar in coating works. In his work in 2021, Şapçı produced cement and polymer-based composite elements and found strength classification according to TS EN 998-1. The experimental approach of the study supports the strength classification study [25],[26]. In addition, 450 g. tile waste is used for 1 batch in the production of mortar samples. It is also thought that approximately 1.76 tons of waste can be used in the production of 1 m³ mortar in surface coating processes and thus contribute to waste disposal.

In future studies, it is suggested by the authors that the use of tile wastes with different mole concentrations, W/B ratios and different activators such as Na₂SiO₃ will add depth to the study.

6 Yazar katkı beyanı

Hazırlanan çalışmada Ömer ÇOBAN fikrin oluşturulması deneylerin yapılmasında, literatür taramasında elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde, Tahir AKGÜL elde edilen sonuçların değerlendirilmesine ek katkı verilmesinde, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 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".

8 Kaynaklar

- [1] Malhotra VM. "Introduction: sustainable development and concrete technology". *American Concrete Institute Concrete International*, 24(7), 1-22, 2002.
- [2] Guo X, Shi H, Dick WA. "Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer". *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147, 2010.
- [3] İlkentapar S, Eren H. "EPS ile İkame Edilmiş Uçucu Küllü Geopolimer Hafif Harcın Fiziksel, Mekanik ve Isıl Geçirimsizlik Özelliklerinin İncelenmesi". *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 9(1), 28-38, 2021.
- [4] Olawale MD. "Syntheses, characterization and binding strength of geopolymers: A review". *International Journal of Materials Science and Applications*, 2(6), 185-193, 2013.
- [5] Çelikten S, Atabey İİ. "Su İçeriği ve Isıl Kür Süresinin Atık Bazalt Tozu Esaslı Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi". *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 328-332, 2021.

- [6] Genç BS, Balçıklı Bankir M, Sevim UK. "Süper emici polimer katkılı alkalilerle aktive edilen geopolimer harçların özellikleri". *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 335-347, 2022.
- [7] Açıkbaş G, Göçmez H. "Polyester matrisli kompozit özelliklerine vitrifiye seramik sağlık gereci atık miktarının etkisi". *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, 5(3), 138-145, 2017.
- [8] Kaur M, Singh J, Kaur M. "Synthesis of fly ash based geopolymer mortar considering different concentrations and combinations of alkaline activator solution". *Ceramics International*, 44, 1534-1537, 2018.
- [9] Saeli M, Senff L, Tobaldi DM, Carvalheiras J, Seabra MP, Labrincha JA. "Unexplored alternative use of calcareous sludge from the paper-pulp industry in green geopolymer construction materials". *Construction and Building Materials*, 246, 1-9, 2020.
- [10] Mahmut O, Emiroğlu M. "Elazığ ferrokrom çürufunun alkali aktive edilmiş harç üretiminde kullanım potansiyelinin araştırılması". *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 23-34, 2016.
- [11] Atabey İİ, Öztürk BZ. "Seramik sağlık gereci atıklarının geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması". *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(1), 212-219, 2021.
- [12] Chen Y, Zhao M, Lv Y, Ting Z J, Zhao S, Liu Z, Yuan W. "Utilization of municipal solid waste incineration fly ash as construction materials based on geopolymerization". *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 1-12, 2023.
- [13] Kumar V, Kutty SRM, Abd Razak SN, Shafiq N, Adebajo A, Baloo L, Azougagh AA, Iseni R. "Exploring the untapped potentials of oily sludge ash blended with fly ash for geopolymer binder via waste valorisation approach". *Journal of Hazardous Materials Letters*, 4, 2-6, 2023.
- [14] Öztürk ZB, Çam T. "Performance of eco-friendly fly ash-based geopolymer mortars with stone-cutting waste". *Materials Chemistry and Physics*, 307, 1-13, 2023.
- [15] Çelik Aİ. "Mechanical Performance of Geopolymer Concrete Based on Basalt and Marble Powder". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 2173-2187, 2023.
- [16] Poyraz S, Ural N. "Atık porselen karonun (APK) kil zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi". *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 771-782, 2022.
- [17] Türk Standartları Enstitüsü. "Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini". Ankara, Türkiye, 196-1, 2016.
- [18] Durak U. "Ön bekleme süresi ve mikrodalga kürünün geopolimer harç numunelerin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi". *Ankara International Conference on Scientific Research- IV*, Ankara, Türkiye, 10-11 April 2021.
- [19] Türk Standartları Enstitüsü. "Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş Beton Yoğunluğunun Tayini". Ankara, Türkiye, 12390-7, 2010.
- [20] Uygunoğlu T. Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2008.
- [21] Şimşek O. *Yapı Malzemesi I*. 6. Baskı. Ankara, Türkiye, Seçkin, 2016.
- [22] American Society for Testing and Material. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete". USA, C 597, 1998.

- [23] Şimşek, O. *Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri*. 4. Baskı. Ankara, Türkiye, Şeçkin, 2010.
- [24] Sevinç AH. "Farklı tane boyutuna sahip afşin-elbistan uçucu külünün geopolimer hammaddesi olarak kullanımı". *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(2), 751-765, 2021.
- [25] Türk Standartları Enstitüsü. "Kâgir Harcı-Özellikler-Bölüm 1: Kaba ve İnce Sıva Harcı". Ankara, Türkiye, 998-4, 2006.
- [26] Şapcı, N. "Çimento esaslı dış cephe kaplama malzemelerinin üretiminde kompozit bileşenli harçların teknik değerlendirilmesi". *El-Cezer Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(2), 981-993, 2021.