



Uçucu kül ve farklı seramik sektörü atıklarının kullanımı ile üretilen geopolimer harçların dayanım özellikleri

Mechanical properties of geopolymer mortars produced with fly ash and various ceramic industry wastes

Ayşe Eser¹ , Zahide Bayer Öztürk^{2,*} , İsmail İsa Atabey³ , Serhat Çelikten⁴ 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

² Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

^{3,4} Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

Öz

Türkiye'de seramik sektörü, ekonomik anlamda önemli bir paya sahip olup, ülkemiz seramik kaplama malzemeleri ve vitrifiye üretiminde lider konumdadır. Çanak-çömlek ürünleri seramik üretiminin bir başka kolunu oluşturmaktadır. Ancak, ilgili sektörde ıskartaya ayrılan hatalı ürünlerden kaynaklanan atıkların oluşması çevre kirliliği, depolama, tozlaşma sorunlarını beraberinde getirmekte ve atık üretim miktarı dikkate alındığında sektör atıklarının farklı alanlarda değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, seramik-karo fabrikası filtre-pres keki, vitrifiye ve çömlek atığının, farklı aktivatörlerle uçucu kül ile ve kül olmadan üretilen geopolimer harçların mekanik özellikleri incelenmiştir. Sıvı/bağlayıcı oranı 0.40 olan, NaOH ve Na₂SiO₃ içeren harç karışımları 24 saat boyunca 90°C sıcaklıkta ısıl küre tabi tutulmuştur. Numunelere 7, 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. 28 günlük Na₂SiO₃ ile üretilen harçların eğilme dayanımlarının 4.4 MPa-11 MPa, NaOH ile üretilen harçların 3.4-7.6 MPa aralığında olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarında ise seramik atıklarının ikili ve uçucu küllü üçlü karışımlarının 30 MPa'dan yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Çalışma seramik sektörü atıklarının geopolimer üretiminde başarıyla değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Seramik atıkları, Uçucu kül, Geopolimer, Mekanik özellikler.

1 Giriş

Seramik sektörü ülkemiz ekonomisinde önemli bir paya sahiptir. Seramik endüstrisi, her geçen gün gelişerek ülkemiz, dünyanın sayılı seramik üreten ülkelerinden biri konumuna gelmiştir. Türkiye'de seramik sektörünün lokomotif ürün grubu seramik kaplama malzemeleri ve seramik sağlık gereçleridir [1]. Seramik sektörü, hammadde açısından oldukça avantajlı konumdadır, ancak hammadde arama ve çıkarma işlemleri zayıftır. Öte yandan mevcuttaki havzalar korunamadığı için bu durum uzun dönemde firmalar için dezavantajlı duruma gelme riski taşımaktadır

Abstract

The ceramic industry holds a considerable position in Turkey's economy, with our country emerging as a frontrunner in the manufacturing of ceramic coating materials and sanitaryware. Pottery products form another distinct branch of ceramic production. The disposal of defective products in the industry leads to the generation of waste, causing environmental pollution and presenting challenges in terms of storage and disposal. Considering the substantial volume of waste produced, it becomes imperative to explore diverse avenues for the effective utilization of the sector's waste. The mechanical properties of geopolymer mortars produced by using ceramic tile factory filter-press cake, sanitaryware, and pottery wastes with and without fly ash with different activators were examined in this study. The mortar mixtures with a liquid/binder ratio of 0.40, incorporating NaOH and Na₂SiO₃, were subjected to thermal curing at 90°C for 24 hours. 7 and 28-day flexural and compressive strength tests were applied to the samples. The flexural strengths of mortars produced with Na₂SiO₃ for 28 days were found to be in the range of 4.4 MPa-11 MPa, while those produced with NaOH ranged from 3.4 to 7.6 MPa. The compressive strengths of ceramic waste binary mixtures and fly ash ternary mixtures surpassed values of 30 MPa. The study demonstrates that ceramic industry wastes can be effectively employed in geopolymer production.

Keywords: Ceramic wastes, Fly ash, Geopolymer, Mechanical properties

[2]. Günümüzde, ülke ve dünya nüfusunun artması ile tüketimin de doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

Doğal kaynaklar ve yaşanılan ortama bilinçli veya bilinçsiz şekilde zarar verilmesi ile meydana gelen istenmeyen durumlar "çevre kirliliği" olarak tanımlanmaktadır. Çeşitli endüstri kollarından doğaya salınan atıklar çevre kirliliğine sebep olabilmektedir. Ortaya çıkan atıkların miktarı göz önünde bulundurulduğunda, atık üretimi bakımından seramik sektörü de önemli bir paya sahiptir [3]. Ülkemizde 2018 yılı itibariyle 335 milyon m² seramik kaplama ürünleri ve 20,5 milyon adet seramik sağlık

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: z.ozturk@nevsehir.edu.tr. (Z. Bayer Öztürk)
Geliş / Received: 04.12.2023 Kabul / Accepted: 29.01.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1400321

gereci (vitrikiye) üretilmiştir. Üretilen ürünlerin iyimser yaklaşımla %5'inin kusurlu olduğu gözetilirse yılda yaklaşık 320 bin ton civarında seramik atığı ortaya çıkmaktadır [4].

Seramik karo ve vitrikiye dışında bir diğer seramik ürün grubu da çanak-çömlek ürünleridir. Nevşehir, Kapadokya bölgesinin merkezinde yer almakta olup, ülkemizin en fazla turist çeken yerleşim merkezlerindedir. Kapadokya'da çömlekçilik önemli el sanatlarından biridir. Bölgede yer alan seramik atölyelerinin yanı sıra faaliyet gösteren çömlek fabrikaları saksılar, baskı ürünler, el yapımı küpler, bahçe seramikleri ve dökümlü şekillendirilmiş iç-dış mekân seramikleri üretmektedir [5]. Fabrikada üretim sonrası oluşan iskarta ürünler depolanarak muhafaza edilmekte, üretime geri dönüşümü çok az olması, görüntü kirliliği ve atık olarak bekletilmesi sebebiyle de stok sahasında depolama problemi oluşturmaktadır. Karşılaşılan bu durumla ilgili, kaynakların korunması ve üretim esnasında oluşacak atıkların farklı alanda kullanımı zorunlu hale gelmiştir [6].

İnşaat sektörü düşünüldüğünde, harç, beton ve çimento üretimi sırasında önemli oranda sera gazı ortaya çıkmaktadır. Çevresel zararları göz önüne alındığında, yan ürünlerin kullanımını ve toksik atıkların yapıya hapsedilmesiyle birlikte ısıya ve aşındırıcı çevre koşullarına dayanıklı malzemeler üreten geopolimerler, bu tür sorunlara alternatif çözümler sunabilir [7]. Geleneksel çimentoya göre geopolimer bağlayıcıların en önemli avantajlarından biri, daha az CO₂ salınımının olmasıdır. Bu durum, hammaddelerin yüksek sıcaklıkta kalsinasyon sürecine tabi olmaması sayesinde gerçekleşir. İnşaat sektöründeki öneminin ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, daha üstün özelliklere sahip olan geopolimerlerin önemi de artmıştır [8]. Günümüzde, geopolimer harç/beton üretiminde temel malzeme olarak atık seramik tozunun kullanılması, sürdürülebilirlik ve seramik sektörünün de atıklarının geri dönüşümüne yardımcı olması nedenleri ile ilgi görmektedir [9,10]. Yapılan çalışmalarda kırmızı kil seramik tozu [11], tuğla üretiminde oluşan ince atık tozlar [12], kırmızı çamur [13, 14], atık cam tozu [15], seramik karo atıkları [16-20], seramik sağlık gereci atıkları [21-23] kullanımlarının geopolimerlerin performansına etkileri değerlendirilmiştir.

Geopolimer için önemli ana malzemelerden biri, uçucu kül olarak bilinir [24]. Bu kül, kömür yanması sırasında termik santral bacalarından atmosfere yayılan mikron boyutundaki taneciklerin elektrostatik veya mekanik filtreler tarafından yakalanması ve kül silolarında toplanması ile elde edilen endüstriyel atıklardan biridir [25]. Geopolimerlerin üretiminde temel malzemelerden olan uçucu külün kullanım alanının artması ve bunun yanı sıra üretim yeri ile termik santral arasındaki mesafelerin uzaklığı da maliyeti artmıştır. Atık sınıfında yer alan uçucu kül, geopolimer üretimi için önemli malzemelerden biri haline gelmiştir. Ayrıca, uçucu külün mineral katkı olarak çimentoda, agrega olarak betonda, dolgu olarak zemin iyileştirmede ve yol uygulamalarında kullanılabilir olması maliyetin artmasına neden olmuş ve üreticileri farklı hammadde veya katı atık malzemelerine yönlendirmiştir [26]. Avrupa'da birçok farklı ülke kömürlü çalışan termik santrallerini kapatmaktadır. Avrupa ülkelerinde rüzgâr ve güneşten enerji üretilmesi

yaygınlaşırken, Türkiye mevcut kömürlü termik santrallerini açık tutmayı sürdürme çabasında olsa da yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım ve teşviklerin olması uçucu külün üretiminde önümüzdeki süreçte kısıtlamaların beklendiğini göstermektedir [27]. Uçucu kül yerine farklı seramik atıklarının ikame edilmesi, geopolimer harç üretiminde uçucu küle olan talebi azaltacaktır. Günlük üretimi yüksek olan bu seramik ürünlerin hatalı olanlarının iskartaya ayrılmasıyla oluşan atıklar fabrikalardan temin edilerek, üretilecek geopolimer harcın uçucu kül yerine kullanılmasının fiziksel ve mikroyapısal özelliklerde herhangi bir olumsuzluğa yol açmadan, özelliklere olan etkilerinin değerlendirilmesi, seramik atıklarının ürüne dönüştürülmesi ve geopolimer üretiminde alternatif bir hammadde kaynağı bulunmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu sayede üretimdeki maliyet düşecek ve seramik fabrikalarının üretiminde her yıl çok miktarda oluşan, üretim sahalarında bekletilen seramik atıklarının (filter-pres kek atığı, vitrikiye ve çömlek atıkları) hammadde olarak kullanımı sağlanmış olacaktır. Böylece hem seramik ve inşaat sektörüne hem de ülke ekonomisine önemli katkı sağlanmış olacaktır.

Literatür incelendiğinde bazı seramik atıkların kullanımını ele alan çalışmalar bulunmakta ancak pişme öncesi işletme havuzlarında biriken seramik karo kek atığının, vitrikiye atıklarının ve çömlek kırıklarının birlikte kullanımını ele alan çalışmalar bulunmamaktadır. Cüruf ve uçucu kül gibi yaygın kullanılan atıklara ek olarak seramik sektörü atıklarının geopolimer harçlarda geri dönüşümünün sağlanması ve atıkların değerlendirilmesi farklı bir ürüne dönüştürülebilme potansiyeli seramik sektörü için önemlidir [28-30]. Ülkemizde porselen, yer ve duvar karosu, sağlık gereci ve çömlek üretimi gerçekleştiren çok sayıda firma bulunmakta ve bu firmalarda ortaya çıkan bu atıklar ciddi sorun teşkil etmektedir. Ortaya çıkan seramik atıklarının kimyasal bileşimi değişkenlik gösterse de her üç atık da %60'ın üzerinde SiO₂ ve %17'nin üzerinde Al₂O₃ içeriğine sahiptir.

Bu çalışmada; uçucu kül ile üretilen geopolimer harçlarda, SiO₂ ve Al₂O₃'ce zengin seramik karo firmasında üretim sonrası açığa çıkan havuzlarda biriken seramik kek atıklarının (Seranit Seramik, Bilecik), seramik sağlık gereci üreten fabrikada hatalı ürünlerin iskartaya ayrılması ile oluşan vitrikiye atıklarının (Turkuaz Seramik, Kayseri) ve çömlek üretimi gerçekleştiren bir fabrikadan alınan çömlek atıklarının (Anadolu Çömlekçilik, Nevşehir) geopolimerlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Çalışmada kullanılan malzemeler ve uygulanan metot aşağıda belirtilmiştir.

2.1 Materyal

Karışımlarda kullanılan F sınıfı uçucu kül (U) Adana ili Ceyhan ilçesinde bulunan Sugözü Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Uçucu külün 45 µm elek üstü %18.1 ve özgül ağırlığı 2.32'dir (Şekil 1a). Deneysel çalışmalarda kullanılan atık seramik tozları (vitrikiye atığı, filtre-pres karo atığı, çömlek atığı) 125 mikron elekten elenerek kullanılmıştır. Filtre-pres keki (K) seramik karo fabrikası

içinde atık tesislerinden temin edilmiştir. Bu atık tesislerine farklı bölümlerden oluşan çamurlar gelmektedir. Filtre pres kekinin temin edildiği Bilecik'teki Fabrikanın su arıtma tesisinin toplam kapasitesi 10000 m³/gün üzerinde olabilmekte ve tesislerden toplamda 50 ton/gün filtre pres keki elde edilmektedir. Filtre presten sonra römorklara dökülen kekler, sanayi bölgesinin atık alanına dökülerek çok düşük miktarı (%7-10) geri üretime döndürülmekte, büyük miktarı işlevsiz şekilde bırakılmaktadır. Bu atıklardan alınıp laboratuvara getirilen malzemeler deneyde kullanıma uygun toz haline getirilmiştir (Şekil 1b). Vitrifiye atığı (V) ıskarta ürünlerin fabrikada yeniden öğütülmesi ile elde edilen toz olarak temin edilmiştir (Şekil 1c). Çömlek atıkları, Nevşehir Avanos'ta bulunan yerel bir çömlek firmasının üretim esnasında ıskartaya ayrılan ürünlerinin toz haline getirilip elenmesi ile elde edilmiştir (Şekil 1d). Atıkların kimyasal analizleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan dere kumunun doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 2.71 ve su emme oranı %1.81'dir [31]. Ayrıca aktivatör çözeltilisi hazırlamada Nevşehir şehir şebekesine ait musluk suyu kullanılmıştır [32].



Şekil 1. a) Uçucu kül (U), b) filtre-pres karo atığı (K), c) vitrifiye atığı (V), d) pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç)

Tablo 1. Karışımlarda kullanılan atıkların kimyasal analizleri, %

Kimyasal Kompozisyon	Ç	K	V	U
SiO ₂	52.51	68.27	63.06	55.10
Al ₂ O ₃	16.37	17.65	30.86	26.32
CaO	14.06	1.04	0.92	2.44
Fe ₂ O ₃	6.94	1.34	1.13	5.92
K ₂ O	2.76	1.35	1.06	3.44
Na ₂ O	0.80	3.27	0.27	0.52
TiO ₂	0.61	0.44	0.70	1.09
MgO	2.83	0.67	0.38	1.99
P ₂ O ₅	0.11	0.10	0.07	0.16
BaO	0.01	0.29	0.03	0.08
Mn ₃ O ₄	0.19	-	-	0.07
SO ₃	0.33	0.09	0.05	0.20
V ₂ O ₅	0.03	0.02	0.01	0.04
ZnO	0.02	0.14	0.07	-
ZrO ₂	-	0.52	0.53	0.03
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.20	3.86	2.04	2.08
KK	2.29	4.80	0.87	3.45
(Kızdırma kaybı)				

2.2 Metot

Geopolimerlerde kullanılan uçucu kül (U), porselen karo fabrikasından (Bilecik) temin edilen filtre-pres atık keki (K), seramik sağlık gereci fabrikasından (Kayseri) temin edilen vitrifiye atıkları (V) ve çömlek fabrikasından (Nevşehir)

alınan çömlek kırıkları atıkları (Ç) uygun tane boyutlarına getirilerek harç oluşturmak için farklı karışım oranlarında tek, ikili ve üçlü kullanılarak harçların mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Atık tozlar tek kullanımda 450 g, ikili kullanımda yarı yarıya 225 g, üçlü kullanımlarda ise 150 g olacak şekilde karışım tasarımı yapılarak sinerjik etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır. Karışım tablosunda kodlamalarda atıkların karışıma girdikleri ağırlığa göre kodlamalar yapılmıştır. Örneğin 150 Ç-V-U; çömlek atığının 150 g, vitrifiye atığının 150 g ve uçucu külün de 150 g olduğu karışımı ifade etmektedir.

Karışım için hazırlanan atık tozları aktive etmek için çalışmada iki farklı aktivatör (NaOH ve Na₂SiO₃) ayrı ayrı kullanılmıştır. Tablo 2'de verilen karışımlarda NaOH ile üretim yapılırken aktivatör için 87 g NaOH ve 180 g su kullanılmıştır. Na₂SiO₃ ile yapılan üretimlerde ise 273 g Na₂SiO₃ ve 13 g su kullanılmıştır. Hazırlanan harçlarda sıvı/bağlayıcı oranı 0,40 olarak belirlenmiştir. Literatürde genel olarak aktivatörün kullanım miktarında uygun koşulların sağlandığı değer NaOH için 12 M ve Na₂SiO₃ için ise %12 Na₂O oranı olduğu için hazırlanan karışımlarda da aktivatörler bu oranda kullanılmıştır [22,33].

Karışım için hazırlanan aktivatör ve atık toz malzemeleri karıştırma kabına boşaltılmış ve mikser, ilk 30 saniyelik karıştırma işleminin ardından ikinci 30 saniye içinde kum eklenmiştir. Daha sonra 30 saniye daha yüksek hızda karıştırılmıştır. Karıştırıcı durdurulup, ilk 30 saniyede kabın kenarlarındaki harç orta kısma toplanması için toplamda 90 saniye bekletilmiştir. Bekleme süresi sonunda 60 saniye daha yüksek hızda mikser çalıştırılarak karıştırma aşaması tamamlanmıştır. Daha sonra TS-EN 196-1'e [34] uygun olarak hazırlanan karışımlar, 40×40×160 mm ebatlarındaki üç gözlü harç kalıplarına iki aşamada dökülmüştür. Üç gözlü harç kalıplarına dökülen karışımlar kalıpla birlikte etüve konularak, 24 saat boyunca 90 °C sıcaklıkta ısıl küre tabii tutulmuştur. Isıl küre uygulandıktan sonra kalıplardan çıkarılan sertleşmiş numuneler laboratuvar ortamında yaklaşık 23±2°C sıcaklıkta 7 ve 28 gün bekletilmiş ardından eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Eğilme dayanımı

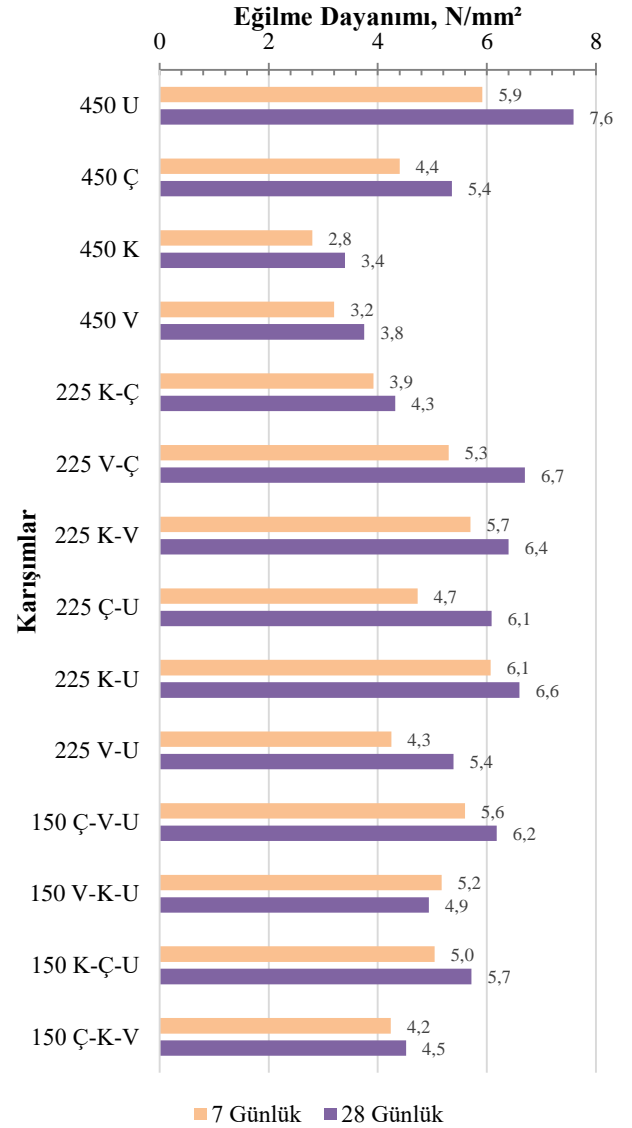
NaOH ile üretilen harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 2'de sunulmuştur. Tekli karışımlarda en yüksek 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları uçucu kül ile ve en düşük eğilme dayanımları ise filtre-pres karo atığı ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. İkili karışımlarda ise malzemeler arasında uyum farklılıkları gözlenmiştir. Bu farklılığın nedenlerinden bazıları malzemelerin kimyasal içeriği ve tane boyutlarıdır [17, 18, 23, 33]. İkili karışımlarda genellikle tekli karışımlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Özellikle vitrifiye- pişmiş çömlek kırığı ve vitrifiye- filtre-pres karo atığı malzemeleri arasında belirgin bir uyum gözlenmiştir. İkili karışımlarda uçucu kül içeriği ile seramik sektörü atıklarının eğilme dayanımlarında artış sağlanmıştır. Bu artış sadece uçucu külün aktivasyon kinetiğinden değil, aynı zamanda seramik sektörü atıkları ile meydana gelen sinerjik etkiden kaynaklanmaktadır [29].

Tablo 2. Alkali ile aktive edilen harçların karışım miktarları, g

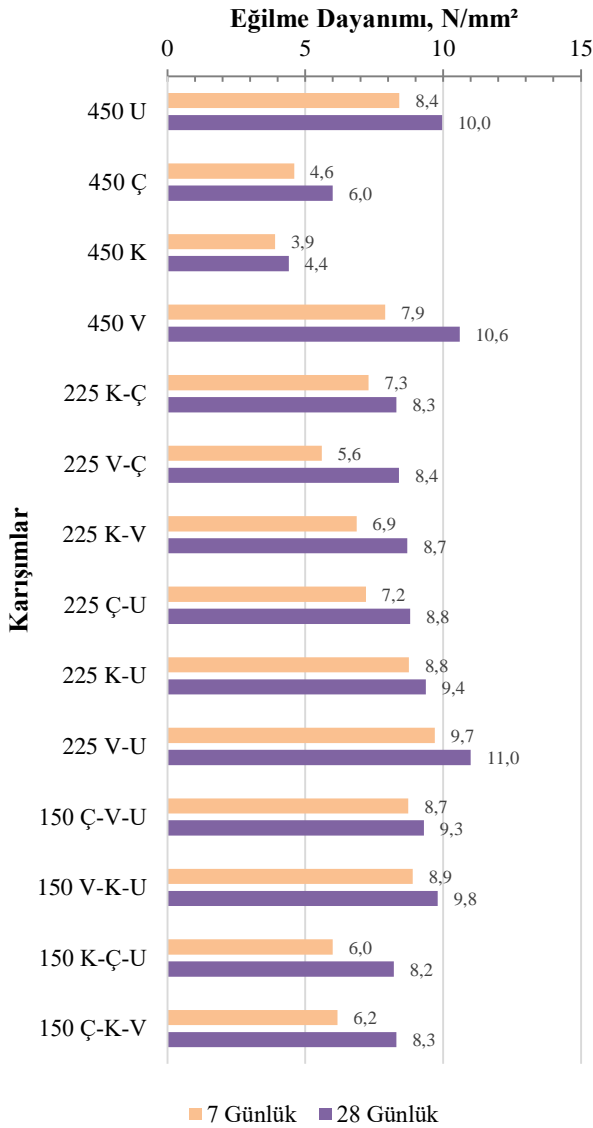
Numune Kodu	Ç	K	V	U	Kum
450 U	-	-	-	450	1250
450 Ç	450	-	-	-	1250
450 K	-	450	-	-	1250
450 V	-	-	450	-	1250
225 K-Ç	225	225	-	-	1250
225 V-Ç	225	-	225	-	1250
225 K-V	-	225	225	-	1250
225 Ç-U	225	-	-	225	1250
225 K-U	-	225	-	225	1250
225 V-U	-	-	225	225	1250
150 Ç-V-U	150	-	150	150	1250
150 V-K-U	-	150	150	150	1250
150 K-Ç-U	150	150	-	150	1250
150 Ç-K-V	150	150	150	-	1250

Malzemelerin etkin kullanımı ve en uygun kimyasal-fiziksel bileşimin elde edilebilmesi için üçlü karışımlar da üretilmiştir. Üçlü karışımları içerisinde en yüksek 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları 150 Ç-V-U kodlu harçlarda sırasıyla 5.6 MPa ve 6.2 MPa elde edilmiştir. Bununla birlikte, 150 V-K-U ve 150 K-Ç-U kodlu harçlarda 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 5.2 MPa ve 5.7 MPa olarak elde edilebilmiştir.

Sodyum silikat ile üretilen geopolimer harçların eğilme dayanımları Şekil 3'te sunulmuştur. Tekli karışımlarda en yüksek 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 450U ve 450V kodlu harçlarda elde edilmiştir. Bu harçların 10 MPa civarında olan 28 günlük eğilme dayanımları tekli karışım olarak üretilen diğer harçlara göre belirgin şekilde yüksektir. Tekli karışımlar içerisinde en düşük eğilme dayanımları filtre-pres karo atığı ile üretilen 450 K kodlu harçlarda elde edilmiştir. İkili karışımlarda ise en yüksek 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları 225 V-U kodlu harçlarda sırasıyla 9.7 MPa ve 11.0 MPa olarak elde edilmiştir. Uçucu kül içeren diğer ikili karışımların 28 günlük eğilme dayanımları ise 9 ± 0.4 MPa olarak elde edilmiştir. Bu yüksek eğilme dayanımı değerleri uçucu kül içeriğine bağlanabilir [8]. Ancak, karışım içeriklerinde %50 oranında seramik sektörü atıkları olduğu düşünüldüğünde, elde edilen dayanım değerleri malzemelerin birlikte geopolimer harçlarda ikili karışım halinde kullanımının verimli bir üretim metodu olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, uçucu kül içermeyen ve sadece seramik sektörü atıklarının ikili karışımları ile üretilen harçlarda 28 günlük eğilme dayanımları 8.5 ± 0.2 MPa olarak elde edilmiştir. Sodyum silikat ile aktive edilen üçlü karışımlar arasında 150 Ç-V-U ve 150 V-K-U kodlu harçlarda 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 8.8 ± 0.1 MPa ve 9.5 ± 0.3 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, kullanılan üçlü karışımların sodyum silikat ile aktivasyon ile yüksek eğilme dayanımlarına ulaşabileceğini göstermiştir. Elde edilen yüksek eğilme dayanımlarının nedeni olarak uygun kimyasal bileşim ile malzemelerden çözünen Al, Si ve Ca elementlerinin iyonik halde alkali ortamda güçlü geopolimer jel bağları kurmalarıdır [29].



Şekil 2. NaOH ile üretilen harçların eğilme dayanımları

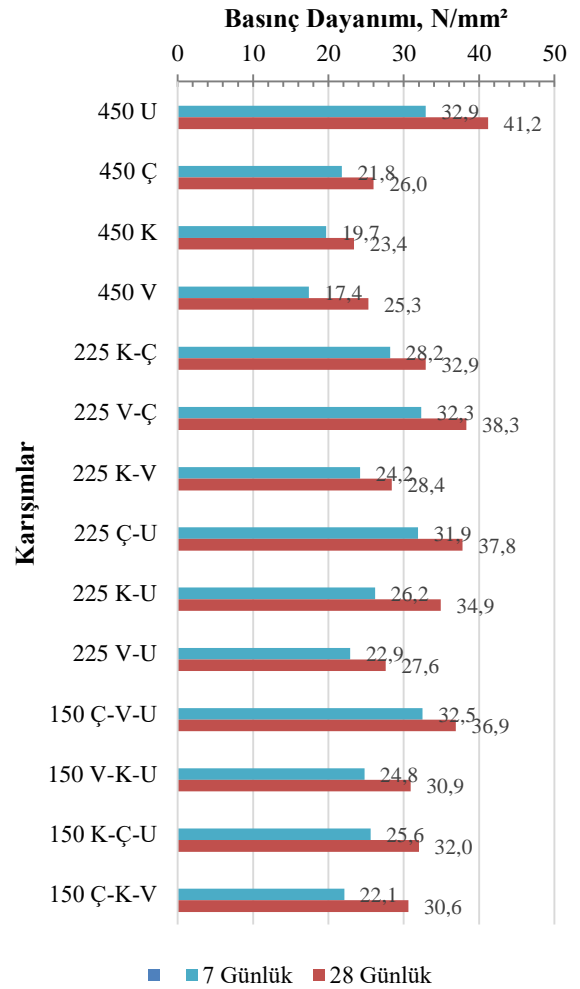


Şekil 3. Na₂SiO₃ ile üretilen harçların eğilme dayanımları

3.2 Basınç dayanımı

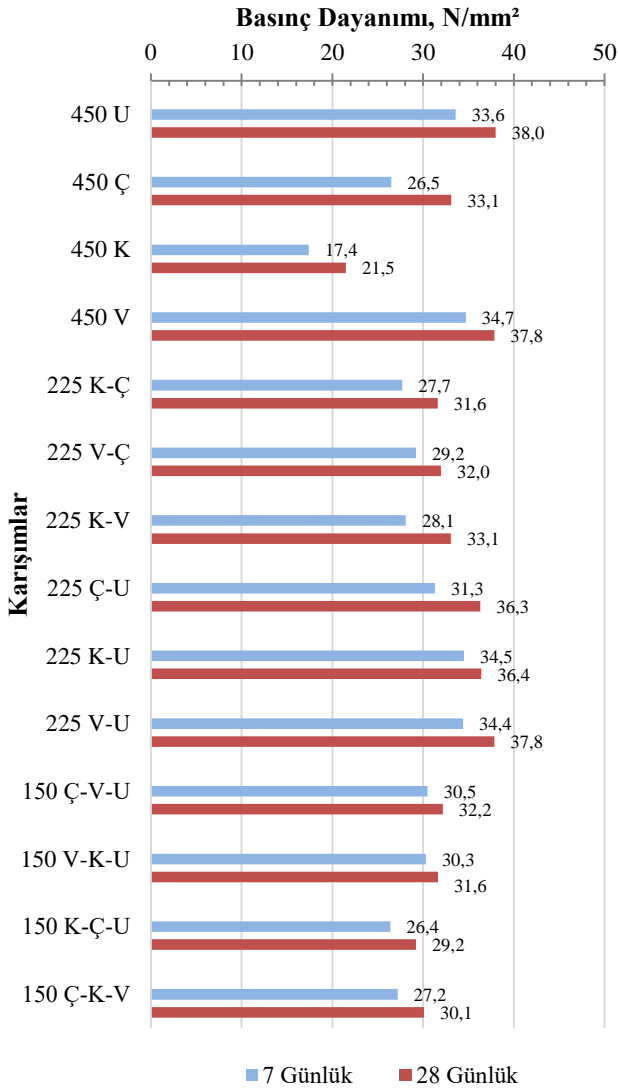
NaOH ile üretilen harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları Şekil 4’de sunulmuştur. Tekli karışımlarda en yüksek basınç dayanımı değerleri uçucu kül ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. Seramik sektörü atıklarının tekli kullanımı ile üretilen harçlarda ise 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 19±2 MPa ve 24±2 MPa aralığında olmak üzere birbirlerine yakın olarak elde edilmiştir. İkili karışımlarda ise uçucu kül içermeyen karışımlar da dâhil olmak üzere tüm ikili karışımların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri tekli karışımlara kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. Uçucu kül içeren ikili karışımlar arasında en yüksek basınç dayanım değerlerine pişmiş çömlük kırığı- uçucu kül karışımı içeriği ile üretilen 225 Ç-U kodlu harçlarda elde edilmiştir. Uçucu kül içermeyen ikili karışımlar arasında en yüksek basınç dayanımları vitrifiye-pişmiş çömlük kırığı atıkları ile üretilen harçlarda (225 V-Ç) elde edilirken, en düşük değerler vitrifiye- filtre-pres karo atığı malzemeleri ile üretilen 225 K-V kodlu harçlarda

görülmüştür. Malzemelerin üçlü karışımı ile üretilen harçlarda en yüksek 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerine 150 Ç-V-U kodlu harçlarda ulaşılmıştır. Seramik sektörü atıklarının tekli üretiminden elde edilen harçların 28 günlük basınç dayanımları 24±2 MPa iken, bu malzemelerin üçlü karışımından elde edile 150 Ç-K-V kodlu harçların 28 günlük basınç dayanımı 30.2 MPa olarak elde edilmiştir. Malzemelerin birlikte kullanımı ile hem farklı tane boyutuna sahip malzemelerin mikro ölçekte doluluk meydana getirmesi açısından, hem de geopolimer bağlayıcı üretimi için uygun kimyasal içeriğin elde edilmesi yönünde etkili olmuştur.



Şekil 4. NaOH ile üretilen harçların basınç dayanımları

Sodyum silikat ile üretilen geopolimer harçların basınç dayanımları Şekil 5’de sunulmuştur. Tekli karışımlarda en yüksek 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerine uçucu kül ve vitrifiye atığı ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. En düşük değerler ise filtre-pres karo atığı ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. Sodyum silikatın aktivatör olarak kullanımının dezavantajlarından olan erken priz alma probleminin de dayanım düşüklüğüne neden olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5. Na_2SiO_3 ile üretilen harçların basınç dayanımları

Özellikle silis içeriği yüksek olan atık tozların üçlü karışımlarında bu durum daha fazla görülebilmektedir. NaOH içeren üçlü karışımların dayanım sonuçları sodyum silikat içeren harçlara kıyasla daha yüksektir. Tablo 1'den de görüleceği gibi filtre-pres karo atığı %68 SiO_2 içeriği ile diğer toz atıklara göre en yüksek silis değerine sahiptir. Uçucu kül ile birlikte seramik sektörü atıklarının kullanıldığı ikili karışımlarda ise 37 ± 1 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir. Uçucu külün tekli kullanımından elde edilen 450 U karışımı ve uçucu kül ile birlikte seramik sektörü atıklarının kullanıldığı ikili karışımların dayanımları arasındaki farkın ± 1 MPa olduğu gözlenmiştir. Bu yakın değerlere ulaşmada kullanılan seramik atığı tipi de etkili olmuştur. Önceki çalışmalarda bu çalışmadan farklı olarak yer karosu atıkları küle ikame edildiğinde dayanımlarda düşüşler gözlenmiştir. Saxena ve Gupta (2022), uçucu küle karo seramik atıkları ilave ettikleri çalışmalarında yüksek oranda seramik atığının dayanımı düşürdüğünü ifade etmektedirler [35]. Uçucu kül malzemesi geopolimer üretiminde en çok kullanılan Al_2O_3 ve SiO_2 içerikli

malzemelerin başında gelmektedir. Literatürde birçok çalışmada uçucu küllü geopolimerlerin üstün mekanik, durabilite ve çevresel özellikleri ortaya konmuştur [36, 37]. Ancak, birçok malzeme gibi uçucu küller de sonsuz temin edilebilirlikte değildir. Uçucu küllerin temin edildikleri termik santrallerin çevreye verdiği zararlar küresel anlamda kaygı oluşturmaktadır. Bu nedenle termik santral yerine güneş ve rüzgâr enerji santralleri gibi daha çevre dostu elektrik üretim tesisi yatırımları her geçen gün artmaktadır. Bu durum, ilerleyen yıllarda termik santrallere olan ihtiyacın azalacağını ve bu santrallerden ortaya çıkan uçucu külün de daha az miktarda temin edilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle atık da olsa malzemelerin etkin ve verimli kullanımı adına uçucu küle birlikte seramik sektörü atıklarının ikili karışımlarının sodyum silikat ile aktivasyonu sonucu elde edilen geopolimerlerin sadece uçucu küle üretilen geopolimerlere göre dayanım değerleri açısından daha uygun olduğu söylenebilir. Üçlü geopolimer harç karışımlarında ise eğilme dayanımlarında olduğu gibi en yüksek basınç dayanımı değerleri de 150 Ç-V-U ve 150 V-K-U kodlu harçlarda elde edilmiştir. Bu harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla $30,4 \pm 0,1$ MPa ve $32,0 \pm 0,4$ MPa olarak elde edilmiştir. Uçucu kül içermeyen 150 Ç-K-V karışımında ise 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 27,2 MPa ve 30,1 MPa olarak tespit edilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada uçucu kül ve seramik sektörü atıklarının iki farklı aktivatörle aktivasyonundan elde edilen geopolimer harçların dayanım özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir.

- Seramik sektörü atıkları uçucu kül ile birlikte veya uçucu kül içermeyen geopolimer üretiminde kullanım potansiyeline sahiptir.
- Aktivatör olarak, sodyum silikatın erken priz alma probleminin özellikle silis içeriği yüksek olan atık tozların üçlü karışımlarında dayanım düşüklüğüne

neden olduğu düşünülmektedir. NaOH içeren üçlü karışımların dayanım sonuçları sodyum silikat içeren harçlara kıyasla daha yüksektir.

- Pişmiş çömlek kırığı atığı ve vitrifiye atığının tekli kullanıldığı NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edilen geopolimerler harçlarda sırasıyla 25 MPa ve 30 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımları elde edilebilmiştir.
- Uçucu kül ile seramik sektörü atıklarının ikili karışımları ile üretilen geopolimer harçlarda uçucu külün tek başına kullanıldığı harçlara yakın dayanım değerleri elde edilebilmiştir. Atıkların etkili ve verimli kullanımı açısından seramik atıklarının uçucu küllü geopolimerlerde kullanım potansiyeli olduğu görülmüştür.
- Seramik atıklarının ikili karışım halinde kullanıldığı geopolimer harçlarda genellikle 30 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiş, NaOH ile aktive edilen 225 V-Ç

karışımında da 28 günlük basınç dayanımı değeri 38.3 MPa olmuştur.

- Uçucu kül ve seramik atıklarının birlikte kullanıldığı üçlü karışımlarda da genellikle 30 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir.
- Uçucu kül içermeyen seramik atıkların üçlü kullanıldığı 150 Ç-K-V kodlu harçlarda da her iki aktivatör içeriği ile de yaklaşık 30 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilebilmiştir.
- Harçların eğilme dayanımları ile basınç dayanımları arasında genellikle bir uyum olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, sodyum silikat ile üretilen harçların eğilme dayanımlarının sodyum hidroksitle üretilenlere göre genellikle daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışma ile seramik sektörü atıklarının hem uçucu küllü geopolimer üretiminde hem de bu atıkların ikili-üçlü karışımı ile seramik atığı esaslı geopolimer sentezinde değerlendirilebileceği görülmüştür. Ayrıca sektör atıklarının bu şekilde kullanılması çevre kirliliğinin kontrol altına alınmasına katkıda bulunacak ve sürdürülebilir yapı malzemelerini teşvik edecektir.

Teşekkür

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 222M299 numaralı proje ile finanse edilmiştir. Yazarlar, TÜBİTAK'a sağladığı destek, Seranit Seramik (Bilecik), Turkuaz Seramik (Kayseri) ve Anadolu Çömlekçilik (Nevşehir) fabrikalarına atık temini desteği için teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] Türkiye Cumhuriyeti Strateji ve Bütçe Başkanlığı, https://www.sbb.gov.tr/wpcontent/uploads/2018/10/10_SeramikCalismaGurubu.pdf, Erişim tarihi Eylül 2022.
- [2] Türkiye Seramik Federasyonu, <https://www.serfed.com/upload/ihracat->, Erişim tarihi Eylül 2022.
- [3] M. Saygı, Seramik atıkların asfalt endüstrisinde kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak, 2019.
- [4] K. Kayacı, Y. Yıldırım, C. Genç, A. Keskin ve A. Çırpın, Seramik karo fabrikalarının kek ve seramik sağlık gereçleri pişmiş kırık atıklarının porselen karo bünyelerde kullanım olanaklarının araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 Özel Sayı (353-358), 2019.
- [5] <http://www.avanospottery.com/tr/>, Erişim tarihi Eylül 2022.
- [6] Y.H. Adıyaman, ETİBOR A.Ş. Hisarcık işletmesi atıklarının porselen karo üretiminde kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
- [7] E. Alvarez-Ayuso, Querol X., F. Plana, A. Alastuey, N. Moreno, M. Izquierdo, O. Font, T. Moreno, S. Diez, E. Vazquez and M. Barra, Environmental, physical and structural characterisation of geopolimer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes. Journal of Hazardous Materials, 154, 175-183, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.008>
- [8] İ.İ. Atabey, F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 2017.
- [9] G.F. Huseien, J. Mirza, M. Ismail, Effects of high volume ceramic binders on flexural strength of self-compacting geopolimer concrete. Adv. Sci. Lett. 24 4097-4101, 2018. <https://doi.org/10.1166/asl.2018.11549>
- [10] G.F. Huseien, A.R.M. Sam, J. Mirza, M.M. Tahir, M.A. Asaad, M. Ismail and K.W. Shah, Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated temperatures: performance evaluation. Construction and Building Materials, 187, 307-317, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.226>
- [11] M. Keppert, E. Vejmelková, P. Bezdicka, M. Dolezelová, M. Cáhová, L. Scheinherrová, J. Pokorny, M. Vyšvar il, P. Rovnaníková and R. Cerny, Red-clay ceramic powders as geopolimer precursors: Consideration of amorphous portion and CaO content. Appl. Clay Sci. 161 82-89, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.019>
- [12] S.K. Amin, S.A. El-Sherbiny, A.A.M.A. El-Magd, A. Belal, M.F. Abadir, Fabrication of geopolimer bricks using ceramic dust waste. Construction and Building Materials, 157 610-620, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.052>
- [13] S. Kulkarni, Experimental study on red mud, fly ash, GGBFS based geopolimer concrete. International journal of engineering research technology, 7(12) 107-111, 2018.
- [14] G. Mucsi, R. Szabo, A. Racz, F. Kristaly, S. Kumar, Combined utilization of red mud and mechanically activated fly ash in geopolimers. The Mining Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 27-36, 2019. <https://doi.org/10.17794/rgn.2019.1.3>
- [15] M. Torres-Carrasco, F. Puertas, Waste glass in the geopolimer preparation. Mechanical and microstructural characterization. Journal of Cleaner Production, 90:397-408, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.074>
- [16] G.F. Huseien, A.R.M. Sam, K.W. Shah, J. Mirza and M.M. Tahir, Evaluation of alkali-activated mortars containing high volume waste ceramic powder and fly ash replacing GBFS. Construction and Building Materials, 210, 78-92, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.194>
- [17] G.F. Huseien, A.R.M. Sam, K.W. Shah and J. Mirza, Effects of ceramic tile powder waste on properties of self-compacted alkali activated concrete. Construction and Building Materials, 236, 117574, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117574>

- [18] L. Reig, L. Soriano, M.V. Borrachero, J. Monzo and J. Paya, Influence of the activator concentration and calcium hydroxide addition on the properties of alkali-activated porcelain stoneware. *Construction and Building Materials*, 68, 214-222, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.023>
- [19] A.M. Rashad and G.M.F. Essa, Effect of ceramic waste powder on alkali-activated slag pastes cured in hot weather after exposure to elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*, 111, 103617, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103617>
- [20] L. Reig, M.V. Borrachero, J.M. Monzo, J.R.H. Savastono, M.M. Tashima, J.J. Paya, Use of ceramic sanitaryware as alternative for the development of new sustainable binders. *Key Engineering Materials*, 668, 172-180, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.172>
- [21] Z. Bayer Öztürk, Y.C. Yılmaz, Y. Bozkurt, İ.İ. Atabey, Vitrikiye ürün atıklarından geopolimer yapı malzemesi üretimi, The Internatinoal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in Cappadocia/TURKEY (IMSMATEC'19), 1178-1181, June 21-23, 2019.
- [22] İ.İ. Atabey, Z. Bayer Öztürk, Seramik sağlık gereci atıklarının geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(1), 212-219, 2021. <https://doi.org/10.29137/umagd.782733>
- [23] Z. Bayer Öztürk ve İ.İ. Atabey, Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer mortars at high temperatures produced with ceramic sanitaryware waste. *Ceramics International*, 48(9), 12932-12944, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.166>
- [24] A.M. Rashad, A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Materials & Design*, 53, 1005-1025, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.074>
- [25] V. G. Papadakis, Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30, 291-299, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00249-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00249-5)
- [26] G. Kaplan, A.B. Gültekin, Yapı sektöründe uçucu kül kullanımının çevresel ve toplumsal etkiler açısından incelenmesi, *International Sustainable Building Symposium*, 1-8, Ankara, 2010.
- [27] <https://www.dw.com/tr/avrupak%C3%B6m%C3%B%C3%BC-santralleri-kapat%C4%B1yor>
- [28] Ü. Yurt, An experimental study on fracture energy of alkali activated slag composites incorporated different fibers. *Journal of Building Engineering*, 32, 101519, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101519>
- [29] M. Kaya, The effect of micro-SiO₂ and micro-Al₂O₃ additive on the strength properties of ceramic powder-based geopolymer pastes. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(1), 333-350, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01323-3>
- [30] A. Özsoy, E. Örklemmez, S. İlkentapar, Effect of addition diatomite powder on mechanical strength, elevated temperature resistance and microstructural properties of industrial waste fly ash-based geopolymer. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25, 2338-2349, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01692-x>
- [31] TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [32] TS EN 1008, Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [33] Z. Bayer Ozturk, R. Cırık and İ.İ. Atabey. Sustainable environment approach by the usage of ceramic pottery waste in geopolymer mortar. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04939-0>
- [34] TS EN 196-1, Çimento Deneysel Metodları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [35] R. Saxena, T Gupta, Assessment of mechanical, durability and microstructural properties of geopolymer concrete containing ceramic tile waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(2), 725-742, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01353-5>
- [36] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, C. D. Atış, The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 264, 120268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120268>
- [37] I. Luhar, S. Luhar, A comprehensive review on fly ash-based geopolymer. *Journal of Composites Science*, 6(8), 219, 2022. <https://doi.org/10.3390/jcs6080219>

