

Seramik Atıklarının Sürdürülebilir Harç Üretiminde Kullanım Olanaklarının İncelenmesi

Investigation of the Possibility of Using Ceramic Waste in Sustainable Mortar Production

Esra Toptaş^{1*} , Ülger Bulut Karaca² 

¹ İstanbul Arel Üniversitesi, Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Kent Üniversitesi, Sanat Ve Tasarım Fakültesi, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı; seramik sağlık gereçleri üretiminde ortaya çıkan ve yeniden üretim sürecine dahil edilemeyen sırlı seramik atıklarının değerlendirilerek sürdürülebilir yapı malzemelerine dönüştürülme olanaklarının araştırılmasıdır. Seramik atıklarının puzolan ve ince agrega olarak kullanılması olanaklarının incelenmesi için farklı matrislerde harçlar oluşturulmuştur. Taze harçlarda yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiş; harçlarla hazırlanan 7 günlük numunelerin birim hacim ağırlığı, özgül ağırlığı ve ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. Ardından numunelere çekme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Seramik atığının metakaolin ile kullanıldığı ve NaOH ile Na₂SiO₃ aktivatörlerinin uygulandığı harç matrisleri, en yüksek mekanik dayanımları göstermiştir. Fiziksel ölçümler değerlendirildiğinde ise bu harç matrislerinde NaOH katkılı numunenin boşluksuz; Na₂SiO₃ ile hazırlanan numunenin ise boşluklu iç yapıya sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Yapı bloğu ve yapı harcı için gerekli mekanik mukavemeti sağlamaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu çalışma kapsamında üretilen harç matrislerinin farklı koşullarda kürlenmeleri sonucunda elde edilecek performans özelliklerinin incelenmesi yararlı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Seramik atığı, Seramik sağlık gereçleri, Sürdürülebilir harç, Kireç, Puzolan, Metakaolin, Alkali aktivatör

Abstract

The aim of this study is to investigate the possibilities of transforming glazed ceramic waste, which occurs during the production of ceramic sanitary ware and cannot be included in the remanufacturing process, into sustainable building materials. To investigate the potential use of ceramic waste as a pozzolan and fine aggregate, mortars were prepared with different matrices. A flow table test was performed on the fresh mortars; the unit weight, specific gravity, and ultrasonic pulse velocity of the 7-day specimens prepared from these mortars were measured. Afterwards, tensile strength and compressive strength tests were applied to the specimens. Mortar matrices composed of ceramic waste, metakaolin, and activators NaOH and Na₂SiO₃ exhibited the highest mechanical strengths. Physical measurements revealed that the NaOH-added sample in these mortar matrices had a void-free internal structure, while the sample prepared with Na₂SiO₃ had a void-filled internal structure. This provides the necessary mechanical strength for both the building block and the mortar. In future studies, it would be beneficial to investigate the performance properties of the mortar matrices produced in this study under different curing conditions.

Keywords: Ceramic waste, Ceramic sanitary ware, Sustainable mortar, Lime, Pozzolan, Metakaolin, Alkali activator

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): esratoptas21@istanbularel.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 01.09.2025, Kabul Tarihi (Accepted): 02.11.2025

1. Giriş

Seramik sağlık gereçleri, “kil, kaolen, feldspat ve kuvars türü anorganik hammaddelerden oluşan kütlelerin çeşitli yöntemlerle şekillendirilip, sırlanmaları ve 1200-1250 °C civarında pişirilmeleri sonucu camlaşmış bir sır örtüsü ile kaplanması” [1] sonucu üretilen lavabo, klozet, pisuar gibi vitrifiye ürünlerdir. 2023 yılı verilerine göre Türkiye, “25 milyon adeti aşan üretimi ile Avrupa'da 1., Dünya'da 4. seramik sağlık gereçleri üreticisidir” [2].

Seramik atığı, seramik sağlık gereci, fayans ve refrakter faaliyetlerinde kullanılan seramiklerin üretimi sırasında büyük miktarlarda üretilen ürünlerden biridir [3]. Seramik endüstrisinde üretim sürecinde, genellikle %15-30 oranında atık ürün ortaya çıkar [4]. Üretici firmalar oluşan yaş atığın büyük bir bölümünü değerlendirebilseler de sinterlenmiş ürünün değerlendirilmesinde üretim kısıtlamaları nedeniyle bu mümkün olamamaktadır” [5]. “Hammaddelerin üretim sırasında zorlu pişirme süreçlerine tabi tutulması nedeniyle, atıkların büyük çoğunluğu fabrikadaki üretim hattına geri kazandırılmamaktadır” [6]. Seramik atıkların yanlış bertarafı, baryum, bakır ve kadmiyum gibi zararlı elementlerin yeraltı suyuna sızmasına ve yeraltı suyunun kalitesinin ve toprak verimliliğinin azalmasına neden olabilir [7]. “Seramik sektöründe üretimin her aşamasında oluşan atıklar, yaratmış oldukları çevresel sorunların yanı sıra, yok edilmesi, depolanmasında yaşanan zorluklar nedeni ile sektörde ilave bir maliyet getirmektedir” [8].

“Seramik endüstrisi için, seramik üretimi sırasında ortaya çıkan pişmiş atık ürünlerinin üretim döngüsüne dahil edilmesi, yalnızca ekonomik kâr ve doğal kaynakların korunması açısından değil, aynı zamanda çevre kirliliğinin önemli ölçüde azaltılması açısından da ilginç bir alternatiftir. Çünkü işlem sırasında ortaya çıkan tüm seramik atıkları normalde çöp depolama alanlarına atılır ve bu da atıkların taşınması ve bertarafı için yüksek maliyetler anlamına gelir” [9]. “Seramik atıklar çoğunlukla geri dönüştürülmüş seramik ürünlerde kullanım potansiyeli yüksek olan silikat içermesine rağmen, çoğu düşük ekonomik getiri nedeniyle çöp sahalarına gönderilmektedir” [10]. Seramik endüstrileri tarafından üretilen atıklar, asbest içermediği için tehlikesiz olarak sınıflandırılır [11] ve bu nedenle herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan hammadde olarak yeniden kullanılabilir.

Tarihte, bir seramik türü olarak tuğlanın öğütülüp kireç harçlarına eklenmesiyle elde edilen horasan harçlarının, puzolanik reaksiyonlar sonucunda dayanım özelliklerinin geliştiği ve hidrolik özellikler kazandığı bilinmektedir.

“Günümüzde seramik atıklarının esas olarak beton formülasyonunda, elektrik yalıtkanlarının üretiminde, alümina ekstraksiyonunda ve nükleer atıkları tutmak için jeolojik bariyer olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Seramik atıklarının yeniden kullanımı ve değerlendirilmesi için ekonomik açıdan en karlı seçeneğin beton üretimi olduğu belirlenmiştir” [12].

Son yıllarda, geri dönüştürülmüş seramik atıklarının agrega veya çimento esaslı beton ve harçlarda ham maddelerin kısmen ikamesi olarak kullanılmasıyla çevre dostu malzemeler geliştirmeye odaklanan çalışmalar artmıştır. “Seramik atıkların yeniden kullanımı konusunda en yaygın olarak çalışılan alternatif, atıkların beton üretiminde agrega olarak kullanılmasıdır” [13]. Beton üretiminde seramik atıkların ince agrega olarak kullanılması [14]; kaba agrega olarak kullanılması [15, 16, 17]; çimentonun bir kısmının yerine ikame malzeme olarak kullanılması [18]; seramik atıklarının alkali ile aktive edilerek geopolimer harçlar üretilmesi [19] üzerine yapılmış çalışmalar belirlenmiştir.

Küresel iklim değişikliği etkilerinin giderek daha belirgin ve yaygın olarak kabul görmesi nedeniyle sürdürülebilirliğin daha fazla önemsenmesi gereken bir dönemde yaşanmaktadır. Sürdürülebilir yapı üretimi anlayışının, yapı malzemelerinin üretim sürecinden itibaren göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bir malzemenin sürdürülebilir kabul edilebilmesi için, hammaddenin rezervden çıkarılmasından kullanım ömrü sonunda bertaraf edilmesine kadar geçen tüm aşamalarda ekolojik

kriterleri karşılaması önemlidir. Bu süreçlerde kullanılan enerjinin ve çevreye yayılan zararlı emisyonların en düşük düzeyde tutulması temel bir önceliktir. Bu bağlamda, kireç harçlarının yapısal kullanımının yaygınlaştırılması çalışmanın hedeflerinden birini oluşturmaktadır. Ayrıca, seramik sağlık gereçleri üretiminde ortaya çıkan ve yeniden üretim sürecine dahil edilemeyen sırlı seramik atıklarının değerlendirilerek sürdürülebilir yapı malzemelerine dönüştürülme olanaklarının araştırılması ise çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır.

2. Materyal ve Metod

Bu çalışma esas olarak deneysel yöntem ile gerçekleştirilmiş olup süreçlere bağlı olarak uygulanan yöntem adımları şu şekildedir:

- Geri dönüştürülmüş seramik atıklarının kullanılmasıyla sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmeye odaklanan bilimsel çalışmalar ve konuyla ilgili standartların incelenmesi;
- Kirece hidrolik bir yapı kazandırabilmek ve dayanımını artırmak amacıyla, sırlı seramik atığının puzolanik malzeme olarak kullanıldığı kireç harcının üretilmesi ve incelenmesi;
- Sırlı seramik atığının agrega, metakaolinin puzolan olarak kullanıldığı kireç harcının üretilmesi ve incelenmesi;
- Üretilen harçlarda puzolanik aktivitenin geliştirilmesi için alkali aktivatörlerin etkilerinin incelenmesi;
- Deney sonuçlarının, malzemenin yapıdaki performans gereklilikleri açısından incelenmesi.

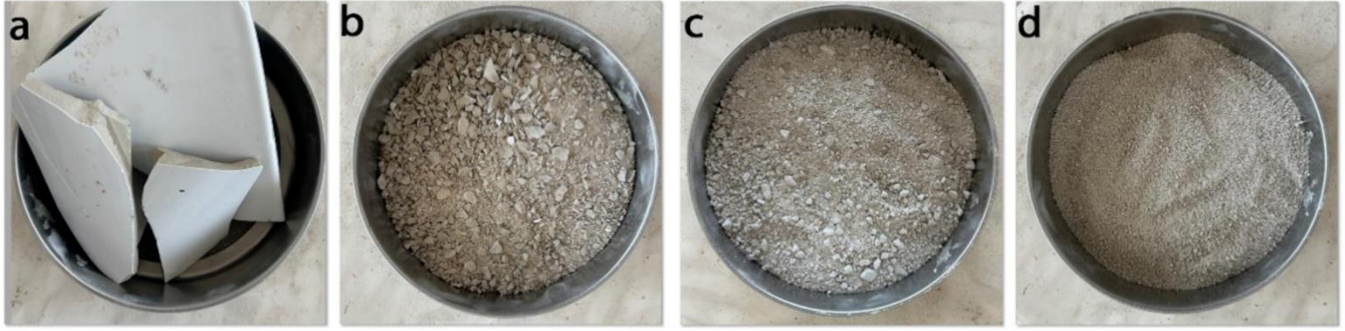
Seramik kırıklarının bilinen puzolan bir malzeme olmasından ötürü bu çalışma TS 25 [20]'te tanımlı puzolan deneyi üzerine kurgulanmıştır. Seramik atıklarının agrega olarak kullanıldığı harçlarda metakaolin puzolan bileşeni olarak seçilmiştir. Bu kapsamda, TS 25 standardına uygun olarak hem metakaolinin hem de seramik atıklarının puzolanik aktiviteleri belirlenmiş, seramik atıklarının agrega olarak kullanılabilirliği analiz edilmiştir.

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Seramik Atığı

Bu çalışmada, Adıyaman'da bulunan bir seramik sağlık gereci üreticisi firmanın pişirilmiş, sır kaplamalı, seramik üretimi için geri dönüştürülemeyen atıkları kullanılmıştır. Günlük 40 bin seramik sağlık gerecinin üretildiği bu firmada üretimin yaklaşık %5'i (2000 adet) problemlili ve geri dönüştürülemez ürün olarak atık havuzuna ayrılmaktadır.

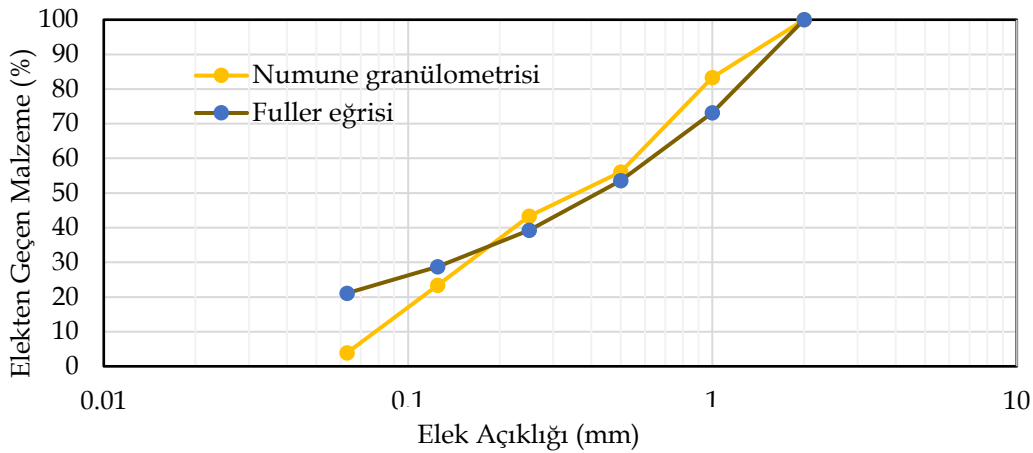
Harç üretiminde öncelikle bütün halde olan pişmiş sırlı seramik atığı (SA) çeneli kırıcıda öğütülmüş; sonrasında çenelide kırıcıda kırılan numuneler 6000 devir uygulanarak bilyeli kırıcıda toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilen seramik atıkları 2 mm elekten geçirilerek ince agrega olarak, puzolan olarak kullanılan seramik atıkları ise 63 mikronluk elekten geçirildikten sonra kullanılmıştır (Şekil 1). Agrega olarak kullanılan seramik atıkları için dane dağılımı Çizelge 1'de sunulmuştur. Şekil 2'de agrega olarak kullanılan SA'nın granülometrisi grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 1. Seramik atığının hazırlanma süreçleri seramik atığı, b) çeneli kırıcıdan öğütülmüş seramik atığı, c) bilyeli kırıcıdan öğütülmüş seramik atığı, d) bilyeli kırıcıdan sonra 2 mm'lik elekten geçirilmiş seramik atığı.

Çizelge 1. Agrega olarak kullanılan SA'nın elek analizi

Elek	Elek üstü (gr)	% Elek üstü (gr)	Elek altı (gr)	% Elek altı (gr)
2mm	1000	10	900	90.0
1mm	150 gr	15	750 gr	75.0
0.5 mm	245 gr	24.5	505 gr	50.5
0.250 mm	115 gr	11.5	390 gr	39.0
0.125 mm	180 gr	18	210 gr	21.0
0.063 mm	175 gr	17.5	35 gr	35
0.063 mm altı	35 gr	3.5	----	----
Toplam	1000 gr	----	----	----



Şekil 2. Agrega olarak kullanılan seramik atığının granülometrik eğrisi

2.1.2. Metakaolin

En yaygın alüminosilikat öncüllerine kıyasla seramik malzemelerin düşük reaktivitesi nedeniyle daha reaktif bileşenler içeren ikili karışımların denenmesini önerilmektedir [21]. Metakaolin, seramik toz atıklarıyla birlikte kullanılan en yaygın reaktif katkı maddelerinden biridir [22]. Metakaolin, çok yüksek oranda amorf, dolayısıyla reaktif silika ve alümina içermesi ile karakterize edilir [23].

Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), kaolin adı verilen doğal bir kil mineralinin yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 600-800°C) kalsine edilmesi sonucu elde edilen bir yan üründür. Bu kalsinasyon işlemi sonucunda, metakaolinin bünyesindeki alümin ve silisin kristal yapılarında bozulma olur. Metakaolin, amorf yapılı, yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip hale gelir [24]. Puzolan olarak kullanılan metakaolinin 63, mikronluk elek üstünde % 0 kalıntı bırakan dane boyutunda kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan SA ve metakaolinin özellikleri ile TS 25'e göre kıyaslanması Çizelge 2' de sunulmuştur.

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan seramik atığı ve metakaolinin özellikleri ile TS 25'e göre kıyaslanması

TS 25'e göre puzolanın sağlaması gereken kimyasal içerik ve özellikler		SA'nın kimyasal içeriği ve özellikleri	metakaolinin kimyasal içeriği ve özellikleri
SiO ₂	Toplam en az %70	% 74.74	%53-56
Al ₂ O ₃		% 17.56	%41-44
Fe ₂ O ₃		% 1.69	<%0.5
SO ₃	En çok %3.0	% 0.00	-
Cl ⁻	En çok %0.1		
MgO	-	% 0.40	-
Na ₂ O	-	% 1.97	-
K ₂ O	-	% 1.18	-
Cr ₂ O ₃	-	% 0.0107	-
Mn ₂ O ₃	-	% 0.0106	-
TiO ₂	-	% 0.6462	--
P ₂ O ₅	-	% 0.1621	
Kızdırma kaybı (%)	-	0.16	%1.0
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	-	2.46	2.41
Özgül yüzey (cm ² /gr)	En az 4000 ± %25	3198	17.400 cm ² /gr

2.1.3. Standart Kum

Deneylerde TS EN 196-1 [25]'e uygun standart kum kullanılmıştır.

2.1.4. Kireç

Bu çalışmada TS 25'te tanımlı kireç özelliklerine uygun, hava kireci olarak bilinen sönmüş kireç, Ca(OH)₂ kullanılmıştır. Kullanılan kirecin özgül ağırlığı TS 639 [26]'a göre yapılan deney ile 2.39 gr/cm³ olarak bulunmuş; kimyasal analizi teknik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Çalışmada kullanılan kirecin özellikleri ve TS EN 459-1:2011 [27]'e göre kıyaslanması

	TS EN 459-1:2011'e göre kirecin sağlaması gereken özellikler (%)	Çalışmada kullanılan kirecin özellikleri (%)
Kızdırma kaybı	En çok 4	En çok 4
Ca(OH) ₂	-	En az 90
Toplam CaO+MgO	En az 90	En az 91
MgO	En çok 5	En çok 3
Çözünmeyen madde	-	En çok 2.5
H ₂ O	En çok 2	En çok 1.0
SO ₃	En çok 2	En çok 2.0
R ₂ O ₃	-	En çok 1.5
200µ (Elek üstü)	En çok 2	En çok 1.0
90µ (Elek üstü)	En çok 7	En çok 5
Birim hacim kütlesi (kg/dm ³)	En çok 0.6	En çok 0.5

2.1.5. Karışım Suyu

Deney numunelerinin hazırlanmasında, zararlı organik bileşikler ve madensel tuzlar içermeyen Adıyaman şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Matrislerde TS 25'e göre hesaplanan su miktarı normal kıvamda bir harç oluşturmaya yetmediği için taze harç yayılma tablası deneyinden aynı yayılma oranını veren miktarda su eklenmiştir. Çizelge 6'da hesaplamaya göre (belirlenen su miktarı + eklenen su miktarı) olarak sunulmuştur.

"Standart kıvam suyu değerinin artmasının sebebi, puzolanik malzeme olarak kullanılan seramik atığının su emme değerinin yüksek (porozitesi yüksek) olmasıdır" [28].

2.1.6. Kimyasal Katkılar (Aktivatörler)

Bu çalışmada kimyasal katkı olarak alkali aktivatörlerden kostik soda adı ile de bilinen sodyum hidroksit (NaOH) ve sıvı cam veya su camı olarak da bilinen sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Bu alkali hidroksit ve alkali silikat karışımlarının puzolanik malzemenin çözünmesini ve polimerik iyonlaşmayı artırdığı bilinmektedir [29].

NaOH içeren harç matrislerinde 6 molar NaOH çözeltisi; Na_2SiO_3 içeren harç matrisleri, 1, 2 ve 6 molar çözelti kullanılarak üç farklı oranda kullanılmıştır.

2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

SA'nın puzolanik aktivitesini belirlemek amacıyla, TS 25 standardına uygun olarak puzolanik aktivite deneyi yapılmıştır. Bu deney için hazırlanan harç karışımı (ASK-PSA-A0-7) referans numune olarak kabul edilmiştir.

SA'nın puzolanik aktivitesi, Çizelge 4'te verilen malzeme ve miktarları ile TS 25'e göre hazırlanan harç numuneleri ile araştırılmıştır.

Çizelge 4. TS 25 Standardına göre SA ile hazırlanan harcın karışım oranları

TS 25'te tanımlanan oranlar		Deney için alınan değerler
Sönmüş Kireç	150 gr	150 gr
Puzolan	$2 \times 150 \times \text{seramik atığı özgül ağırlığı} / \text{sönmüş kireç özgül ağırlığı}$	$2 \times 150 \times (2.46 / 2.39) = 308.78 \text{ gr}$
Standart Kum	1350 gr	1350 gr
Su	$0.5 \times (150 + \text{puzolan})$	$0.5 \times (150 + 308.78) = 229.39 \text{ gr}$

SA'nın başka bir puzolanlı harçta agrega olarak kullanımı olasılığı düşünülerek, SA'nın agrega olacağı harç için puzolan olarak metakaolin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu nedenle SA kullanılmadan, TS 25'e göre metakaolinin puzolanik aktivitesi belirlenmiştir. Metakaolinin puzolanik aktivitesini belirlemek için hazırlanan deney karışım oranları Çizelge 5'te yer almaktadır.

Çizelge 5. TS 25 Standardına göre metakaolin ile hazırlanan harcın karışım oranları

TS 25'te tanımlanan oranlar		Deney için alınan değerler
Sönmüş kireç	150 gr	150 gr
Puzolan (metakaolin)	$2 \times 150 \times (\text{metakaolin özgül ağırlığı} / \text{sönmüş kireç özgül ağırlığı})$	$2 \times 150 \times (2.41 / 2.39) = 302.51 \text{ gr}$
Standart kum	1350 gr	1350 gr
Su	$0.5 \times (150 + \text{puzolan})$	$0.5 \times (150 + 302.51) = 226.25 \text{ gr}$

Puzolanik aktiviteye sahip olduğu belirlenen SA ile puzolan harcının niteliğinde etkili olabilecek harç bileşenlerinin etkilerinin araştırılması amacıyla toplam 20 harç matrisi oluşturulmuştur. Farklı harç matrislerine verilen kodlar ve içerikleri aşağıda Çizelge 6’da sunulmuştur.

Harç matrisleri kodlanırken;

- İlk harf grubu matristeki agrega türünü ifade etmektedir: agrega standart kumdan oluşuyor ise (ASK) ya da agrega seramik atığından oluşuyor ise (ASA) ile;
- İkinci harf grubu matristeki puzolanın türünü ifade etmektedir: puzolanı metakaolinden oluşuyor ise (PMK), puzolanı SA ‘dan oluşuyor ise (PSA) ya da puzolan olmayan (P0) ile;
- Üçüncü harf grubu matriste aktivatör bulunup bulunmadığını, bulunuyorsa aktivatörün türünü ifade etmektedir. Matriste aktivatör olmaması (A0), sodyum hidroksit (A1), sodyum silikat (A2). Sodyum silikat çözeltisi farklı oranlarda kullanıldığı için farklı çözelti oranları (A2)’den sonra gelen rakamlar ile ifade edilmektedir: (A21), (A22), (A23).
- Üçüncü harf grubunu takip eden sayı ise gün olarak harcın bekleme süresini ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen 4 farklı harç matrisi için numune hazırlama süreci şu şekilde gerçekleşmiştir: Öncelikle numunelerin üretiminde, ilk aşamada kuru ve iri taneli malzemeler karıştırılmış; daha sonra su ve katkı maddeleri eklenmiştir. Elde edilen karışım, elektrikli mikser kullanılarak 3 dakika boyunca karıştırılmış ve homojen bir harç oluşturulmuştur.. Harç kalıplara dökülmeden önce, harcın işlenebilirliğini belirlemek amacıyla taze harç yayılma tablası deneyi uygulanmış; ardından 40×40×160 mm boyutlarında 3 adet kare prizma numune hazırlanmak üzere kalıba yerleştirilmiştir. Kalıptaki numuneler 24 saat sonra çıkarılmış ve normal hava koşullarında 7 gün bekletilmiştir. Yedinci günün sonunda birim hacim ağırlıkları ve özgül ağırlıkları belirlenmiş; numunenin boşluk yapısını incelemek için ultrases ölçümleri yapılmış; TS 25’te tanımlanan değerlendirme ölçütleri kapsamında eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm, hesaplama ve deneylerin sonuçları için 3 numunenin aritmetik ortalaması kabul edilmiştir.

Çizelge 6. Farklı harç matrisleri ve içerikleri

	Sönmüş kireç (gr)	Agrega (gr)		Puzolan (gr)		Su (gr)	Aktivatör (gr)	
		Standart kum	Seramik atığı	Seramik atığı	Metakaoli n		NaOH çözeltisi	Na ₂ SiO ₃
ASK-PSA-A0-7	150	1350	-	308.78	-	229.39+30.61	-	-
ASK-PSA-A1-7	150	1350	-	308.78	-	229.39+30.61	6 mol	-
ASK-PSA-A21-7	150	1350	-	308.78	-	229.39+30.61	-	6 mol
ASK-PSA-A22-7	150	1350	-	308.78	-	229.39+30.61	-	1 mol
ASK-PSA-A23-7	150	1350	-	308.78	-	229.39+30.61	-	2 mol
ASA-PMK-A0-7	150	-	1350	-	302.51	226.25+143.75	-	-
ASA-PMK-A1-7	150	-	1350	-	302.51	226.25+143.75	6 mol	-
ASA-PMK-A21-7	150	-	1350	-	302.51	226.25+143.75	-	6 mol
ASA-PMK-A22-7	150	-	1350	-	302.51	226.25+143.75	-	1 mol
ASA-PMK-A23-7	150	-	1350	-	302.51	226.25+143.75	-	2 mol
ASA-P0-A0-7	150	-	1350	-	-	260	-	-
ASA-P0-A1-7	150	-	1350	-	-	260	6 mol	-
ASA-P0-A21-7	150	-	1350	-	-	260	-	6 mol
ASA-P0-A22-7	150	-	1350	-	-	260	-	1 mol
ASA-P0-A23-7	150	-	1350	-	-	260	-	2 mol
ASA-PSA-A0-7	150	-	1350	308.7	-	229.39+120.61	-	-
ASA-PSA-A1-7	150	-	1350	308.7	-	229.39+120.61	6 mol	-
ASA-PSA-A21-7	150	-	1350	308.7	-	229.39+120.61	-	6 mol
ASA-PSA-A22-7	150	-	1350	308.7	-	229.39+120.61	-	1 mol
ASA-PSA-A23-7	150	-	1350	308.7	-	229.39+120.61	-	2 mol

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 7’te sunulmuştur.

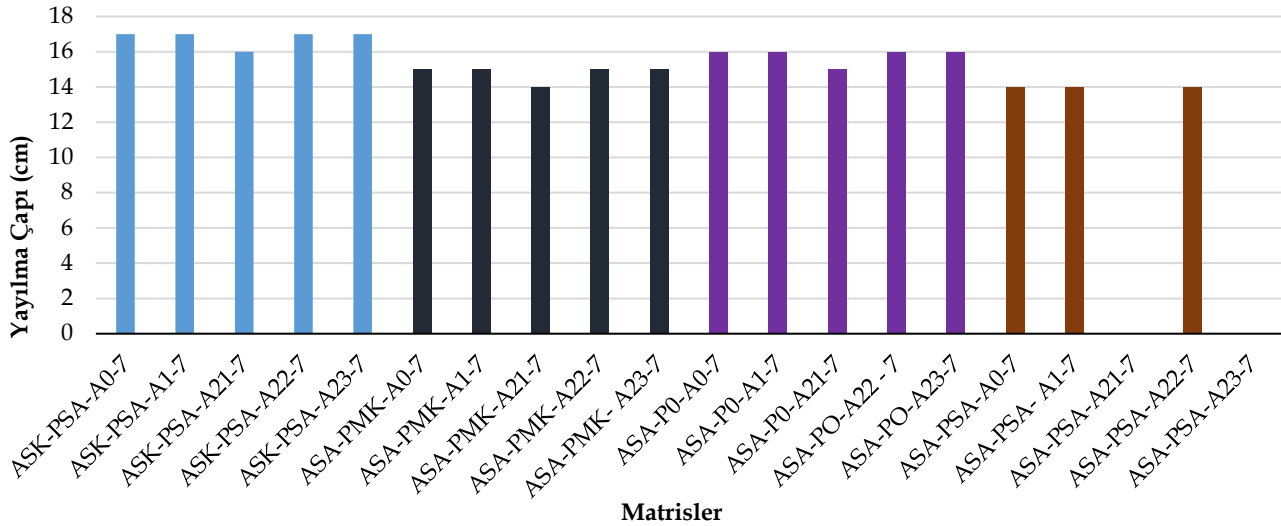
Çizelge 7. Deney sonuçları

Matrisler	Taze harç dağılma	Birim hacim ağırlık (gr)	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Ultrases (m/s)	Çekme dayanımı N/mm ²	Basınç dayanımı N/mm ²
ASK-PSA-A0-7	17	458.60	1.79	554.59	1.30	3.57
ASK-PSA-A1-7	17	534.50	2.08	2121.73	1.61	5.67
ASK-PSA-A21-7	16	467.60	1.82	1185.18	1.48	8.68
ASK-PSA-A22-7	17	481.80	1.88	962.11	0.84	3.14
ASK-PSA-A23-7	17	473.80	1.85	1013.94	1.04	5.25
ASA-PMK-A0-7	15	419.30	1.63	1424.75	0.79	4.77
ASA-PMK-A1-7	15	469.00	1.83	2102.49	2.97	12.89
ASA-PMK-A21-7	14	410.30	1.60	1912.5	4.72	21.35
ASA-PMK-A22-7	15	426.50	1.66	1102.68	0.76	4.76
ASA-PMK-A23-7	15	417.60	1.63	1168.73	0.80	5.10
ASA-P0-A0-7	16	430.50	1.68	1459.85	0.90	4.67
ASA-P0-A1-7	16	508.00	1.98	2492.6	2.26	6.94
ASA-P0-A21-7	15	422.00	1.64	1907.94	2.10	15.87
ASA-PO-A22 - 7	16	444.10	1.72	1242.23	0.71	4.28
ASA-PO-A23-7	16	425.60	1.66	1287.2	0.95	6.31
ASA-PSA-A0-7	14	417.60	1.63	1247.07	1.19	3.91
ASA-PSA-A1-7	14	492.60	1.92	2684.56	1.98	6.42
ASA-PSA-A21-7	Harcın işlenebilirliği düşük					
ASA-PSA-A22-7	14	418.60	1.64	1275.91	0.89	3.95
ASA-PSA-A23-7	Harcın işlenebilirliği düşük					

3.1. Taze Harç Deneyleri

Araştırmacılar tarafından elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde, seramik tozlarına ait tane şeklinin genellikle küresel forma yakın olduğu belirlenmiştir [30, 31, 32]. Seramik tozlarının tane şekli küresel olduğu için işlenebilirlik özelliği iyileşmektedir [28].

Agrega ve puzolan türü aynı olup aktivatör varlığı ve türüne göre farklılık gösteren matrislerde su oranı sabittir. Dolayısıyla, yayılma deneyi değerlendirmesi Agregası ve puzolan türü aynı olup aktivatör varlığı ve türüne göre farklılık gösteren matrisler arasında yapılmıştır.



Şekil 3. Taze harç yayılma deneyi

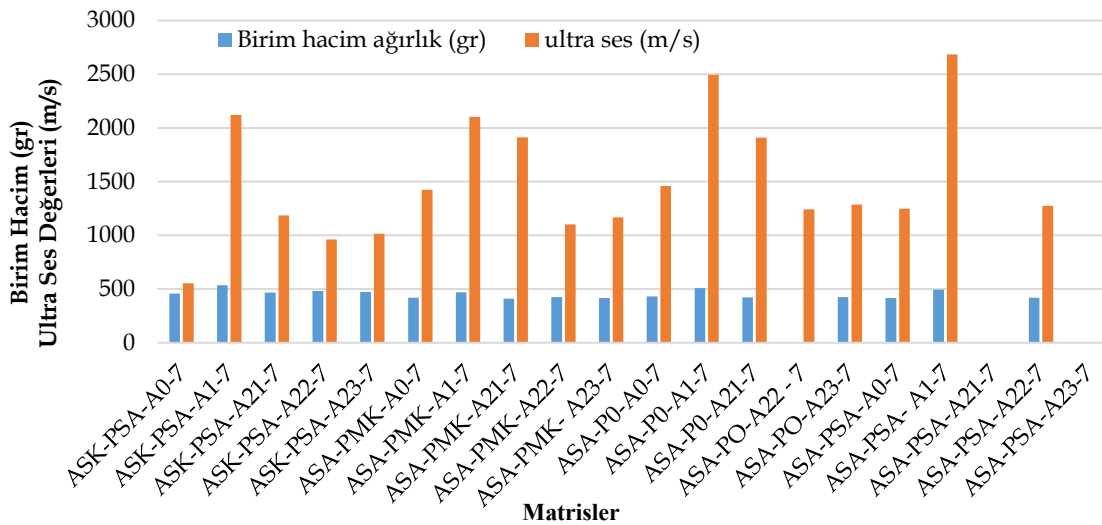
ASK-PSA, ASA-PMK ve ASA-PO matris gruplarının taze harç yayılma deneyi sonuçları, bu harçların iyi bir işlenebilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, seramik atığının hem agrega hem de puzolan olarak kullanıldığı ASA-PSA matrislerinde, 6 mol Na_2SiO_3 aktivatörü içeren ASA-PSA-A21-7 ile 2 mol Na_2SiO_3 aktivatörü içeren ASA-PSA-A23-7 numuneleri akışkan kıvamlı ve düşük işlenebilirlik gösteren harçlar olarak belirlenmiş; bu harçlar ile yayılma tablası deneyi gerçekleştirilememiş, kalıplara yerleştirilememesi nedeniyle numune üretimi yapılamamıştır.

Ayrıca, Na_2SiO_3 'nin aktivatör olarak kullanıldığı harçlarda, kalıba yerleştirme aşamasından itibaren hızlı priz alma davranışı gözlemlenmiştir.

3.2. Fiziksel Özellikleri Belirleyen Deneyler

Agrega ve puzolan türü aynı olan harç matrislerinde NaOH katkılı numunelerin birim hacim ağırlıklarının, özgül ağırlıklarının ve ultrases hızlarının daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 4).

Tüm harç türleri arasında en düşük ultrases geçiş hızı ASK-PSA-A0-7 kodlu numunelerde ölçülmüş, bunu 1 mol Na_2SiO_3 katkılı harçlar takip etmiştir.

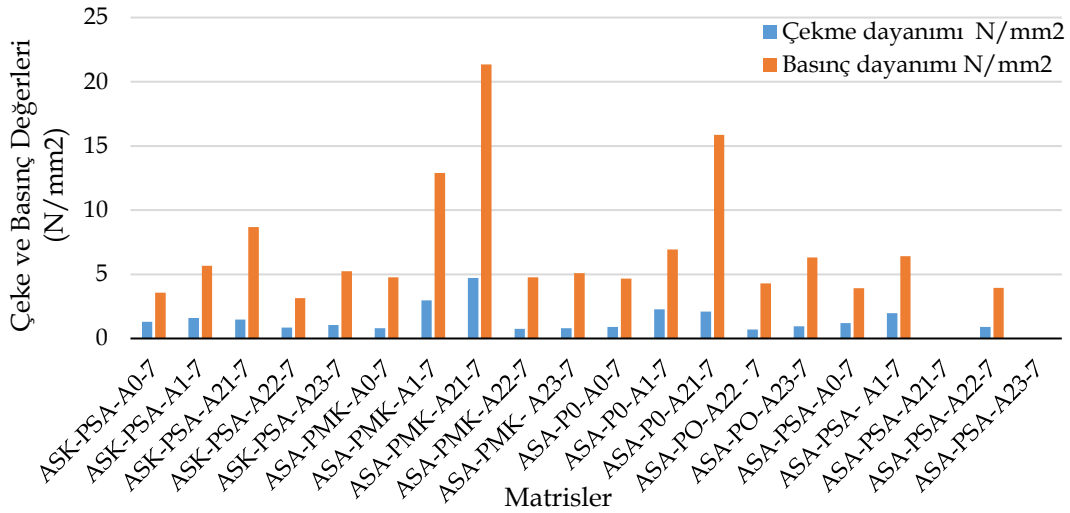


Şekil 4. Birim hacim ağırlığı ve Ultrases geçiş hızı

3.3. Mekanik Özellikleri Belirleyen Deneyler

Tüm harç türleri arasında en yüksek çekme dayanımı ASA-PMK-A21-7 kodlu numunelerden elde edilmiştir.

- Agregası standart kum ve puzolanı SA olan harç matrisleri arasında en yüksek çekme dayanımı ASK-PSA-A1-7 kodlu ve NaOH katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu numune aynı içerikte katkısız harçtan %23.85 daha fazla dayanıma sahiptir.
- Agregası SA ve puzolanı metakaolin olan harç matrisleri arasında en yüksek çekme dayanımı ASA-PMK-A21-7 kodlu ve 6 mol Na_2SiO_3 katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu numune aynı içerikte katkısız harçtan %4.97 daha fazla dayanıma sahiptir.
- SA'nın agrega olarak kullanıldığı ve puzolan içermeyen harç matrisleri arasında en yüksek çekme dayanımı ASA-P0-A1-7 kodlu ve NaOH katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu numune aynı içerikte katkısız harçtan %1.51 daha fazla dayanıma sahiptir.
- SA'nın hem agrega hem de puzolan olarak kullanıldığı harç matrisleri arasında en yüksek çekme dayanımı ASA-PSA-A1-7 kodlu ve NaOH katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu numune aynı içerikte katkısız harçtan %0.66 daha fazla dayanıma sahiptir.



Şekil 5. Çekme ve Basınç dayanımları

Tüm harç türleri arasında en yüksek basınç dayanımı ASA-PMK-A21-7 kodlu 6 mol Na_2SiO_3 katkılı numunelerden elde edilmiştir.

- Agregası standart kum ve puzolanı SA olan harç matrisleri arasında en yüksek basınç dayanımı ASK-PSA-A21-7 kodlu ve 6 mol Na_2SiO_3 katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu numune aynı içerikte katkısız harçtan %1.43 daha fazla dayanıma sahiptir.
- Agregası SA ve puzolanı metakaolin olan harç matrisleri arasında en yüksek basınç dayanımı ASA-PMK-A21-7 kodlu ve 6 mol Na_2SiO_3 katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu numune aynı içerikte katkısız harçtan %3.57 daha fazla dayanıma sahiptir.
- SA'nın agrega olarak kullanıldığı ve puzolan içermeyen harç matrisleri arasında en yüksek basınç dayanımı ASA-P0-A21-7 kodlu ve 6 mol Na_2SiO_3 katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu numune aynı içerikte katkısız harçtan %2.32 daha fazla dayanıma sahiptir.
- SA'nın hem agrega hem de puzolan olarak kullanıldığı harç matrisleri arasında en yüksek basınç dayanımı ASA-PSA-A1-7 kodlu ve NaOH katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu numune aynı içerikte katkısız harçtan %0.64 daha fazla dayanıma sahiptir.

TS 25'e göre puzolanik aktivitenin kanıtı olarak 7 günün sonunda numunelerin eğilmede çekme dayanımı en az 10 kgf/cm² (= 1 N/mm²), basınç dayanımı ise en az 40 kgf/cm² (= 4 N/mm²) olmalıdır.

Elde edilen sonuçlara göre, yüksek reaktiviteye sahip metakaolinin seramik atıklarıyla birlikte agrega olarak kullanıldığı karışımların, TS 25'te belirtilen dayanım sınırlarının üzerinde çekme ve basınç dayanımı değerleri sergilediği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, seramik atığının puzolan olarak kullanıldığı deneylerde de elde edilen değerlerin standardın üstünde olması, kullanılan seramik atığının hem agrega hem de puzolan olarak kullanılabilirliğini doğrulamıştır.

4. Sonuçlar

Sırlı seramik atıkları, üretim sürecine yeniden dâhil edilemeyen geri dönüştürülemeyen endüstriyel atık malzemelerdir. Bu durum, söz konusu atıkların depolama alanlarında ciddi yer işgaline neden olmakta ve çevresel yük oluşturmaktadır.

SA'nın yapı malzemesi üretiminde değerlendirilmesi, atık bertaraf maliyetini azaltmak, doğal kaynak tüketimini önlemek, karbon salımını düşürmek ve düşük enerji girdili, sürdürülebilir harç sistemleri geliştirmek açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Bu atıkların yeniden kullanımı, yeni hammadde çıkarımını azaltarak enerji tasarrufu sağlamak ve döngüsel ekonomi anlayışını desteklemektedir.

Bu çalışmada, SA'nın puzolan ve ince agrega olarak kullanılabilirliği farklı harç matrislerinde denenmiş; ayrıca bu harçların alkali hidroksit ve alkali silikatlarla geliştirilme olanakları incelenmiştir. Harçlar taze iken harç yayılma tablası deneyi, harçlar ile oluşturulan 7 günlük numunelerin birim hacim ağırlığı, özgül ağırlığı belirlenmiş ve ultrases ölçümleri yapılmış; ardından numunelere çekme dayanımı, basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre;

- Deneylerde kullanılan agrega ve puzolan türlerinin işlenebilirliği belirgin şekilde değiştirdiği gözlemlenmiştir. ASK-PSA, ASA-PMK ve ASA-PO matrisleri kolay işlenebilirliğe sahip iken; ASA-PSA matrisi daha düşük bir işlenebilirliğe sahiptir.
- NaOH aktivatör katkılı numunelerin yüksek birim hacim ağırlığı, özgül ağırlık ve ultrases geçiş hızı ile düşük poroziteye sahip oldukları söylenebilir.
- 1 ve 2 mol Na₂SiO₃ akitvatörlü matrislerde, 6 mol Na₂SiO₃ akitvtörlü matrise kıyasla daha düşük çekme ve basınç dayanımı gözlemlenmiştir.
- 6 mol Na₂SiO₃ aktivatör katkı içeren SA ve metakaolinin birlikte kullanıldığı harç türü tüm harç türleri arasında en yüksek çekme ve basınç dayanımına ulaşmıştır.
- SA'nın metakaolin ile kullanımı, düşük reaktivite etkisini azaltmış ve basınç dayanımını yükseltmiştir.
- TS EN 1504-3 standartlarına göre NaOH ve 6 mol Na₂SiO₃ içeren alkali aktivatörlü matrislerin tamir harcı, sıva ve dolgu harçları olarak kullanılmaya; TS EN 771-3 standartlarına göre yapı tuğlası içinde elverişli olduğu belirlenmiştir.

Metakaolinin SA ile hazırlanan kireç harçlarında dayanımı artırdığı görülmüş; kürlenme ile göstereceği gelişmenin belirlenmesi yararlı görülmektedir.

NaOH ve Na₂SiO₃ katkılarının SA ve metakaolinli kireç harçlarında dayanımı artırdığı görülmüş; bu etkinin 91 ve 180. günlerde göstereceği gelişmenin belirlenmesi yararlı görülmektedir.

Elde edilen bulgulardan, SA'nın, puzolanik özeliğinden yararlanılarak çimento ve kireç bağlayıcılar ile kullanılarak yapı malzemesi olarak geliştirilebilmesi olanaklarının belirlenmesi yararlı olacaktır.

Katkı Beyanı

Veri Toplama ve verilerin analizi, Analizlerin doğrulanması: Tüm yazarlar

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler

Kaynaklar

- [1] Vardal, L. Sıhhi Tesisat Seramiğinin Tarihsel Gelişimi ve Kişisel Öneri. [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul;1996.
- [2] <https://www.serfed.com/uyelerimiz/sersa> (erişim 08.05.2025)
- [3] Singh, A., & Srivastava, V. Ceramic waste in concrete – A review. Recent advances on engineering, technology and computational sciences (RAETCS), 2018;1-6.
- [4] Ahmad, J., Alattyih, W., Jebur, Y.M., Alqurashi, M., Garcia-Troncoso, N. A review on ceramic waste-based concrete: a step toward sustainable concrete. Rev. Adv. Mater. Sci, 2023; 62 (1), 20230346. <https://doi.org/10.1515/rams-2023-0346>
- [5] Açıkbaş, G., & Göçmez, H. Polyester matrisli kompozit özelliklerine vitrifiye seramik sağlık gereci atık miktarının etkisi. In 3rd International Symposium on Environment and Morality). Alanya/Antalya-Turkey;2016. <https://doi.org/10.21541/apjes.290743>
- [6] Ocampo, M. A. A., & González, A. F. R. Ceramic waste reuse and valorization alternatives: A review. Revista EIA, 2023; 20(40), 4018-pp. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1680>
- [7] El-Dieb, A. S., & Kanaan, D. M. Ceramic waste powder an alternative cement replacement – characterization and evaluation. Sustainable Materials and Technologies, 2018; 17, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00063>
- [8] Poyraz, M. Pişmiş Seramik Atıkların Artistik Yüzeylerde Geri Dönüşümü Ve Çağdaş Seramik Sanatçısı David Binns. İnönü Üniversitesi Kültür Ve Sanat Dergisi, 2018; 4(2), 17-27. <https://doi.org/10.22252/ijca.528587>
- [9] Rodríguez, E. A., Niño, C. J., Contreras, J. E., Vázquez-Rodríguez, F. J., López-Perales, J. F., Aguilar-Martínez, J. A., ... & Lara-Banda, M. Influence of incorporation of fired porcelain scrap as partial replacement of quartz on properties of an electrical porcelain. Journal of Cleaner Production, 2019; 233, 501-509. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.403>
- [10] Pang, L., Pan, Y., Deng, B., Zhang, D., Wang, Q. Conjoint reuse of ceramic polishing waste and calcium carbide slag as mineral admixtures: hydration and mechanical properties. J. Build. Eng, 2023; 72, 106741. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106741>
- [11] Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Kirchheim, A. P., & Provis, J. L. Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2016; 91(9), 2365-2388. <https://doi.org/10.1002/jctb.4927>
- [12] Ocampo, M. A. A., & González, A. F. R. Ceramic waste reuse and valorization alternatives: A review. Revista EIA, 2023; 20(40), 4018-pp.: <https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1680>
- [13] Awoyera, P. O., Ndambuki, J. M., Akinmusuru, J. O., & Omole, D. O. Characterization of ceramic waste aggregate concrete. HBRC journal, 2018; 14(3), 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.11.003>
- [14] Piyaphanuwat, R., & Asavapisit, S. Utilization ceramic wastes from porcelain ceramic industry in lightweight aggregate concrete. International Journal of Environmental Science and Development, 2017; 8(5), 342-346. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.5.975>
- [15] Elçi, H. Utilisation of crushed floor and wall tile wastes as aggregate in concrete; 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.003>
- [16] El-Dieb, A. S., & Kanaan, D. M. Ceramic waste powder an alternative cement replacement – characterization and evaluation. Sustainable Materials and Technologies, 2018; 17, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00063>

- [17] Bommisetty, J., Keertan, T.S., Ravitheja, A., Mahendra, K. Effect of waste ceramic tiles as a partial replacement of aggregates in concrete. Mater;2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.230>
- [18] Kannan, D.M., Aboubakr, S.H., El-Dieb, A.S., Reda Taha, M.M. High Performance Concrete Incorporating Ceramic Waste Powder As Large Partial Replacement Of Portland Cement. Constr. Build. Mater;2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.115>
- [19] Atabey, İ. İ., & Bayer Oztürk, Z. Investigation of Usability of Ceramic Sanitaryware Wastes in Geopolymer Mortar Production. Uluslararası Muhendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 2021; 13(1), 212-219. <https://doi.org/10.29137/umagd.782733>
- [20] TS 25: Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, Gereker ve Uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara;2008.
- [21] Buchwald, A., Kaps, C., Hohmann, M. Alkali-activated binders and pozzolan cement binders – compete binder reaction or two sides of the same story, 11th Int. Congr. Clin. Chem, 2003; 1238-1247.
- [22] Rovnaník, P., Rovnaníková, P., Vyšvařil, M., Grzeszczyk, S., Janowska-Renkas, E. Rheological properties and microstructure of binary waste red brick powder/ metakaolin geopolymer, Construct. Build. Mater, 2018; 188, 924-933. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.150>
- [23] Fugazzotto, M., Cultrone, G., Mazzoleni, P., & Barone, G. Suitability of ceramic industrial waste recycling by alkaline activation for use as construction and restoration materials. Ceramics International, 2023; 49(6), 9465-9478. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.111>
- [24] Anuk, D., & Arel, H. Ş. Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 2010; 25(2), 13-24.
- [25] TS EN 196-1 : Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini;2016.
- [26] TS-639 : Uçucu küllerin tanımı, sınıflandırılması, özellikleri, deney yöntemleri kalite kontrolü, Türk Standartları Enstitüsü; 1975.
- [27] TS EN 459-1: Yapı kireci - Bölüm 1: Tanımlar, özellikler ve uygunluk kriterleri; 2015.
- [28] Kalınçimen, G., Öztürk, A., Kaplan, G., & Yıldız, S. Seramik atıklarının çimento ikame malzemesi olarak kullanılması ve asit dayanıklılığının incelenmesi. Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences, 2015; 1(1), 9-16.
- [29] Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review. Journal of Cleaner Production, 2020;258 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120896>
- [30] Wu JM, Lu WZ, Wang XH, Fu P, Ni M, Yang JL, Wang C, Zeng QC. Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃-MgO Ceramics from Ceramic Powders Prepared by Improved Aqueous Gelcasting-Assisted Solid-State Method, Journal of the European Ceramic Society, 2013; 33; 2519-2527. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.04.015>
- [31] Paul F, Binder JR, Gesswein H, Ritzhaupt-Kleissl HJ, Hausselt J. Synthesis of Doped Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃ Ceramic Powder Via a Sol-Freeze-Granulation and Freeze-Drying Process, Ceramics International, 2009;35; 479-486. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.01.014>
- [32] Jiati-yun F. Zhuo-xin L. Jian-min J, Yao-wu S. Difference in Particle Characteristics and Coating Properties Between Spraying Metallic And Ceramic Powder Cored Wires, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007;17; 537-542. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(07\)60129-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60129-0)