

YAPI MALZEMELERİNİN GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE KUM OLARAK GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMESİNİN İNCELENMESİ

Süleyman İPEK^{1*}, Şevin EKME²

¹Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Bingöl, 12000, Türkiye

²Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, 63050, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 10.03.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 16.05.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.1085538

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı, doğal kuma alternatif olarak geri dönüştürülmüş kum malzemelerinin araştırılmasıdır. Bunun için bu çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer harç üretiminde yapı malzemelerinden geri dönüştürülmüş farklı kumların olası kullanım etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, beton, bazalt karo, granit karo, mermer karo ve seramik karo gibi inşaat malzemelerinin geri dönüşümünden elde edilen beş farklı türde geri dönüştürülmüş kum malzemesi doğal kuma alternatif olarak değerlendirilmiştir. Uçucu kül bazlı geopolimer harçların üretiminde, doğal kum, bu geri dönüştürülmüş kumlarla hacimce 10, 20, 30, 40 ve %50'lik oranlarda ikame edildi. Böylece biri kontrol karışımı olmak üzere toplam 26 farklı geopolimer karışımı tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen geopolimer harçların birim ağırlık, su emme, yarmada çekme ve özellikle termal iletkenlik özellikleri test edildi. Deneysel sonuçları geri dönüşüm kumlarının geopolimer harçların özelliklerini ciddi mertebelerde etkilemediğini göstermiş olup bu geri dönüştürülmüş kumların kontrollü bir şekilde geopolimer harçların üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Atık yönetimi; Geopolimer harç; Geri dönüşüm kumu; Termal iletkenlik; Yarmada çekme dayanımı*

INVESTIGATION OF RECYCLING OF BUILDING MATERIALS AS SAND IN THE PRODUCTION OF GEOPOLYMER MORTAR

ABSTRACT

The main target of this study is to explore alternative recycled sand materials to the natural sand. For this, the possible utilization of different types of recycled sand in fly ash-based geopolimer mortar production was experimentally investigated in this study. Within this context, five different types of recycled sand materials acquired from the recycling of construction materials such as concrete, basalt tile, granite tile, marble tile, and ceramics tile were considered to be alternatives to the natural sand. In producing fly ash-based geopolimer mortars, the natural sand was substituted with these recycled sands at five replacement levels of 10, 20, 30, 40, and 50% by volume. Thereby, 26 different geopolimer mixtures, one of which was the control mixture, were designed and manufactured. Unit weight, water absorption, splitting tensile strength, and especially thermal conductivity characteristics of the geopolimer mortars were tested. The results of the experiment showed that the recycled sands did not affect the properties of geopolimer mortars seriously, and it was concluded that they could be used in the production of geopolimer mortars in a controlled manner.

Keywords: *Waste management; Geopolimer mortar; Recycled sand; Thermal conductivity; Splitting tensile strength*

* e-posta¹ : sipek@bingol.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8891-949X> (Sorumlu Yazar)

e-posta² : ekmensevin@harran.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2577-696X>

1. Giriş

Birleşmiş Milletler, şehirleşmenin geleceği ile ilgili olarak, 2050 yılına kadar dünyadaki insanların %65'inden fazlasının şehirlerde yaşayacağına dair bir tahminde bulunmaktadır [1]. Aslında bu öngörü durumun önemini ortaya koyuyor çünkü şehirlerdeki nüfus artışı yeni yapılar ve binaların inşasına olan talebi de artıracaktır. Giderek artan bu kentleşme hızı, ihtiyacı duyulan bu yapılar ve binaların inşasında yapı malzemesi olarak dünyada sudan sonra en çok tüketilen malzeme olan geleneksel betonun kullanımını gerektirmesi nedeniyle doğal kaynaklarda ciddi ve giderek artan bir azalmaya neden olacaktır [2]. Bu da betonun, hem ucuz, kolay uygulanan ve kolay elde edilen hem de iyi bilinen ve yaygın olan bir inşaat malzemesi olması nedeniyle daha fazla imalatına ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir [3]. Temelde çimento, su ve agreganın birleşmesi anlamına gelen geleneksel beton, genellikle kendi imalatının yanı sıra çimento üretimi için doğal kaynakların tüketilmesinden de sorumludur. Bu nedenle dürüstçe ifade etmek gerekir ki geleneksel beton üretimindeki artış beraberinde birçok doğal kaynak tüketiminin de artmasına neden olmaktadır [4]. Geleneksel betonda ana bağlayıcı malzeme olarak kullanılan Portland çimentosunun üretimi, insan kaynaklı küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %5-7'sinden sorumludur [5]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayınlanan raporda [6], 2015-2020 yılları arasındaki 5 yıllık dönemde çimento üretiminin CO₂ yoğunluğunda yıllık %1.8 artış olduğu bildirilmektedir.

Tabii ki Portland çimentosu üretiminin sorumlu olduğu tek konu bu değil, aynı zamanda yüksek enerji tüketimi ve büyük miktarda hammadde kaynağı tüketiminin de müsebbibidir [7,8]. Yine IEA tarafından yayınlanan raporda, klinker üretimi sırasında tüketilen enerjinin 2020 yılında küresel olarak yaklaşık olarak 3.5 GJ/t olduğu, aynı yıl küresel olarak üretilen tahmini çimento miktarının ise 4.3 Gt olduğu belirtilmektedir [6]. Tüm bunlara ek olarak, 1 ton Portland çimentosu üretmek için gerekli olan hammaddenin yaklaşık 1.5 ton olması da durumun önemini anlamak adına göz önünde bulundurulması gereken bir konudur [9,10]. Dünya genelindeki toplam hazır beton üretimi (2019 yılı için 4.4 milyon Mt [11]) dikkate alındığında, sorunun büyüklüğü tahmin edilebilir. Anlaşılacağı üzere, çimento ve beton endüstrilerinin çalışma prensibi, doğal kaynakların tüketimine dayanmaktadır. Bu bağlamda literatürde, beton üretiminde Portland çimentosu ve doğal agrega kullanımının azaltılmasına yönelik birçok girişime rastlanmaktadır [3]. Beton üretiminde çimento yerine uçucu kül, silis dumanı, cüruf vb. gibi çimento esaslı malzemeler ve doğal agregaların yapay agregalarla değiştirilmesi çevre dostu beton arayışı olarak değerlendirilebilir.

Fransız malzeme bilimcisi Joseph Davidovits [12], çimentonun mineral katkılarla kısmi ikamesi yerine, tamamen yeni bir konsept geliştirdi; bu konseptte, sertleşme aşaması, su ve çimento arasında gerçekleşen hidrasyon reaksiyonları yerine alkali aktivatör ve alüminosilikatça zengin hammaddeler arasında meydana gelen polimerizasyon reaksiyonları tarafından yönetilir. Bu yeni konseptte meydana gelen polimerizasyon reaksiyonlarının bir sonucu olarak Si-O-Al-O bağları oluşmakta ve bu da geopolimerlerin oluşmasına vesile olmaktadır [3,13]. Bu nedenle bu yeni konseptte, Si-O-Al-O bağlarını oluşturmak için alkali aktivatör çözeltileri ve alüminyum ve silikon bakımından zengin hammaddelere ihtiyaç vardır. Bu noktada yüksek fırın cürufu, taban külü, uçucu kül vb. endüstriyel atıklar kullanılarak polimerizasyon işleminin hammadde ihtiyacının karşılanması geopolimer beton olarak da adlandırılan bu yeni malzemenin önemli faydalarından biridir. Başka bir deyişle, bu malzemenin üretimi bağlayıcı malzeme olarak çimento gerektirmediği için, daha az enerji tüketimi, sera gazı salınımı ve doğal kaynak tüketimi durumu söz konusu olur ve bu da bu malzemeyi daha çevre dostu ve enerji tasarruflu bir yapı malzemesi haline getirir [14].

Davidovits tarafından geliştirilen geopolimer beton konsepti, geleneksel çimento esaslı betona göre daha enerji verimli ve daha çevre dostu bir yapı malzemesi olmasına rağmen, bu beton tipinin imalatında yapısındaki agrega fazı hala doğal kaynaklardan sağlanmaktadır. Bu nedenle alternatif kaynaklardan agrega temini hem çok önemli hem de elzem bir konudur. Bu kapsamda, literatürde geopolimer beton üretiminde farklı tip agregaların kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan biri Rovnanik ve Safrankova [15] tarafından gerçekleştirilmiş olup şamot (seramik kırıntısı) tipi agrega

içeren geopolimerlerin termal davranışını incelediler ve bu agreganın geopolimerlerin termal performansını iyileştirdiği ancak mekanik performansını düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Mermerdaş ve ark. [16] nehir kumu ve kırılmış kireçtaşı gibi farklı agrega türlerinin geopolimer harcın özellikleri üzerindeki etkisini araştırdı. Geopolimer harçları nehir kumu ile ürettiklerinde daha yüksek akışkanlık gözlemlemişler öte yandan kırma kireçtaşı kullandıklarında ise daha yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımı elde etmişlerdir. Mohseni ve ark. [17] ise, skorya kayasından elde ettikleri düşük yoğunluklu agreganın geopolimer harçların özelliklerini incelemiş ve doğal kumun %20 seviyelerinde skorya agregası ile değiştirilmesinin daha düşük dayanıklılık performansı gösterdiğini bildirmişlerdir. Ekmen ve ark. [18] ise, %35 oranında doğal kumun pomza agregası ile ikame edildiği geopolimer harçların taze ve sertleşmiş hal özelliklerini incelemişler ve matris fazı ile pomza agregası arasında karmaşık bir etkileşim olduğunu belirtmişlerdir. Li ve ark. [19] standart ve farklı gradasyonlara sahip nehir kumu içeren geopolimer harcın mekanik özelliklerini test ettikleri bir çalışma yapmışlar ve agrega gradasyonunun geopolimer harçların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşmışlar.

Ancak bahsedildiği üzere tüm bu çalışmalarda geopolimer harçların üretiminde kullanılan agregalar doğal kaynaklardan elde edilmiştir. Oysa, Wongsu ve ark. [20] atık kırıntı kauçuğu ve Poggetto ve ark. [21] ise atık camı ince agrega olarak kullanarak geopolimer harç üretim özelliklerini araştırmışlar. Wongsu ve ark. [20], kırıntı kauçuğun ince agrega olarak kullanımının geopolimer harçların basınç dayanımını azalttığını, ancak daha düşük yoğunluk ve daha iyi termal özelliklere vesile olduğunu bildirmişler. Öte yandan, Priyadharshini ve ark. [22], hafriyat toprağı atığını ince agrega olarak geopolimer harç üretiminde kullanmışlar, Zhu ve ark. [23], geopolimer harcın üretiminde ince agrega olarak kullanabilmek için geopolimer harcı geri dönüştürmüşler. Zhu ve ark. [23], geri dönüştürülmüş geopolimer agregası kullandıklarında tanecik ve hamur arayüzünün daha kompakt olduğunu gözlemlemişler. Ayrıca Mermerdaş ve ark. [24] tarafından yapılan bir başka çalışmada, soğuk bağlama işlemi ile üretilen sentetik agrega, geopolimer harç imalatında kullanılmış ve sentetik agrega kullanımının yumuşak ve gözenekli yapısı nedeniyle daha düşük mekanik performans sağladığı sonucuna varmış olup, sentetik agreganın daha düşük özgül ağırlığı nedeniyle geopolimer harçların da daha düşük birim ağırlıkla sahip olduğunu bildirmişler. Literatürdeki çalışmalardan da anlaşılacağı gibi, başta geri dönüştürülmüş olanlar olmak üzere farklı agrega türlerini içeren geopolimer harçların olası üretimini tam olarak anlamak için hala birçok mihenk taşına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca geopolimer betondan elde edilen fayda ve verimi artırmak için üretiminde kullanılan agreganın da geopolimer macunu kadar sürdürülebilir olması gerektiği vurgulanmalıdır.

Söz konusu literatür ışığında, hızla kentleşen dünya karşısında çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmenin giderek önem kazandığı söylenebilir. Bu nedenle, bu çalışmada daha çevreci ve sürdürülebilir yapı malzemesi elde etmek için atık yapı malzemelerinden elde edilen ince agregaların geopolimer harçta kullanılmasının olası etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu nedenle 5 farklı yapı malzemesi ince agrega olarak geri dönüştürülmek üzere belirlenmiştir. İnce agrega olarak geri dönüştürülen atık malzemeler, çimento esaslı beton, bazalt karo, granit karo, mermer karo ve seramik karodur. Geopolimer harcın, geri dönüştürülmüş kumların eklenmesi ve ikame seviyesinin arttırılmasından kaynaklanan özelliklerindeki değişimi görebilmek için toz hammadde (uçucu kül) dozajı, alkali aktivatör içeriği ve süper akışkanlaştırıcı içeriği tüm geopolimer harç karışımlarında sabit tutulmuştur. Kontrol karışımının imalatında nehir kumu kullanılmış ve belirli ikame seviyelerinde kademeli olarak geri dönüştürülmüş kumlarla değiştirilmiştir. Bu çalışmada, karışımların birim ağırlık, su emme, yarmada çekme ve termal iletkenlik gibi özelliklerine geri dönüştürülmüş kum türü ve ikame seviyesinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Söz konusu geri dönüşüm kumlarının bahsi geçen özellikler üzerinde olumlu veya olumsuz etkilerinin araştırılması çalışmanın asıl hedefidir. Böylece, nehir kumuna alternatif kum malzemeleri keşfetmek için kapsamlı ve karşılaştırmalı bir çalışma yapılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Materyal

Bu çalışmada, geopolimer karışımların üretiminde uçucu kül, sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri, nehir ve geri dönüştürülmüş kumlar ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

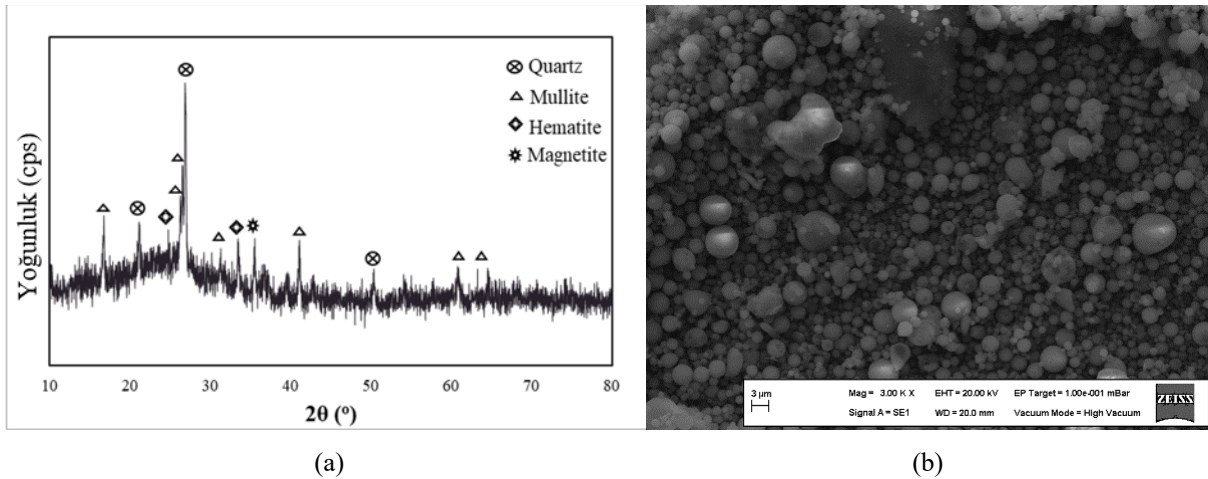
Uçucu kül, Türkiye'nin Zonguldak ilindeki Çatalağzı termik santralinden temin edilmiş olup ASTM C311'e uygundur [25]. X-ışını floresan (XRF) analizi ile belirlenen uçucu külün kimyasal bileşenleri ve kızdırma kaybı Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Uçucu külün kimyasal bileşenleri

Kimyasal bileşenler, %								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	KK*
1.69	55.46	26.33	6.71	2.42	0.05	1.08	4.22	1.2

*KK: Kızdırma kaybı

Geopolimer karışımların imalatında alkali ortamda bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül kullanılmıştır ve tabloda verilen bileşen miktarları dikkate alındığında (SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oksitlerin toplamı %70'den fazla olduğu için) ASTM C618 [35]'e göre kullanılan uçucu külün F sınıfı olduğu söylenebilir. Kullanılan uçucu külün özgül ağırlığı 2.0 ve özgül yüzey alanı yaklaşık 2.018 m²/g idi. Ayrıca, Şekil 1a ve 1b, sırasıyla, uçucu külün X-ışını kırınım (XRD) analizi sonucunu ve taneciklerinin taramalı elektron mikroskobundan (SEM) elde edilen görüntüsünü göstermektedir. Şekil 1b'de uçucu külün partikül boyutları görülürken, Şekil 1a'da uçucu külü oluşturan bileşenler gösterilmektedir; burada, uçucu kül yüksek miktarda SiO₂ içerdiğinden, pikin kuvars kristalinde meydana geldiği açıkça fark edilebilir.



Şekil 1. (a) uçucu külün X-ışını kırınım (XRD) analizi sonucu ve (b) taneciklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü

Geopolimer harcın ikinci temel bileşeni olan alkali aktivatör, bu çalışmada 1:2 oranında NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı olarak belirlenmiştir. 12 M konsantrasyonundaki NaOH çözeltisini hazırlamak için %98'den fazla saflığa sahip beyaz renkte küresel NaOH peletleri kullanılmıştır. Özgül ağırlığı yaklaşık 1.254 olan NaOH 'in kimyasal bileşenleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Alkali aktivatörün hazırlanmasında kullanılan diğer kimyasal malzeme olan Na_2SiO_3 çözeltisinin silika-sodyum oksit oranı ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) yaklaşık 2.5, yoğunluğu ise 1.367 g/ml idi. Bu kimyasal çözelti, yaklaşık %61.5 sıvı ve %38.5 katı

malzemeden oluşan açık sarı renkte sıvı halde temin edilmiştir. Na_2SiO_3 çözeltisinin fiziksel özelliklerinin ve kimyasal bileşenlerinin detayları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 2. Sodyum hidroksitin (NaOH) kimyasal bileşenleri

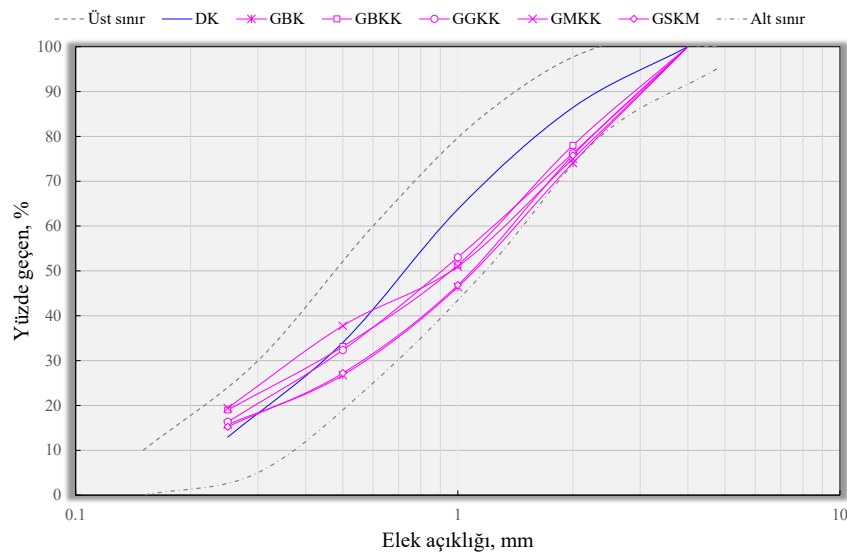
Kimyasal bileşenler, %			
NaOH (Sodyum hidroksit)	Na_2CO_3 (Sodyum karbonat)	NaCl (Sodyum klorür)	Fe (Demir)
≥ 98.0	≤ 0.5	≤ 0.02	≤ 0.001

Çizelge 3. Sodyum silikatın (Na_2SiO_3) kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri

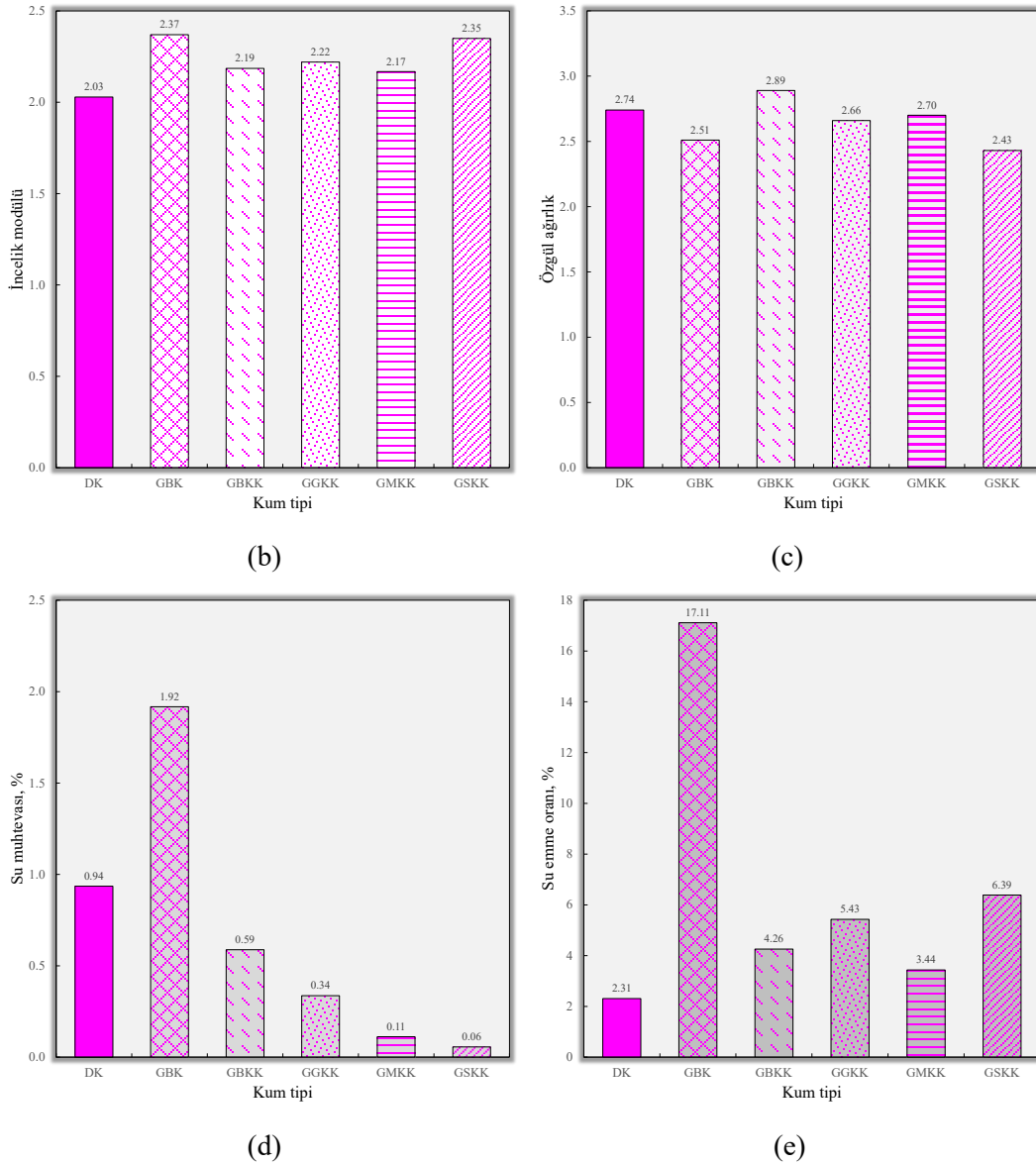
Kimyasal bileşenler, %		Yoğunluk, g/ml	Modül	Bome, °B
Na_2O (Sodyum oksit)	SiO_2 (Silikat)	1.367	2.93	38.68
9.03	27.08			

Bu çalışmadaki ana tema nehir kumunun kısmen geri dönüştürülmüş kumlarla değiştirilmesinin etkilerinin araştırılması olduğu için kumların fiziksel özelliklerinin ve tane boyutu dağılımının belirlenmesi ve tanecik şekillerinin tanımlanması önem taşımaktadır. Bu bağlamda, geopolimer harcın imalatında kullanılan nehir kumunun özellikleri hassas bir şekilde belirlenmiş ve geri dönüşüm kumları ile karşılaştırılmıştır. Mevcut çalışmada kullanılan doğal ince agrega nehir kumuydu ve bu makale boyunca bu agregayı belirtmek için NK kısaltması kullanıldı. Nehir kumu ile ikame edilen ilk kum, C25 sınıfı betonun çeneli kırıcıda kırılması ile elde edilirken, diğer kumlar ise yıkılan bir binadan çıkarılan bazalt, granit, mermer ve seramik karoların, yine bu binadan alınan C25 sınıfı betonun geri dönüşümünde izlenen yöntemle kırılmasıyla elde edilmiştir. Nehir kumu için izlenen kısaltma yönteminde olduğu gibi, bu kumların adları da ilk harflerinin yan yana getirilmesiyle kısaltılmış olup; GBK, GBKK, GGKK, GMKK ve GSKM sırasıyla beton kumu, bazalt karo kumu, granit karo kumu, mermer karo kumu ve seramik karo kumu anlamına gelmektedir. Burada, kısaltmaların ilk harfi olan G 'geri dönüşüm' kelimesinin kısaltmasıdır.

Mevcut çalışmada kullanılan tüm kumlar 4 mm'den küçük tane boyutlarına sahip olup ASTM C136'ya [27] göre belirlenen elek analiz sonuçları, ayrıca ASTM C33 [28] tarafından ince agrega için verilen üst ve alt sınırlar ile birlikte Şekil 2a'da sunulmuştur. Bu şekilden de görülebileceği üzere, tüm kum türlerinin gradasyon eğrileri belirtilen standart sınırları içinde yer almakta olup DK ile hemen hemen aynı elek analizi sonuçlarına sahiptir.



(a)

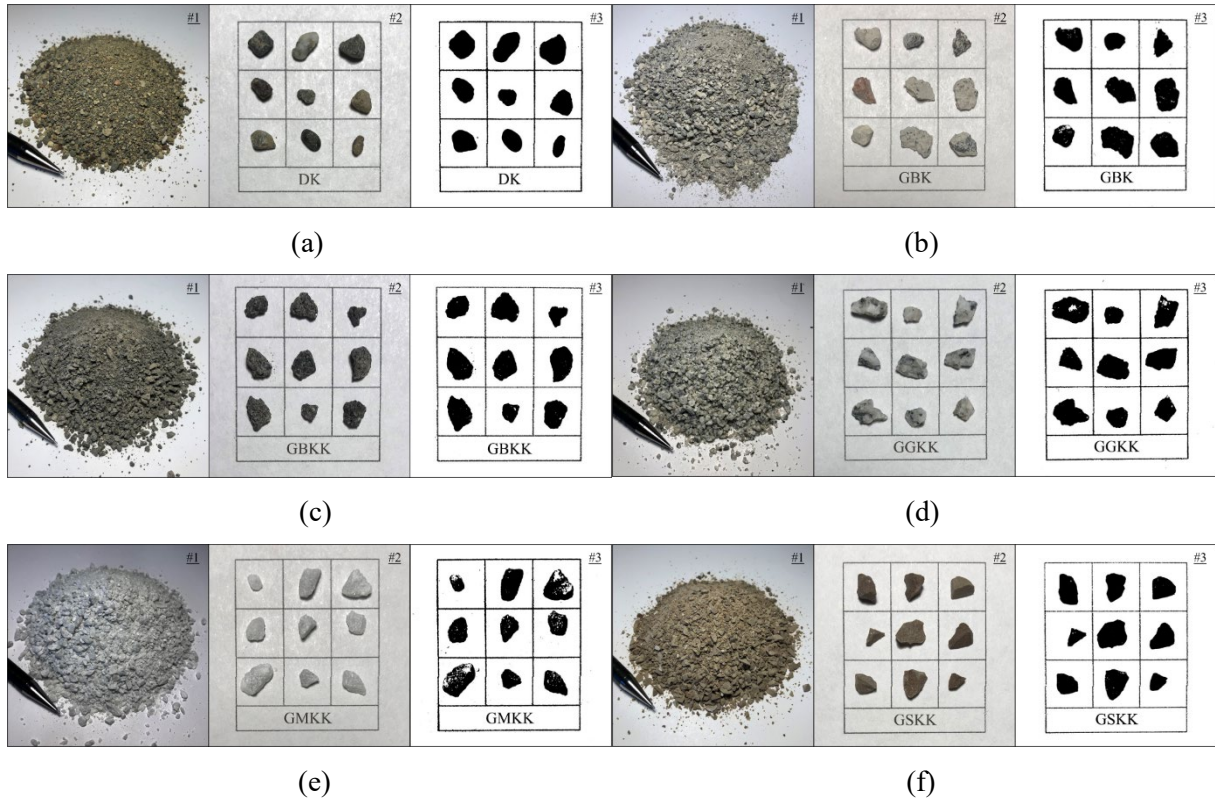


Şekil 2. Kumların (a) elek analizi sonuçları, (b) incelik modülü, (c) özgül ağırlık, (d) su muhtevası ve (e) su emme oranları

Ayrıca Şekil 2b, kumların incelik modülü değerlerini göstermektedir. DK, 2.03 ile en düşük incelik modülüne sahipken, diğer kumlar nispeten daha yüksek incelik modülü değerlerine sahiptir. Daha yüksek incelik modülü, kumun daha iri taneli tanelerden oluştuğunun göstergesidir. Bu bağlamda geri dönüşüm kumlarının DK'ye göre biraz daha iri olduğu söylenebilir. Bu durum Şekil 2a'da sunulan gradasyon eğrilerinden de görülmektedir. 1-mm'lik elekten geri dönüşüm kumlarının geçen yüzdesi DK'den daha azdır. ASTM C127'ye [29] göre belirlenen özgül ağırlık, su muhtevası ve su emme oranları gibi tüm kumların diğer fiziksel özellikleri sırasıyla Şekil 2c, 2d ve 2e'de sunulmuştur. Şekil 2c'de DK'nin özgül ağırlığının 2.74 olduğu ve özgül ağırlık değeri 2.89 olan GBKK'nin en ağır kum, özgül ağırlık değeri 2.43 olan GSKK'nin ise en hafif kum olduğu görülmektedir. Diğer geri dönüşüm kumları yani GBK, GGKK ve GMKK ise sırasıyla 2.51, 2.66 ve 2.70 özgül ağırlıklara sahiptir. Şekil 2d, hava kurusu durumdaki kumların su muhtevasını göstermektedir. Bu değerlere göre bu çalışmada kullanılan kumların %0.06 (GSKK) ile %1.92 (GBK) arasında değişen su muhtevası değerlerine sahip olduğu, DK'nin ise su muhtevasının %0.94 olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra mevcut çalışmada kullanılan kumlardan en yüksek su emme kapasitesi %17.11 değeri ile GBK tipinde, en düşük kapasite

ise DK tipinde tespit edildi. DK ile kıyaslandığında, diğer kum çeşitlerinin de daha yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu ancak GBK'nin sahip olduğundan hayli düşük mertebelerde olduğu Şekil 2e'de sunulan su emme oranlarından da kolayca görülmektedir.

Kumların fiziksel özelliklerinin yanı sıra makro ölçekteki genel ve taneçik görünümleri verilerek şekil özellikleri bazında karşılaştırılıp değerlendirilmesi sağlanmıştır. DK'ye ait görüntüler Şekil 3a'da verilirken, GBK, GBKK, GGKK, GMKK ve GSKK'ye ait olanlar sırasıyla Şekil 3b, 3c, 3d, 3e ve 3f'de gösterilmektedir. Kumların görünüşlerini kapsamlı bir şekilde tanımlamak için, her bir şekilde genel görünümün (#1), 10 mm'lik ızgaralar içindeki taneçiklerin (#2) ve 10 mm'lik ızgaraların içindeki taneçiklerin ana hatlarının (#3) fotoğraf görünümleri sunulmaktadır. Kumların aynı görünüme sahip oldukları sunulan genel görünümünden (#1) rahatlıkla görülebilmektedir; ancak, 10 mm'lik ızgaralar (#2 ve #3) içindeki taneçiklerin fotoğraf görünümleri ve ana hatları, kumların taneçik şekli arasında bazı farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır. DK esas olarak yuvarlak, kısmen yuvarlak ve düzensiz taneçiklerden oluşmaktadır (bakınız Şekil 3a'daki #2 ve #3 resimler), oysa genel olarak GBK, GBKK ve GGKK çoğunlukla köşeli ve bazen pulsu taneçiklerden oluşmaktadır (bakınız Şekil 3b, 3c ve 3d'deki #2 ve #3 resimler). Öte yandan, GMKK'nin taneçikleri çoğunlukla düzensiz ve kısmen yuvarlak şekillerdeyken (bakınız Şekil 3e'deki #2 ve #3 resimler), GSKK'nin taneçikleri genellikle açısız biçimlidir (bakınız Şekil 3f'deki #2 ve #3 resimler).



Şekil 3. Kumların genel, 10 mm'lik ızgaralar içindeki taneçik ve taneçik ana hattının görünümleri: (a) DK, (b) GBK, (c) GBKK, (d), GGKK, (e) GMKK ve (f) GSKK

Karışımlar için yeterli işlenebilirlik elde etmek için geopolimer harçların imalatında, ticari olarak temin edilebilen ve özgül ağırlığı 1.07 olan polikarboksilik eter bazlı süper akışkanlaştırıcı kullanıldı.

2.2. Geopolimer harç karışım oranları ve üretimi

Uçucu kül bazlı geopolimer harçlara geri dönüşüm kumunun dahil edilmesinin ve ikame seviyesinin artırılmasının geopolimer harçların özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için,

karışımlar, 0.5'lik sabit bir alkali aktivatör-uçucu kül oranı ve yukarıda belirtildiği gibi 2.0'lik sabit bir Na_2SiO_3 -NaOH oranında tasarlanıp üretilmiştir. Ayrıca, tüm geopolimer karışımlarında uçucu kül dozajı ve alkali aktivatör içeriği sırasıyla 600 kg/m^3 ve 300 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Çalışma kapsamında seçilen alkali aktivatör-uçucu kül oranı, Na_2SiO_3 -NaOH oranı, alkali aktivatör molaritesi, uçucu kül dozajı ve alkali aktivatör içeriği, Ekmen ve ark. [18] tarafından gerçekleştirilen temel olarak yukarıda bahsedilen parametrelerin geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine etkisinin incelendiği ve bu bağlamda yapılmış en kapsamlı çalışmalardan biri olan doktora tezi dikkate alınarak seçilmiştir. Ekmen ve ark. [18] 2 farklı aktivatör-uçucu kül oranı, 3 farklı Na_2SiO_3 -NaOH oranı ve 3 alkali aktivatör molaritesinde uçucu kül bazlı geopolimer harçlar üreterek taze ve sertleşmiş özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmadan elde edilen kıvam ve mukavemet bulguları göz önünde bulundurularak mevcut çalışmadaki karışım oranları belirlenmiştir. Ayrıca kontrol karışımında istenen işlenebilirliği elde etmek için birçok deneme karışımından sonra süper akışkanlaştırıcı içeriği, uçucu külün kütlece %3.5'i olarak belirlenmiştir. Kontrol geopolimer karışımı sadece DK kullanılarak üretilirken, geri dönüşüm kumu içeren karışım serisinde DK, hacimce %10, %20, %30, %40 ve %50'lik değiştirme oranlarında geri dönüşüm kumları ile ikame edildi. Böylece her bir geri dönüşüm kumu türünden 5 adet geopolimer harç karışımı tasarlanarak üretilmiştir ve toplamda, kontrol karışımı dışında 30 farklı karışım elde edilmiştir. Geopolimer harçların detaylı karışım oranları Çizelge 4'te sunulmuştur.

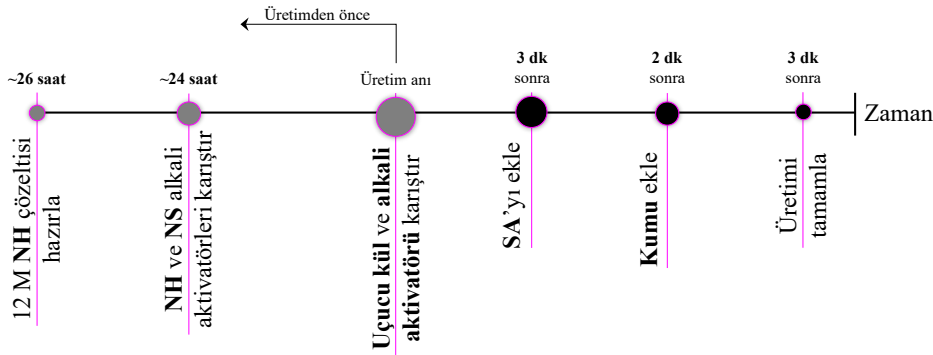
Çizelge 4. Geopolimer harçların karışım oranları (kg/m^3)

Karışım	UK	NH	NS	DK	KİS (%)	Geri dönüşüm kumu	SA	f_c (MPa)
Kontrol	600	100	200	1231.1	0	-	21	35.5
GBK grubu	600	100	200	1108.0	10	112.8	21	34.6
				984.9	20	225.6		35.1
				861.8	30	338.3		35.8
				738.7	40	451.1		34.9
				615.6	50	563.9		35.5
GBKK grubu	600	100	200	1108.0	10	129.9	21	36.3
				984.9	20	259.7		36.7
				861.8	30	389.6		37.1
				738.7	40	519.4		38.8
				615.6	50	649.3		39.9
GGKK grubu	600	100	200	1108.0	10	119.5	21	35.7
				984.9	20	239.0		36.0
				861.8	30	358.6		36.5
				738.7	40	478.1		36.8
				615.6	50	597.6		37.2
GMKK grubu	600	100	200	1108.0	10	121.3	21	35.7
				984.9	20	242.6		36.1
				861.8	30	364.0		37.8
				738.7	40	485.3		38.6
				615.6	50	606.6		40.3
GSKK grubu	600	100	200	1108.0	10	109.0	21	33.4
				984.9	20	218.0		32.8
				861.8	30	328.0		31.8
				738.7	40	437.0		31.3
				615.6	50	546.0		30.8

NH: sodyum hidroksit; NS: sodyum silikat; KİS: kum ikame seviyesi; SA: süper akışkanlaştırıcı, f_c : 3 günlük basınç dayanımı [30]

Tüm geopolimer harç karışımlarında aynı homojenliği elde edebilmek için her bir karışım aynı karıştırma işlemi izlenerek üretilmiştir. Bahsedilen bu işleme göre, üretimden yaklaşık 26 saat önce 12 M'lık NaOH çözeltisi hazırlandı. NaOH çözeltisinin hazırlanmasında, katı NaOH peletleri önce saf suda eritildi; ancak NaOH'in suda çözünmesi yüksek oranda ekzotermik bir reaksiyonun oluşmasına ve yüksek miktarda ısının açığa çıkmasına neden olduğundan, çözelti ortam sıcaklığına gelinceye kadar

cam şişede laboratuvar koşullarında tutulmuştur. Mevcut çalışmada, bu soğutma periyodu yaklaşık 2 saat sürmüştür, bu nedenle NaOH çözeltisi, Na₂SiO₃ çözeltisi ile karıştırılmadan yaklaşık 2 saat önce hazırlanmıştır. Daha sonra, geopolimer harcı imalatında kullanılmadan yaklaşık 24 saat önce belirlenen miktarda NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri karıştırılarak alkali aktivatör çözeltisi hazırlanmıştır [3,31], daha sonra alkali aktivatör solüsyonu karıştırma anına kadar cam bir kaptaki tutulmuştur. Geopolimer harcın üretim işlemine uçucu kül ve alkali aktivatör çözeltisinin mikser tavaında 3 dakika karıştırılmasıyla başlandı. Böylece geopolimer macunu elde edilmiş olup, bu 3 dakikalık karıştırma süresinden sonra mikser tavaına süper akışkanlaştırıcı ilave edilerek 2 dk daha karıştırmaya devam edilmiştir. Uçucu kül, alkali solüsyon ve süper akışkanlaştırıcının 5 dakikalık karıştırma periyodu tamamlandıktan sonra mikser tavaına yavaş yavaş kum ilave edildi ve kum eklendikten sonra karışım 3 dakika daha karıştırıldı. Böylece geopolimer macuna kum ilave edildikten 3 dakika sonra karıştırma işlemi tamamlanmış oldu. Ayrıca, NaOH çözeltisinin hazırlandığı ilk andan, imalatın tamamlandığı son ana kadar olan üretim sürecini göstermek için Şekil 4'te bir akış zaman çizelgesi sunulmaktadır. Bu akış zaman çizelgesi, bu çalışmada uygulanan üretim sürecini kolayca anlamak ve uygulamak için takip edilebilir.



Şekil 4. Geopolimer harçlar için akış şeması

Üretim tamamlandıktan sonra, taze geopolimer harcı çelik kalıplara iki tabaka halinde dökülmüş ve vibrasyon tablası kullanılarak her tabakaya 30 saniyelik vibrasyon uygulanarak sıkıştırılmış geopolimer karışımları elde edilmiştir. Çalışma kapsamındaki deneyleri yapmak için numunelere ilk 24 saat 60 °C ısı kuru uygulanmış olup sonrasında ortam sıcaklığında kürlenme (23±2°C) yapılmıştır. Burada belirtmelidir ki geopolimer harçların uygulanabilirliği ile ilgili çözülmesi gereken en önemli unsurlardan biri geopolimerizasyonun ihtiyaç duyduğu yüksek sıcaklık kürlenmesi ve bunun uygulanma süresidir. Son zamanlarda yapılan çalışmaların da temel amacı daha düşük kürlenme sıcaklığı ve uygulama süresiyle hatta ısı kuru uygulanmadan geopolimer harç veya beton üretilmesidir. Bu hususta literatürdeki çalışmalar da göz önünde bulundurularak enerji verimliliği açısından kürlenme sıcaklığı olarak 60 °C ve süre olarak da 24 saat tercih edilmiştir. Ayrıca, ısı kuru işlemi esnasında numunelerin nem kaybını önlemek için numuneler plastik poşetlere sarılmıştır.

2.3. Metod

Geopolimer harçların birim ağırlık ve su emme kapasitesi değerleri sırasıyla ASTM C138 [32] ve ASTM C642 [33] takip edilerek ölçülmüştür. Burada geopolimer harçların su emme oranını hesaplamak için aşağıdaki ifade kullanılmıştır:

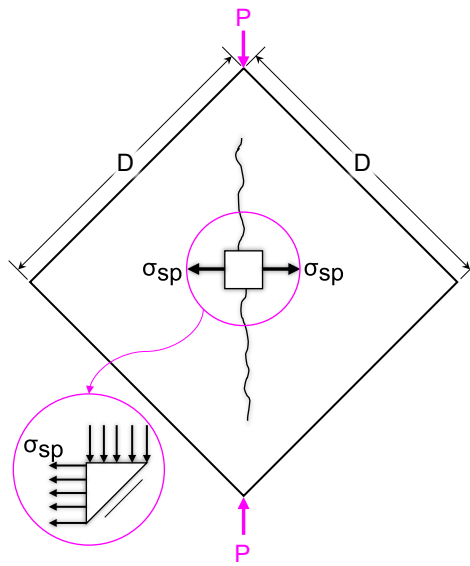
$$SE (\%) = \frac{W_{sd} - W_{ek}}{W_{ek}} \times 100 \quad (1)$$

burada SE , W_{sd} ve W_{ek} sırasıyla numunenin su emme oranı, kuru yüzey doymun durumdaki ağırlık ve etüv kuru ağırlıktır.

Elastik çalışma prensibine göre, silindirik bir numuneye uygulanan çizgisel yükleme, yüklenen çapın neredeyse üçte ikisi boyunca çok homojen olan bir çekme gerilimine neden olur. Numune sonunda, çekme gerilimi nedeniyle yüklü çap boyunca bölünerek kırılır ve çekme mukavemeti, kırılma durumundaki yük bilinerek belirlenebilir. Bu teoriye dayanarak, Gambhir [34] bu testin ya kare çubuklar kullanarak paralel yüzeylerine ya da zıt kenarlarına yük uygulanmasıyla kübik numuneler üzerinde de yapılabileceğini belirtmektedir. Bu bağlamda, geopolimer harçların yarmada çekme dayanımları, Şekil 5'te gösterildiği gibi kübik numunenin basınç hattı yükleri altında diyagonal olarak test edilmesiyle belirlenmiştir. Burada, geopolimer harçların yarmada çekme dayanımları aşağıdaki ifade kullanılarak belirlendi:

$$f_{st} = 0.5187 \frac{P}{D^2} \quad (2)$$

burada f_{st} , P ve D sırasıyla yarmada çekme dayanımı, kırılma yükü ve küpün kenar uzunluğudur.



Şekil 5. Yarmada çekme dayanımının belirlenmesinde kullanılan yükleme düzenlemesi

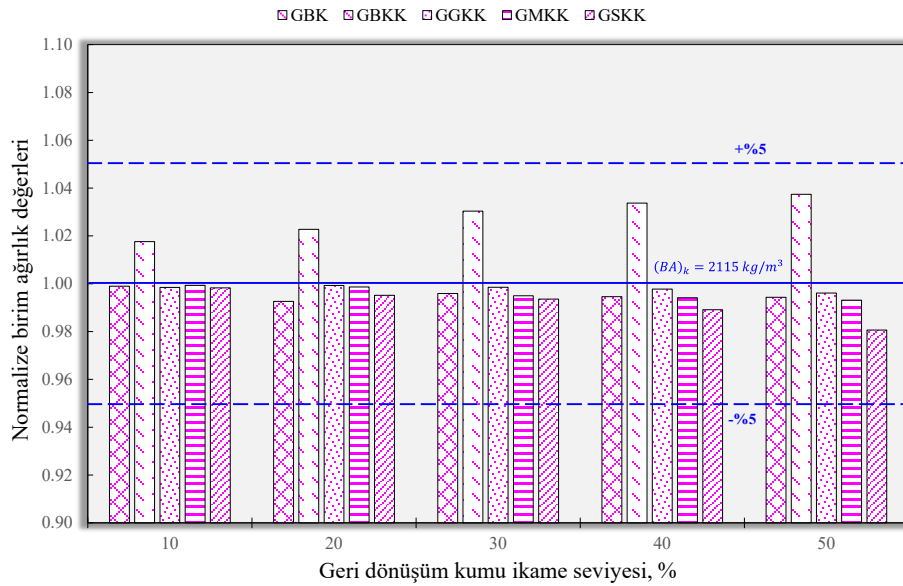
Geopolimer harçların termal iletkenlik katsayılarını belirlemek için sıcak disk yöntemini kullanarak ısı iletim katsayısını ölçen bir TPS 500 S Hot Disk Termal Sabitler Analizatörü cihazı kullanılmıştır. Cihazın ölçüm aralığı yaklaşık 0.03-100 W/m.K iken doğruluk ve tekrarlanabilirlik değerleri sırasıyla %5 ve %2'dir. Ayrıca, seçilen ölçüm süresine ve 50 Hz güç hattı frekansına bağlı olarak, her numune için güç hattı döngü sayısı 4'tür.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneyler her bir karışımdan üç numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sunulan sonuçlar ise bu üç numunenin ortalama değerleridir.

3. Bulgular ve tartışma

Çalışma kapsamında atık inşaat malzemelerinin geri dönüştürülmesinden elde edilen 5 farklı kum tipinin geopolimer harç üretiminde ince agrega yerine kullanımının harçların birim ağırlığı üzerindeki etkisi Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekilde de belirtildiği üzere kontrol karışımı, yani tamamen dere kumu (DK) ile üretilen geopolimer harç karışımı 2115 kg/m³'lük birim ağırlığa sahipti. Geri dönüşüm kumu içeren karışımların birim ağırlıkları ise, kontrol karışımının birim ağırlığı baz alınarak normalize edilerek grafikte ±%5 sınır çizgileri ile birlikte sunulmuştur. Bazalt karonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kum (GBKK) dışındaki bütün geri dönüşüm kumları geopolimer harcın birim ağırlığında bir

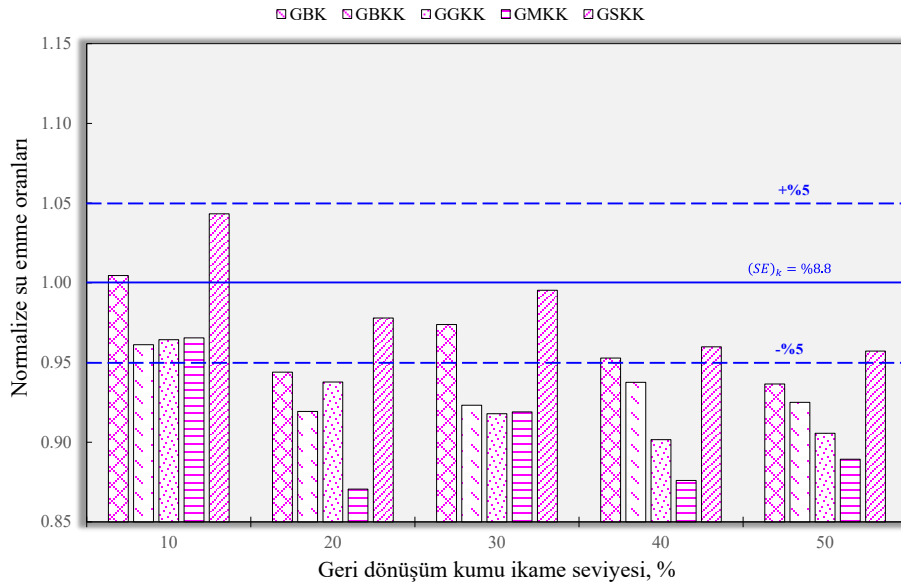
düşüşe neden olmuştur. DK'nin GBKK ile ikame edilmesi ve ikame seviyesinin artırılması ise harçların birim ağırlığında sistematik bir artışa neden olmuştur. Ancak şekilde gösterilen $\pm\%5$ sınır çizgileri göz önünde bulundurulduğunda anlaşılacağı üzere çalışma kapsamında üretilen bütün geopolimer harçların birim ağırlıkları kontrol karışımının birim ağırlığının $\%5$ 'inden fazla farklılık göstermemiştir. Özellikle granit ve mermer karonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumların (sırasıyla GGKK ve GMKK) ikame edilmesinde, birim ağırlıktaki bu değişim $\%50$ ikame seviyesinde bile $\%1$ 'den fazla değildir. Betondan ve seramik karodan geri dönüştürülen kumlar (sırasıyla GBK ve GSKK) ikame edildiğinde ise harçların birim ağırlığında sadece $\%2$ seviyelerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 2'de verilen kumların özgül ağırlıkları göz önünde bulundurulduğunda bu düşüşün müsebbibinin ne olduğu kolayca anlaşılacaktır. GBKK'nin geopolimer harç üretiminde kullanımı harçların birim ağırlığında bir artışa sebep olmuş olup bu artış $\%50$ ikame seviyesinde $\%4$ seviyelerinde kalmıştır. Yine bu durumun birincil sebebi kullanılan GBKK'nin özgül ağırlığının DK'ninkinden yüksek olmasıdır. Genel olarak ifade edilecek olursa çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçların birim ağırlıkları 2050 kg/m^3 ile 2200 kg/m^3 arasındaydı. Geopolimer harçlar için önerilen bir standardın bulunmuyor olması bu kapsamda üretilen harçların kabul edilebilir bir harç olup olamayacağı noktasında değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Ancak çimento esaslı harçlar için önerilen TS EN 206-1 [35] standard, çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçların birim ağırlıklarını değerlendirme noktasında kullanmamız yanlış olmayacaktır. Söz konusu standart göz önünde bulundurulduğunda çalışma kapsamında üretilen tüm geopolimer harç karışımlarının normal ağırlıklı harç (2000 kg/m^3 üzeri) olarak değerlendirilebileceği söylenebilir.



Şekil 6. Geri dönüşüm kumu ile üretilen geopolimer harçların birim ağırlıklarındaki değişim

Ger i dönüşüm kumu ikame edilen geopolimer harçların bu çalışma kapsamında incelenen bir diğer özelliği su emme oranlarıydı. Kontrol geopolimer harcının ölçülen ortalama su emme oranı $\%8.8$ olup geri dönüşüm kumlarının ikame edildiği geopolimer harçların su emme oranlarındaki kum tipine ve ikame seviyesine göre değişim Şekil 7'de sunulmuştur. Şekilde sunulan değerler kontrol karışımın su emme oranına göre normalize edilmiş değerler olup grafikte $\pm\%5$ 'lik sınır değerleriyle beraber verilmiştir. Sonuçlar geri dönüşüm kumlarının geopolimer harcın üretiminde kullanımının harcın su emme kapasitesini önemli ölçüde düşürdüğünü ortaya çıkarmıştır. Bazalt, granit ve mermer karoların geri dönüşümünden elde edilen kumların özellikle $\%10$ 'dan fazla ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harçların su emme oranlarında $\%5$ 'ten fazla düşüş gözlemlenmiştir. Beton ve seramik karonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumların ikame edilmesiyle de geopolimer harçların su emme oranında bir miktar azalma gözlemlenmiş olsa da bu azalma diğer kumlarda olduğu kadar belirgin ve yüksek değildir. Bu sonuçlara dayanarak geri dönüşüm kumları ile üretilen harçların özellikle yüzeyindeki

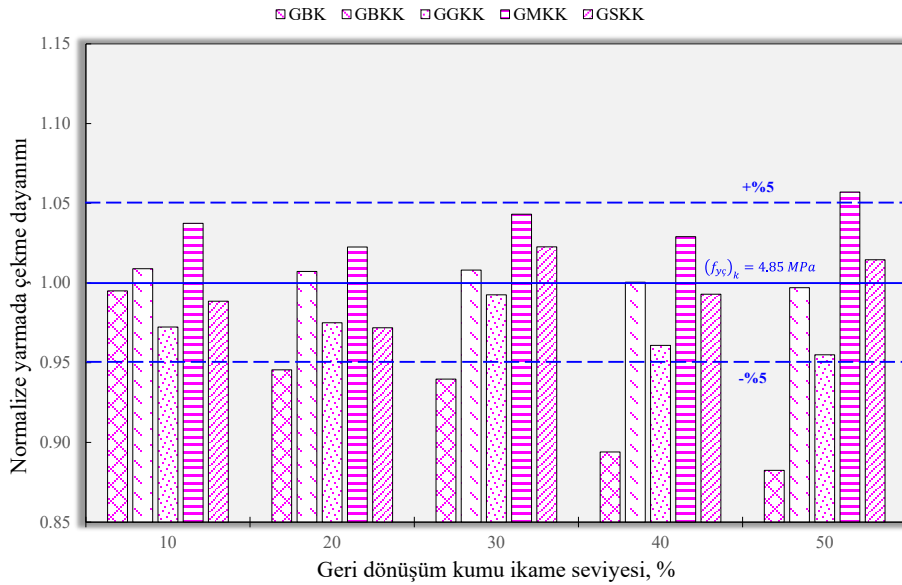
boşluk miktarının daha az olduğu ifade edilebilir. Bu tarz kompozit malzemelerin su emme özelliği bünyesindeki boşluk oranı ile orantılı bir şekilde değişmektedir. Malzeme bünyesindeki boşluğun da malzemenin dayanımı ile ilişkili olduğu göz önünde bulundurulursa daha düşük su emme kapasitesinin dolaylı olarak daha yüksek dayanım sağlayacağı sonucuna varılabilir. Bu iki özellik arasındaki ilişkiyi Çizelge 4’te verilen basınç dayanımı değerlerine bakarak da görebiliriz. Bazalt, granit ve mermer karoların geri dönüşümünden elde edilen kumlarla üretilen geopolimer harçların görece daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu betonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumlarla üretilen harçlarda ise basınç dayanımında dikkate değer bir değişimin olmadığı görülecektir.



Şekil 7. Geri dönüşüm kumu ile üretilen geopolimer harçların su emme oranlarındaki değişim

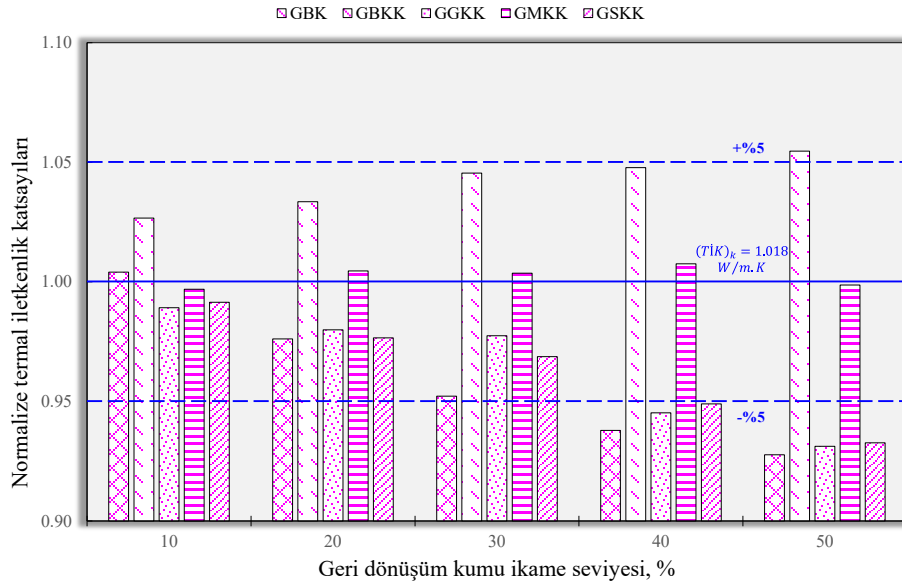
Bu çalışmanın en önemli noktalarından bir tanesi, çalışma kapsamında gerçekleştirilen yarmada çekme dayanımı testinin kum numune üzerinde diyagonal yükleme ile yapılmış olmasıdır. Teorik olarak açıklaması deney yöntemleri kısmında verilen bu yöntem kapsamında %100 DK ile üretilen kontrol geopolimer harcın yarmada çekme dayanımı 4.85 MPa olarak belirlenmiştir. Diğer geopolimer harçların kontrol karışımına göre normalize edilmiş yarmada çekme dayanımları Şekil 8’de sunulmuştur. Bu normalize yarmada çekme dayanımları incelendiğinde görüleceği üzere GBK’nin geopolimer harç üretiminde DK yerine ikame edilmesi ve ikame seviyesinin artırılması sistematik bir şekilde harcın yarmada çekme dayanımını azaltmaktadır. Özellikle %30 ikame seviyesinden sonra yarmada çekme dayanımındaki GBK kullanımından kaynaklı düşüş %10’dan fazla olmuştur. GBK’nin dahil edilmesi ve ikame seviyesinin artırılmasından kaynaklanan sistematik düşüşlerin arkasındaki neden, bu geri dönüştürülmüş kumların zayıf yapısı ile ilişkili olabilir. Örneğin, GBK partikülleri üzerinde çimento macunları ve buna bağlı olarak arayüzey geçiş bölgesi vardır, bu nedenle GBK partiküllerinin kırılması DK’dan daha kolay hale gelir. Dolayısıyla dolaylı da olsa çekme yükleri altında bu kum parçacıkları daha düşük direnç gösterecektir. GBK kadar tanımlı ve sistematik olmasa da GGKK’nin geopolimer harç üretiminde DK yerine ikame edilmesi de harçların yarmada çekme dayanımını düşürmüştür ancak bu düşüş %50 ikame seviyesinde bile %5’ten fazla değildir. Öte taraftan bazalt ve mermer karoların geri dönüştürülmesinden elde edilen kumların geopolimer harç üretiminde kullanılmasının genellikle yarmada çekme dayanımını arttırdığı sonucuna varılabilir. Ancak GSKK’nin geopolimer harç üretiminde DK yerine kullanılmasının yarmada çekme dayanımı üzerinde sürekli bir artırma veya azaltma etkisi göstermediği yine Şekil 8’de görülmektedir. GBK dışındaki geri dönüşüm kumlarının geopolimer harç üretiminde kullanımının yarmada çekme dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi saptanmamış olsa da bu etkilerin genel olarak kontrol geopolimer harcın yarmada çekme dayanımının $\pm\%5$ aralığında olmasından ötürü bu geri dönüşüm kumlarının DK yerine kullanılabileceği net bir şekilde ifade edilebilir. Aynı geopolimer harcından alınan numunelerin testleri sırasında da bu tür dalgalanmaların

sıklıkla görülebileceği unutulmamalıdır. Bundan ötürü, genel olarak, bu çalışmada inşaat malzemelerinden geri kazanılan kumların, geopolimer harcı üretiminde belirli seviyelerde ve kontrollü bir şekilde kullanılabilirliği söylenebilir. Ayrıca Çizelge 4’te verilen basınç dayanımı değerleri göz önünde bulundurulduğunda görüleceği gibi, bazalt, granit ve mermer karoların geri dönüştürülmesinden elde edilen kumun geopolimer harç üretiminde dere kumu ile ikame edilmesi ve ikame seviyesinin artırılması harç karışımlarının ortalama basınç dayanımlarını arttırmıştır. C25 sınıfı betonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumun harç üretiminde kullanımının belirgin ve sistematik bir etkisi gözlemlenmemiş olsa da her ikame seviyesinde elde edilen basınç dayanımlarının kontrol geopolimer harcın dayanımına çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak seramik karosunun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumun DK yerine ikame edilmesi ve ikame seviyesinin artırılması ortalama basınç dayanımında sistematik düşüşe neden olmuştur.



Şekil 8. Geri dönüşüm kumu ile üretilen geopolimer harçların yarmada çekme dayanımındaki değişim

Son olarak buradaki çalışma kapsamında üretilen geri dönüşüm kumu içeren geopolimer harçların termal iletkenlik özellikleri test edildi. TPS 500 S Hot Disk Termal Sabitler Analizatörü cihazı kullanılarak kontrol geopolimer harç için termal iletkenlik katsayısı 1.018 W/m.K olarak ölçülmüştür. Kontrol harç karışımının termal iletkenlik katsayısına göre normalize edilmiş geri dönüşüm kumu içeren geopolimer harçların termal iletkenlik katsayıları Şekil 9’da sunulmuştur. Bu grafikte verilen değerler göz önünde bulundurulduğunda GBK, GGKK ve GSKK kullanılarak üretilen geopolimer harçların termal iletkenlik katsayılarının ikameye seviyesine bağlı bir şekilde azaldığı özellikle %30 seviyesinden sonra termal iletkenlik katsayısında %5’ten fazla bir düşüş olduğu görülecektir. Öte taraftan GMKK içeren geopolimer harç karışımlarının bütün ikame seviyelerindeki termal iletkenlik katsayılarının kontrol karışımıyla neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Tüm geri dönüşüm kumları arasında, termal iletkenliğin artışına sebep olan tek geri dönüşüm kumu GBKK’dır. Bu kumun geopolimer harç üretiminde DK yerine kullanılması termal iletkenlik katsayısını %50 ikame seviyesinde %5’in üzerinde arttırdığı gözlemlenmiştir. Bir malzemenin termal iletkenlik performansı malzemenin boşluk oranı ve dolayısıyla da birim ağırlığıyla ilgili olduğu için geopolimer harçlar gibi kompozit bir yapıya sahip olan malzemelerde, termal iletkenlik performansı kompozit malzemenin bünyesinde yer alan tüm bileşenlerin boşluk oranı ve birim ağırlığıyla ilişkilidir. Sonuçlar bu perspektiften değerlendirilince bazalt karosundan elde edilen kumun sahip olduğu yüksek özgül ağırlık değeri bu kum kullanılarak üretilen harçların da yüksek birim ağırlıkta olmasına neden olmuştur ve dolayısıyla da burada GBKK içeren harçların daha az boşluklu yapısı daha yüksek termal iletkenlik katsayısı ile sonuçlanmıştır. Bu kapsamda diğer geri dönüşüm kumları kullanılarak üretilen geopolimer harçların da termal iletkenlik performansı değerlendirilebilir.



Şekil 9. Geri dönüşüm kumu ile üretilen geopolimer harçların termal iletkenlik katsayılarındaki değişim

4. Sonuçlar

Yukarıda elde edilen bulgulara neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır:

- Yapısal beton, bazalt karo, seramik karo, granit karo ve mermer karo gibi yapı malzemeleri geri dönüştürülerek kum elde edilmiştir.
- Tüm geri dönüştürülmüş kumlar nehir kumu ile benzer bir gradasyon eğrisine sahipken, diğer fiziksel özellikleri ve partikül şekillerinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Ancak tüm bu farklılıklara rağmen, çalışma kapsamında üretilen geri dönüşüm kumları geopolimer harç imalatında dere kumu yerine kullanılabilen sonuçuna ulaşılmıştır.
- Dere kumunun geri dönüşüm kumları ile ikame edilmesinin geopolimer harçların birim ağırlıklarının pek etkilemediği, sadece bazalt karosundan geri dönüştürülmesinden elde edilen kumun harçların birim ağırlığını artırdığı bu artışın da %5'ten fazla olmadığı görülmüştür.
- Geri dönüşüm kumları ile üretilen geopolimer harçların su emme oranlarının kontrol geopolimer harcından düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- Betonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumun, geopolimer harç üretiminde kullanımı harçların yarmada çekme dayanımını azaltmışken mermer karonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kum ise genel olarak harçların yarmada çekme dayanımını artırmıştır. Diğer geri dönüşüm kum tiplerinin belirgin ve sistematik bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.
- Beton, granit karo ve seramik karonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumlar geopolimer harçların termal iletkenlik katsayılarının azalmasına neden olmuşken bazalt karonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumun geopolimer harçların üretiminde kullanılmasıyla harçların iletkenlik katsayısında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca mermer karonun geri dönüştürülmesinden elde edilen kumun, geopolimer harçların termal iletkenliğine pek bir etkisi olmamıştır.

Kaynaklar

- [1] Brown G. A global sand shortage could cause damaging effects to our rapidly urbanizing world. Business Insider. <https://www.businessinsider.com/global-sand-shortage-could-cause-damaging-effects-2018-12> (Erişim Tarihi: 10.02.2022)
- [2] Gagg CR. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis* 2014;40:114-140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- [3] Mermerdaş K, İpek S, Mahmood Z. Visual inspection and mechanical testing of fly ash-based fibrous geopolymer composites under freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials* 2021;283:122756. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122756>
- [4] Ayodele OA, İpek S, Mermerdaş K. Effect of aggregate type on the permeability of concretes having the same compressive strength. *Proceeding Book: 14th International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey; 2021.*
- [5] Peng JX, Huang L, Zhao YB, Chen P, Zeng LU, Zheng W. Modeling of carbon dioxide measurement on cement plants. *Advanced Materials Research* 2012;610-613:2120-2128, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.2120>
- [6] Cement, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/cement> (Erişim Tarihi 11.02.2022)
- [7] Lämmlein TD, Messina F, Wyrzykowski M, Terrasi GP, Lura P. Low clinker high performance concretes and their potential in CFRP-prestressed structural elements. *Cement and Concrete Composites* 2019;100:130-138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.014>
- [8] Xie, N., Dang, Y., Shi, X. (2019) New insights into how MgCl₂ deteriorates Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 120, 244–255, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.026>
- [9] Elchalakani M, Aly T, Abu-Aisheh E. Sustainable concrete with high volume GGBFS to build Masdar City in the UAE. *Case Studies in Construction Materials* 2014;1:10-24. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2013.11.001>
- [10] Gao T, Shen L, Shen M, Liu L, Chen F. Analysis of material flow and consumption in cement production process. *Journal of Cleaner Production* 2016;112(1):553-565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.054>
- [11] Hilburg J. Concrete production produces eight percent of the world's carbon dioxide emissions. *The Architects' Newspaper*. <https://www.archpaper.com/2019/01/concrete-production-eight-percent-co2-emissions> (accessed on 20.02.2022)
- [12] Davidovits J. Properties of geopolymer cements. in *Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine; 1994.* https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/KIEV.pdf
- [13] Chowdhury S, Mohapatra S, Gaur A, Dwivedi G, Soni A. Study of various properties of geopolymer concrete - a review. *Materials Today: Proceedings* 2021;46(11):5687-5695. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.835>
- [14] Turner LK, Collins, FG. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials* 2013;43:125-130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- [15] Rovnaník P, Šafránková K. Thermal behaviour of metakaolin/fly ash geopolymers with chamotte aggregate. *Materials* 2016;9(7):535. <https://doi.org/10.3390/ma9070535>
- [16] Mermerdaş K, Manguri S, Nassani DE, Olewi SM. Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2017;20(6):1642-1652. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.11.009>
- [17] Mohseni E, Kazemi MJ, Koushkbaghi M, Zehtab B, Behforouz B. Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nanoalumina. *Construction and Building Materials* 2019;209:532-540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.067>

- [18] Ekmen Ş, Mermerdaş K, Algin Z. Effect of oxide composition and ingredient proportions on the rheological and mechanical properties of geopolymer mortar incorporating pumice aggregate. *Journal of Building Engineering* 2021;34:101893. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101893>
- [19] Li H, Gao P, Xu F, Sun T, Zhou Y, Zhu J, Peng C, Lin J. Effect of fine aggregate particle characteristics on mechanical properties of fly ash-based geopolymer mortar. *Minerals* 2021;11(8):897. <https://doi.org/10.3390/min11080897>
- [20] Wongsa A, Sata V, Nematollahi B, Sanjayan J, Chindapasirt P. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal of Cleaner Production* 2018;195:1069-1080. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.003>
- [21] Poggetto GD, D'Angelo A, Blanco I, Piccolella S, Leonelli C, Catauro M. FT-IR study, thermal analysis, and evaluation of the antibacterial activity of a MK-geopolymer mortar using glass waste as fine aggregate. *Polymers* 2021;13(17):2970. <https://doi.org/10.3390/polym13172970>
- [22] Priyadharshini P, Ramamurthy K, Robinson RG. Excavated soil waste as fine aggregate in fly ash based geopolymer mortar. *Applied Clay Science* 2017;146:81-91. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.038>
- [23] Zhu P, Hua M, Liu H, Wang X, Chen C. Interfacial evaluation of geopolymer mortar prepared with recycled geopolymer fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 2020;259:119849. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119849>
- [24] Mermerdaş K, İpek S, Sor NH, Mulapeer ES, Ekmen Ş. The impact of artificial lightweight aggregate on the engineering features of geopolymer mortar. *Turkish Journal of Nature and Science* 2020;9(1):79-90. <https://doi.org/10.46810/tdfd.718895>
- [25] Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. American Society for Testing and Materials ASTM C311/C311M-18; 2018. https://doi.org/10.1520/C0311_C0311M-18
- [26] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials ASTM C618-19; 2019. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- [27] Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American Society for Testing and Materials ASTM C136/C136M-19; 2019. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- [28] Standard Specification for Concrete Aggregates. American Society for Testing and Materials ASTM C33; 2018. https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18
- [29] Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International ASTM C127-15; 2015. <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- [30] İpek S. Macro and micro characteristics of eco-friendly fly ash-based geopolymer composites made of different types of recycled sand. *Journal of Building Engineering*, 2022;52:104431. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104431>
- [31] Hou Y, Wang D, Zhou W, Lu H, Wang L. Effect of activator and curing mode on fly ash-based geopolymers. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition* 2009;24(5):711-715. <https://doi.org/10.1007/s11595-009-5711-3>
- [32] Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. American Society for Testing and Materials ASTM C138/C138M-17a; 2017. https://doi.org/10.1520/C0138_C0138M-17A
- [33] Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. American Society for Testing and Materials ASTM C642-13; 2013. <https://doi.org/10.1520/C0642-13>
- [34] Gambhir ML. *Concrete Technology*. 5th ed. New Delhi: McGraw-Hill Education; 2013.
- [35] TS-EN 206+A1. *Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk*. Turkish Standard Institute, Turkey; 2017.