

Atf İçin: Eryılmaz, K., Polat, R., Turhan, D. ve Karagöl, F. (2023). Geopolimer Beton Atıklarından Elde Edilen Agregaların Geopolimer Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 419-431.

To Cite: Eryılmaz, K., Polat, R., Turhan, D. & Karagöl, F. (2023). Investigation of Usability of Aggregates Obtained from Geopolymer Concrete Wastes in Geopolymer Concrete. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 419-431.

Geopolimer Beton Atıklarından Elde Edilen Agregaların Geopolimer Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Kadriye ERYILMAZ¹, Rıza POLAT¹, Fatma KARAGÖL¹, Derya TURHAN¹

Öne Çıkanlar:

- Sürdürülebilir
- Özgün
- Yenilikçi

Anahtar Kelimeler:

- Sürdürülebilirlik
- Geopolimer beton
- Geri dönüştürülmüş geopolimer agrega
- Beton ve yıkım atığı
- Sürdürülebilir yapı malzemeleri

ÖZET:

Çevresel bozulmalar, artan sera gazları, hammaddelerin bilinçsizce ve hızla tüketilmesi gibi sorunlar toplumları sürdürülebilir yeşil bina ve inşaat malzemeleri üretmeye zorlamaktadır. Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonominin çevresel ve finansal faydaları büyük ölçüde atıkların yeniden kullanılması, geri dönüştürülmesi veya bertaraf edilmesine bağlıdır. Bu bağlamda geopolimer beton üstün mekanik ve durabilite özellikleri ve birçok atığı öncül olarak kullanma yetenekleri nedeniyle çevre dostu bir malzeme olarak son yıllarda ilgi görmüştür. Düşük karbon ayak izine sahip olması ve uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerin ve volkanik esaslı küllerin kullanılması, geopolimer betonun (GPC) geleneksel betona sürdürülebilir bir alternatif olmasını sağlar. Katı atık tesislerinde artan inşaat yıkım atıkları ve doğal kaynakların aşırı kullanımı ekolojik denge için endişe verici seviyeye ulaşmıştır. Bu nedenle beton atıkların geri dönüşümü; katı atık problemlerini çözmenin, ekolojik dengeyi sağlamanın ve doğal hammaddeleri korumanın en etkili yöntemlerinden biridir. Fakat literatürde; geleneksel beton için geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi yaşam sonu stratejileri geniş çapta araştırılmış olsa da bu tür stratejilerin geopolimer beton için uygulanabilirliği yeterli düzeyde araştırılmamıştır. Bu makale, geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların fiziksel özelliklerini ve geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen geopolimer betonun mekanik özelliklerini inceleyen araştırmaları sunmaktadır. Literatür araştırmaları sonucunda; aynı tane boyutundaki doğal agregalara göre geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların su emme oranının yüksek, tane yoğunluğunun düşük, Los Angeles aşınma direncinin düşük, pH değerinin yüksek, potansiyel ASR reaktivitesinin düşük olduğu gözlemlenirken, geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen geopolimer betonun mekanik özelliklerinin geleneksel betonun mekanik özelliklerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Investigation of Usability of Aggregates Obtained from Geopolymer Concrete Wastes in Geopolymer Concrete

Highlights:

- Sustainable
- Genuine
- Innovative

Keywords:

- Sustainability
- Geopolymer concrete
- Recycled geopolymer aggregate
- Concrete and demolition waste
- Sustainable building materials

ABSTRACT:

Problems such as environmental disturbances, increasing greenhouse gases, unconscious and rapid consumption of raw materials force societies to produce sustainable green buildings and construction materials. The environmental and financial benefits of sustainable development and the circular economy largely depend on the disposal of waste or the ability to transform waste into new products. In this context, geopolymer concrete has attracted attention in recent years as an environmentally friendly material due to its superior mechanical and durability properties and ability to use many wastes as a precursor. Having a low carbon footprint and the use of industrial by-products such as fly ash, ground granulated blast furnace slag, and volcanic-based ash make geopolymer concrete (GPC) a sustainable alternative to conventional concrete. Increasing construction demolition wastes and excessive use of natural resources in solid waste facilities have reached an alarming level for the ecological balance. Therefore, recycling of concrete waste; it is one of the most effective methods of solving solid waste problems, maintaining ecological balance, and protecting natural raw materials. But in the literature; although end-of-life strategies such as recycling and reuse for conventional concrete have been widely investigated, the applicability of such strategies for geopolymer concrete has not been adequately investigated. This article presents research examining the physical properties of recycled geopolymer aggregates and the mechanical properties of geopolymer concrete produced with recycled aggregates. As a result of literature research; compared to natural aggregates of the same grain size, it was observed that the water absorption rate of the recycled geopolymer aggregates was high, the grain density was low, the Los Angeles abrasion resistance was low, the pH value was high, and the potential ASR reactivity was low while it was observed that the mechanical properties of geopolymer concrete produced with recycled aggregates were higher than the mechanical properties of conventional concrete.

¹ Kadriye ERYILMAZ (Orcid ID:0000-0001-8789-7137), Rıza POLAT (Orcid ID: 0000-0002-8990-035X), Derya TURHAN (Orcid ID: 0000-0002-2368-7365), Fatma KARAGÖL (Orcid ID: 0000-0003-1760-1972) Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

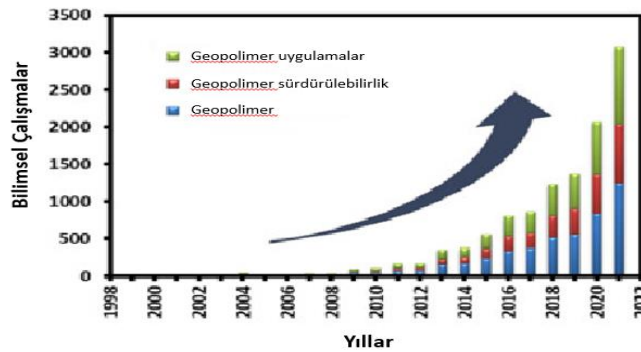
*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Kadriye ERYILMAZ, e-mail: kadriyer6991@gmail.com

GİRİŞ

Dayanım ve dayanıklılığı nedeniyle beton inşaat sektöründe en çok tercih edilen yapı malzemelerinden biri olurken yaşam kaynağı olan sudan sonra en çok tüketilen yapı malzemesidir. Çimento, agrega ve suyun optimum seviyede karıştırılmasıyla üretilen betonun avantajlarının yanı sıra özellikle çimento gibi ana bileşenlerinin üretimi esnasında büyük miktarda enerji harcanması ve küresel ısınmaya ve çevre kirliliğine sebep olan CO₂ ve sera gazı salınımına yol açması gibi dezavantajlara sahiptir (Das ve ark., 2021). Bir ton çimento üretimi sonucunda atmosfere yaklaşık bir ton CO₂ gazı salınımı gerçekleşmektedir, bu da çimento endüstrisini küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu hale getirmektedir (Neupane ve ark., 2022). Ayrıca çimento endüstrisi su ve havanın kirlenmesine neden olurken, çimento üretimi için büyük miktarda doğal hammadde gereksinimi, doğal kaynakların rezervlerinin aşırı kullanımına, çevre estetiğinin bozulmasına ve ekosistemlerin değişmesine neden olmaktadır (Almutairi ve ark., 2021). Dünyada her yıl 30 milyar ton beton kullanıldığı ve kişi başına düşen beton kullanımının son 40 yılda üç kat arttığı değerlendirildiğinde bu durum endişe vericidir (York ve Europe 2021). Tüm bu sorunlara çözüm getirmek amacıyla, inşaat uygulamalarında çimento yerine sürdürülebilir alternatif malzemeler araştırılmıştır.

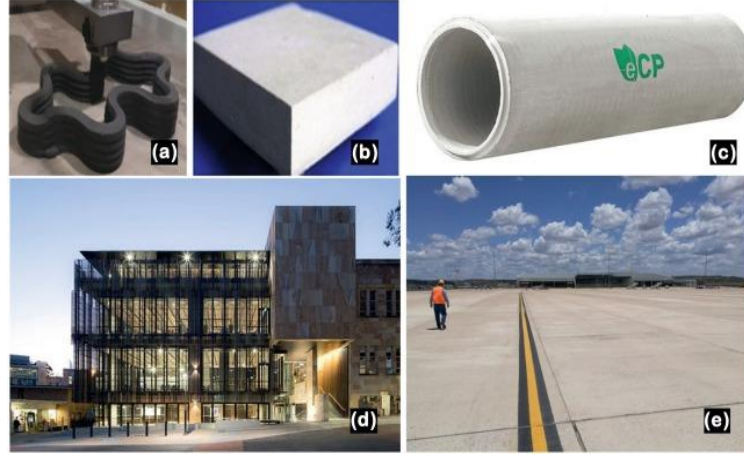
Bu amaçlar doğrultusunda Fransız bilim insanı Joseph Davidovits, geopolimer olarak adlandırılan yeni bir nesil betonu geliştirmiştir. “Geo”, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silika dumanı, pirinç kabuğu külü, perlit, volkanik kökenli kül gibi silika ve alümina bakımından zengin jeolojik veya endüstriyel yan ürünleri ifade ederken, "polimer" kavramı, aynı birimden üretilen bir molekül zinciri ifade eder (Younis ve ark., 2020). Joseph Davidovits geopolimer kavramını; alimünosilikatça zengin hammaddelerin uygun kür koşulları altında NaOH veya KOH gibi güçlü alkali çözeltiler ve Na₂SiO₃ gibi çözünen silikatlar ile reaksiyona girmesi sonucu SiO₄ ve AlO₄ bileşiklerinden oluşan “poli-sialat” (Si-O-Al-O) üç boyutlu polimerik zincir yapısına sahip sürdürülebilir malzeme olarak tanımlamıştır (Davidovits 1991; Torgal ve ark., 2008). Geopolimer betonda alümina ve silika bakımından zengin endüstriyel atık malzemelerin Portland çimentosuna tamamen ikame olarak kullanılması, büyük hacimli atıkların bertaraf edilmesine katkıda bulunmasının yanında çimento endüstrisi kaynaklı sera gazı ve CO₂ emisyonlarını %80'e kadar azaltmaktadır (Hassan ve ark., 2019; Almutairi ve ark., 2021).

Genel olarak, 2001'den önce geopolimer beton ile ilgili araştırmalar minimum düzeyde iken 2001 yılından sonra araştırmalar ivme kazanarak devam etmiştir, 2016 yılından bu yana ise geopolimer betonun performansını değerlendiren kapsamlı çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. Buna rağmen geopolimer beton, bir inşaat malzemesi olarak küresel bir değer kazanmamıştır (Ma ve ark., 2018). Şekil 1’de, geopolimer beton ile ilgili 2000’den 2021’e kadar ScienceDirect veri tabanında yayınlanan makalelerin sayısının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 1. Son dönemde “geopolimer beton”, “geopolimer beton sürdürülebilirliği” ve “geopolimer beton uygulamaları” kelimelerini içeren geopolimer kavramı esaslı makale sayısı (Shehata ve ark., 2022)

Geopolimer betonlar, üstün özellikleri sayesinde, inşaat malzemeleri (çimento ve beton), havacılık ve plastik endüstrilerinin yanı sıra kimyasal ve nükleer endüstrilerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ayrıca geopolimer betonlar, 3D baskı malzemeleri, biyolojik malzemeler, refrakter malzemeler, kaplama malzemeleri, düşük enerjili karolar, fiber takviyeli kompozitler, onarım malzemeleri, iç ve dış dekorasyon ve diğer gelişmekte olan geopolimer malzemeler gibi birçok alanda büyük potansiyele sahiptir (Şekil 2) (Shehata ve ark., 2022).



Şekil 2. (a) 3D baskılı geopolimer ürün, (b) Geopolimer köpük, (c) Geopolimer kanalizasyon boruları (RCPA), (d) Queensland Üniversitesi'nin geopolimer esaslı Küresel Değişim Enstitü Binası, (e) Toowoomba Wellcamp Havaalanı'nı inşasında kullanılan geopolimer beton esaslı uygulamalar (Shehata ve ark., 2022)

Günümüzde geopolimer beton; endüstriyel ve tarımsal atık malzemelerinin hammadde olarak kullanılmasına ve atık bertarafına fırsat vermesi nedeni ile hızlı bir ilerleme kaydetmektedir (Rahman ve Al-Ameri 2021).

Son zamanlarda özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde büyüyen kentleşmenin bir sonucu olarak ulaşım, konut, sağlık ve eğitim gibi altyapı ihtiyaçları ortaya çıkmıştır ve bu ihtiyaçları karşılamak için beton tüketimi doğru orantılı bir şekilde artmıştır. Artan beton talebini karşılayabilmek için doğal kaynaklar aşırı derecede tüketilmiştir ve sonucunda doğal denge geri döndürülemez şekilde bozulmuştur. Tahribat ile birlikte birçok ülke ve bölgede doğal agrega kıtlığı ortaya çıkmıştır (Agrawal ve ark., 2019). Bu doğrultuda ilerleyen yıllarda dünyada gittikçe artan doğal agrega ihtiyacının temininde sıkıntılar yaşanacağı öngörülmektedir. Diğer yandan mevcut yapıların amaçlanan kullanım süresini doldurması, gereken dayanım ve dayanıklılık özelliklerini sağlayamaması veya kullanım amacına hizmet edememesi durumunda kontrollü olarak ortadan kaldırılması veya doğal afetlere maruz kalarak yıkılması sonucunda büyük miktarlarda inşaat ve yıkıntı atığı ortaya çıkmaktadır (Göksu ve ark., 2018). Yalnızca Amerika Birleşik Devletleri, her yıl yaklaşık 140 milyon ton, Çin her yıl yaklaşık 200 milyon ton, Avrupa ise her yıl yaklaşık 970 milyon ton beton ve yıkım atığı üretmektedir ve toplam katı atığın büyük çoğunluğunu inşaat atıkları oluşturmaktadır. Yıkım sonucu ortaya çıkan atık betonlar atıldıkları yerlerde çevre kirliliğine ve zamanla çöp sahası kıtlığına neden olmaktadır. Bu nedenle beton geri dönüşümü, dünya çapında üretilen muazzam miktardaki beton artıklarıyla başa çıkmak için en eski ve en etkili atık yönetimi stratejilerinden biridir (Akbarnezhad ve ark., 2015). Geri dönüştürülmüş agregaların betonda kullanılarak değerlendirilmesi çöplüklere giden atıkların miktarını düşürürken; yeni beton üretimi için alternatif bir agrega kaynağı sağlayarak doğal kaynaklarının tüketimini azaltır ve böylelikle ekolojik dengenin korunmasına katkıda bulunur (Akbarnezhad ve ark., 2013).

Geopolimerin Portland çimentolu betonun yerini alacak şekilde benimsenmesinin, gelecekte geopolimer atık miktarında orantılı bir artışa yol açması beklenmektedir. Bunun sonucu olarak gelecek yıllarda geopolimer betonun geri dönüştürülerek yeniden kullanılması kaçınılmaz bir durumdur. Geopolimer atıkların geri dönüştürülmesi ve bunların alüminosilikat kaynağı veya agrega olarak kullanılması, ekonomik ve ekolojik faydasının yanı sıra, küresel sürdürülebilir kalkınma ve yeşil malzeme üretimi için de fayda sağlayacaktır. Gelecek nesillere temiz bir gezegen bırakmak için geopolimer beton atıkları da “beşikten beşiğe” konseptine uygun olarak farklı geopolimer formülasyonlarına dâhil edilebilir (Gharzouni ve ark., 2016). Mevcut literatür, geopolimer betonun geri dönüşümünden ziyade geopolimer betonda geri dönüştürülmüş (normal Portland çimento esaslı) malzemelerin kullanımına ilişkin araştırmalar sunmaktadır. Geopolimer betonlardan geri dönüştürülmüş agreganın geopolimer betonda yeniden kullanılması hakkında literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yakın gelecekte geri dönüştürülmüş agregalar gibi geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar da büyük bir pazar oluşturacaktır ve dolayısıyla uygulamada geri dönüşümün benimsenmesine ihtiyaç vardır.

Bu makale çalışması, geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların su emme, tane yoğunluğu, alkali agrega reaksiyonu, Los Angeles aşınma kaybı, tane boyutu analizi, pH değeri ve durabilite özelliklerini ve geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Geri Dönüştürülmüş Geopolimer Agregaların Özellikleri

Su emme ve özgül ağırlık

Hedeflenen işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini sağlayabilen beton üretimi için agregaların su emme miktarı ve özgül ağırlığının bilinmesi önem arz etmektedir. Geri dönüştürülmüş agregalar doğal agregalara göre bünyesinde daha fazla boşluklu yapıya sahiptir. Agreganın bünyesindeki boşluklu yapı arttıkça betonun karışım suyu ihtiyacı artar. Artan karışım suyu miktarı betonda kılcal boşluklara sebep olur ve bunun sonucunda betonun dayanım ve dayanıklılığı azalır (Gökçe ve Can., 2019). Aşağıda Çizelge 1’de TS 1097-6’ya göre normal agregaların tane boyutuna göre kabul edilebilir maksimum su emme yüzdeleri ve Çizelge 2’de ise TS 706 EN 12620 +A1’e göre bazalt ve kalker kökenli agregaların su emme yüzdeleri ve tane yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 1. TS EN 1097-6’ya göre normal agregaların maksimum su emme yüzdeleri

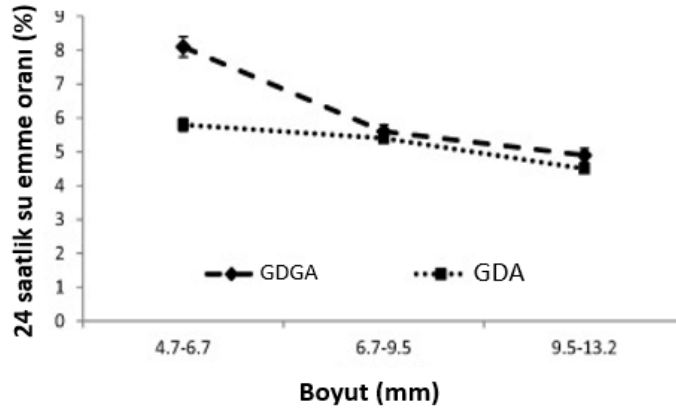
Parçacık Boyutu (mm)	Su Emme Kapasitesi (%)
31.5-63	% 1.5’ten az olmalı
4-31.5	% 1.5’ten az olmalı
0.063-4	% 1.5’ten az olmalı

Çizelge 2. TS 706 EN 12620+A1 göre; bazalt ve kalker agregalarının doygun yüzey kuru esastaki tane yoğunlukları ve su emme yüzdeleri

Agrega Tipi	Tane Yoğunluğu (g/cm ³)	Su emme (%)
Bazalt	2.79	0.75
Kalker	2.60	1.2

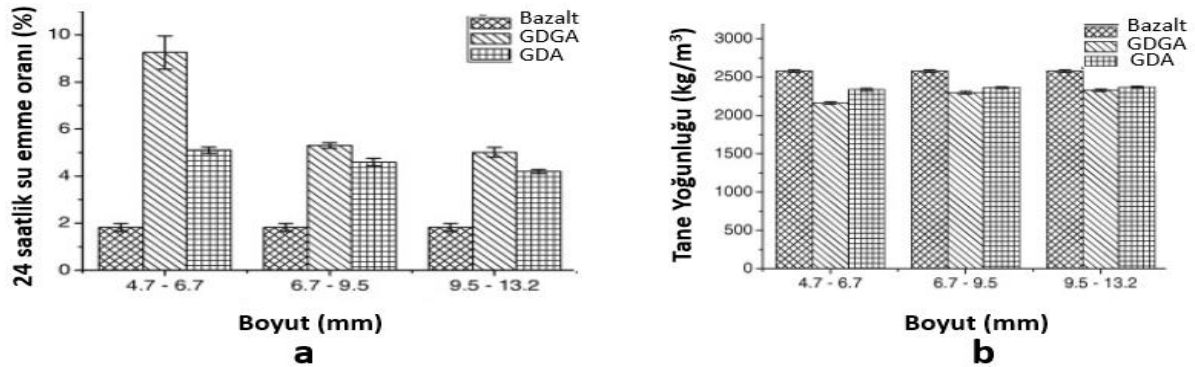
Agrawal ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktive edilen, uçucu kül esaslı geopolimer betondan elde ettikleri geri dönüştürülmüş geopolimer uçucu kül kumunun (ince uçucu kül GDGA) özgül ağırlığını ve su emme oranını sırası ile 2.46 ve %5.61 olarak tespit etmiştir. Buna karşı doğal nehir kumunun özgül ağırlığını ve su emme oranını ise sırası ile 2.67 ve %2.46 olarak tespit etmiştir. Mesgari ve ark. (2020), NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktive edilen, uçucu kül,

metakaolin ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonlardan elde ettikleri geri dönüştürülmüş geopolimer iri agregaları (iri GDGA) tane boyutlarına göre ayırarak su emme oranını ve kuru özgül ağırlığını incelemiştir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, su emme oranı ve özgül ağırlığı, agregaların tane boyutuna göre önemli ölçüde değişmiştir. Tane boyutundaki artışla birlikte 24 saatlik su emme oranlarında önemli bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. GDGA'ların kuru özgül ağırlığı ise tane boyutuna bağlı olarak doğal agregadan daha düşük bulunmuştur.



Şekil 3. Farklı tane boyutlardaki GDGA'ların ve geri dönüştürülmüş agregaların (GDA) 24 saatlik su emme oranı (%) (Mesgari ve ark., 2020)

Akbernezhad ve ark. (2015), NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktive edilen, uçucu kül, kaolin ve yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betondan elde ettikleri iri GDGA'ları tane boyutlarına göre ayırarak su emme oranını ve kuru özgül ağırlığını incelemiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi GDGA'ların su emme oranı aynı tane boyutundaki doğal bazalt agregasının su emme oranından daha yüksek iken etüv kuru özgül ağırlığı ise doğal agregadan daha düşüktür.



Şekil 4. a) GDGA, GDA ve bazalt agregasının 24 saatlik su emme oranı (%) ve b) Etüv kuru özgül ağırlığı değerleri (Akbernezhad ve ark., 2015)

Zhu ve ark. (2020), NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktive edilen, metakaolin esaslı geopolimer betondan elde ettikleri ince GDGA'ların su emme oranını ve özgül ağırlığını incelemiştir. İnce GDGA'ların ve nehir kumunun özgül ağırlığı sırası ile 1.85 ve 2.61 g/cm³, su emme oranları ise %15.04 ve %1.07 olarak tespit edilmiştir. Ramos ve ark. (2020), geopolimer beton atık parçacıkları ile birleştirilmiş, soldurulmuş düz veya oleik asit ile yüzey modifiye edilmiş geri dönüştürülmüş polipropilen matrisli çevre dostu kompozitleri incelemiştir. Yüzeyi modifiye edilmiş geopolimer atık parçacıklarının su emme oranının %1'den düşük olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen literatür çalışmalarına göre; geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların su emme oranları aynı tane boyutundaki doğal agrega ile karşılaştırıldığında daha yüksek ve tane yoğunlukları daha düşüktür. Şekil 4'te görüldüğü gibi geri

dönüştürülmüş geopolimer agregaların su emme oranları geleneksel betondan geri dönüştürülmüş agregaların su emme oranından da daha yüksektir. Su emme oranındaki artış ve tane yoğunluğundaki düşüş geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların boşluklu yapısından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte yüzey modifiye işlemi ile geri dönüştürülmüş agregaların su emme kapasitesi önemli ölçüde azaltılabilir (Ramos ve ark., 2020).

Los Angeles aşınma kaybı

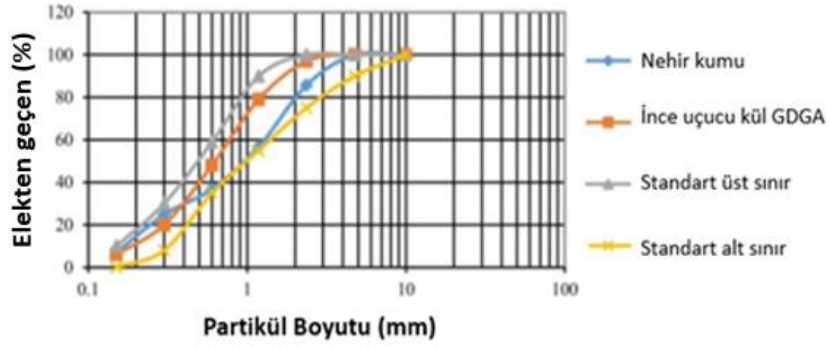
Agregalar kullanıldıkları alana göre farklı yüklerle maruz kalarak farklı şekillerde aşınabilir ve parçalanabilir. Agregaların yüzeyindeki veya bünyesindeki aşınma deformasyonun belirli bir oranda kalması, inşa edilen yapı güvenliği için gereklidir. Agregaların darbe dayanımı, standart boyutlardaki kayaçların belirli bir doğrultuda darbelere karşı gösterdiği dirençtir. Agregaların darbe ve aşınma gibi etkilere karşı dayanıklılığının belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerinden biri de Los Angeles aşınma deneyidir. Akbernezhad ve ark. (2015), GDGA ve doğal bazalt agregalarının (DA) Los Angeles aşınma kaybını incelemiştir. Sırası ile GDGA ve DA'ların aşınma kaybı oranı %47 ve %16 olarak tespit edilmiştir. GDGA'ların Los Angeles aşınma kaybı DA'lara oranla oldukça fazladır. Mesgari ve ark. (2020), GDGA'ların ve doğal bazalt agregalarının Los Angeles aşınma kaybını sırası ile %42±2 ve %16 olarak tespit etmişlerdir. İncelenen literatür çalışmalarına göre; geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların Los Angeles aşınma direnci aynı tane boyutundaki doğal agreganın aşınma direncinden daha düşüktür. Agregaların aşınma kaybı dirençleri; tane yoğunlukları ve boşluk oranları gibi özelliklere bağlıdır (Tunç ve Alyamaç, 2020). GDGA'ların boşluk oranları doğal agrega ile karşılaştırıldığında daha yüksekken tane yoğunluğu daha düşüktür ve buna bağlı olarak aşınma dirençleri de doğal agregalara göre daha düşüktür. Bu da GDGA'ları aşınmaya maruz kalan yapısal uygulamalarda (yol ve yüzey betonları gibi) dezavantajlı hale getirebilir.

Alkali silika reaksiyonu

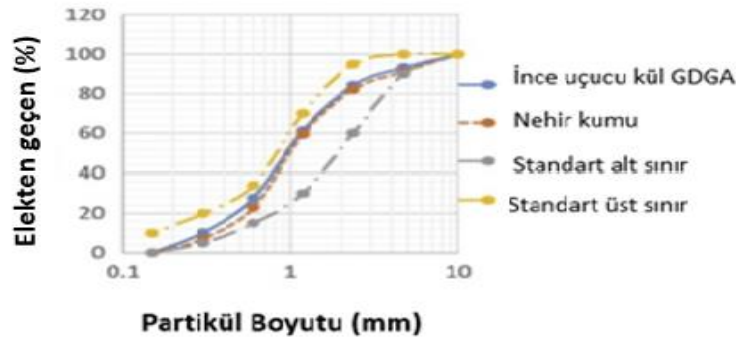
Alkali silika reaksiyonu; Portland çimentosundan gelen alkali ile agregadan gelen silissi içerikler arasındaki kimyasal reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda meydana gelen alkali silika jeli bünyesine fazla su absorbe edip genişleyerek çatlaklara ve bunun sonucunda ise betonda dayanım ve dayanıklılık kaybına sebep olur. Bununla birlikte geopolimer beton söz konusu olduğunda silis içerikli bağlayıcı malzemeler ve alkali hidroksitlerin bir arada kullanılması sebebi ile alkali silika reaksiyonunun oluşma ihtimali söz konusudur (Dezfouli ve ark., 2021). Agrawal ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, ince uçucu kül GDGA'sının ve nehir kumunun alkali silika reaktivitesini sırası ile 0.023 ve 0.031 olarak tespit etmişlerdir. Agrawal ve ark. (2017), ince uçucu kül GDGA'sı ile yaptığı diğer bir çalışmada da; ASR'ye bağlı betonda zamana bağlı boy değişimi miktarını 0.06 mm olarak ölçmüşlerdir. İncelenen literatür çalışmalarında; geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların alkali silika reaktivitesinin standart değerlerin altında olduğu ve betonda kullanılmasının sorun teşkil etmediği gözlemlenmiştir. Geopolimer betonların düşük ASR genleşmesi, esas olarak geopolimer matrisindeki daha düşük Portlandit (CH) miktarı ile açıklanabilir (Dezfouli ve ark., 2021).

Dane boyutu dağılımı ve incelik modülü

Agrawal ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada ince uçucu kül GDGA'ların ve doğal nehir kumunun incelik modülü değerini sırası ile 2.56 ve 2.67 olarak tespit etmişlerdir (Şekil 5). Agrawal ve ark. (2017), başka bir çalışmalarında ise ince uçucu kül GDGA'ları ve nehir kumu için ortalama parçacık boyutu dağılım eğrisini, standart kumunun üst ve alt sınırları ile karşılaştırmıştır (Şekil 6). Parçacık boyutu dağılım eğrisinin doğal kumun dağılım eğrisi ile benzer olduğu ve standart kumun üst ve alt sınırları içinde olduğu gözlemlenmiştir.

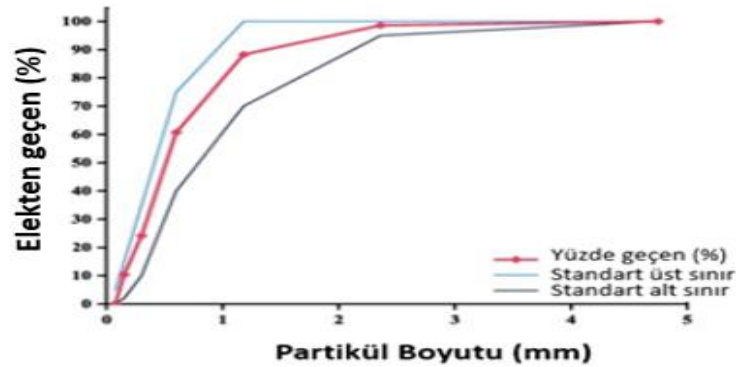


Şekil 5. İnce uçucu kül GDGA'ların ve nehir kumunun dane boyutu dağılımı (Agrawal ve ark.,2019)



Şekil 6. İnce uçucu kül GDGA'ların ve nehir kumunun dane boyutu dağılımı (Agrawal ve ark.,2017)

Zhu ve ark. (2020), ince GDGA'ların incelik modülünü incelemiş ve nehir kumu ile karşılaştırmış ve hem nehir kumunu hem de ince GDGA'ları, ASTM C144'e göre aynı incelik modülü değeri (2.59) ile tek tip sınıflandırmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Nehir kumu ve ince uçucu kül GDGA'ların elekten yüzdelik olarak geçme değerleri (Zhu ve ark.,2020)

İncelenen literatür çalışmalarına göre; geri dönüştürülmüş geopolimer agreganın tane boyutu dağılımı, incelik modülü, doğal agreganın tane boyutu dağılımı ve incelik modülü ile aynı veyahut istenilen boyutta ayarlanabilir şekildedir. Literatür çalışmalarında agregaların geri dönüşümü genellikle çeneli kırıcıda boyut fraksiyonu ayarlanarak yapılmıştır. Çeneli kırıcının boyut fraksiyonunu doğal agreganın tane boyutuna göre ayarlanırsa, geri dönüşüm agregasının tane boyutu dağılımı, doğal agreganın tane boyutu dağılımına benzer olabilir.

Agregalarda durabilite testi

Agregalarda durabilite testi, agregaların fiziksel, kimyasal ve biyolojik koşullara karşı direncinin göstergesidir. Sağlam olmayan bir agregada, betonun bozulmasına, hedeflenen servis ömrünü kısalmasına ve deprem gibi doğal afetler karşısında yapıdan beklenen mekanik özelliklerin sergilenememesine neden olur. Agrawal ve ark. (2017), ince uçucu kül GDGA'ları, doymuş sodyum sülfat (Na_2SO_4) içine daldırılarak toplam 14 gün boyunca dönüşümlü ıslatma ve kurutmaya tabi tutmuş ve ince uçucu kül GDGA'ların ağırlığında ortalama %6'lık bir azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. İnce uçucu kül GDGA'ların çevresel etkilere maruz kaldığında ağırlık kaybı ve hacim değişikliklerine karşı dirençli olduğu gözlemlenmiştir. Agrawal ve ark. (2019), başka bir çalışmada; ince uçucu kül GDGA'ları ve doğal nehir kumu ile üretilen betonların hızlı klorür geçirgenlik seviyesini ve karbonatlaşma derinliğini ölçmüşlerdir. Hızlı klorür geçirgenlik seviyelerini sırası ile $4.65 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^1$ ve $6.62 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^1$ olarak tespit edilmiştir. İnce uçucu kül GDGA'ların klorür geçirgenlik seviyesinin nehir kumundan daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu alümina silikat kaynağının puzolanik davranışından dolayı boşlukları daha iyi doldurarak betonun klorür geçirgenlik seviyesinin azaltmasından kaynaklanabilir (Bagheri ve Zanganeh, 2012). Ayrıca, ince uçucu kül GDGA betonundaki ve nehir kumu betonundaki karbonatlaşma derinliğini sırası ile 2.1 mm ve 8.4 mm olarak ölçülmüştür. Bu geopolimer numunelerin pH seviyesinin yüksek olmasına bağlanmıştır. İncelenen literatür çalışmalarına göre; geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar çevresel etkilere karşı direnebilir fakat durabilite deneyleri üzerinde daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

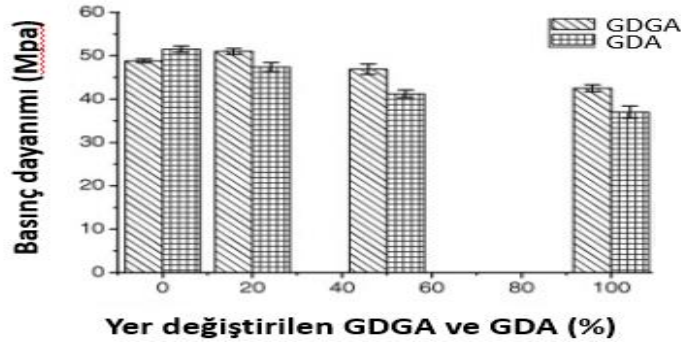
Agregaların pH değeri

Betonun pH değeri arttıkça silis kökenli agregalar daha fazla çözünür ve ASR oluşumuna sebep olur bu sebeple beton tasarımında kullanılan agregaların pH değeri önemli ve dikkat edilmesi gereken bir parametredir (Uygunoğlu, 2009). Literatürdeki çalışmalara göre geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların ölçülen pH değeri, doğal agregalara oranla daha yüksektir. Bunun sebebi ise önceki geopolimerizasyon reaksiyonunda oluşan alkali ürünlerin varlığıdır (Gharzouni ve ark., 2016). Gharzouni ve ark. (2016), metakaolin esaslı geopolimer betonun ve GDGA ilaveli geopolimer betonların pH değerini sırası ile 7.2 ve 10 olarak tespit etmiştir. Agrawal ve ark. (2017), ince uçucu kül GDGA'ların ve doğal nehir kumunun pH değerlerini incelemiş ve sırası ile 12.12 ve 8.16 olarak ölçmüştür. Ayrıca geopolimer betonun pH seviyesinin yüksekliği GDGA 'ların potansiyel alkali silika reaktivitesini artırmamıştır. Agrawal ve ark. (2019) yaptığı diğer bir çalışmada ince uçucu kül GDGA'larının potansiyel ASR değerini doğal agreganın potansiyel ASR değerinden daha düşük bulunmuştur. İncelenen literatür çalışmalarına göre; GDGA'nın pH değeri doğal agregaların pH değerinden yüksektir.

Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar ile üretilen geopolimer betonun mekanik özellikleri

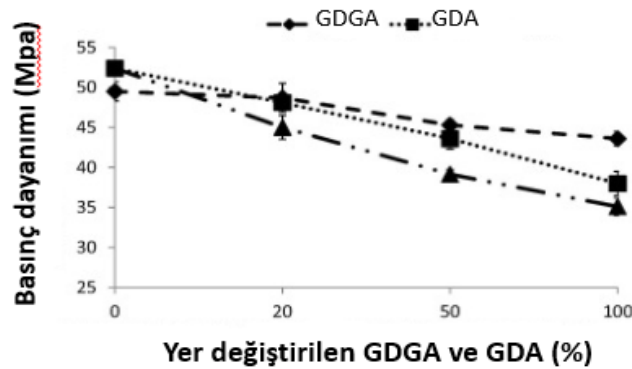
basınç dayanımı

Akbernezhad ve ark. (2015), %100 GDGA kullanılarak üretilen geopolimer betonun ve %100 GDA kullanılarak üretilen geleneksel betonun basınç dayanımlarını incelemiştir. %100 GDGA kullanılarak üretilen geopolimer betonun basınç dayanımında kontrol numunesine göre %12.9'luk bir azalma olurken; %100 GDA kullanılarak üretilen geleneksel betonun basınç dayanımında kontrol numunesine göre %28.1'lik bir azalma gözlemlenmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi geri dönüştürülmüş agreganın yer değiştirme oranı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır.



Şekil 8. Geri dönüştürülmüş agreganın doğal agrega ile yer değiştirme oranına göre GDGA ile üretilen geopolimer betonun ve GDA ile üretilen geleneksel betonun 28 günlük basınç dayanımındaki farklılıklar (Akbernezhad ve ark.,2015)

Agrawal ve ark. (2019), ince uçucu kül GDGA'ları ile üretilen betonun ve doğal nehir kumu ile üretilen betonun 28 ünlük basınç dayanımlarını sırası ile 34.22 MPa ve 28.94 MPa olarak tespit etmiştir. Gharzouni ve ark. (2016), farklı oranlarda geopolimer atıklarının metakaolin esaslı geopolimer betonlarda kullanılmasının, geopolimerizasyon reaksiyonu ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla kullanılan alkali çözeltide ve eklenen metakaolin miktarında farklılık gösteren üç bileşim incelenmiştir. Kullanılan metakaolin miktarındaki artışa göre basınç dayanımı değerleri sırası ile 45. 68 ve 76 MPa olarak ölçülmüştür. Agrawal ve ark. (2017), ince uçucu kül GDGA'ları ile üretilen betonun ve doğal nehir kumu ile üretilen betonun 28 günlük basınç dayanımlarını sırası ile 22.4 MPa ve 23.9 MPa tespit etmiştir. Mesgari ve ark. (2020), farklı içerikteki GDGA (%0, %20, %50 ve %100 iri doğal agrega ikamesi) ile üretilen geopolimer betonunun, GDA ile üretilen geleneksel betonunun ve GDGA ile üretilen Portland çimentosu betonunun basınç dayanımlarını incelemiştir. GDGA'ların %20 oranında ikame edilmesi ile üretilen geopolimer betonun basınç dayanımının kontrol numunesine kıyasla %14 azaldığı ve %100 ikame edilmesi ile basınç dayanımının %33 oranında azaldığı görülmüştür. Şekil 9'da görüldüğü gibi GDGA'ların geopolimer betonda kullanılmasıyla üretilen beton basınç dayanımı en yüksek değeri vermiştir.



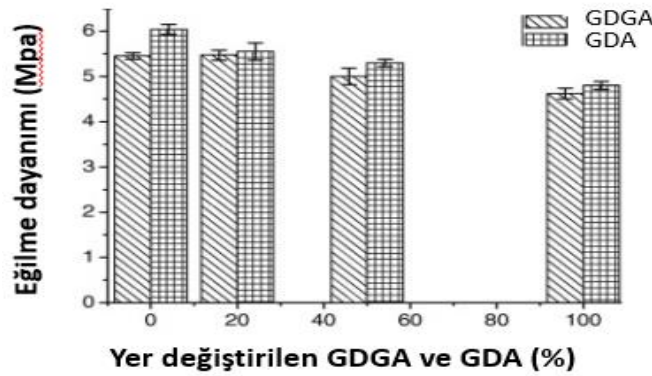
Şekil 9. GDGA ve GDA'ların doğal agrega ile farklı oranlarda yer değiştirmesi ile üretilen geopolimer betonun ve geleneksel betonun basınç dayanımında meydana gelen değişimler (Mesgari ve ark.,2020)

Zhu ve ark. (2020), ince GDGA'ları doğal agregaya farklı oranlarda ikame ederek geopolimer harc üretilmiştir ve %0, %20, %50, %80 ve %100 ikame oranlarına karşılık harcın basınç dayanımı sırası ile 61.1 MPa, 59.0 MPa, 55.7 MPa, 49.6 MPa ve 37.0 MPa olarak bulunmuştur. Literatür verileri incelendiğinde; betonda kullanılan geri dönüştürülmüş geopolimer agrega miktarı artmasıyla basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Fakat geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların maksimum tane boyutu arttıkça basınç dayanımındaki düşüş azalmıştır. Bu maksimum tane boyutu küçük agregaların su emme oranının maksimum tane boyutu büyük agregalardan daha fazla olmasından

kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar ile üretilen geopolimer betonların basınç dayanımı, geri dönüştürülmüş agregalardan üretilen geleneksel betonunun basınç dayanımından daha yüksektir.

Eğilme dayanımı

Akbernezhad ve ark. (2015), GDGA ile üretilen geopolimer betonun ve GDA ile üretilen geleneksel betonun eğilme dayanımlarını incelemiştir. %100 GDGA ile üretilen geopolimer betonun eğilme dayanımında kontrol numunesinin eğilme dayanımına göre %15.2'lik bir azalma gözlemlenirken; %100 GDA ile üretilen geleneksel betonun eğilme dayanımında kontrol numunesinin eğilme dayanımına göre %20.5'lik bir azalma gözlemlenmiştir. Şekil 10'da görüldüğü gibi geri dönüştürülmüş agreganın doğal agregaya ile yer değiştirme oranı arttıkça eğilme dayanımı azalmıştır.

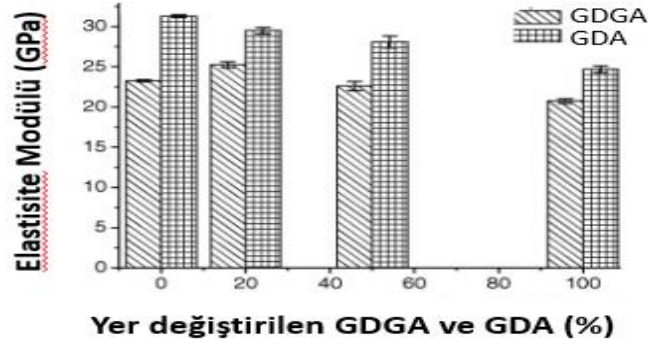


Şekil 10. Geri dönüştürülmüş agreganın doğal agregaya ile yer değiştirme oranına göre GDGA ile üretilen geopolimer beton ve GDA ile üretilen geleneksel betonun 28 günlük eğilme dayanımındaki farklılıklar (Akbernezhad ve ark.,2015)

Agrawal ve ark. (2019), ince uçucu kül GDGA'ları ile üretilen betonunun ve doğal nehir kumu ile üretilen betonun 28 günlük eğilme dayanımlarını sırası ile 2.35 MPa ve 2.61 MPa olarak tespit etmiştir. Mesgari ve ark. (2020), farklı içerikteki GDGA (%0, %20, %50 ve %100 iri doğal agregaya ikamesi) ile üretilen geopolimer betonunun, GDA ile üretilen geleneksel betonun ve GDGA ile üretilen geleneksel betonunun eğilme dayanımlarını incelemiştir. %100 geri dönüştürülmüş agregalar kullanılarak üretilen geopolimer ve geleneksel betonlarının kontrol numunesine göre eğilme mukavemetindeki maksimum azalma sırasıyla %21.0, %17.6 ve %19.6 olarak bulunmuştur. Zhu ve ark. (2020), ince GDGA'ları farklı oranlarda doğal agregaya ikame ederek ürettikleri geopolimer harçların eğilme dayanımını incelemiştir ve GDGA'nın %0, %20, %50, %80 ve %100 doğal agregaya ile yer değiştirme oranları için eğilme dayanımı kontrol numunesine göre sırasıyla %4.1, %10.1, %13.6 ve %19.5 oranında azalmıştır. Literatür verileri incelendiğinde; betonda kullanılan geri dönüştürülmüş geopolimer agregaya miktarı arttıkça eğilme dayanımı azalır. Fakat GDGA'ların maksimum tane boyutu arttıkça eğilme dayanımındaki düşüş azalmıştır. GDGA ile üretilen geopolimer betonların eğilme dayanımı değeri, GDA ile üretilen geleneksel betonunun eğilme dayanımı değerinden daha düşüktür. Fakat GDGA ilaveli geopolimer betonların eğilme dayanımındaki azalma GDA ilaveli geleneksel betonun eğilme dayanımındaki azalmadan nispeten daha iyidir.

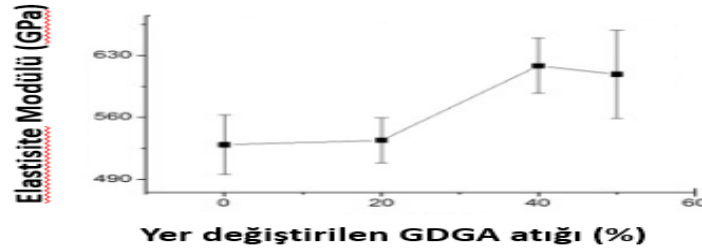
Elastisite modülü

Akbernezhad ve ark. (2015), GDGA ile üretilen geopolimer betonun GDA ile üretilen geleneksel betonun elastisite modüllerini incelemiştir. %100 GDGA ile üretilen geopolimer betonunun elastisite modülünde kontrol numunesinin elastisite modülüne göre %10.7 azalma gözlemlenirken; GDA ile üretilen geleneksel betonunun elastisite modülünde ise kontrol numunesinin elastisite modülüne göre %21.1'lik bir azalma gözlemlenmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Geri dönüştürülmüş agreganın doğal agrega ile yer değiştirme oranına göre GDGA ile üretilen geopolimer beton ve GDA ile üretilen geleneksel betonun Elastisite modülündeki farklılıklar (Akbernezhad ve ark.,2015)

Ramos ve arkadaşları. (2020), geopolimer beton atık parçacıkları ile birleştirilmiş, soldurulmuş düz veya oleik asit ile yüzeyi modifiye edilmiş geri dönüştürülmüş polipropilen matrisli çevre dostu kompozitlerin elastisite modülünü incelemiştir. Şekil 12’de görüldüğü gibi yüzeyi modifiye edilmiş geopolimer beton atıklarının ilave edilme oranı arttıkça kompozitlerin elastik modülü artmıştır.



Şekil 12. Yüzeyi oleik asitle modifiye edilmiş geopolimer beton atığı ile birleştirilmiş geri dönüştürülmüş polipropilen (rPP) kompozitlerin elastisite modülü (Ramos ve ark.,2020).

Mesgari ve ark. (2020), farklı içerikte GDGA (%0, %20, %50 ve %100 iri doğal agrega ikamesi) ile üretilen geopolimer betonunun, GDA ile üretilen geleneksel betonunun ve GDGA ile üretilen geleneksel betonunun elastisite modülünü incelemiştir. GDGA'nın %100 oranında doğal agrega ile yer değiştirilmesiyle, elastisite modülünde maksimum %8.3'lük düşme meydana gelmiştir. Ramos ve ark. (2020), geri dönüştürülmüş polipropilen matrisine ağırlıkça %20, %40 ve %50 oranlarında eklenen yüzeyi vinil trimetoksi silan ile modifiye edilmiş geopolimer atık parçalarından üretilmiş nanokompozitlerin elastisite modülünü incelemiştir. Yüzeyi modifiye edilmiş geopolimer beton atıklarının dâhil edilme yüzdesi arttıkça kompozitlerin elastisite modülünün de arttığı tespit edilmiştir.

SONUÇ

–Geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların 24 saatlik su emme oranı doğal agregaların su emme oranına göre daha yüksektir ve maksimum tane boyutu küçüldükçe agregaların su emme oranı artmıştır. Agregaların su emme miktarı arttıkça betonun işlenebilirliği için gerekli su miktarı da artmaktadır. Geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların tane yoğunluğu, doğal agregaların tane yoğunluğuna göre düşüktür.

–Geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların Los Angeles aşınma direnci doğal agregaların aşınma direncine göre düşüktür. Geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların düşük aşınma direnci, yüksek aşınmaya maruz kalan uygulamalarda kullanımını elverişsiz hale getirebilir.

–Geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların alkali silika reaktivitesi standartların altındadır ve betonda kullanıma uygundur.

–Geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların pH değeri, yüksek alkali içeriğinden dolayı doğal agregaların pH değerine göre daha yüksektir.

–İncelenen literatür araştırmalarına göre geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar çevresel etkilere karşı dirençlidir fakat durabilite deneyleri üzerinde daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

–Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalarla üretilen geopolimer betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü; geleneksel betonun basınç ve eğilme dayanımına ve elastisite modülüne göre düşüktür. Geri dönüştürülmüş agrega miktarı arttıkça betonun mekanik özelliklerinde azalma olmuştur.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Agrawal, U. S., Wanjari, S. P. ve Naresh, D. N. (2017). Characteristic study of geopolimer fly ash sand as a replacement to natural river sand, *Construction and Building Materials*,150, pp-681-688.
- Agrawal, U. S., Wanjari, S. P. ve Naresh, D. N. (2019). Impact of replacement of natural river sand with geopolimer fly ash sand on hardened properties of concrete,*Constr. Build. Mater.*, 209, pp. 499-507.
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Tam, C. T. ve Zang, M. H. (2013). Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates, *J. Mater. Civ. Eng.*, 25 (12), pp.1795-1802.
- Akbarnezhad, A., Mesgari, M. H. S. ve Castel, A. (2015). Recycling of geopolimer concrete, *Construction and Building Materials*, 101,Part 1, pp. 152-158.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F. ve Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolimer concrete in construction: A review, *Case Studies in Construction Materials*, (15) e00733.
- Anonim. (2020). K.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Laboratuvarları Eğilme Dayanımı Deneyi, 2019-2020 güz dönemi, https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/maden_79937.pdf
- Anonim. (2019). ALLPLAN; Geopolymer Concrete for the Precast Construction, https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Geopolymer_Concrete_for_the_Precast_Construction_3306843.html
- Bagheri, A. R. ve Zanganeh, H. (2012). Comparison of rapid tests for evaluation of chloride resistance of concretes with supplementary cementitious materials, *J. Mater. Civ. Engg.*, 64, pp. 1175-1182.
- Das, S., Saha, P., Jena, S. P. ve Panda, P. (2021). Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission – A review, *Materialstoday Proceedings*.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers *J. Therm. Anal.*, 37, pp. 1633-1656.
- Dezfouli, H. R. ve Rangaraju, P. R. (2021). Study on the effect of selected parameters on the alkali-silica reaction of aggregate in ground glass fiber and fly ash-based geopolimer mortars, *Construction and Building Materials*, 271, pp.121549.
- Gharzouni, A., Vidal, L., Esseadi, N., Joussein, E. ve Rossignol, S. (2016). Recycling of geopolimer waste: Influence on geopolimer formation and mechanical properties, *Materials & Design*, 94, pp.221-229.

- Gökçe, H. S. ve Can, Ö. (2009). Pomza agregasının farklı zamanlardaki su emmelerinin hafif betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi, *Journal of Polytechnic*, Vol: 12 No: 4 pp.293-298.
- Göksu, Ç., Akkaya, Y., Sarıbaş, İ. ve İlki, A. (2018). Geri dönüştürülmüş agrega ile elde edilen betonun mekanik özellikleri, *Actual Problems in Manufacturing Building Materials and Ways of Their Solution* Baku.
- Hassan, A., Arif, M. ve Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment A review of mechanical properties and microstructure-Review, *Journal of Cleaner Production*, 223, pp.704-728.
- Ma, C. K., Awang, A. Z. ve Omar, W. (2018). Structural and material performance of geopolymer concrete: a review, *Constr. Build. Mater.*, 186, pp. 90-102.
- Mesgari, S., Akbarnezhad, A. ve Xiao, J. Z. (2020). Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties, *Construction and Building Materials* 236, pp-117571.
- Neupane, K. (2022). Evaluation of environmental sustainability of one-part geopolymer binder concrete, *Cleaner Materials*, 6, pp.100138.
- Rahman, S. K. ve Al-Ameri, R. (2021). A newly developed self-compacting geopolymer concrete under ambient condition, *Constr. Build. Mater.*, 267, pp.121822.
- Ramos, F. J. H. T. V., Reis, R. H. M., Grafova, I., Grafov, A. ve Monteiro, S. N. (2020). Eco-friendly recycled polypropylene matrix composites incorporated with geopolymer concrete waste particles, *Journal of Materials Research and Technology*, 9-3, pp- 3084-3090.
- Ramos, F. J. H. T. V., Silva, M. H. P., Grafova, I., Grafov, A. ve Monteiro, S. N. (2020). Recycled polypropylene matrix nanocomposites reinforced with silane functionalized geopolymer concrete waste, *Journal of Materials Research and Technology*, 9-4, pp-7540-7550.
- Shehata, N., Mohamed, O. A., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A. ve Olabi, A. G. (2022). A Reveiw- Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials, *Science of The Total Environment*, 836, pp.155577.
- Torgal, P. F., Gomes, C. J. ve Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *J. Constr. Build. Mater.*, 22, pp.1305-1314.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS 706 EN 12620 +A1, 2009. Beton agregaları. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- Tunç, E. T. ve Alyamaç, K. E. (2020). The Effect of Aggregate Type on Los Angeles Abrasion Loss for Different Test Parameters, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 32(1), 1-10.
- Uygunoğlu, T. (2009). Examination of Alkali-Silica Reaction (ASR) Development in High Ratio Silica Fume Blended Mortars, *Electronic Journal of Construction Technologies* Vol: 5, No: 2, 2009 (9-16).
- Younis, K. H., Salihi, K. A. ve Ibrahim, T. K. (2020). An overview of geo-polymer concrete including recycled aggregate, *Int. J. Sci. Technol. Res.*, 9, pp. 6239-6245.
- York, I. N. ve Europe, I. (2021) Concrete needs to lose its colossal carbon footprint, *Nature*, 597, pp. 593-594.
- Zhu, P., Hua, M., Liu, H., Wang, X. ve Chen, C. (2020). Interfacial evaluation of geopolymer mortar prepared with recycled geopolymer fine aggregates, *Construction and Building Materials*, 259, pp-119849.