



Geride Dönüştürülmüş Geopolimer Agregaları ile Üretilen Çimento Esaslı Harçların Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması

Investigation of Engineering Properties of Cement-Based Mortars Produced with Recycled Geopolymer Aggregates

Şevin Ekmen* , Zeynep Algın 

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

Öz

Yapı malzemeleri üretiminde yüksek oranlarda kullanılan doğal agrega yerine inşaat atıklarından elde edilen geride dönüştürülmüş agrega kullanımı oldukça önemli bir yere sahiptir. Portland çimentosu bazlı malzemelerin geride dönüştürülmüş agregalar olarak geride dönüşümü yaygın olarak araştırılırken, geopolimerlerin yeniden kullanımına çok az odaklanılmıştır. Bu çalışma kapsamında çimento kullanımı devre dışı bırakılarak üretimi gerçekleştirilen geopolimer kompozitlerin atık hallerinin tekrar değerlendirilmesi amaçlanmıştır. %0, %50 ve %100 olmak üzere 3 farklı oranda geride dönüştürülmüş-geopolimer agregası (GDA) ikamesi ve %0, %0.2, %0.4 ve %0.6 oranlarında bazalt lif kullanımı ile 12 farklı çimentolu harç karışımı üretilmiştir. Üretilen harç karışımlarının yayılma çapı ve birim ağırlık deneyleri ile taze özelliklerinin, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme ve kılcal su emme deneyleri ile ise sertleşmiş özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. GDA birim ağırlık değerlerini düşürürken, su emme değerlerinde belirgin bir artışa neden olmuştur. Tüm karışımlar için %0.4 oranının üzerinde bazalt lif kullanımı basınç dayanımı değerlerinde düşüşe neden olmuştur. En yüksek basınç dayanım değerine %0.2 bazalt lif oranı için, geride dönüştürülmüş agrega ikamesi yapılmamış numunede ulaşılmıştır. Kontrol karışımları için lif oranının artışına bağlı olarak eğilme dayanım değerleri artış gösterirken GDA içeren harçlarda en yüksek eğilme dayanım değerine %0.2 bazalt lif oranı ile ulaşılmıştır.


Anahtar Kelimeler: Bazalt lif, geride dönüştürülmüş geopolimer agregası, çimento harcı, taze ve sertleşmiş harç özellikleri


Abstract

The use of recycled aggregate obtained from construction waste has a very important place instead of the natural aggregate used at high rates in the production of building materials. While the recycling of Portland cement-based materials as recycled aggregates has been widely investigated, the reuse of geopolymers has not been sufficiently focused. Within the scope of this study, it is aimed to reuse the waste states of geopolymer composites, which were produced by disabling the use of cement. 12 different cement-based mortar mixtures were produced by using recycled geopolymer aggregates (RA) in 3 different ratios as 0%, 50% and 100% and basalt fiber at 0%, 0.2%, 0.4% and 0.6% ratios. It was aimed to determine the fresh properties of the produced mortar mixtures by spreading diameter and unit weight tests, and to determine the hardened properties by compressive strength, flexural strength, water absorption and capillary water absorption tests. While the recycled geopolymer aggregate decreased the unit weight values, it caused a significant increase in the water absorption values. The use of basalt fiber above 0.4% for all blends caused a decrease in compressive strength values. The highest compressive strength value was obtained for the 0.2% basalt fiber content in the sample without recycled aggregate replacement. While the flexural strength values of the control mixtures increased depending on the increase in the fiber content, the highest flexural strength value was reached with the basalt fiber ratio of 0.2% for the mortars containing RA.

Keywords: Basalt fiber, aggregate of recycled geopolymer, cement mortar, properties of fresh and hardened mortar

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: ekmensevin@harran.edu.tr

Şevin Ekmen  orcid.org/0000-0002-2577-696X

Zeynep Algın  orcid.org/0000-0001-7004-8403



1. Giriş

Endüstriyel katı atıkların ciddi çevre sorunlarına neden olduğu bilinmektedir (Tang vd. 2019, Zhou vd. 2020, De Azevedo vd. 2022). İnşaat ve yıkıntı atıklarının yarattığı olumsuz etkiler nedeniyle dünya çapında birçok ülke çevreyi korumak için farklı yasalar üreterek farkındalık yaratmaya çalışmaktadır (Bilgen ve Altuntas 2023, Mehrjardi vd. 2020, Bilgen 2020, Islam vd. 2019). Bu atıkların yapısal ve yapısal olmayan beton yapımında sürdürülebilir şekilde bertarafı (Shariati vd. 2011, Toghroli vd. 2018, Zhang vd. 2020, Zhang vd. 2021) çevreye zararlı etkilerini azaltmak için en iyi çözüm olarak kabul edilmektedir. Atıkların yeniden kullanılması sayesinde elde edilen para tasarrufu, doğal kaynak tüketiminde azalma gibi avantajların yanı sıra CO₂ emisyonunun azalması ile çevrenin korunması sağlanmış olmaktadır (Park and Tucker, 2017). Beton üretiminde yüksek oranlarda kullanılan agreganın yerine çeşitli geri dönüştürülmüş agregaların kullanımı doğal kaynak tüketimini azaltmak açısından büyük önem kazanmıştır. Bu konuda gerçekleştirilen birçok çalışma (Hansen ve Narud 1983, Parviz 2012, Suryawanshi vd. 2015, Gómez-Soberón 2002, Katz, 2003, Martín-Morales vd. 2011, Nagataki vd. 2004) sayesinde çeşitli yöntemler ile kullanılabilirliği araştırılan geri dönüştürülmüş agregaların harç/beton kompozitlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri farklı açılardan irdelenmiştir.

Geopolimer, beton üretiminde çimento kullanımını ortadan kaldırmak için alkali aktivatörler ile silisyum ve alüminyum kaynaklı malzemeler, kaolin (Kaya 2021), kireç (Das vd. 2020) vb. doğal kaynaklar veya uçucu kül (Kaya 2022), yüksek fırın cürufu (Luga ve Atis 2018), pirinç kabuğu külü (Liu vd. 2020) gibi yan ürünlerin reaksiyonu sonucu oluşan amorf alkali alüminosilikatlardır. Geopolimerizasyon işleminde üç boyutlu polimerik Si-O-Al-O zincirleri oluşturmak için yüksek alkali ortamlarda alüminosilikat oksitler arasında gerçekleşen birkaç karmaşık kimyasal reaksiyondan sonra inorganik bileşikler üretilir. Polimerizasyon sırasında alkali aktivatör ilk olarak alüminosilikat kaynaklarındaki Al-O ve Si-O bağlarını kırar ve bu tetrahedral monomerler amorf -Si-O-Al-O-yapılarına ve zeolit kristallerine dönüştürülür. Son olarak dehidrasyon aşamasından sonra rijit yapıya sahip geopolimer elde edilmiş olur (Davidovits 1994). Geopolimer yapı malzemelerinin özelliklerini iyileştirmek, tasarım parametrelerini optimize etmek amacıyla son on yılda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Portland çimentolu yapı malzemeleri ile kıyaslandığında geopolimer kompozitlerin daha yüksek basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü değerlerine sahip olduğu ve dış etkilere, yüksek

sıcaklığa karşı daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir (Ryu vd. 2013, Rangan 2009, Hardjito vd. 2004, Sarker vd. 2014). Elde edilen bu umut verici sonuçlar ile bu alandaki önemli ilerlemeler dikkate alındığında geopolimer yapı malzemelerinin artan şekilde benimsenmesinin yakın gelecekte devam etmesi beklenmektedir. Geopolimerlerin belirtilen üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra doğal kaynak tüketimindeki azalma, düşük karbon emisyonu ve yan ürün kullanımı gibi sürdürülebilirlik faydalarının inşaat sektöründe benimsenmesine olanak sağlaması beklenmektedir.

Çimento esaslı kompozit malzemelerin gevrek davranış göstermeleri, bünyelerinde bulunan malzemelerin büzülme eğilimi sonucunda kolay çatlama, düşük çekme dayanım değerlerine sahip olmaları ve darbe direncinde zayıflık göstermeleri sonucunda yapının belirli bir süre sonra bozulması kaçınılmaz olabilmektedir. Harçta liflerin kullanılması, başarılı bir onarım için en önemli gereksinimlerden biri olan eski yüzey ile tamir malzemeleri arasındaki bağ kuvvetini önemli ölçüde artırabilmektedir (Iucolano vd. 2013, Zanotti vd. 2014). Ek olarak, harçta liflerin kullanılması aynı zamanda kompozit malzemenin basınç ve eğilme dayanımlarını, kırılma tokluğunu, köprüleme etkisinden dolayı harçtaki çatlakların genişliğini ve sayısını azaltarak aşınma direnci ve donma çözülme direnci gibi harcın dayanıklılık özelliklerini geliştirebilmektedir (Grdic vd. 2012, Çavdar 2014, Spadea vd. 2015). Sürdürülebilir bir mühendislik yapısı geliştirmek için yürütülmüş olan önceki çalışmalar optimum lif yüzdesi ve türünün harcın işlenebilirliği, priz süresi, akışkanlığı gibi taze özelliklerinin yanı sıra darbe direnci, yarmada çekme ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini de iyileştirebileceğini göstermişlerdir (Banthia vd. 1994, Bentur ve Mindess 2006, Mallat ve Alliche 2011, Banthia vd. 2014).

Çevre dostu malzemeler olan geri dönüştürülmüş agregalar, enerji, kaynak ve üretim maliyetini büyük ölçüde koruma ve sürdürülebilir kalkınma taleplerinin tam olarak karşılanmasına olanak sağlama potansiyeline sahiptir. Geri dönüştürülmüş agreganın geopolimer kompozit yapılarda kullanımına henüz yeterince odaklanılmaması ile birlikte geri dönüştürülmüş geopolimer agregasının kullanımı ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar oldukça kısıtlı sayıdadır (Rao ve Acharya 2014, Gharzouni vd. 2016, Zhu vd. 2020,) Akbarnezhad vd. (2015) GDA 'ların beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması kapsamında agregalar üzerinde aşınma, yoğunluk ve su emme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca GDA 'nın normal iri agrega ile %100 ikamesi sonucunda üretilen çimento esaslı betonun basınç dayanımı, elastisite modülü

ve kopma modülü değerlerinin sırasıyla %12.9, %10.7 and %15.2 oranlarında azaldığı sonucuna varmışlardır. Mesgari vd. (2020) bazalt agregası yerine %0, %20, %50 ve %100 oranlarında GDA kullanarak çimento esaslı beton üretmişlerdir. Üretilen beton numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü sonuçları irdelenmiş ve GDA kullanımının bu değerlerde sırasıyla %21, %3.4 ve %8.3 oranlarında düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. Geopolimerin, Portland çimento bazlı malzemelerden daha yüksek dayanıma, dayanıklılığa ve daha düşük gözenekliliğe sahip olduğu göz önüne alındığında, geri dönüştürülmüş geopolimer agregası kullanımının uzun vadede doğal kaynak tüketimi ve küresel ısınma sorunlarını ortadan kaldırmak için uygun bir alternatif olabileceği gayet açıktır. Geopolimer kompozitlerin pazar payı ve ortaya çıkan atık miktarı hakkında tam bir bilgiye sahip olunmaması ile birlikte, yapılan literatür çalışmalarının geopolimerlerin Portland çimentolu kompozitler yerine kullanımını önerilmesi sonucunda, benimsenmesi ve üretilen toplam beton atığı içinde geopolimer atık payının önümüzdeki birkaç on yılda hızla artması beklenmektedir. Bu nedenle, geopolimer yapıların pratikte uygulanması, inşaat endüstrisi tarafından değerlendirmesi ve kullanımının başlarında olunmasına rağmen, geopolimer yapılarının hizmet ömrünün sonunda atıkları ile başa çıkamadaki potansiyel zorlukları anlamak oldukça önemli hale gelecektir.

Bu çalışma belirtilen durumlar göz önüne alındığında geopolimer kompozitlerin benimsenmesi için karar verme sürecinin daha hızlı bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanınması hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında geri dönüştürülmüş geopolimer agregasının Portland çimentolu harç üretiminde kullanılabilirliği ve mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. GDA içeren harç numunelerine ayrıca bazalt lif de eklenerek birlikte kullanımları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar GDA kullanımı ile yeterli özelliklere sahip harç üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Gereç

Bu çalışma kapsamında kullanılan malzemeler; çimento (Cem-I 52.5N), dere kumu, uçucu kül esaslı geri dönüştürülmüş geopolimer agregası, Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen 6 mm boyuna sahip bazalt lif (BL), su ve süper akışkanlaştırıcıdır. Kullanılan malzemelerin özgül ağırlık değerlerine ve agregaların su emme de-

ğerlerine Çizelge 1'de çimentonun kimyasal bileşimine ise Çizelge 2'de yer verilmiştir.

Geri dönüştürülmüş geopolimer agregalar, 24 saat 80 C°'de ısı kürlemesi yapılarak üretilen 5x5x5 cm boyutlarına sahip geopolimer harç numunelerinin çeneli kırıcı yardımı ile istenilen boyutlarda parçalanması ile elde edilmiştir. Kullanılan numuneler Kullanılan geri dönüştürülmüş geopolimer agregasının ve dere kumunun dane boyut dağılımını yansıtan granülometre eğrisi ASTM C33/33M (2018) standardında yer alan alt ve üst limit değerleri ile birlikte Şekil 1'de verilmiştir.

Çalışmada kullanılacak olan malzeme oranları ve miktarları belirlenirken 3 farklı ikame oranlarında geri dönüştürülmüş agregası (%0, %50, %100) ve 4 farklı bazalt lif oranı (%0, %0.2, %0.4, %0.6) dikkate alınmıştır. Hazırlanan toplam 12 karışıma ait malzeme miktarlarına Çizelge 3'te yer verilmiştir. Karışım adı kullanılan malzeme oranlarına göre belirlenmiştir. Örneğin 50GDA-0.2BL gösterimi %50 oranında geri dönüştürülmüş agregası %0.2 oranında ise bazalt lif kullanımının gerçekleştiği karışımı ifade etmektedir.

2.2. Yöntem

Çalışma kapsamında üretilen tüm taze harç karışımları aynı

Çizelge 1. Kullanılan malzemeleri özellikleri.

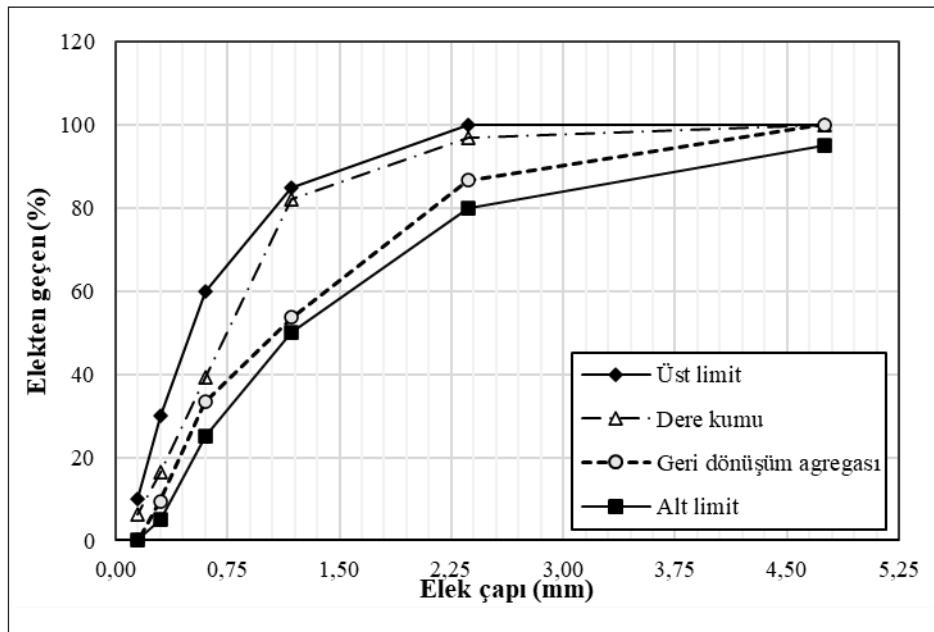
Özgül ağırlıklar	
Su	1
Çimento	3.15
Kum	2.72
Geri dönüştürülmüş geopolimer agregası	2.1
Süper akışkanlaştırıcı	1.07
Bazalt lif	2.78
Su emme (%)	
Geri dönüştürülmüş geopolimer agregası	15
Kum	2.5

Çizelge 2. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşenleri.

Kimyasal bileşenler (%)	Portland Çimentosu
CaO	62.85
SiO ₂	18.96
Al ₂ O ₃	5.33
Fe ₂ O ₃	3.05
MgO	1.67
SO ₃	2.6
K ₂ O	0.58
Na ₂ O	0.17

Çizelge 3. Kullanılan malzeme miktarları (1 m³)

Karışım adı	GDGA oranı (%)	Bazalt lif oranı (%)	Su (kg)	Çimento (kg)	Kum (kg)	GDGA (kg)	Lif (kg)
0GDA-0BL	0	0	290	500	1568	0	0
0GDA-0.2BL	0	0.2	290	500	1568	0	6
0GDA-0.4BL	0	0.4	290	500	1568	0	11
0GDA-0.6BL	0	0.6	290	500	1568	0	17
50GDA-0BL	50	0	363	500	784	528	0
50GDA-0.2BL	50	0.2	363	500	784	528	6
50GDA-0.4BL	50	0.4	363	500	784	528	11
50GDA-0.6BL	50	0.6	363	500	784	528	17
100GDA-0BL	100	0	436	500	0	1055	0
100GDA-0.2BL	100	0.2	436	500	0	1055	6
100GDA-0.4BL	100	0.4	436	500	0	1055	11
100GDA-0.6BL	100	0.6	436	500	0	1055	17



Şekil 1. Agregada dane boyut dağılımı.

karıştırma prosedürü ile hazırlanmıştır. 15 litre kapasiteye sahip mikserde ilk olarak çimento, dere kumu ve GDA konulmuş ve 1'er dakika normal ve hızlı devirlerde karıştırılmıştır. Homojen bir görünüme ulaşan karışıma su ve akışkanlaştırıcı da eklenip 2 dakika daha hızlı devirde karıştırıldıktan sonra işlem tamamlanmıştır.

Belirlenen malzeme oranları dikkate alınarak hazırlanan taze karışımlar kalıplara döküldükten 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak istenilen deney gününe kadar suda bekletilmiştir. Hazırlanan taze karışımların ilk olarak yayılma çapı ve taze birim ağırlık değerlerine ulaşıldıktan sonra sertleşmiş özel-

liklerin belirlenmesi kapsamında birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme ve kılcal su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Yayılma çapı tayini kesik koni kullanılarak ASTM C1437 (2015) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Her karışım için elde edilen yayılmalar birbirine dik iki yönde gerçekleştirilen ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Basınç dayanımı testi ASTM C109/C109M (2016) standardına göre 3000 kN kapasiteye sahip cihaz kullanılarak 0.63 kN/sn kırma hızı gerçekleştirilmiştir. 50x50x50 mm

boyutlarına sahip 28 günlük 3 adet küp numunenin dayanım değerlerinin ortalaması alınarak nihai dayanım sonucuna ulaşılmıştır.

Eğilme dayanımı testi 40x40x160 mm boyutlarına sahip kırış numuneler üzerinde ASTM C348-18 (2010) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test, 1 MPa/dk kırma hızı kullanılarak 100 kN kapasiteli cihaz yardımı ile uygulanmıştır.

Su emme testi için ASTM C642 (2013) standardı dikkate alınmıştır. Deney 28. günde 50 mm boyutundaki üç küp numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak son değere ulaşılmıştır.

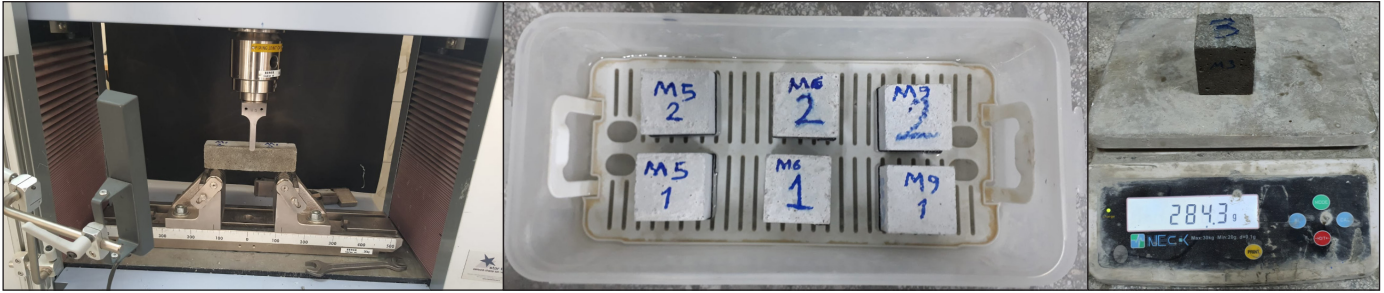
Kılcal su emme deneyi ASTM C 1585 (2013) standardı kullanılarak 50x50x50 mm boyutlarında 3 küp numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sadece taban yüzeyinden su akışının sağlanması amacıyla numunelerin dört tarafı 3 cm yüksekliğe kadar parafin ile kaplanmıştır. Böylece numuneler tarafından emilen birim alandaki su miktarı belirlenerek

oluşturulan eğri eğimi ile kılcallık katsayısına ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen deneylere ait bazı görsellere Şekil 2'de yer verilmiştir.

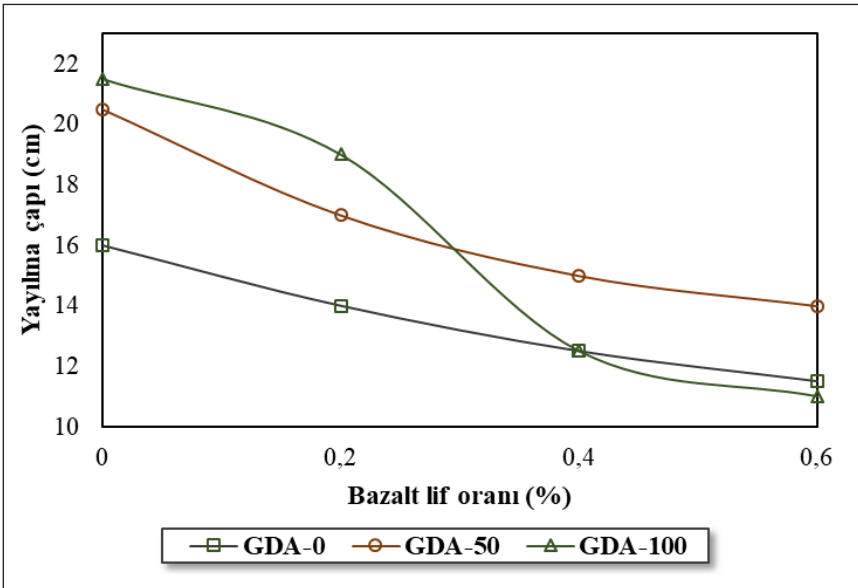
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yayılma Çapı

Yayılma çapı deneyi karışımların taze halde iken istenildiği gibi şekil verilebilme durumunun belirlenmesi açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Üretilen taze karışımın bünyesinde bulunan malzeme oran ve özelliklerine bağlı olarak elde edilen değerler değişkenlik gösterebilmektedir. Üretilen karışımın kullanım alanına amacına göre hedeflenen sonuçlara ulaşılması gerekmektedir. Yürütülen bu çalışmada geri dönüştürülmüş geopolimer agregasının ve bazalt lifin farklı oranlarının taze karışımların işlenebilme özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için yayılma çapı deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yayılma çapı (cm) değerlerine Şekil 3'te yer verilmiştir. Tüm karışımlar dikkate alındığında yayılma



Şekil 2. Bazı deneylere ait görseller.



Şekil 3. Hazırlanan taze karışımlar için yayılma çapı değerleri.

çapı değerlerinin 11 cm ile 21.5 cm arasında değiştiği görülmüştür. İşlenebilirliği olumsuz etkilemesi sonucunda bazalt lif oranının artması ile birlikte tüm agrega ikame oranları için yayılma çapı (cm) değerlerinde düşüş görülmüştür. Benzer sonuca Ma vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı oranlarda bazalt lifin kullanılması ile üretilen harç karışımları için de ulaşılmıştır. Bir diğer çalışmada Sadr-momtazi vd. (2018) %0, %1 ve %1.5 oranlarında bazalt lif kullanarak ürettikleri kompozitlerde lif yüzdesinin artmasına bağlı olarak yayılma değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, GDA kullanımının ise yayılma çapı değerleri üzerinde değişken bir etkisinin olduğu görülmektedir. %0 ve %0.2 oranlarında bazalt lif kullanılan karışımlarda GDA oranının artması ile yayılma çapı değerleri artış gösterirken, %0.4 ve %0.6 oranlarında lif kullanımı durumlarında belirlenen eğilimde değişiklik olmuştur. Lifsiz karışımlar için kontrol karışımı ile kıyaslandığında %50 ve %100 oranlarında GDA kullanımını sırasıyla %28 ve %34 oranlarında yayılma çapı değerlerini arttırmıştır. Sonuç olarak GDA-100 için %0.2 'den fazla bazalt lif kullanımı yayılma çapında bariz düşüşe neden olmaktadır.

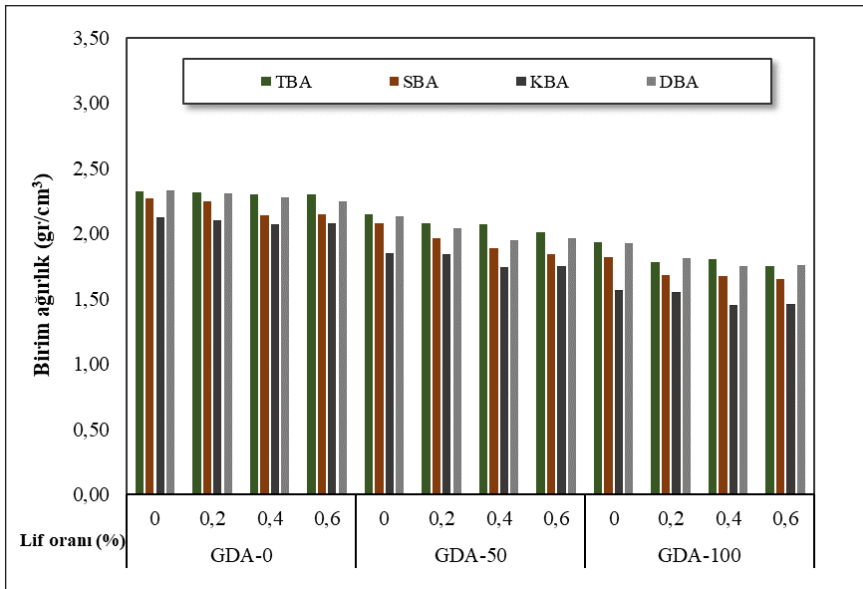
3.2. Birim Ağırlık

Üretilen kompozit yapıların ağırlıkları özellikle dinamik etkiler altında oldukça önem kazanmaktadır. Bu nedenle yapıya gelen yükü minimuma indirmek amacıyla yapı malzemeleri üretiminde mümkün oldukça düşük birim ağırlık değerlerinin hedeflenmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında üretilen karışımların taze birim ağırlık (TBA), sertleşmiş birim ağırlık (SBA), doymuş birim ağırlık (DBA) ve

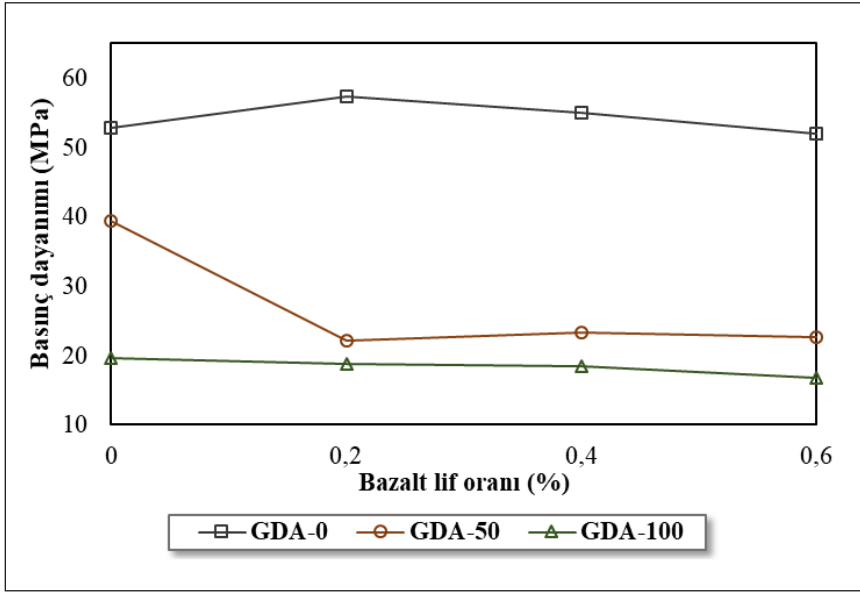
kuru birim ağırlık (KBA) olmak üzere 4 farklı birim ağırlık değerlerine ulaşılmıştır. Ulaşılan değerleri içeren grafiğe Şekil 4'te yer verilmiştir. Üretilen tüm karışımları içeren TBA, SBA, DBA ve KBA değer aralıkları sırasıyla 1.73-2.32 gr/cm³, 1.65-2.27 gr/cm³, 1.75-2.31 gr/cm³ ve 1.45-2.10 gr/cm³ olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde 3 farklı GDA ikamesi için de %0.4 oranına kadar bazalt lif artışı genel olarak birim ağırlık değerlerinde artışa neden olurken %0.4'ten %0.6 lif oranına çıkıldığında birim ağırlık değerlerinde düşüş görülmüştür. Koksall (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da bazalt lifin çimento esaslı harçların birim ağırlık değerleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlara göre lif oranlarının artmasına bağlı olarak birim ağırlık değerlerinde hem artış ve hem azalışlar görüldüğünden sabit bir ilişki bulunamamıştır. Aynı zamanda elde ettiğimiz sonuçlara göre sabit lif oranları için GDA oranının artışına bağlı olarak birim ağırlık değerlerinde azalma trendi görülmektedir. Değerlerde meydana gelen azalma yüzdeleri %7.5 ile %14 arasında değişerek her birim ağırlık grubunda farklılık göstermiştir.

3.3. Basınç Dayanımı

GDA içeren harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. %0 GDA ikamesi ile üretilen karışımlar ile belirgin bir şekilde daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. GDA-50 ile GDA-100 karışımları ile ulaşılan basınç dayanım değerleri oldukça yakın olmak ile birlikte GDA ikame oranının artması ile tüm basınç dayanım değerlerinde azalma görülmüştür. Bu duruma dere kumu ile kıyaslandığında daha zayıf ve boşluklu



Şekil 4. Hazırlanan karışımlar için birim ağırlık değerleri.



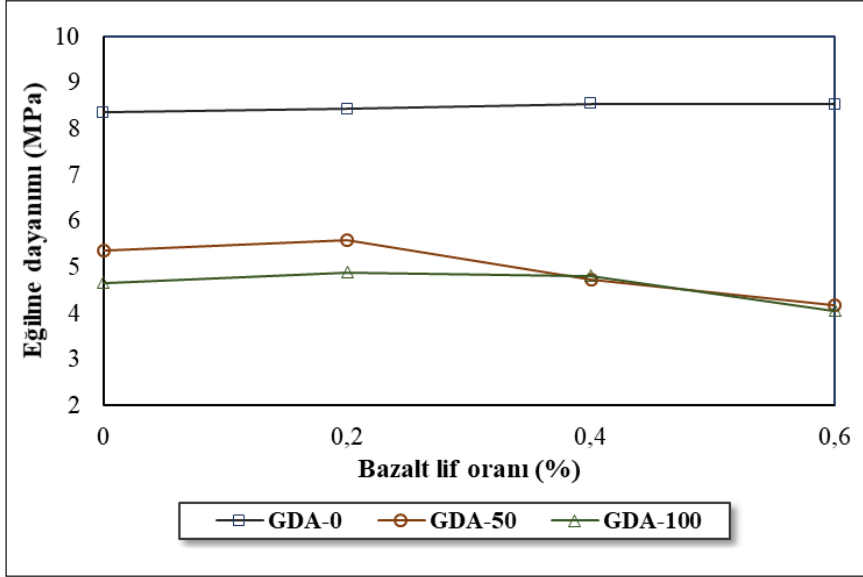
Şekil 5. Hazırlanan karışımlar için basınç dayanım değerleri.

bir yapıya sahip olan GDA kullanımı neden olmuştur. Lif içermeyen karışımlar için kontrol karışımı ile kıyaslandığında %50 ve %100 oranlarında GDA kullanımı sırasıyla %25 ve %63 oranlarında basınç dayanımı değerlerini düşürmüştür. Benzer sonuçlara Gómez-Soberón (2002) ile Majhi vd. (2018) tarafından geri dönüştürülmüş agrega kullanımının araştırıldığı çalışmalar ile de ulaşılmıştır. Mesgari vd. (2020) de benzer şekilde geri dönüştürülmüş geopolimer agregalarının farklı oranlarında kullanımının betonun mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre bazalt agrega yerine %20 oranında geri dönüştürülmüş geopolimer agrega kullanımı basınç dayanım değerinde %14 oranında düşüğe neden olurken %50 ikame oranı ile dayanım değerinde %33'lük bir azalma görülmüştür. Bazalt lif oranındaki değişimin basınç dayanım değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde ise yalnızca GDA-100 karışımı için lif yüzdesinin artışına bağlı olarak dayanım değerlerinde sürekli bir düşüş eğilimi görülmüştür. Bu durum yüksek GDA ikame oranı ile birlikte bazalt lif varlığının harç bünyesinde meydana getirdiği boşluk dağılımı ve yapısı ile ortaya çıkmıştır. BL eklenmesi, GDA agregasının meydana getirdiği zayıf ara yüzey geçiş bölgesinin artmasına neden olarak dayanım gelişimini olumsuz etkileyebilmektedir. BL kullanımı kompozit malzemenin iç gözenek yapısını iyileştirerek mikro çatlak gelişimini engellemektedir. Bununla birlikte yüksek oranlarda kullanımı ise bir bölgede toplanma (aglomerasyon) sonucunda harcın akışkanlığını ve sıkıştırılabilir performansını azaltarak dayanım değerlerinde düşümlere neden olmaktadır. Bu çalışma neticesinde elde edilen basınç dayanım sonuçları irdelendiğinde de %0.4 oranının

üzerinde lif kullanımının tüm karışımlarda elde edilen değerleri düşürdüğü görülmüştür. GDA-50 için, kontrol karışımı ile kıyaslandığında %0.2, %0.4 ve %0.6 oranlarında bazalt lifi kullanımı basınç dayanım değerlerini sırasıyla %44, %41 ve %42.5 oranlarında düşürmüştür. Tamamen GDA ile üretilen karışımlarda ise belirtilen lif oranları basınç dayanım değerlerinde sırasıyla %4, %6 ve %15 oranlarında düşüşe neden olurken geri dönüşüm agregasız karışımlarda %0.2 ve %0.4 bazalt lif oranı için sırasıyla %8 ve %4 oranlarında artış %0.6 için ise %2 oranında azalış görülmüştür. Ulaşılan basınç dayanım değerleri 16.7 MPa ile 57.27 MPa arasında değişirken en yüksek dayanım değerine %0.2 bazalt lif oranı için %0 GDA ikamesi ile ulaşılmıştır. Zheng vd. (2022) tarafından bazalt lifin geri dönüştürülmüş agrega ile kullanımının beton yapılarıdaki etkisinin incelendiği çalışma ile de benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

3.4. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı yapısal performansı gösteren diğer bir önemli özelliktir. Çalışma kapsamında geri dönüştürülmüş agrega ve bazalt lif kullanımının üretilen numunelerin eğilme dayanımı değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu deneyden elde edilen sonuçlar Şekil 6'da görülmektedir. En yüksek eğilme dayanım değerlerine lif kullanım oranından bağımsız olarak GDA-0 karışımı ile ulaşıırken GDA-50 ile GDA-100 karışımlarında özellikle yüksek bazalt lif oranları için oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Lif eklenmeyen karışımlar için kontrol karışımı ile kıyaslandığında %50 ve %100 oranlarında GDA kullanımı sırasıyla %36 ve %44 oranlarında eğilme dayanımı değerlerini düşürmüştür. GDA



Şekil 6. Hazırlanan karışımlar için eğilme dayanım değerleri.

oranının artışına bağlı olarak meydana gelen eğilme dayanımı değerlerindeki düşüş GDA yüzeylerinde bulunan eski harç ile oluşturulan yeni harç arasındaki zayıf bağlantıdan kaynaklanmaktadır. Bairagi vd. (1993) tarafından gerçekleştirilen çalışmada %25 ile %50 arasında GDA kullanımının eğilme dayanım değerlerini %6-13 arasında düşürdüğü belirlenmiştir. Mesgari vd. (2020) portland çimentolu beton üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında %20 oranında geri dönüştürülmüş geopolimer agregası kullanımının %3.4, %100 oranında agregası ikamesinin ise %21 oranında eğilme dayanım sonuçlarını düşürdüğünü belirlemişlerdir.

Bazalt lif kullanımının etkisi incelendiğinde geri dönüştürülmüş agreganın kullanılmadığı kontrol numunesinde lif yüzdesinin artışına bağlı olarak eğilme dayanım değerlerinde artış görülmüştür. GDA-0 için lif içermeyen karışım ile kıyaslandığında %0.2, %0.4 ve %0.6 oranlarında bazalt lifi kullanımı eğilme dayanım değerlerini sırasıyla %1 %2.2 ve %2.3 oranlarında arttırmıştır. %50 oranında geri dönüştürülmüş agregası kullanılması durumunda ise %0.2 bazalt lif eklenmesi eğilme dayanımını %4.5 oranında arttırırken bu oranın üzerindeki %0.4 ve %0.6 oranları için dayanım değerlerinde sırasıyla %12 ve %22 oranlarında düşüş görülmüştür. GDA-100 için ise %0.2 ve %0.4 oranlarında bazalt lifi kullanımı eğilme dayanım değerlerini sırasıyla %5 ve %3 oranlarında arttırırken %0.6 lif eklenmesi %13 oranında azaltmıştır. Yüksek oranlarda geri dönüştürülmüş geopolimer agregası kullanımının: belirli bir orandan sonra bazalt lifin eğilme dayanımı üzerindeki olumlu etkisini tersine çevirdiği görülmüştür. Ulaşılan eğilme dayanımı değerleri 4.05-8.52 MPa arasında olup en yüksek değere %0 GDA

ikamesi ve %0.6 bazalt lif oranı ile ulaşılmıştır.

3.5. Su Emme

Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen su emme deneyi sonucunda elde edilen değerlere Şekil 7'de yer verilmiştir. Görüldüğü gibi dere kumu ile kıyaslandığında daha boşluklu ve kusurlu bir yapıya sahip olan GDA yüzdesinin artmasına bağlı olarak bazalt lif kullanımından bağımsız olarak su emme (%) değerlerinde belirgin şekilde artış olmuştur. Lifsiz üretilen karışımlarda, kontrol karışımı ile kıyaslandığında %50 ve %100 oranlarında GDA kullanımı sırasıyla %70 ve %140 oranlarında su emme değerlerini arttırmıştır. Elde edilen bu sonuç, yüksek su emme değerine sahip GDAsının bünyesinde bulunan boşluklar ile ilişkilendirilebilmektedir. Çakır (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile de geri dönüştürülmüş agregası kullanımının su emme değerleri üzerindeki artırıcı etkisi incelenmiştir. Aynı GDA oranı için bazalt lif etkisi incelendiğinde ise %0.2 oranının üzerinde bazalt lif kullanımı su emme değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu durum numune bünyesinde bulunan liflerin dağılım şekli ile ilişkilidir. Koksall (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada benzer şekilde bazalt lif kullanımının harç numunelerinin su emme değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde ettikleri verilere göre %0.4 miktarının üzerinde bazalt lif eklenmesi harçların su emme değerlerinde artış ile sonuçlanmıştır.

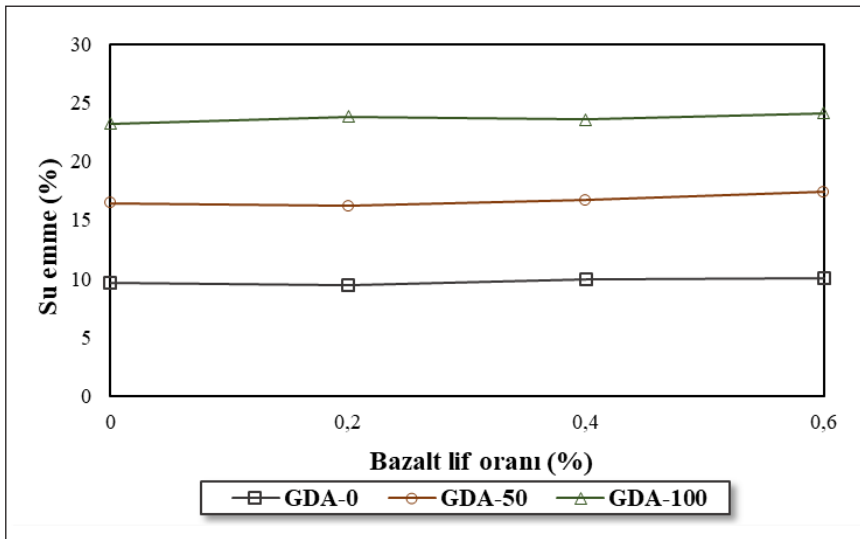
GDA-0 için, lif içermeyen karışım ile kıyaslandığında %0.2 oranında bazalt lifi kullanımı su emme değerini %2 oranında azaltırken %0.4 ve %0.6 oranları su emme değerlerini sırasıyla %3 ve %3.5 oranlarında arttırmıştır. GDA-50

için de benzer bir eğilim görülerek %0.2 bazalt lif kullanımı ile %1.5 oranında azalış %0.4 ve %0.6 oranları için ise su emme sonuçlarında %1 ve %6 oranlarında artış görülmüştür. GDA-100 için ise lifsiz duruma göre %0.2, %0.4 ve %0.6 oranlarında bazalt lifi kullanımı su emme değerlerini sırasıyla %2.5 %1.5 ve %4 oranlarında arttırmıştır.

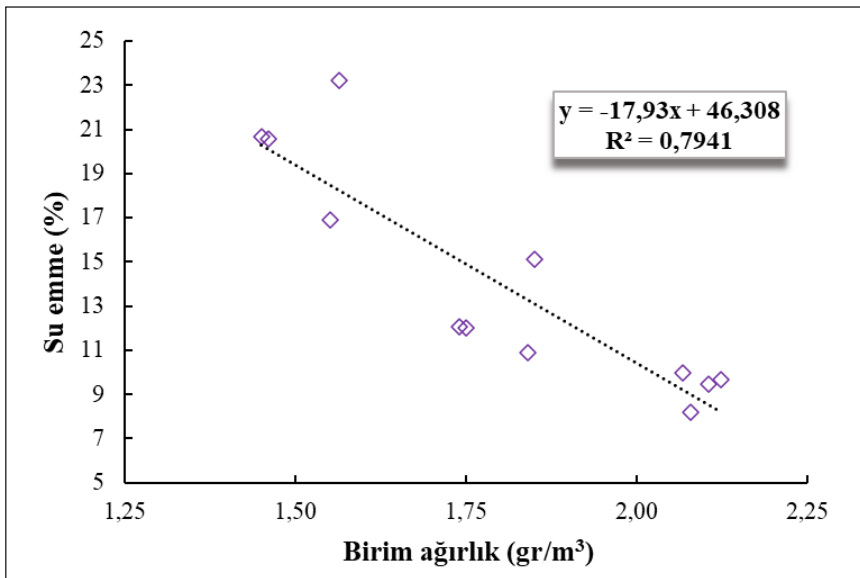
Şekil 8'de sertleşmiş harç numunelerinin kuru birim ağırlık değerleri ile su emme değerleri arasındaki ilişki verilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen birim ağırlık ve su emme değerleri arasındaki bağlantıyı gösteren 0.794 R² determinasyon katsayısına sahip bir denklem elde edilmiştir. Belirtilen her iki parametre için elde edilen sonuçlar numune bünyesinde bulunan boşluk oranı ile orantılıdır. Boşluk miktarının artmasına bağlı olarak birim ağırlık değerlerinde

azalma beklenirken su emme değerlerinde artış beklenmektedir. Verilen şekilde de iki parametre arasında beklenen bu ters ilişki görülmektedir.

Üretilen sertleşmiş kuru numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı (MPa) ve su emme (%) deney sonuçlarından elde edilen veriler arasındaki ilişki de incelenmiştir (Şekil 9). İncelenen her iki parametre de malzeme yapısında bulunan boşluk miktarı ile orantılı olduğunda aralarındaki ilişkinin kurulabilmesi beklenmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen basınç dayanımı ve su emme değerleri arasındaki bağlantıyı gösteren 0.919 R² determinasyon katsayısına sahip bir denklem elde edilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarında artış, su emme değerlerinde azalma ile paralellik göstermiştir. Elde edilen numunelerin su emme değer-



Şekil 7. Hazırlanan karışımlar için su emme değerleri.



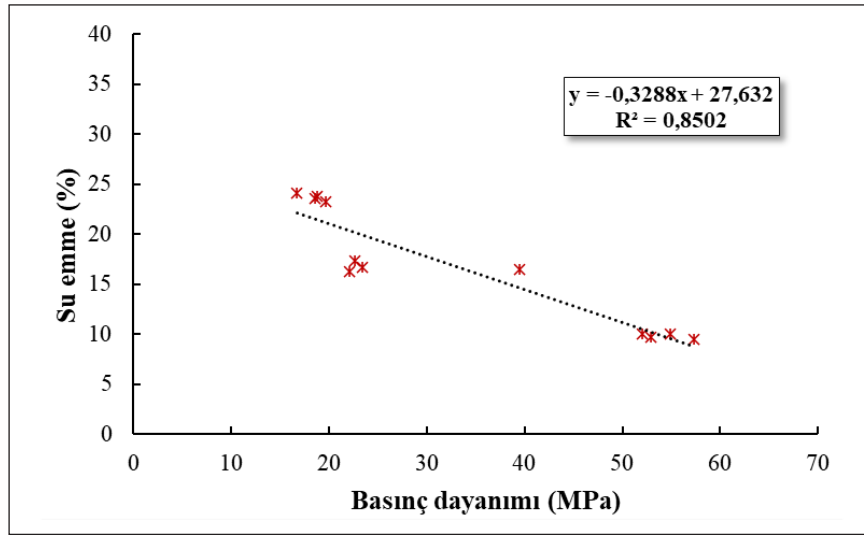
Şekil 8. Birim ağırlık değerleri ile su emme değerleri arasındaki ilişki.

leri %9.47 ile %24.10 arasında değişirken basınç dayanımı değerleri 16.70 MPa ile 57.27 MPa arasında değişkenlik göstermiştir.

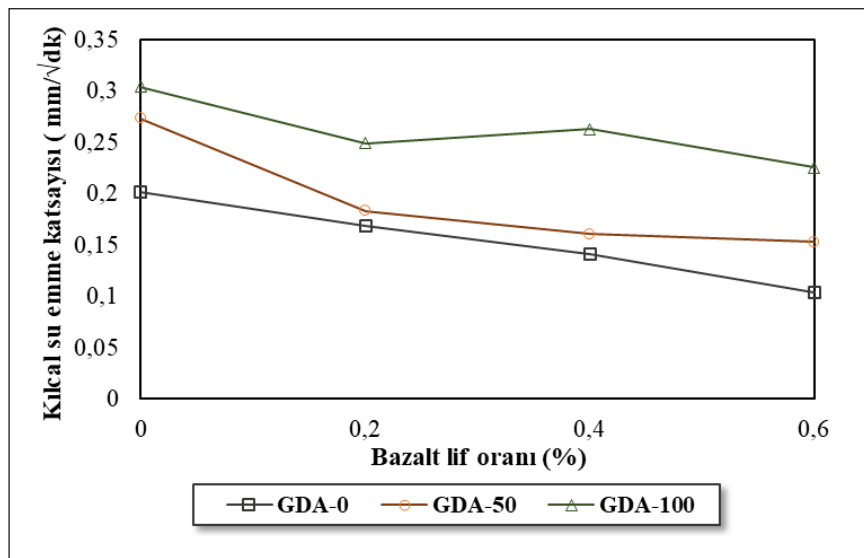
3.6. Kılcal Su Emme

Sertleşmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen kılcal su emme deneyi sonucunda elde edilen kılcallık katsayısı değerleri Şekil 10'da bulunan grafikte gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde GDA oranının artmasına bağlı olarak kılcallık katsayısı değerlerinde artma olduğu görülmüştür. Lif içermeyen karışımlar için, kontrol karışımı ile kıyaslandığında %50 ve %100 oranlarında GDA kullanımı sırasıyla %35.5 ve %51 oranlarında kılcallık katsayısı değerlerini arttırmıştır. GD-100 ile kıyaslandığında, GDA-0 ve GDA-50 karışımları için daha yakın değerler elde edilmiştir. GDA-0

karışımı için bazalt lif oranının artışı kılcallık katsayısında sürekli düşüşe neden olurken diğer GDA ikame oranları için sabit bir eğilim görülememiştir. GDA-0 için, lifsiz karışım ile kıyaslandığında %0.2, %0.4 ve %0.6 oranlarında bazalt lifi kullanımı kılcallık katsayısı değerlerini sırasıyla %16, %30 ve %48 oranlarında, GDA-50 için sırasıyla %33, %41 ve %44 oranlarında GDA-100 için ise sırasıyla %18, %13.5 ve %16 oranlarında azaltmıştır. Kılcallık katsayı değerinin birbirleri ile bağlantılı boşluk yapılarının varlığı ile orantılı olduğu bilgisi ışığında, bu durum yüksek GDA ikame oranlarının bu boşluk yapılarında değişiklik meydana getirmesi ile açıklanabilmektedir. En düşük ve en yüksek kılcallık katsayı değerleri olan 0.104 mm^{1/2}/dk ve 0.304 mm^{1/2}/dk sırasıyla 0GDA-0,6BL ve 100GDA-0BL karışımları ile elde edilmiştir.



Şekil 9. Basınç dayanım değerleri ile su emme değerleri arasındaki ilişki.



Şekil 10. Hazırlanan karışımlar için kılcallık katsayısı değerleri.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında GDA kullanılarak bazalt lif içeren harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde yayılma çapı, birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme ve kılcal su emme deneyleri yapılmıştır. Böylece elde edilen harç numunelerinin hem taze hem de sertleşmiş özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Üretilen taze karışımlara ait yayılma çapı değerleri 11 cm ile 21.5 cm arasında değişmiştir. Bazalt lif oranının artması ile birlikte tüm agrega ikame oranları için yayılma çapı (cm) değerlerinde düşüş görülürken GDA kullanımının sabit bir etkisi görülmemiştir.
- GDA oranının artışı ile birim ağırlık değerlerinde azalma eğilimi görülmüştür. Lif oranının artmasına bağlı olarak genel olarak birim ağırlık artışı görülmüştür.
- Tüm karışımlar için %0.4 oranının üzerinde bazalt lif kullanımı basınç dayanımı değerlerinde düşüşe neden olmuştur. GDA yüzdesindeki artış da yine basınç dayanım değerlerini düşürmüştür. En yüksek basınç dayanım değerine %0.2 bazalt lif oranı için %0 GDA ikamesi ile ulaşılmıştır.
- Ulaşılan birim ağırlık ile su emme (%) sonuçları arasında 0.794 R² determinasyon katsayısına sahip ters ilişki bulunmuştur.
- Elde edilen basınç dayanımı (MPa) ve su emme (%) değerleri arasında yüksek bir ilişki olduğu görülmüştür.
- GDA kullanımı eğilme dayanım değerlerini düşürmüştür. Lifin eğilme dayanım değerleri üzerindeki olumlu etkisi ise yüksek oranlarda GDA kullanımı ile tersine dönmüştür. Ulaşılan eğilme dayanımı değerleri 4.05 MPa ile 8.52 MPa arasında olup en yüksek değere %0 GDA ikamesi ve %0,6 bazalt lif oranına sahip numune ile ulaşılmıştır.
- GDA oranının artması su emme (%) değerlerinde artış ile sonuçlanmıştır. Lif eklenmesinin su emme değerleri üzerindeki etkisi ise değişiklik göstermiştir.
- GDA oranının artmasına bağlı olarak kılcallık katsayısı değerlerinde artma olduğu görülmüştür. En düşük ve en yüksek kılcallık katsayı değerleri olan 0.104 mm/ \sqrt{dk} ve 0.304 mm/ \sqrt{dk} sırasıyla 0GDA-0.6BL ve 100GDA-0BL karışımları ile elde edilmiştir. Tüm agrega oranları için bazalt lif miktarının artması sonucunda kılcallık katsayılarında azalma görülmüştür. En yüksek azalma

değerine GDA-0 karışımında 0.6 bazalt lif oranı ile ulaşılmıştır.

Yapılan çalışmalar neticesinde Portland çimentolu yapı malzemeleri ile kıyaslandığında geopolimer kompozit yapıların daha üstün mekanik ve dayanıklılık özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca üretiminin çimento kullanımı içermemesi, atık malzemeler ile gerçekleştirilmesi gibi avantajlar sunması geopolimer yapıların uygulama sahasının daha fazla genişletilmesi açısından oldukça önemsenmektedir. Yapılan yoğun çalışmalar ışığında gelecekte geopolimer yapıların daha fazla kullanım alanına sahip olacağı beklentisi ile atık olarak ortaya çıkarılabileceği problemlerin de önemsenmesi gerekmektedir. Gelecekte bu çalışma geliştirilerek farklı yapı kompozitlerinin üretilmesi ve dayanıklılık problemlerinin de incelenmesi hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- Akbarnezhad, A., Huan, M., Mesgari, S., Castel, A. 2015.** Recycling of geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.*, 101, pp. 152-158.
- ASTM C1437, 2015.** Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, 10.1520/C1437-15.
- ASTM C33/C33M, 2018.** Standard specification for concrete aggregates.
- ASTM, C109/109M, 2016.** Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). *Annual Book of ASTM Standards*, 4.
- ASTM, C1585, 2013.** Standard test method for measurement of rate of absorption of water by Hydraulic-, ASTM Int, 4-9.
- ASTM, C348, 2010.** Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). In *American Society for Testing and Materials*, 100: 19428-2959.
- ASTM, C642, 2013.** Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2013.
- Bairagi, NK., Ravande, K., Pareek, VK. 1993.** Behaviour of concrete with different proportions of natural and RAs. *Resour. Conserv. Recycl.*, 9 (1-2): 09-126.
- Banthia, N., Chokri, K., Ohama, Y., Mindess, S. 1994.** Fiber-reinforced cement based composites under tensile impact. *Advanced Cement Based Materials*, 1(3), 131-141.
- Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., Bindiganavile, V. 2014.** Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*, 48, 91-97.
- Bentur, A., Mindess, S. 2006.** Fibre reinforced cementitious composites. *Crc Press*.

- Çakır, O. 2014.** Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (rca) concrete with mineral additives. *Constr. Build. Mater.*, 68, 17–25.
- Çavdar, A. 2014.** Investigation of freeze–thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, 58, 463–472.
- Bilgen, G. 2020.** Geri dönüştürülmüş beton agregasının düşük plastisiteli bir kilin mekanik özelliklerine etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(3), 1714–1719.
- Bilgen, G., Altuntas, O. F. 2023.** Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01815.
- Das, SK., Mustakim, SM., Adesina, A., Mishra, J., Alomayri, TS., Assaedi, HS., Kaze, CR. 2020.** Fresh, strength and microstructure properties of geopolymer concrete incorporating lime and silica fume as replacement of fly ash. *Journal of Building Engineering*, 32, 101780.
- Davidovits, J. 1994.** Properties of geopolymer cements, in: First international conference on alkaline cements and concretes. KIEV, Ukraine, pp. 131–149.
- De Azevedo, AR., Costa, AM., Cecchin, D., Pereira, CR., Marvila, MT., Adesina, A. 2022.** Adesina, economic potential comparative of reusing different industrial solid wastes in cementitious composites: a case study in Brazil. *Environment. Development and Sustainability*, pp. 1–24.
- Gharzouni, A., Vidal, L., Essaidi, N., Joussein, E., Rossignol, S. 2016.** Recycling of geopolymer waste: Influence on geopolymer formation and mechanical properties. *Materials and Design*, 94, 221–229.
- Gómez-Soberón, JM. 2002.** Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cem. Concr. Res.*, 32 (8), 1301–1311.
- Grdic, ZJ., Curcic, GAT., Ristic, NS., Despotovic, IM. 2012.** Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 27(1), 305–312.
- Hansen, TC., Narud, H. 1983.** Henrik, strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr. Int.*, 5 (1), 79–83.
- Hardjito, D., Wallah, SE., Sumajouw, DM., Rangan, BV. 2004.** On The development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Mater. J.*, 101 (6), 467–472.
- Islam, R., Nazifa, TH., Yuniarto, A., Uddin, AS., Salmiati, S., Shahid, S. 2019.** An empirical study of construction and demolition waste generation and Implication of Recycling. *Waste Manag.*, 95, 10–21.
- Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F., Cioffi, R. 2013.** Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. *Materials and Design*, 52, 916–922.
- Katz, A. 2003.** Properties of concrete made with ra from partially hydrated old concrete. *Cem. Concr. Res.*, 33, 703–711.
- Kaya, M. 2021.** Kaolin esaslı geopolimer harçlarda silis dumanı ve mikro SiO₂ katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 640–647.
- Kaya, M. 2022.** Effect of steel fiber additive on high temperature resistance in geopolymer mortars. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(3), 1949–1967.
- Koksal, F., Kocabeyoglu, ET., Gencel, O., Benli, A. 2021.** The effects of high temperature and cooling regimes on the mechanical and durability properties of basalt fiber reinforced mortars with silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104107.
- Liu, X., Jiang, J., Zhang, H., Li, M., Wu, Y., Guo, L., ..., Zhang, Z. 2020.** Thermal stability and microstructure of metakaolin-based geopolymer blended with rice husk ash. *Applied Clay Science*, 196, 105769.
- Luga, E., Atis, CD. 2018.** Optimization of heat cured fy ash/slag blend geopolymer mortars designed by “Combined Design” method: Part 1. *Construction and Building Materials*, 178, 393–404.
- Ma, JX., Zhang, M., Zhao, G. 2013.** Experimental research on basalt fiber reinforced cementitious composites. In *Applied mechanics and materials*, Vol. 253, pp. 533–536.
- Majhi, RK., Nayak, AN., Mukharjee, BB. 2018.** Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 159, 417–430.
- Mallat, A., Alliche, A. 2011.** Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system. *Construction and building materials*, 25(4), 1587–1595.
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., Valverde-Espinosa, I. 2011.** Characterization of ras construction and demolition waste for concrete production following the spanish structural concrete code ehe-08. *Constr. Build. Mater.*, 25 (2): 742–748.
- Mehrjardi, GT., Azizi, A., Haji-Azizi, A., Asdollafardi, G. 2020.** Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction. *Transport. Geotech.*, 23, 100349.

- Mesgari, S., Akbarnezhad, A., Xiao, J. Z. 2020.** Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for portland cement concrete and geopolymer concrete: effects on mechanical properties. *Constr. Build. Mater.*, 236.
- Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., Hisada, M. 2004.** Hisada, assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Res.*, 34 (6), 965–971.
- Park, J., Tucker, R. 2017.** Overcoming barriers to the reuse of construction waste material in australia: a review of the literature. *Int. J. Construct. Manag.*, 17, 228–237.
- Parviz, S. 2012.** Strength and durability of rac containing milled glass as partial replacement for cement. *Constr. Build. Mater.*, 29, 368–377.
- Rao, SM., Acharya, IP. 2014.** Synthesis and characterization of fly ash geopolymer sand. *Journal of materials in civil engineering*, 26(5), 912–917.
- Rangan, BV. 2009.** Engineering properties of geopolymer concrete. *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, p. 211–226.
- Ryu, GS., Lee, YB., Koh, KT., Chung, YS. 2013.** The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Constr. Build. Mater.*, 47, 409–418.
- Sadrumontazi, A., Tahmouresi, B., Saradar, A. 2018.** Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC). *Construction and Building Materials*, 162, 321–333.
- Sarker, PK., Kelly, S., Yao, Z. 2014.** Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Mater. Des.*, 63, 584–592.
- Shariati, M., Ramli Sulong, NH., Sinaei, H., Arabnejad Khanouki, MM., Shafiqh, P. 2011.** Behavior of channel shear connectors in normal and light weight aggregate concrete (experimental and analytical study). *Adv. Mater. Res.*, 168, 2303–2307.
- Spadea, S., Farina, I., Carrafiello, A., Fraternali, F. 2015.** Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. *Construction and Building Materials*, 80, 200–209.
- Suryawanshi, SR., Singh, B., Bhargava, P. 2015.** Characterization of rac, advances in structural engineering. Springer, India, pp. 1813–1822.
- Tang, Z., Li, W., Ke, G., Zhou, JL., Tam, VW. 2019.** Sulfate attack resistance of sustainable concrete incorporating various industrial solid wastes. *J. Clean. Prod.*, 218, 810–822.
- Toghroli, A., Shariati, M., Sajedi, F., Ibrahim, Z., Koting, S., Mohamad, ET., Khorami, MA. 2018.** A Review on pavement porous concrete using recycled waste materials. *Smart Struct. Syst.*, 22, 433–440.
- Zanotti, C., Bantia, N., Plizzari, G. 2014.** A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs. *Cement and Concrete Research*, 63, 117–126.
- Zhang, C., Ali, A., Sun, L. 2021.** Investigation on low-cost friction-based isolation systems for masonry building structures: experimental and numerical studies. *Eng. Struct.*, 243, 112645.
- Zhang, J., Yao, Z., Wang, K., Wang, F., Jiang, H., Liang, M., Wei J., Airey, G. 2020.** Sustainable utilization of bauxite residue (red mud) as a road material in pavements: a critical review. *Construct. Build. Mater.*, 121419.
- Zheng, Y., Zhuo, J., Zhang, P., Ma, M. 2022.** Mechanical properties and meso-microscopic mechanism of basalt fiber-reinforced recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133555.
- Zhou, K., Gong, K., Zhou, Q., Zhao, S., Guo, H., Qian, X. 2020.** Estimating the feasibility of using industrial solid wastes as raw material for polyurethane composites with low fire hazards. *J. Clean. Prod.*, 257, 120606.
- Zhu, P., Hua, M., Liu, H., Wang, X., Chen, C. 2020.** Interfacial evaluation of geopolymer mortar prepared with recycled geopolymer fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 259, 119849.