



## Geri Dönüştürülmüş Asfalt Tozunun Alkali Aktifleştirilmiş Cüruf Harçları Üzerindeki Etkisi

### Effect of Recycled Asphalt Powder on Alkali Activated Slag Mortars

Erdinç Halis Alakara<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60000 Tokat, Türkiye

Başvuru/Received: 18/11/2022

Kabul / Accepted: 30/12/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/12/2022

#### Öz

Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş asfalt tozunun (GDAT) alkali aktifleştirilmiş cüruf (AAS) harçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. AAS harçlarında bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve GDAT kullanılmıştır. Harç karışımlarına GDAT, YFC'nin ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50'si oranlarında ikame edilmiştir. Karışımlarda aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılmıştır. Çözelti aktivatör derişimi ise 12 molarite (M) olarak seçilmiştir. Harçlar 100 °C etüvde, 24 saat kür edildikten sonra ultrases geçiş hızı (UPV), eğilme dayanımı ( $f_e$ ) ve basınç dayanımı ( $f_b$ ) testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, GDAT ikame oranının artmasıyla UPV,  $f_e$  ve  $f_b$  değerlerinde düşüşler görülmüştür. Bu düşüş oranları, özellikle %20 ikame oranından sonra önemli ölçüde artış göstermiştir. Ayrıca her yıl yüksek miktarlarda açığa çıkan kazanmış asfalt kaplamanın, AAS harçlarda kullanılarak çevre kirliliğinin önemli ölçüde azaltılabileceği düşünülmektedir.

#### Anahtar Kelimeler

*“Geri dönüşüm, asfalt tozu, alkali aktifleştirilmiş cüruf, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı”*

#### Abstract

In this study, the effect of recycled asphalt powder (RAP) on alkali activated slag (AAS) mortars was investigated. Blast furnace slag (BFS) and RAP were used as binders in AAS mortars. In the mortar mixes, RAP was substituted at the rates of 10%, 20%, 30%, 40% and 50% by weight of BFS. Sodium hydroxide (NaOH) solution was used as the activator in the mixtures. The solution activator concentration was chosen as 12 molarity (M). After the mortars were cured in an oven at 100 °C for 24 hours, they were subjected to ultrasonic pulse velocity (UPV), flexural strength ( $f_f$ ) and compressive strength ( $f_c$ ) tests. When the results obtained were examined, it was observed that the UPV,  $f_f$  and  $f_c$  values decreased with the increase in the RAP substitution ratio. These decline rates increased significantly, especially after the 20% substitution rate. In addition, it is thought that environmental pollution can be significantly reduced by using the scraped asphalt pavement, which is exposed in high amounts every year, in AAS mortars.

#### Key Words

*“Recycling, asphalt powder, alkali activated slag, ultrasonic pulse velocity, flexural strength, compressive strength”*

## 1.Giriş

En önemli yapı malzemesi olan beton dünya çapında her yıl 10 milyon tondan fazla üretilmektedir (Meyer, 2009). Betonda bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun elde edilmesinde yüksek enerjiye ve çok fazla miktarda hammaddeye ihtiyaç duyulmaktadır (Mehta, 2002). Çimento endüstrisi oluşturduğu sera gazlarından, enerji ve hammadde tüketiminden dolayı doğaya ciddi derecede zarar vermektedir. Çimento üretimi endüstriyel enerjinin %12-15'ini kullanmakla birlikte küresel çapta CO<sub>2</sub> miktarının %5 ila %8'ini oluşturmaktadır (Podolsky vd., 2021; Stafford vd., 2016; Bingöl vd., 2020, a). 1 ton çimento üretiminde konumuna, teknolojisine, ürün verimliliğine, elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarına ve yakıt cinsine bağlı olarak yaklaşık 1 ton CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmektedir (Stafford vd., 2016; Gursel vd., 2014).

Betonun doğaya olan olumsuz etkilerini azaltabilmek ve daha sürdürülebilir yapı malzemesi ortaya çıkarmak amacıyla yapılan araştırmalar önem kazanmıştır. Geopolimer beton zengin silis ve alümin kökenli malzemelerin alkali aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda oluşan, geleneksel betona alternatif olan çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemesidir (Shobeiri vd., 2021). Zengin silis ve alüminyum içeren herhangi bir endüstriyel atık veya doğal malzeme geopolimer beton üretiminde kullanılabilir (Manikandan & Vasugi, 2021). Araştırmacılar uçucu kül (Amran vd., 2021), yüksek fırın cürufu (YFC) (Bingöl vd., 2020, b), silis dumanı (Okoye vd., 2016), cam tozu (Manikandan & Vasugi, 2021), metakaolin (Albidah vd., 2021), çelikhane cürufu (Bingöl, 2022), perlit tozu (Alakara vd., 2022, a), atık beton tozu (Alakara vd., 2022, b) gibi malzemeleri geopolimer üretiminde kullanmışlardır.

Atık asfalt, tasarım süresinin sonuna gelmiş asfalt yolların üst kaplamasının kazınmasıyla elde edilir. Kazınan asfalt genelde atık malzeme sahalarında toplanır. Türkiye'de 2021 yılında yaklaşık olarak 2 milyon ton asfalt, tasarım süresini doldurmuş ve kazınmıştır (ASMÜD, 2021). Atık asfaltın inşaat sektöründe kullanılması olumlu çevresel katkılar sağlamakla birlikte atık sahalarında da önemli azalmalar sağlayacaktır (Hoy vd., 2016). Bu bağlamda atık asfaltın geleneksel ve geopolimer beton içerisinde kullanımı ile ilgili farklı çalışmalar yapılmıştır.

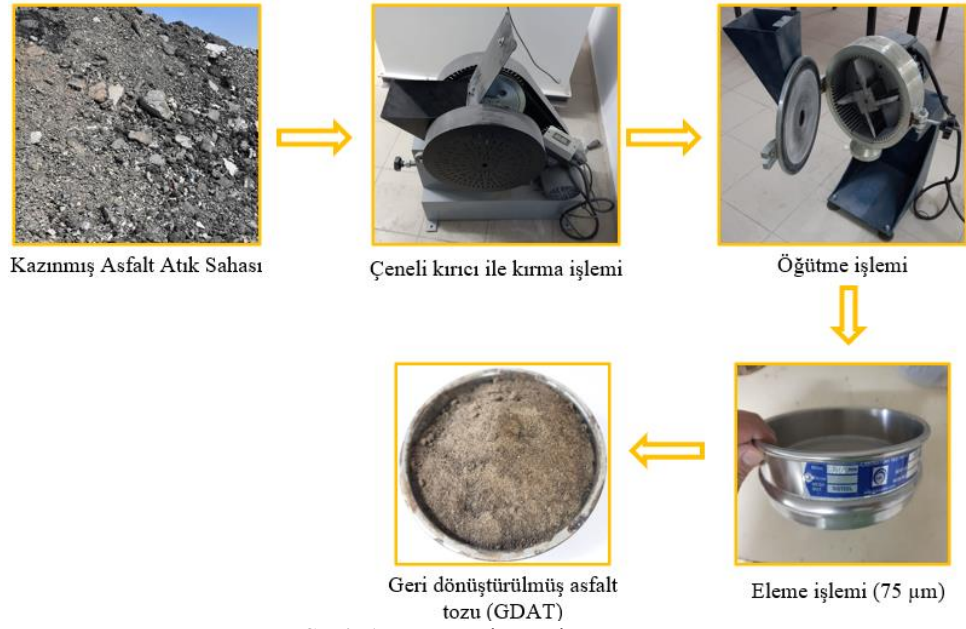
Şahan & Canpolat (2021), kazınmış asfaltı geleneksel betonda ince kum yerine %5, 10, 15 ve 20 oranlarında ikame ederek farklı ortam ısılarında (25, 50 ve 75 °C) mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda kazınmış asfalt miktarının artması sonucu basınç dayanımında azalmalar görülmüş ve ortam sıcaklığına bağlı olarak numunelerde oluşan çatlakların kılcal düzeye indiği tespit edilmiştir. Huang vd., (2005) geri dönüştürülmüş asfalt agregasını betonda hem ince hem de iri agrega olarak kullanmışlardır. Geri dönüştürülmüş asfalt agregasını iri ve ince agrega olarak kullanılması sonucunda eğilme ve basınç dayanımlarında sistematik azalma olduğu görülmüştür. Hossiney vd., (2020, a) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise alkali ile aktive edilmiş beton yol bloklarında geri dönüştürülmüş asfalt agregasının kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmada geri dönüştürülmüş asfalt agregaları, doğal agregalar yerine %25, 50 ve 75 oranında ikame edilerek aşınma direnci, su emme, basınç dayanımı gibi özellikler incelenmiştir. Sonuç olarak geri dönüştürülmüş asfalt agregasının %50 oranına kadar ikame edilebileceği ve üretim maliyetinin %25.8'e kadar düşürülebileceği belirtilmiştir. Hossiney vd., (2020, b) atık asfalt agregası kullanılarak üretilen geopolimer beton yol bloklarının fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Asfalt agregası %0, 20, 40, 60 ve 80 oranlarında ince agrega ve kaba agrega yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Çalışma sonucunda geopolimer beton yol bloklarında asfalt agregasının %60 oranına kadar ikame edilebileceği tespit edilmiştir. Wongkvanklom vd., (2021) geri dönüştürülmüş atık asfalt agregasını geopolimer betonda iri agrega yerine %0, 20 ve 40 oranlarında ikame etmişlerdir. Çalışmalar sonucunda atık asfalt agrega ikame oranının artmasıyla basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Ancak ikame oranının artmasıyla sülfürik aside karşı direnç artmış aynı zamanda porozite ve su emme değerinin de azaldığı tespit edilmiştir.

Ülkemizdeki atık asfalt miktarının fazla olması ve yapılan çalışmalarda geri dönüştürülmüş asfalt tozunu (GDAT), alkali aktifleştirilmiş cüruf (AAS) harçlarda kullanımına rastlanılmamış olması, bu çalışmanın önemli motive kaynağı olmuştur. Yapılan çalışmada GDAT, YFC yerine %0, 10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında ikame edilerek AAS harçlar hazırlanmıştır. Hazırlanan AAS harçlar 100 °C etüvde, 24 saat kür edildikten sonra ultrases geçiş hızı (UPV), eğilme dayanımı ( $f_e$ ) ve basınç dayanımı ( $f_b$ ) deneylerine tabi tutulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot

AAS harçları TS EN 196-1 standardına göre hazırlanmıştır. Karışımlarda standart kum kullanılmıştır. YFC, Bolu Çimento'dan temin edilmiş olup ASTM C989 (ASTM 2014b)'a göre seçilmiştir. GDAT ise kazınmış asfalt kaplamasının öğütülmesi sonucunda elde edilmiştir. GDAT, öğütme işleminin ardından 75 µm'lik elekten elenerek kullanılmıştır. GDAT'nin üretim aşaması Şekil 1'de gösterilmiştir. Karışımlarda alkali aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır.

Tablo 1'de AAS harçlara ait karışım oranları gösterilmiştir. Hazırlanan taze haldeki AAS harçlar, 40×40×160 mm ölçülerindeki kalıplara iki aşamada doldurularak sıkıştırılmıştır. Sonrasında ise 100 °C etüv sıcaklığında 24 saat boyunca kür edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri TS EN 196-1'e göre yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı deneyi ise ASTM C 597-16 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. GDAT'nin üretim aşaması

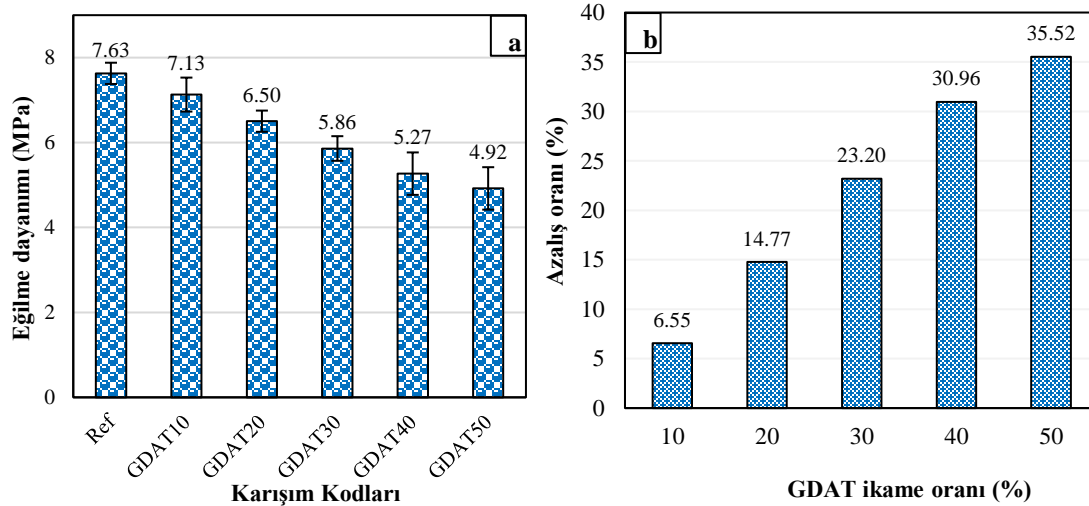
Tablo 1. AAS harçların karışım oranları

Karışım Kodu	YFC (g)	GDAT (g)	GDAT Oranı (%)	Su (g)	Kum (g)	NaOH (g)	Molarite (M)
Ref	450	0	0				
GDAT10	405	45	10				
GDAT20	360	90	20	200.7	1350	108	12
GDAT30	315	135	30				
GDAT40	270	180	40				
GDAT50	225	225	50				

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Eğilme dayanımı ( $f_e$ )

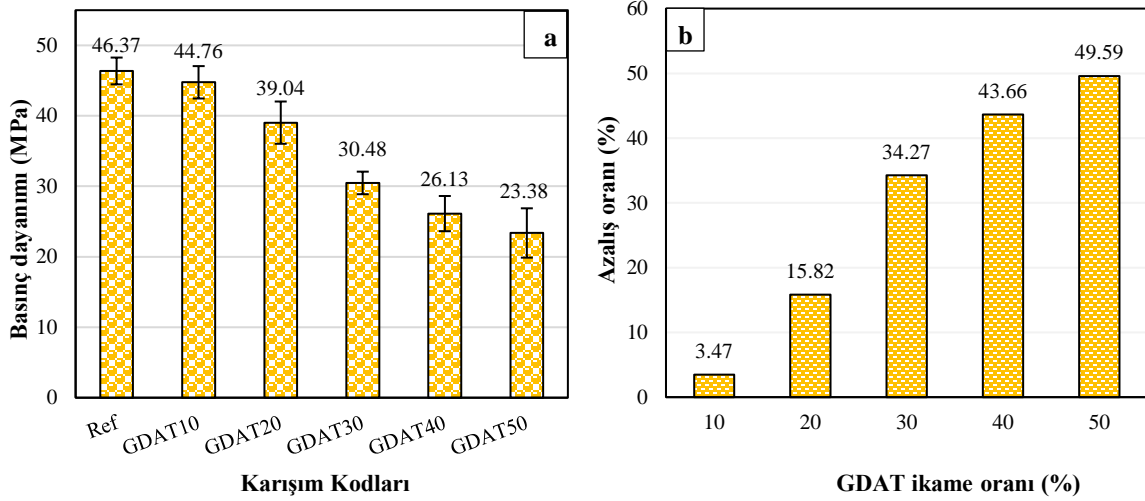
TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen  $f_e$  deney sonuçları Şekil 2 (a)'da verilmiştir. Her bir karışım kodu için 3 adet numune üretilmiş ve bu değerlerin ortalaması nihai  $f_e$  değeri olarak belirlenmiştir. Şekil 2 (b)'de ise GDAT ikame oranı referans harçlara kıyasla  $f_e$  değerlerindeki yüzdesel düşüş oranları verilmiştir.

Şekil 2. (a)  $f_e$  bulguları, (b)  $f_e$  değerlerindeki yüzdesel düşüş oranı

Şekil 2 (a)'da verilen  $f_e$  bulguları incelendiğinde;  $f_e$  değerlerinin 7.63–4.92 MPa arasında değiştiği görülmektedir. GDAT ikame oranı arttıkça  $f_e$  değerlerinde azalışlar görülmüştür. GDAT10, GDAT20, GDAT30, GDAT40 ve GDAT50 kodlu harçların  $f_e$  değerleri, Ref kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %6.55, %14.77, %23.20, %30.96 ve %35.52 oranlarında azalış göstermiştir. Jeopolimer matrisinde bulunan YFC tanecikleri, kalsiyum alümino silikat hidrat (C-A-S-H) veya kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) oluşmasını sağlamaktadır. Bu durum jeopolimerizasyon sürecini artırmaktadır (Puligilla & Mondal, 2013). YFC yerine GDAT ikame edilmesi durumunda jeopolimer matris içerisindeki YFC miktarı azalmaktadır. Bunun sonucunda ise matristeki hidrate eleman yoğunluğu azalmaktadır (Alakara vd., 2022, b). Dolayısıyla GDAT ikame oranının artmasıyla  $f_e$  değerlerindeki düşüşün sebebi bu duruma bağlanmıştır.

### 3.2. Basınç dayanımı ( $f_b$ )

TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen  $f_b$  deney sonuçları Şekil 3 (a)'da gösterilmiştir. Eğilme deneyi sonrasında her bir karışım kodundan elde edilen 6 adet numunenin ortalaması nihai  $f_b$  değeri olarak belirlenmiştir. Şekil 3 (b)'de ise GDAT ikameli AAS harçların, referans harçlara kıyasla  $f_b$  değerlerindeki yüzdesel düşüş oranları gösterilmiştir.

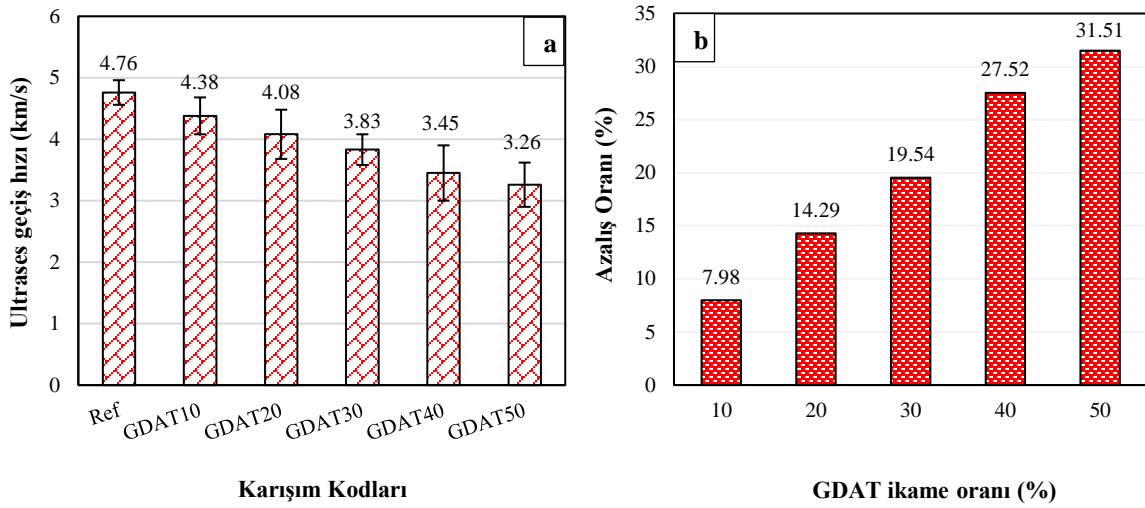


Şekil 3. (a)  $f_b$  bulguları, (b)  $f_b$  değerlerindeki yüzdesel düşüş oranı

Şekil 3 (a) incelendiğinde  $f_b$  değerlerinin 46.37–23.38 MPa arasında değiştiği görülmektedir.  $f_e$  değerlerinde olduğu gibi GDAT ikame oranının artmasıyla  $f_b$  değerlerinde de düşüşler görülmüştür. GDAT10, GDAT20, GDAT30, GDAT40 ve GDAT50 kodlu harçların  $f_b$  değerleri, Ref kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %3.47, %15.82, %34.27, %43.66 ve %49.59 oranlarında azalış göstermiştir.  $f_b$  değerlerindeki düşüş oranları özellikle %20 ikame oranından sonra önemli ölçüde artmıştır. %50 oranında GDAT ikame edilmesi durumunda  $f_b$  değeri, Ref kodlu harçlara kıyasla yaklaşık %50 oranında düşüş göstermiştir. GDAT10 kodlu harçların  $f_b$  değeri ise 44.76 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer 28 gün küre tabi tutulan çimento harçları için gerekli olan minimum dayanım (42.5 MPa) değerinden %5.32 daha yüksektir. Bu değer birçok yapı uygulaması için yeterlidir. Cürufun, jeopolimer matrisini daha yoğun hale getirdiği yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Tan vd., 2020). Ayrıca cürufun, boşlukları ve gözenekleri doldurarak jeopolimer matrisin mukavemetini artırdığı görülmüştür (Song vd., 2019). Dolayısıyla GDAT ikame oranının artmasıyla  $f_b$  değerlerindeki gözlenen düşüşün sebebi, jeopolimer matris içerisindeki YFC miktarının azalmasına bağlanmıştır.

### 3.3. Ultrases geçiş hızı (UPV) deneyi

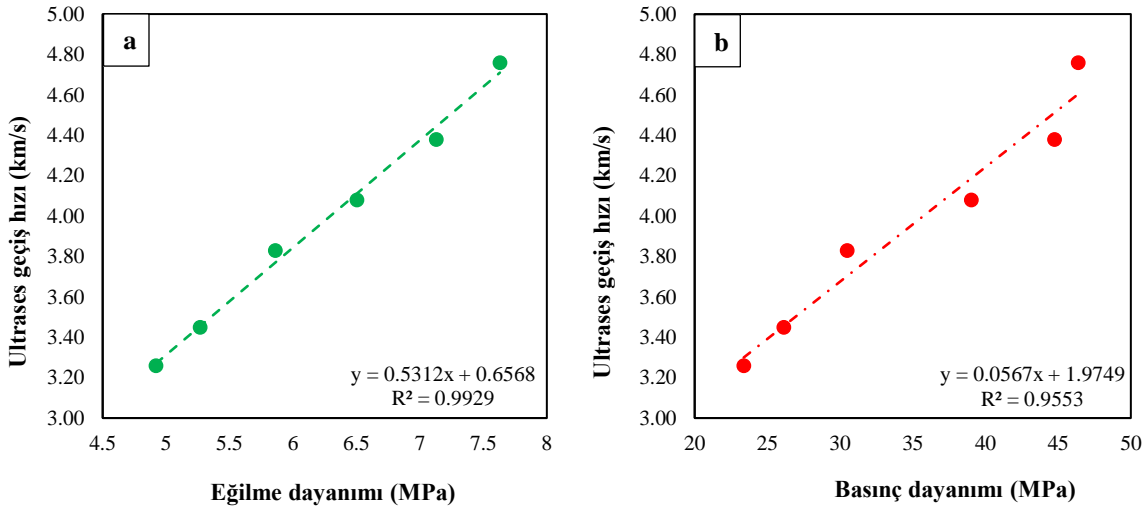
Şekil 4 (a)'da ASTM C 597-16 standardına uygun olarak gerçekleştirilen UPV deney sonuçları gösterilmiştir. Her bir karışım grubu için 3 adet numunedan alınan ölçümlerin ortalaması nihai UPV değeri olarak alınmıştır. Şekil 4 (b)'de ise GDAT ikameli harçların UPV değerlerinin, Ref kodlu harçlara kıyasla yüzdesel düşüş oranları gösterilmiştir.



Şekil 4. (a) UPV bulguları, (b) UPV değerlerindeki yüzdesel düşüş oranı

Şekil 4 (a)'da verilen UPV bulguları incelendiğinde; UPV bulgularının 4.76–3.26 km/s arasında değiştiği görülmektedir.  $f_e$  ve  $f_b$  bulgularında olduğu gibi GDAT ikame oranı arttıkça UPV değerlerinde düşüşler görülmüştür. GDAT10, GDAT20, GDAT30, GDAT40 ve GDAT50 kodlu harçların UPV değerleri, Ref kodlu harçlara kıyasla sırasıyla %7.98, %14.29, %19.54, %27.52 ve %31.51 oranlarında azalış göstermiştir. Whitehurst (1951) sınıflandırmasına göre Ref kodlu harçların “mükemmel”, GDAT10, GDAT20 ve GDAT30 kodlu harçların “iyi” sınıfında, GDAT40 ve GDAT50 kodlu harçların ise “şüpheli” sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Cürufun, boşlukları ve gözenekleri doldurduğu bildirilmiştir (Song vd., 2019). Dolayısıyla GDAT ikame oranının artmasıyla UPV değerlerindeki azalışın sebebi jeopolimer matris içerisindeki YFC miktarının azalmasına ve matristeki gözenekliliğin artmış olmasına bağlanmıştır.

Şekil 5'te  $f_e$  ve  $f_b$  değerleri ile UPV değerleri arasındaki korelasyonlar verilmiştir.  $f_e$  ve  $f_b$  değerlerini, UPV değerleri ile ilişkilendirmek için doğrusal regresyon kullanılmıştır. Elde edilen denklemler ise Şekil 5'teki grafiklerin üzerinde gösterilmiştir.  $R^2$  değerleri Şekil 5 (a) ve (b)'de sırasıyla 0.9929 ve 0.9553 olarak elde edilmiştir. Bu değerler korelasyon için iyi bir güven anlamına gelebilmektedir (Kubba vd., 2018).



Şekil 5. (a)  $f_e$  – UPV, (b)  $f_b$  – UPV arasındaki ilişki

#### 4. Sonuç

Yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş asfalt tozunun (GDAT) alkali aktifleştirilmiş cüruf (AAS) harçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. AAS harçlarında bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve GDAT kullanılmıştır. Karışımlarda GDAT, YFC'nin ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50'si oranında ikame edilerek kullanılmıştır. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- GDAT ikame oranı arttıkça eğilme dayanımı ( $f_e$ ) değerlerinde %6.55–%35.52 arasında değişen oranlarda düşüşler tespit edilmiştir. En yüksek dayanım kaybı %50 GDAT ikameli harçlarda %35.52 olarak görülmüştür.
- GDAT ikame oranı arttıkça basınç dayanımı ( $f_b$ ) değerlerinde düşüşler görülmüştür. Bu düşüşler %3.47–%49.59 arasında değişen oranlardadır. En düşük  $f_b$  değeri %50 GDAT ikameli harçlardan 23.38 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer referans harçlardan yaklaşık olarak %50 oranında daha düşüktür.
- GDAT ikame oranı %20’yi aştıktan sonra  $f_b$  değerlerindeki düşüş daha da artmıştır. %10 GDAT ikameli harçların  $f_b$  değeri ise 44.76 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu değer birçok yapı uygulaması için yeterli bir değerdir.
- $f_e$  ve  $f_b$  değerlerinde olduğu gibi UPV değerleri de GDAT ikame oranı arttıkça azalmıştır. Referans harçlara kıyasla %7.98–%31.51 arasında değişen oranlarda düşüşler görülmüştür. %10, %20 ve %30 GDAT ikameli harçların, Whitehurst (1951) sınıflandırmasına göre “iyi” sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir.
- $f_e$  & UPV ile  $f_b$  & UPV parametreleri arasındaki ilişkilerin oldukça yüksek bir belirleme katsayısı değerine ( $R^2$ ) sahip olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak GDAT’nin %10 ikame oranında kullanılması durumunda dayanım değerlerinde çok fazla bir düşüş göstermediği, özellikle %20 ikame oranından sonra ciddi derecede düşüşlerin görüldüğü tespit edilmiştir. GDAT ikamesi her ne kadar dayanımda düşüşlere sebep olsa da elde edilen değerler birçok yapı uygulaması için yeterli seviyededir. Her yıl milyonlarca ton kazanmış asfaltın meydana geldiği düşünülürse, bu atıkların AAS harçlarda değerlendirilmesiyle hem yeni bir alanda değerlendirilmesi sağlanacak hem de çevre kirliliği önlenecektir. Gelecek çalışmalarda farklı molarite, kür süresi ve kür sıcaklığı gibi parametrelerin GDAT ikameli AAS harçlar üzerindeki etkisi incelenebilir.

## Bilgilendirme

Bu çalışma mühendislik bilimleri araştırma ve geliştirme uygulamaları özel sayısı çağırısı kapsamında değerlendirilmiştir.

## Referanslar

- Alakara, E. H., Nacar, S., Sevim, O., Korkmaz, S., & Demir, I. (2022, a). Determination of compressive strength of perlite-containing slag-based geopolymers and its prediction using artificial neural network and regression-based methods. *Construction and Building Materials*, 359, 129518. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129518](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129518)
- Alakara, E. H., Sevim, Ö., Demir, İ., & Günel, G. (2022, b). Effect of waste concrete powder on slag-based sustainable geopolymer composite mortars. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 13(3), 101-106. [doi.org/10.20528/cjcr.2022.03.003](https://doi.org/10.20528/cjcr.2022.03.003)
- Albidah, A., Alghannam, M., Abbas, H., Almusallam, T., & Al-Salloum, Y. (2021). Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 84-98. [doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.104](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.104)
- Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270, 121857. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857)
- ASMÜD (2021). Rakamlarla Asfalt 2021, [http://www.asnud.org.tr/yayin/Rakamlarla\\_Asfalt\\_Turkiye.pdf](http://www.asnud.org.tr/yayin/Rakamlarla_Asfalt_Turkiye.pdf)
- Bingöl, Ş. (2022). Farklı cüruf türlerinden geopolimer harç üretimi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 173-178.
- Bingöl, Ş., Bilim, C., Atiş, C. D., & Durak, U. (2020, a). Durability properties of geopolymer mortars containing slag. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(1), 561-569.
- Bingöl, Ş., Bilim, C., Duran Atiş, C., Durak, U., İlkentapar, S., & Karahan, O. (2020, b). An investigation of resistance of sodium meta silicate activated slag mortar to acidic and basic mediums. *Revista de la construcción*, 19(1), 127-133.
- Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51, 38-48. [doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005)
- Hossiney, N., Sepuri, H. K., Mohan, M. K., Arjun, H. R., Govindaraju, S., & Chyne, J. (2020, a). Alkali-activated concrete paver blocks made with recycled asphalt pavement (RAP) aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00322. [doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00322](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00322)

- Hossiney, N., Sepuri, H.K., Mohan, M.K., Chandra K. S., Lakshmith Kumar, S., & H K, T. (2020, b). Geopolymer concrete paving blocks made with Recycled Asphalt Pavement (RAP) aggregates towards sustainable urban mobility development. *Cogent in Engineering*, 7(1), 1824572. [doi.org/10.1080/23311916.2020.1824572](https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1824572)
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., & Arulrajah, A. (2016). Strength development of Recycled Asphalt Pavement–Fly ash geopolymer as a road construction material. *Construction and Building Materials*, 117, 209-219. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.136](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.136)
- Huang, B., Shu, X., & Li, G. (2005). Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2008-2013. [doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.05.002](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.05.002)
- Kubba, Z., Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Shah, K. W., Asaad, M. A., Ismail, M., Tahir, M. M., & Mirza, J. (2018). Impact of curing temperatures and alkaline activators on compressive strength and porosity of ternary blended geopolymer mortars. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00205. [doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00205](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00205)
- Manikandan, P., & Vasugi, V. (2021). A critical review of waste glass powder as an aluminosilicate source material for sustainable geopolymer concrete production. *Silicon*, 13(10), 3649-3663. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00929-w>
- Mehta, P.K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International*, 24(7), 23-28.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601-605. [doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010)
- Okoye, F. N., Durgaprasad, J., & Singh, N. B. (2016). Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceramics International*, 42(2), 3000-3006. [doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.084](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.084)
- Podolsky, Z., Liu, J., Dinh, H., Doh, J. H., Guerrieri, M., & Fragomeni, S. (2021). State of the art on the application of waste materials in geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00637. [doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00637](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00637)
- Puligilla, S., & Mondal, P. (2013). Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer. *Cement and concrete Research*, 43, 70-80. [doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.004)
- Shobeiri, V., Bennett, B., Xie, T., & Visintin, P. (2021). A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126669. [doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126669](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126669)
- Song, W., Yi, J., Wu, H., He, X., Song, Q., & Yin, J. (2019). Effect of carbon fiber on mechanical properties and dimensional stability of concrete incorporated with granulated-blast furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117819. [doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117819](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117819)
- Stafford, F. N., Dias, A. C., Arroja, L., Labrincha, J. A., & Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. *Journal of Cleaner Production*, 126, 159-165. [doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.110](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.110)
- Şahan, M. F., & Canpolat, U. (2021). Kazınmış asfalt malzemelerin beton karışımında ince agrega yerine ikame edilmesinin farklı ortam ısısı altındaki betonların basınç dayanımlarına etkisi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(15), 307-314. [doi.org/10.54365/adyumbd.927197](https://doi.org/10.54365/adyumbd.927197)
- Tan, J., Cai, J., Li, X., Pan, J., & Li, J. (2020). Development of eco-friendly geopolymers with ground mixed recycled aggregates and slag. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120369. [doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120369](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120369)
- Whitehurst, E. (1951). Soniscope tests concrete structures, *In Journal Proceedings*, 47 (2), 433-444.
- Wongkvanklom, A., Posi, P., Kampala, A., Kaewngao, T., & Chindaprasirt, P. (2021). Beneficial utilization of recycled asphaltic concrete aggregate in high calcium fly ash geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00615. [doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00615](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00615)