



Uçucu kül, cam tozu ve çimento esaslı hibrit geopolimer harçların mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi ve yaşam döngüsü analizi (YDA)

Effect of high temperature on mechanical properties of fly ash, glass powder, and cement-based hybrid geopolymer mortars and life cycle assessment (LCA)

Bilal Baran^{1,*}, Serhat Çelikten², İsmail İsa Atabey³

^{1,2,3} Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

Öz

Bu çalışmada, havada kür edilen uçucu kül (UK) ve atık cam tozu (CT) esaslı geopolimer harçlar ile Portland çimentosu (PÇ) içeren geleneksel ve hibrit (UK+PÇ, CT+PÇ, UK+CT+PÇ) geopolimer harçların mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Harç numunelerine yüksek sıcaklık öncesi ve 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası ayrı ayrı eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca üretilen harçlara Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) uygulanarak karışımların Küresel Isınma Potansiyeli (KIP, eşdeğer CO₂ emisyonları) değerleri hesaplanmıştır. Geopolimer ve hibrit harç karışımlarında alkali aktivatör olarak sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) kullanılmıştır. UK, CT ve PÇ'nin eşit miktarda kullanıldığı hibrit geopolimer karışımında, bu üç malzemenin bir arada kullanıldığı diğer hibrit geopolimer harçlara göre daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Üç malzemenin de eşit miktarda kullanılması hem malzemelerin etkin kullanımı hem de performans açısından sinerjik bir etki görülmesini sağlamıştır. Hibrit geopolimer harçlarda 800 °C'de deney öncesine göre %280'e varan dayanım artışları tespit edilmiştir. %100 PÇ içeren kontrol karışımına göre CO₂ emisyonlarında, sadece UK veya CT içeren geopolimer harçlarda % 47.7'ye, UK, CT ve PÇ'nin beraber kullanıldığı hibrit geopolimer harçlarda ise %31'e varan azalmalar kaydedilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hibrit geopolimer, Yaşam Döngüsü Analizi (YDA), Yüksek sıcaklık, Cam tozu, Çimento

1 Giriş

Geleneksel Portland çimentosu (PÇ) üretiminde atmosfere CO₂ salınımı meydana gelir [1]. Bu sebeple, PÇ malzemesine alternatif daha düşük CO₂ salınımına sahip çimento esaslı malzemelerin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Bu alternatiflerden bazıları alkali ile aktive olan malzemeler, geopolimerler ve hibrit çimento esaslı malzemelerdir. Bu malzemeler çoğunlukla endüstriyel yan ürünler olan hammaddeler, atıklar ve ticari değeri olmayan malzemelerden meydana gelmektedir. Ayrıca, bu malzemelerin üretimleri için enerji gereksinimleri düşüktür; buna bağlı olarak karbon ayak izleri de düşüktür. [2]. Alkali aktif malzemelerin üretiminde harcanan enerji çimento

Abstract

In this study, the effect of high temperature on the mechanical properties of air-cured fly ash (FA) and waste glass powder (GP) based geopolymer mortars and conventional and hybrid (FA+GP, GP+PC, FA+GP+PC) geopolymer mortars containing Portland cement (PC) were investigated. Flexural and compressive tests were applied to the mortar samples separately before high temperature and after 400 °C, 600 °C, and 800 °C. In addition, the Global Warming Potential (GWP, equivalent CO₂ emissions) values were calculated by applying the Life Cycle Assessment (LCA). Sodium silicate (SS) and sodium hydroxide (SH) were used as alkali activators in geopolymer and hybrid mortar mixtures. In the hybrid geopolymer mixture, in which FA, GP, and PC were used in equal amounts, higher strengths were obtained than that of the other hybrid geopolymer mortars in which these three materials were used together. The use of equal amounts of all three materials provided a synergistic effect regarding both the effective use of materials and performance. Compressive strength increases of up to 280% were determined at 800 °C compared to before the test in hybrid geopolymer mortars. Compared to the control mixture containing 100% PC, reductions in CO₂ emissions were obtained by up to 47.7% in geopolymer mortars containing only FA or GP, and up to 31% in hybrid geopolymer mortars in which FA, GP, and PC were used together.

Keywords: Hybrid geopolymer, Life Cycle Assessment (LCA), High temperature, Glass powder, Cement

üretiminde harcanan enerjiye kıyasla genellikle daha azdır [3]. Üretim süreçlerindeki çevresel avantajlara ek olarak, alkali ile aktive olan malzemeler, geopolimerler ve hibrit çimento esaslı malzemelerden oluşan ürünler mekanik performans, asit direnci, yüksek ısıya karşı direnç ve düşük ısı iletkenliği gibi üstün özellikleri nedeniyle hizmet ömründe ilave değerler sağlanabilir [4,5].

Yenilikçi bir yapı malzemesi olan geopolimer bağlayıcılar çeşitli alumino-silikat içerikli puzolanların alkali eriyiklerle aktivasyonu ile elde edilmektedir. Bu bağlayıcı malzemeler genellikle endüstriyel atıklardan elde edilirken; bu durum geopolimerleri çevresel etki bakımından çimentoya üstün kılmaktadır. Bununla birlikte, geopolimer

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / bilalbaran@nevsehir.edu.tr (B. Baran)

Geliş / Received: 24.02.2023 Kabul / Accepted: 16.05.2023 Yayınlanma / Published: 15.07.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1256043

bağlayıcı kullanılan karışımlarda ısı kütür gereksinimi bulunması, bu bağlayıcıları enerji tüketimi ve yapılarda yerinde üretilebilirlik açısından çimentoğa göre dezavantajlı duruma getirmektedir.

Hibrit geopolimerler, çeşitli aktivatör kombinasyonları kullanılmasına rağmen özellikle ortam koşullarında istenilen mekanik özelliklerin elde edilemediği geopolimerlerin düşük oranlarda çimento içeriği ile ortam koşullarında üretilebilirliği düşüncesiyle ortaya çıkmıştır. Bu sayede geopolimerlerin ısı kütür ihtiyacı ortadan kalkabilir ve çok düşük çimento içeriği ile çevreci ve ekonomik bir bağlayıcı elde edilebilir. Son zamanlarda hibrit geopolimer üretimi ve bu bağlayıcıların özelliklerinin ortaya konması üzerine yapılmış çalışmalar olsa da bu konuda literatürde kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Uçucu kül (UK), termik santrallerdeki elektro filtreler tarafından tutulan çok ince taneciklerdir [6]. UK malzemesinin yaygın olarak kullanıldığı sektörlerden biri de çimento sanayisidir. UK çimento yerine katkı malzemesi olarak kullanılırken; UK kullanımı sonucunda ekonomi [7], permeabilite [8], alkali agrega gelişimi [9], kimyasal direnç [10], atık kullanımı [11, 12] ve rötre [13] gibi parametrelerde avantajlar sağlanabilmektedir.

Dünyada her yıl büyük miktarlarda atık cam ortaya çıkmaktadır. Birleşmiş Milletler, dünyada ortaya çıkan katı atıkların yıllık 200 milyon ton olduğunu, bu atıkların %7'sinin cam olduğunu tahmin etmektedir. Türkiye için ise bu miktarın 120000 ton olduğu, atıkların ancak 80000 tonunun geri dönüştürülebildiği belirtilmektedir [14]. Atık cam geri dönüştürülebilir olmakla birlikte; toplanan atık camın kaliteleri ve renkleri farklı olduğundan üretilecek olan yeni camda öngörülemeyen renk ve özelliklere sebep olmaktadır [15, 16]. Atık camlar geri dönüştürülemez ise depolama alanlarında bekletildiğinden; silis bakımından zengin atık camlardaki renk farkının önemli bir faktör olmadığı inşaat vb. alanlarda atık camların agrega [17], dolgu malzemesi [18], alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcı üretimi [16, 19] ve katkı malzemesi olarak [20] kullanılabilmesi göz önünde bulundurulmalıdır.

Literatür incelendiğinde UK ve CT ile üretilen geopolimer ve hibrit bağlayıcılar ile ilgili yapılmış bazı çalışmalar özetlenmiştir. Jiang vd. [21], farklı koşullarda kürlenmiş CT ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu esaslı numunelerin boyutunun fiziksel özellikleri ve mikro özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda numune boyutu etkisinin geopolimerlerde önemli olduğunu ve numune boyutunun artmasıyla basınç dayanımının azaldığı belirtilmiştir. Mikroyapı incelemesinde daha küçük boyutlu geopolimer numunelerinde daha yüksek reaksiyon derecesi gözlemlenmiştir. Yüksek kütür sıcaklığı ve yüksek bağıl nemde daha iyi mekanik performans elde edilmiştir.

Schwarz vd. [22], CT, UK ve PÇ içeren beton karışımları üzerinde yaptıkları çalışmalarında, CT ve UK ile modifiye edilmiş çimento esaslı betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerini araştırmıştır. Dayanım için çimento ile %10 CT ikamesinin etkin olduğu belirtilirken, genişleme azaltmada %20'ye kadar UK-CT karışımının etkili olduğu ifade edilmiştir.

Duan vd. [23], çalışmalarında içme suyu arıtma çamuru ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu atık malzemelerini kullanarak çevre dostu bir alkali aktif malzeme geliştirmiştir. Tasarladıkları karışımlarda kum/bağlayıcı oranı 2.75'tir. Her karışım için ağırlıkça farklı sodyum silikat (SS)/sodyum hidroksit (SH) oranlarına sahip üç grup aktivatör değerlendirilmiştir. Bir grup numune plastik örtü ile kaplanmış ve 60 °C sıcaklıkta 24 saat kürlenirken; diğer grup numuneler 28 gün süreyle 23 °C kütür odasında kürlenmiştir. Deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanımını (67 MPa), 40/60 arıtma çamuru/fırın cürufu ve 1.5 SS/SH içeren alkali aktif malzeme ile yapılan harç numunelerinde tespit edilmiştir. %40 arıtma çamuru içeriğinin numunelerin gözenek yapısını iyileştirebileceğini ve geopolimerizasyonu destekleyebileceğini belirtilmiştir. %60'tan fazla arıtma çamuruna sahip numunelerde ise aşırı alüminanın eksik reaksiyona ve gözenekli jel yapısına yol açtığını tespit edilmiştir.

Sun vd. [24], alkali ile aktive edilmiş hibrit beton üretmek için yüksek fırın cürufunun uçucu kül ile değiştirilmesi durumunda karışımların reaksiyonu, taze ve sertleşmiş özelliklerini araştırmışlardır. SH ve SS'i beraber kullanarak hibrit bir aktivatör elde etmişlerdir. 2 farklı alkali aktif malzeme betonu üretmişlerdir. Numunelerdeki uçucu kül oranları %10-40 arasında değiştirilmiştir. Betonda uçucu kül içeriği artırıldığında reaksiyon kinetiği üzerinde geciktirme etkisi olduğu; düşük silikat modülüne (0.25) sahip karışımlarda ise basınç mukavemetinde azalma olduğu tespit edilmiştir.

Huang vd. [25], mukavemet değerlerini artırmak için az miktarda sodyum veya potasyum sitratın eklendiği sodyum veya potasyum karbonat tarafından aktive edilen hibrit alkali çimentonun mukavemet gelişimini araştırmıştır. Hibrit karışımlarında kütlece %72 uçucu kül, %20 çimento ve %8 cüruf kullanılmıştır. Hibrit alkali karışımda sodyum karbonat veya potasyum karbonat miktarı toplam bağlayıcının %4,75'ine sabitlenmiştir. Mukavemete etkisini kontrol etmek amacıyla katkı maddesi olarak %1 SS, sodyum sitrat veya potasyum sitrat kullanılmıştır. Karışıma %1 sodyum veya potasyum sitrat eklendiğinde 28 günlük basınç dayanımının, 38,5 MPa'dan 72,4 MPa'ya yükseltilebileceği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, sodyum veya potasyum sitrat kullanımının daha yoğun C-S-H yapısının oluşmasına katkı sağladığı belirtilmiştir. Hibrit alkali çimento esaslı karışımlar, sadece PÇ kullanılan karışımlar ile karşılaştırıldığında emisyonların %73, maliyetlerin ise %28'e kadar azaltılabileceği belirtilmiştir.

Onaizi vd. [26], çalışmalarında CT, UK ve PÇ içeren beton karışımı geliştirmiştir. Su/çimento (s/ç) oranı 0,50 ve 0,45 olacak şekilde iki grup oluşturulmuştur. Deneyler sonucunda CT malzemesinin betonun işlenebilirliğini azalttığı tespit edilmiştir. %5 CT içeren betonların basınç dayanımları, kontrol beton numunesine göre daha yüksek elde edilmiştir.

Lan vd. [27], çalışmalarında alüminosilikat tamamlayıcı çimento esaslı malzemeler olarak UK, metakaolin ve silis dumanı kullanmış ve alkali ile aktive edilmiş geopolimer hibrit bağlayıcı sentezi için UK ile karıştırmıştır. Bu karışımın mineral bileşimi ve yüzey morfolojisinin yanı sıra

basınç dayanımını artıran mekanizmalar incelenmiştir. Alkali aktivatör olarak SS ve SH kullanılmıştır. Kalıplar 50 °C ve >%90 nemde 24 saat bekletilmiştir. Yaptıkları çeşitli deneyler sonucunda karışımın katı atık külündeki ağır metalleri hareketsiz hale getirdiği ve basınç dayanımının artmasına katkıda bulunduğu belirtilmiştir. Katı atık külü, UK ve metakaolin içeren karışımlarda basınç dayanımı 9.06 MPa değerine kadar ulaşmıştır. 70:30 kütle oranında katı atık külü ve silis dumanının 1,6 M alkali aktivatör modülü ile karıştırılmasıyla sentezlenen karışımın basınç dayanımının, 11.2 MPa değerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Tho-In vd. [28], çimentosuz CT ve UK içeren geopolimer harçların basınç dayanımlarını ve mikro yapılarını incelemiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Numuneler 60±2 °C'de 48 saat kür edilmiştir. CT malzemesinin, 34-48 MPa'lık 7 günlük basınç dayanımlarına sahip geopolimer harçlar üretmek için UK yerine kullanılabilceği tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ve cıva intrüzyon porozimetrisi ile karakterize edilen yoğun mikro yapının, basınç mukavemeti ile ilişkili olduğu; UK malzemesini %10-20 oranlarında CT ile değiştirmenin optimum sonuçları verdiği belirtilmiştir.

Soares vd. [29], ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerde %10, %20, %30 ve %50 CT ile PÇ ikamesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Karışımlarda kütlece sabit silis dumanı kullanılmıştır. Numuneler kirece doygun suda kür edilmiştir. Çalışma sonucunda, Portland çimentosunun %50'sine kadar ikame olarak cam tozu kullanımının 28 günlük mekanik parametreleri önemli ölçüde etkilemediği tespit edilmiştir.

Atabey ve Ay [30], atık cam tozu kullanarak ürettikleri geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine kalsiyum alüminat çimentosunun farklı kür koşullarında etkisini araştırmıştır. Atık cam tozu ve farklı oranlarda kalsiyum alüminat çimentosu içeren geopolimer harçlar üretmişlerdir. Ürettikleri geopolimer harçları etüv ve hava + etüv olmak üzere 2 farklı yöntem ile kürlemişlerdir. Numuneler üzerinde yayılma tablası, su emme-boşluk oranı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, en yüksek basınç dayanımları, hava+etüv küründe %5 kalsiyum alüminat çimentosu ile üretilen harçlardan elde edilmiştir.

Turgut [31], karışımlarında UK, kireç ve CT kullanmıştır. Üç malzemeyi farklı oranlarda kullanarak, ısıl kür ile 180 adet numune üretmiştir. Numunelerin yoğunluk, su emme, basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı ve kılcal su emme deneylerini yapmıştır. Deneyler sonucunda, 72 saatlik ısıl kür sonunda, CT ve kireç içeren numunelerin

kılcal su emme değerlerinde azalma, basınç dayanımı ve yarmada-çekme dayanımında ise artış tespit etmiştir.

Bu çalışmada, havada (20±5 °C, %65 nem) kür edilen UK ve CT esaslı geopolimer, CEM I 42.5R çimento esaslı geleneksel harçlar ve hibrit (UK+PÇ, CT+PÇ, UK+CT+PÇ) geopolimer harçların mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen çimento esaslı ve geopolimer karışımlara 400 °C, 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklık deneyleri, eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca üretilen karışımlar için Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) yapılarak karışımların Küresel Isınma Potansiyeli (KIP, eşdeğer CO₂ emisyonları) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan KIP değerlerine göre çimento esaslı, geopolimer ve hibrit geopolimer harçların çevresel etkileri değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak CT, UK ve PÇ kullanılmıştır. CT, UK ve PÇ malzemelerinin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. CT, geri dönüşüm camın mikronize boyutta öğütülmesi ile elde edilmiştir. F sınıfı UK Sugözü Termik Santrali'nden (Adana, Türkiye) temin edilmiştir. Kullanılan UK malzemesinin 45 µm elek üzerindeki kalıntısı %21 ve özgül ağırlığı 2.30 g/cm³'dür. Hibrit harç karışımlarında CEM I 42.5R Portland çimentosu kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak Sodyum silikat (SS) ve Sodyum hidroksit (SH) kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmada 1 adet PÇ ile üretilen kontrol grubu harç (K1), 2 adet sadece UK veya CT ile üretilen geopolimer harç (K2, K3) ve 5 adet de PÇ, UK ve CT malzemelerinin ikili veya üçlü karışımları ile üretilen hibrit geopolimer harç karışımları (K4-K5-K6-K7-K8) oluşturulmuştur. Oluşturulan karışımlar Tablo 2'de sunulmuştur. Karışımlarda kullanılan dere kumunun su emme oranı %1.96, özgül ağırlığı 2.69 g/cm³'dür. Dere kumunun tane dağılımı Tablo 3'te verilmiştir. Her karışımdan 6 adet 3 gözlü 4x4x16 cm prizma kalıp olmak üzere toplam 144 adet numune üretilmiştir. Geleneksel harçlar standart koşullarda (sıcaklığı 21±1 °C olan kür havuzunda) diğer harçlar ise havada (20±5 °C, %65 nem) kür edilmiştir. Havada kür edilen harçlar üzerinde TS EN 196-1 [32] standardına göre 7, 28 ve 56 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık deneylerinde fırın hedef sıcaklığa ulaşmaya kadar 5 °C/dk hızla ısıtılmıştır. Numuneler hedef sıcaklıkta 1 saat bekletilmiş olup, daha sonra yavaşça soğumaya bırakılmıştır.

Tablo 1. Atık cam tozu, uçucu kül ve çimentonun kimyasal kompozisyonu

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	K. K.	Yoğ. (g/cm ³)
CT	62.40	0.89	0.42	7.31	3.71	-	11.07	-	14.20	2.57
UK	61.40	21.68	7.82	1.85	1.83	0.72	1.19	0.29	3.22	2.30
PÇ	17.02	3.94	4.82	61.98	2.99	3.87	0.62	0.92	3.84	3.11

Yüksek sıcaklık deneyleri 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık deneyleri sonucunda ağırlık kayıpları ölçülmüş olup, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca üretilen karışımlar için Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) yapılarak karışımların Küresel Isınma Potansiyeli (KIP, eşdeğer CO₂ emisyonları) değerleri hesaplanmıştır. Atık malzemeler kullanılarak üretilen karışımların çevreye olan etkilerini incelemek için Küresel Isınma Potansiyeli (KIP, eşdeğer CO₂ emisyonları) yöntemi kullanılmıştır. **Denklem 1**, Toplam KIP değerini tahmin etmek için kullanılmaktadır [33]. **Denklem 1**'de, KIP (kg CO₂/m³), küresel ısınma potansiyelini temsil etmektedir. L_k (km) malzemenin taşınma mesafesidir, e_k ve e_{ulaşım}, belirli bir hammadde taşıma türü için emisyon katsayılarıdır.

$$KIP_k = \sum küttele_k [e_k + (L_k \cdot e_{ulaşım})] \quad (1)$$

k = Atık cam, Cam tozu, Portland Çimentosu, Uçucu Kül, Su, NaOH, Na₂SiO₃, Kum

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Eğilme dayanımı

Tüm harç numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları **Şekil 1(a)**'da verilmiştir. Kontrol grubu K1 harcının 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 6.97, 7.60, 8.32 MPa elde edilmiştir. Sadece UK içeren K2 numunelerinde 28 günlük eğilme dayanımı 1.19 MPa elde edilirken; sadece CT içeren K3 numunesinde 0.99 MPa olarak tespit edilmiştir. K2 ve K3 numunelerinde havada kür ile yeterli eğilme dayanımı elde edilememiştir. Hibrit geopolimer K4, K5, K6, K7 ve K8 numunelerinde havada kür sonucunda 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 4.40, 3.60, 2.92, 3.18 ve 3.35 MPa olarak tespit edilmiştir. Aynı miktarda PÇ içeren K4, K5 karışımlarının 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde, UK içeren K4 karışımı, CT içeren K5 karışımına göre %22 daha yüksek eğilme dayanımı kazanmıştır. K6, K7 karışımlarının 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde ise UK:CT oranı 1:4 olan K7 karışımında, UK:CT oranı 4:1 olan K6 karışımına göre %9 daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. UK, CT ve PÇ'nin eşit miktarda kullanıldığı K8 harcının 28 günlük eğilme dayanımları değerlendirildiğinde, bu üç malzemenin bir arada kullanıldığı diğer hibrit geopolimer harçlara göre daha yüksek eğilme dayanımları elde edilirken; K8 numunesinin eğilme dayanımı, K6 ve K7 numunelerinin dayanımlarına göre sırasıyla %14.7 ve %5.3 daha yüksektir.

Tüm harç numunelerinin 400 °C, 600 °C, 800 °C yüksek sıcaklık altındaki eğilme dayanımları **Şekil 1(b)**'de verilmiştir. Yüksek sıcaklık deneyi sonuçları değerlendirildiğinde, 28 günlük eğilme dayanımına göre; çimentonun geleneksel davranışa uygun olarak kontrol grubu K1 harcında 400 °C'de %27, 600 °C'de %71 ve 800 °C'de %91 eğilme dayanımı kaybı tespit edilmiştir. Sadece UK içeren K2 karışımında 400 °C'de %80, 800 °C'de %42 dayanım artışı elde edilirken; 600 °C'de %32 düşüş tespit edilmiştir. Sadece CT içeren K3 karışımında deney öncesine göre 400 °C'de %45, 600 °C'de %23 ve 800 °C'de %231 dayanım artışı görülmüştür. K4 harcında 400 °C, 600 °C ve

800 °C'de sırasıyla %61, %79 ve %81 dayanım düşüşü tespit edilmiştir. K5 harcında da 400 °C ve 600 °C'de benzer davranış gözlenirken; 800 °C'de %66 dayanım düşüşü meydana gelmiştir. UK:CT oranı 4:1 olan K6 karışımında deney öncesine göre 400 °C ve 600 °C'de sırasıyla %56, %80 dayanım düşüşü görülürken; 800 °C'de %30 mertebesinde daha sınırlı bir dayanım düşüşü meydana gelmiştir. UK:CT oranı 1:4 olan K7 karışımında ise 400 °C ve 600 °C'de sırasıyla %56, %73 dayanım düşüşü görülürken; 800 °C'de %45 eğilme dayanımı artışı gerçekleşmiştir. UK, CT ve PÇ'nin eşit miktarda kullanıldığı K8 harcında, 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de deney öncesine göre sırasıyla %76, %72 ve %62 dayanım düşüşü gözlenmiştir.

Tablo 2. Hibrit harç karışımları, gr

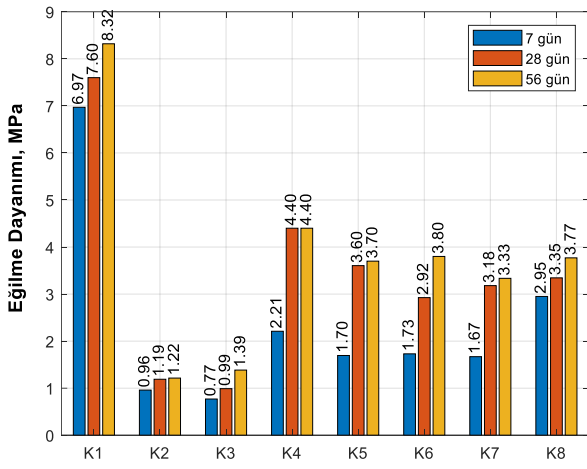
Karışım	UK	CT	PÇ	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Su	Kum
K1	0	0	450	0	0	202.5	1300
K2	450	0	0	120	60	130	1300
K3	0	450	0	120	60	130	1300
K4	300	0	150	120	60	130	1300
K5	0	300	150	120	60	130	1300
K6	300	75	75	120	60	130	1300
K7	75	300	75	120	60	130	1300
K8	150	150	150	120	60	130	1300

Tablo 3. Dere kumuna ait tane dağılımı

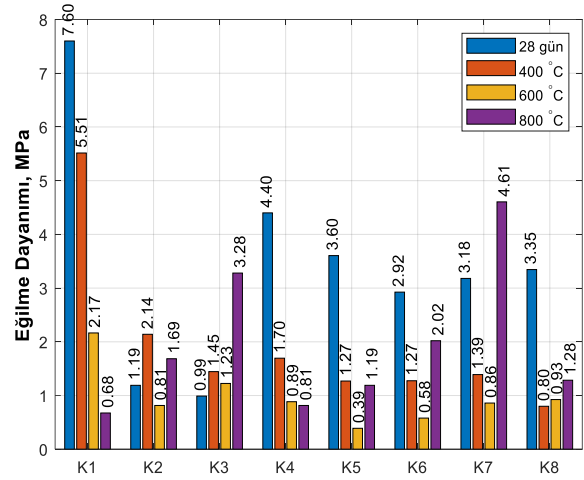
Elek Çapı, mm	Geçen, %
4.00	99.3
2.00	64.9
1.00	40.3
0.5	21.4
0.25	10.0
0.125	3.4
0.063	1.1

3.2 Basınç dayanımı

Tüm harç numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları **Şekil 2(a)**'da verilmiştir. Kontrol grubu K1 harcında su havuzu kürü sonucunda 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 39.05, 48.20, 49.05 MPa elde edilmiştir. Sadece UK içeren K2 numunelerinde 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 6.38, 11.40 ve 16.10 MPa elde edilirken; sadece CT içeren K3 numunelerinde sırasıyla 4.30, 5.58 ve 9.38 MPa olarak tespit edilmiştir. Hibrit karışım olmayan bu numunelerin havada kür ile yeterince dayanım kazanmadıkları görülmüştür. Hibrit geopolimer K4, K5, K6, K7 ve K8 numunelerinde havada kür sonucunda 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 31.98, 14.65, 21.02, 13.80 ve 24.45 MPa olarak tespit edilmiştir. Aynı miktarda PÇ içeren K4, K5 karışımlarının 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, UK içeren K4 karışımı, CT içeren K5 karışımına göre %118 daha yüksek dayanım kazanmıştır. K6, K7 karışımlarının 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde ise UK:CT oranı 4:1 olan K6 karışımında, UK:CT oranı 1:4 olan K7 karışımına göre %52



(a)



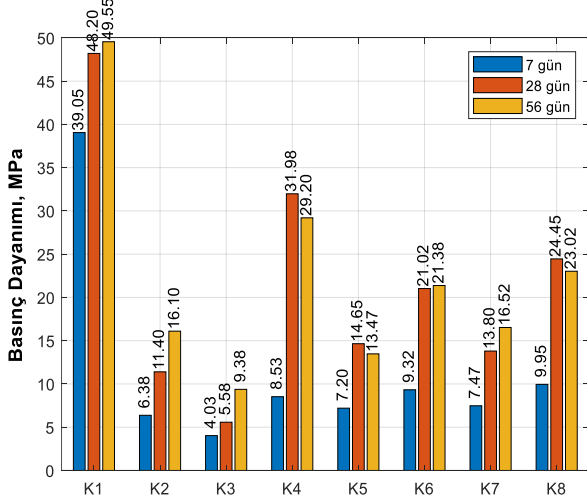
(b)

Şekil 1. (a) Harçların havada kür sonrası 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları ve (b) yüksek sıcaklık (400 °C, 600 °C, 800 °C) deneyi sonrası eğilme dayanımları

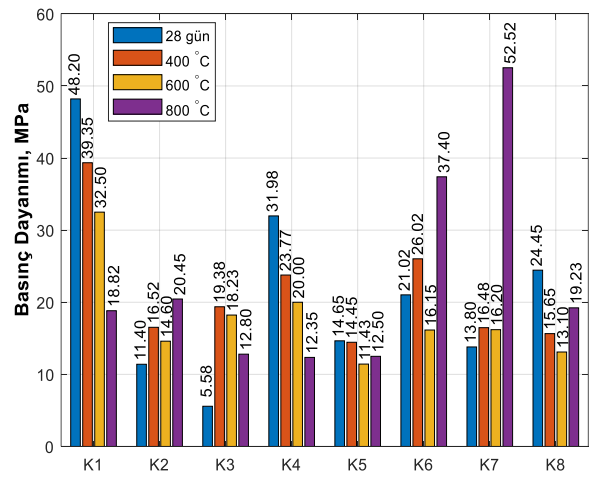
daha yüksek dayanım elde edilmiştir. K4 (2:1, UK:PÇ) karışımında K5 (2:1, CT:PÇ) karışımından, K6 (4:1:1, UK:CT:PÇ) karışımında ise K7 (4:1:1, CT:UK:PÇ) karışımından daha yüksek basınç dayanımı elde edilmesi, uçucu külün cam tozuna göre kullanılan aktivatör içeriği ile daha reaktif olduğunu ve çimento ile ikili karışım durumunda daha iyi etkileşim göstermiştir. UK, CT ve PÇ'nin eşit miktarda kullanıldığı K8 harcında, bu üç malzemenin bir arada kullanıldığı diğer hibrit geopolimer harçlara göre daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımları değerlendirildiğinde K8 numunesinin basınç dayanımı, K6 ve K7 numunelerinin dayanımlarına göre sırasıyla %16 ve %66 daha yüksektir. K8 karışımı, üç malzemeden de eşit miktarda içerdiğinden hem malzemelerin etkin kullanımı hem de performans açısından

sinerjik bir etki görülmesini sağlamıştır. Literatürde Schwarz vd. [22], bu çalışma kapsamındaki K3 ve K4 karışımına benzer olarak, CT ve UK'yu ayrı ayrı kullanmış ve suda kür ile 40 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Onaizi vd. [26], suda kürlenmiş 10:1 UK-CT içeren karışımında yaklaşık 45 MPa, 10:2 UK-CT içeren karışımında yaklaşık 35 MPa basınç dayanımı elde etmiştir. Tho-In vd. [28], UK ve CT'yi beraber kullandığı karışımlarında ısıllı kür ile 33-47 MPa aralığında basınç dayanımları elde etmişlerdir. Literatürde hibrit geopolimer harçlarla ilgili çalışmalarda havada kür işlemine rastlanmamıştır.

Tüm harç numunelerinin 400 °C, 600 °C, 800 °C yüksek sıcaklık altındaki basınç dayanımları Şekil 2(b)'de verilmiştir.



(a)



(b)

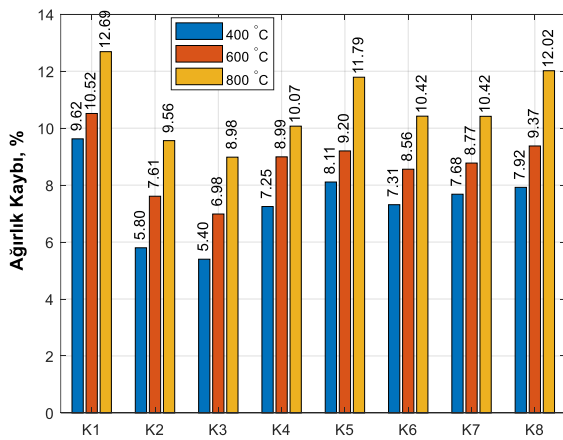
Şekil 2. (a) Harçların havada kür sonrası 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları ve (b) yüksek sıcaklık (400 °C, 600 °C, 800 °C) deneyi sonrası basınç dayanımları

Yüksek sıcaklık deneyi sonuçları değerlendirildiğinde, 28 günlük basınç dayanımına göre; kontrol grubu K1 harcında 400 °C'de %18, 600 °C'de %32 ve 800 °C'de %61 dayanım kaybı tespit edilmiştir. Bu davranış çimentonun geleneksel davranışa uygundur. 400 °C'de Ca(OH)₂ çözülmüş 570 °C civarında silis esaslı kum genleşmiş ve bu sıcaklığın üzerinde de CSH jelleri bozunması belirgin olmaya başlamıştır [34]. Sadece UK içeren K2 karışımında 400 °C'de %45, 600 °C'de %28 ve 800 °C'de deney öncesine göre %79 dayanım artışı elde edilirken; sadece CT içeren K3 karışımında 400 °C'de %247, 600 °C'de %226 ve 800 °C'de %129 dayanım artışı görülmüştür. Bu karışımlar sadece CT ve UK ile üretildiklerinden yüksek sıcaklık bu karışımlarda ısı kuru etkisi yapmış ve 400 °C'de dayanımları % 247'ye varan oranlarda artmıştır. Ancak daha yüksek sıcaklıklarda mikro çatlak oluşumu ve özellikle cam tozlu numunede serbest NaOH'ın genleşmesinden kaynaklı dayanım kayıpları gözlenmiştir. Geopolimerik reaksiyonlar için gerekli ısı kuru olmadığından NaOH ortamda serbest kalmıştır. K4 karışımı da dayanım düşüşünde kontrol grubu ile benzer davranış göstermiştir. K5 harcında ise dayanım düşüşleri daha sınırlı kalırken; 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de deney öncesine göre sırasıyla %1, %22 ve %14 dayanım düşüşü tespit edilmiştir. K4 ve K5 karışımlarında, CaO içeriğinin yüksekliği sıcaklığa karşı direnci düşürdüğünden 1/3 oranında çimento içeriği, sıcaklıkla beraber dayanım kaybında etkin olabilmektedir [34]. UK:CT oranı 4:1 olan K6 karışımında 400 °C ve 800 °C'de deney öncesine göre sırasıyla %24 ve %77 dayanım artışı görülürken; 600 °C'de %23 dayanım düşüşü tespit edilmiştir. UK:CT oranı 1:4 olan K7 karışımında ise tüm sıcaklık değerlerinde artış görülmüştür. K7 harcında 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de deney öncesine göre sırasıyla %19, %17 ve %280 dayanım artışı elde edilmiştir. K6 ve K7 numunelerinde 400 °C'de ısı kuru kurlenme nedeniyle dayanım artışı görülürken; 600 °C'de sıcaklık etkisi fazla olduğundan dayanım artışı azalmış ve malzemedeki aşırı su kaybı mikro çatlak oluşumuna yol açmıştır. 800 °C'de ise muhtemelen malzeme içerisinde yeni kristal faz oluşumları meydana gelmiş ve bu fazlar yüksek

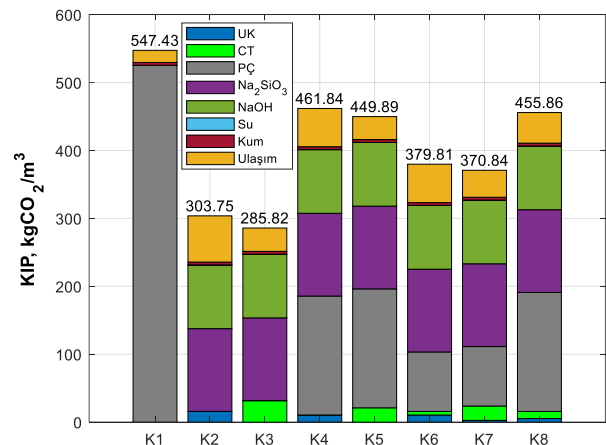
sıcaklıktan deney öncesi içeriğe göre daha az etkilenmiştir. Deney sonuçlarına uygun olarak, literatürde başka ham maddeler ile üretilmiş geopolimerlerdeki yüksek sıcaklık etkisinde nefelin ve zeolit faz oluşumları bulunmaktadır [35-37]. UK, CT ve PÇ'nin eşit miktarda kullanıldığı K8 harcında, 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de deney öncesine göre sırasıyla %35, %46 ve %21 dayanım düşüşü gözlenmiştir. K8 harcındaki CT ve UK'nun 400 °C'de ısı kuru etkisi ile dayanım artışı 1/3 çimento içeriği sebebiyle kısıtlanmıştır. Bu nedenle 400 °C ve 600 °C'de dayanım düşmüş, 800 °C'de ise K6 ve K7 karışımlarında olduğu gibi muhtemel yeni kristal faz oluşumlarından dolayı dayanım artışı görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda dayanım sonuçlarındaki artışın, geo-polimerizasyondaki artıştan ve bağlayıcı matriste daha fazla uçucu külün aktivasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Önceki çalışmalarda, artan sıcaklıkla uçucu kül bazlı geopolimerlerin dayanım sonuçlarındaki artış, reaksiyona girmemiş uçucu kül parçacıklarının sinterleme reaksiyonlarına bağlanmıştır [38, 39, 40].

3.3 Ağırlık kayıpları

Tüm harç numunelerinin 400 °C, 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklık deneyi sonrası ağırlık kaybı yüzdeleri Şekil 3(a)'da verilmiştir. Kontrol grubu K1 numunelerindeki ağırlık kayıpları yüzde olarak K2-K8 numunelerine göre daha yüksektir. En düşük ağırlık kaybı yüzdeleri, sadece UK içeren K2 ve sadece CT içeren K3 harçlarında elde edilmiştir. Hibrit geopolimer harçlardan K4, K6 ve K7'de benzer yüzdelerde ağırlık kaybı oluşurken; K5 ve K8 harçlarında %1-2 daha yüksek ağırlık kayıpları görülmüştür. Düşük Ca içerikli geopolimerlerde görülen N-A-S-(H) jel yapılarında su zayıf bağlı ve ikincil bir bileşik olarak tarif edilmektedir [41]. Bu nedenle düşük Ca içerikli geopolimerlerde kimyasal bağlı su miktarının az olması bu bağlayıcılarda yüksek sıcaklık etkisinde daha az su kaybının görülmesine yol açmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Harçların yüksek sıcaklık (400 °C, 600 °C, 800 °C) deneyi sonrası ağırlık kayıpları ve (b) Harçların Küresel Isınma Potansiyeli (kg CO₂/m³)

3.4 Karışımların yaşam döngüsü analizi

Çevresel etkiler göz önünde bulundurulduğunda performansın yanı sıra, atık malzemelerin daha fazla kullanılmasının sürdürülebilirlik açısından son derece olumlu etkileri bulunmaktadır. Atık malzemeler kullanılarak üretilen karışımların çevreye olan etkilerini incelemek için Küresel Isınma Potansiyeli (KIP, eşdeğer CO₂ emisyonları) yöntemi kullanılmıştır. Yaşam döngüsü hesaplarını gerçekleştirebilmek için gerekli olan harç bileşenlerinin CO₂ emisyonları Tablo 4'te verilmiştir. Hesaplarda hammaddelerin üretimi, atık camın öğütülmesi işlemi ve ulaşım dikkate alınmıştır. CT, KIP değeri sıfır veya ihmal edilebilir olarak bilinen bir atıktır [42]. Bu sebeple yalnızca atık camın kırma ve öğütme işlemi enerji harcamaktadır.

Bu çalışmada üretilen harçların hesaplanan CO₂ emisyonları Şekil 3(b)'de verilmiştir. Şekil 3(b) incelendiğinde, karışımların KIP değerleri 547.43 ile 285.82 kg CO₂/m³ arasında değişmektedir. %100 çimento esaslı K1 harcının KIP'si 547.43 kg CO₂/m³ olup, %100 UK içeren K2 ve %100 CT içeren K3 numunelerinin KIP'leri, K1 numunesinin KIP'sine göre sırasıyla %44.5 ve %47.7 daha düşüktür. Tüm harç grupları arasında en düşük KIP'ye sahip harç grubu K3'tür. Hibrit geopolimer harçlardan PÇ ve UK içeren K4 karışımı kontrol grubuna göre %15, CT ve PÇ içeren K5 karışımı ise %17 daha az emisyon değerlerine sahiptir. UK, CT ve PÇ'den oluşan K6 ve K7 numuneleri kontrol grubuna göre %31 daha az CO₂ emisyonuna sahiptir. Hibrit geopolimer harçlar arasında en az CO₂ emisyonuna sahip karışım K7'dir. Üç malzemenin eşit miktarda kullanıldığı K8 karışımında ise kontrol grubuna göre %16 daha az CO₂ emisyonu elde edilmiştir. PÇ yerine atık malzemelerin kullanımı KIP değerlerini düşürmektedir.

Tablo 4. Malzemelerin CO₂ emisyonları [33;42-47]

Malzeme	KIP (kg CO ₂ /ton)	L _k (km)
Atık cam	0	200
Cam tozu	54	0
Portland Çimentosu	896.6	180
Uçucu Kül	27	650
Su	0.318	0
NaOH	1200	500
Na ₂ SiO ₃	780	500
Kum	2.46	20
Ulaşım (t.km)	0.128	

Not: L_k değerleri belirlenen konuma göre gidiş-dönüş olarak hesaplanmıştır.

4 Sonuçlar

Uçucu kül (UK), cam tozu (CT) ve Portland çimento (PÇ) içeren hibrit harç karışımları ile ilgili deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Sadece UK veya CT içeren geopolimer karışımlarda maksimum 11.40 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiş olup, havada kür ile yeterince dayanım elde edilememiştir.

- UK+PÇ içeren karışım, CT+PÇ içeren karışıma göre daha yüksek dayanım kazanmıştır. Kullanılan aktivatör ve ortam koşullarında UK malzemesi CT malzemesine göre çimento ile daha etkin reaksiyon yapmıştır.

- UK, CT ve PÇ'nin eşit miktarda kullanıldığı karışımda, bu üç malzemenin bir arada kullanıldığı diğer hibrit geopolimer harçlara göre daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Üç malzemenin de eşit miktarda kullanılması hem malzemelerin etkin kullanımı hem de performans açısından sinerjik bir etki görülmesini sağlamıştır.

- %100 PÇ içeren kontrol grubu harcında 400 °C'de %18, 600 °C'de %32 ve 800 °C'de %61 dayanım kaybı tespit edilmiştir. Bu davranış çimentonun geleneksel davranışa uygundur.

- Sadece UK veya CT ile üretilen karışımlarda yüksek sıcaklık altında ısıl kür etkisi meydana gelmiş olup; 400 °C'de dayanımları %247'ye varan oranlarda artmıştır.

- UK+PÇ ve CT+PÇ içeren hibrit geopolimer karışımlarda artan sıcaklıkla beraber dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Bu karışımlardaki 1:3 (PÇ:(UK+CT+PÇ)) oranında CaO içeriği yüksek olan çimento içeriği, sıcaklığa direnci düşürdüğünden dayanım kaybında etkin olabilir.

- 1:6 (PÇ:(UK+CT+PÇ)) oranında PÇ içeren hem CT hem de UK malzemelerinin kullanıldığı hibrit geopolimer karışımlarda 400 °C'de ısıl kürlenme gerçekleşirken; 600 °C'de sıcaklık etkisi nedeniyle dayanım artışı azalmıştır. 800 °C'de ise %280'e varan dayanım artışları tespit edilmiştir.

- 1:3 (PÇ:(UK+CT+PÇ)) oranında PÇ içeren CT ve UK malzemelerinin beraber kullanıldığı hibrit geopolimer karışımlarda ise çimento içeriğinin artması sebebiyle CT ve UK malzemelerinin 400 °C'deki ısıl kür etkisi ile dayanım artışı kısıtlanmıştır. Bu nedenle 400 °C ve 600 °C'de dayanım düşerken; 800 °C'de ise yeni kristal faz oluşumlarından dolayı dayanım artışı görülmüştür.

- Yapılan Yaşam Döngüsü Analizi ile karışımların KIP (kg CO₂/m³) değerleri değerlendirildiğinde; %100 PÇ içeren kontrol karışımına göre CO₂ emisyonlarında, sadece UK veya CT içeren geopolimer harçlarda % 47.7'ye, UK, CT ve PÇ'nin beraber kullanıldığı hibrit geopolimer harçlarda ise %31'e varan düşüşler elde edilmiştir. PÇ yerine atık malzemelerin kullanımı CO₂ emisyon değerlerini düşürmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] C. Bataille, Low and zero emissions in the steel and cement industries: Barriers, technologies and policies. OECD Green Growth Papers, OECD Publishing, No. 2020/02, Paris, 2020. <https://doi.org/10.1787/5ccf8e33-en>.

- [2] C. Li, X.Z. Gong, S.P. Cui, Z.H. Wang, Y. Zheng, B.C. Chi, CO₂ Emissions due to Cement Manufacture. *Mater. Sci. Forum*, 685, 181–187, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.685.181>.
- [3] J. S. J. V. Deventer, J. L. Provis, P. Duxson, D. G. Brice, Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste Biomass Valorization*, 1 (1), 145–155, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9015-9>.
- [4] L. N. Assi, K. Carter, E. Deaver, P. Ziehl, Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. *J. Clean. Prod.* 263, 121477, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121477>.
- [5] Z. Ji, Y. Pei, Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: a review. *J. Environ. Manag.* 231, 256–267, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.041>.
- [6] H. Y. Aruntaş, Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (1), 193-203, 2006.
- [7] E. Worrel, N. Martin, L. Price, Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. *Energy*, 25 (12), 1189-1214, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00042-6).
- [8] S. Li, D. M. Roy, Investigation of relations between porosity, pore structure, and C1– diffusion of fly ash and blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 16 (5), 749-759, 1986. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90049-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90049-9).
- [9] F. Canpolat, K. Yılmaz, Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2, 1- 15, 2002.
- [10] V. Saraswathy, S. Muralidharan, K. Thangavel, S. Srinivasan, Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25 (7), 673- 680, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00068-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00068-9)
- [11] X. Fu, Y. Wang, S. Huang, X. Hou, W. Hou, The influences of siliceous waste on blended cement properties. *Cement and Concrete Research*, 33 (6), 851-856, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01095-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01095-5)
- [12] X. Fu, Z. Wang, W. Tao, C. Yang, W. Hou, Y. Dong, X. Wu, Studies on blended cement with a large amount of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1153-1159, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00757-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00757-3)
- [13] P. Chindapasirt, S. Homwuttiwong, V. Sirivivatnanon, Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34 (7), 1087-1092, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.021>
- [14] I. B. Topçu and M. Canbaz, Properties of concrete containing waste glass. *Cem. Concr. Res.*, 34(2), 267–274, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>
- [15] Y. Jani and W. Hogland, Waste glass in the production of cement and concrete - A review. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2(3), 1767–1775, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>
- [16] M. Vafaei and A. Allahverdi, High strength geopolymer binder based on waste-glass powder. *Adv. Powder Technol.*, 28(1), 215–222, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.09.034>
- [17] T. M. Borhan, Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. *Mater. Des.*, 42, 265–271, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.062>.
- [18] V. Vaitkevičius, E. Šerelis, and H. Hilbig, The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Constr. Build. Mater.*, 68, 102–109, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.101>
- [19] H. Du and K. H. Tan, Properties of high volume glass powder concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 75, 22–29, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>
- [20] M. Mirzahosseini and K. A. Riding, Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). *Cem. Concr. Compos.*, 56, 95–105, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004>
- [21] X. Jiang, Y. Zhang, Y. Zhang, J. Ma, R. Xiao, F. Guo, Y. Bai, B. Huang, Influence of size effect on the properties of slag and waste glass-based geopolymer paste. *Journal of Cleaner Production*, 383, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135428>.
- [22] N. Schwarz, H. Cam, N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486-496, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001>
- [23] W. Duan, Y. Zhuge, C. W. Chow, A. Keegan, Y. Liu, R. Siddique, Mechanical performance and phase analysis of an eco-friendly alkali-activated binder made with sludge waste and blast-furnace slag. *Journal of Cleaner Production*, 374, 134024, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134024>
- [24] Y. Sun, Z. Liu, S. Ghorbani, G. Ye, G. De Schutter, Fresh and hardened properties of alkali-activated slag concrete: The effect of fly ash as a supplementary precursor. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133362, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133362>
- [25] Q. Huang, Z. Tao, Z. Pan, R. Wuhrer, M. Rahme, Use of sodium/potassium citrate to enhance strength development in carbonate-activated hybrid cement. *Construction and Building Materials*, 350, 128913, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128913>
- [26] A. M. Onaizi, N. H. A. S. Lim, G. F. Huseien, M. Amran, C. K. Ma, Effect of the addition of nano glass powder on the compressive strength of high volume fly ash modified concrete. *Materials Today, Proceedings*,

- 48, 1789-1795, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.347>
- [27] T. Lan, Y. Meng, T. Ju, M. Song, Z. Chen, P. Shen, J. Jiang, Manufacture of alkali-activated and geopolymer hybrid binder (AGHB) by municipal waste incineration fly ash incorporating aluminosilicate supplementary cementitious materials (ASCM). *Chemosphere*, 134978, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134978>
- [28] T. Tho-In, V. Sata, K. Boonserm, P. Chindapasirt, Compressive strength and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash. *Journal of cleaner production*, 172, 2892-2898, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.125>
- [29] S. M. Soares, T. O. G. Freitas, A. Oliveira Júnior, F. G. S. Ferreira, and J. A. A. Salvador Filho, Assessment of properties of ultrahigh performance cementitious composites with glass powder waste. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, 15(6), e15612, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000600012>
- [30] İ. İ. Atabey, C. Ay, Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Farklı Kür Koşullarında Atık Cam Tozu Esaslı Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Special Issue 2021 (ARACONF)*, 184-189, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.899513>
- [31] P. Turgut, Uçucu kül, kireç ve cam tozu kullanarak blok üretimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 413-418, 2018. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.70048>
- [32] TS EN 196 -1, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, 2016
- [33] K.R. O'Brien, J. M'énach'e, L.M. O'Moore, Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water consumption in concrete. *Int. J. Life Cycle Assess.* 14 (7), 621-629, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0105-5>
- [34] S. Çelikten, M. Sarıdemir, İ. Ö. Deneme, Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 217, 50-61, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.055>
- [35] A. Buchwald, M. Vicent, R. Kriegel, C. Kaps, M. Monzó, A. Barba, Geopolymeric binders with different fine fillers—Phase transformations at high temperatures. *Applied Clay Science*, 46(2), 190-195, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.08.002>
- [36] M. W. Hussin, M. A. R. Bhutta, M. Azreen, P. J. Ramadhansyah, J. Mirza, Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 48(3), 709-720, 2015. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0251-5>
- [37] A. Gultekin, K. Ramyar, Investigation of high-temperature resistance of natural pozzolan-based geopolymers produced with oven and microwave curing. *Construction and Building Materials*, 365, 130059, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130059>
- [38] M. Guerrieri, J. G. Sanjayan, Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures. *Fire and Materials: An International Journal*, 34(4), 163-175, 2010. <https://doi.org/10.1002/fam.1014>
- [39] Z. Pan, J. G. Sanjayan, B. V. Rangan, An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials Science*, 44, 1873-1880, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3243-z>
- [40] S. Celikten, M. Sarıdemir, K. Akçaözöglü, Effect of calcined perlite content on elevated temperature behaviour of alkali activated slag mortars. *Journal of Building Engineering*, 32, 101717, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101717>
- [41] L. John, S. Provis, A. Bernal, Geopolymers and related alkali-related materials. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 44, 2014. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
- [42] Y. Deng, C. Yan, J. Zhang, L. Yin, S. Liu, Y. Yan, Preparation and mechanical characterization of engineered cementitious composites with high-volume fly ash and waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, 333, 13022, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130222>
- [43] M.H. Samarakoon, P.G. Ranjith, W.H. Duan, V.R.S. De Silva, Properties of onepart fly ash/slag-based binders activated by thermally-treated waste glass/NaOH blends: a comparative study. *Cement Concr. Compos.* 103679, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103679>
- [44] V. Shobeiri, B. Bennett, T. Xie, P. Visintin, Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction. *Case Studies in Construction Materials*, e01832, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01832>
- [45] B. Chiaia, A.P. Fantilli, A. Guerini, G. Volpatti, D. Zampini, Eco-mechanical index for structural concrete. *Construct. Build. Mater.* 67, 386-392, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.090>
- [46] M. Sandanayake, C. Gunasekara, D. Law, G. Zhang, S. Setunge, Greenhouse gas emissions of different fly ash based geopolymer concretes in building construction. *Journal of Cleaner Production*, 204, 399-408, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.311>
- [47] P. Perez-Cortes, J. I. Escalante-Garcia, Alkali activated metakaolin with high limestone contents—Statistical modeling of strength and environmental and cost analyses. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103450, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103450>

