

UÇUCU KÜL VE PERLİT ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARDA ÇÖMLEK SIR ATIĞI İKAMESİNİN YÜKSEK SICAKLIK DAYANIKLILIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Serhat ÇELİKİTEN^{1*}, Bilal BARAN², Zahide BAYER ÖZTÜRK³

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği,
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-8154-7590>

² Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği,
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-2568-7035>

³ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği,
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-8069-0694>

Anahtar Kelimeler	Öz
Geopolimer Uçucu kül Perlit Çömlek sır atığı Yüksek sıcaklık	<i>Bu çalışmada, perlit (PT) ve uçucu kül (UK) bazlı geopolimerlere çömlek sırası atığı (ÇSA) ikamesinin mekanik özellikler ve yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sadece PT, sadece UK ve ağırlıkça %75 UK ve %25 PT içeriği ile üretilen geopolimer harçlara %10, 20 ve 30 oranlarında ÇSA ikame edilmiştir. Harçlar, sabit 10M NaOH içeriği ve 8 saat 100 °C ısıtma ile üretilmiştir. Üretilen harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiş ve 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklarındaki performansları değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda, ÇSA malzemesinin PT ve UK+PT içeren numunelere kütlece %20 oranına kadar ikame edilmesinin nihai basınç dayanımı açısından olumlu yönde etkileri olduğu, UK içeren numunelerde ise ÇSA ikamesinin nihai basınç dayanımı açısından olumsuz etkileri olduğu tespit edilmiştir. Nihai dayanımlarda en yüksek değerler, 34.4 ve 32.41 MPa basınç ve 6.46 ve 6.3 MPa eğilme dayanımları ile UK+PT+ÇSA içeren numunelerde sırasıyla %10 ve 20 ÇSA oranlarında elde edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımları açısından optimum ÇSA oranının %10-20 aralığında olduğu söylenebilir. UK malzemesine ÇSA malzemesinin ikamesi, kür yaşına göre dayanım gelişimlerini olumsuz etkilerken, PT ve UK+PT içeren numunelere ÇSA malzemesi ikamesi dayanım gelişimlerinde olumlu etkiler meydana getirmiştir. ÇSA malzemesi yüksek sıcaklık performansı açısından tüm gruplarda olumlu etki meydana getirmiştir. ÇSA malzemesinin karışımlarda kütlece ikame yüzdesi arttıkça, dayanım kayıpları azalmıştır. UK malzemesinin yerine %30 ÇSA malzemesinin ikame edildiği numunelerde 750 °C'de %40'a varan dayanım artışı tespit edilmiştir.</i>

THE EFFECT OF POTTERY GLAZE WASTE SUBSTITUTION ON HIGH-TEMPERATURE RESISTANCE OF FLY ASH AND PERLITE-BASED GEOPOLYMER MORTARS

Keywords	Abstract
Geopolymer Fly ash Perlite Pottery glaze waste High temperature	<i>In this study, the effect of substituting pottery glaze waste (PGW) into perlite (PT) and fly ash (FA) based geopolymers on mechanical properties and high-temperature performance has been investigated. Geopolymer mortars were produced with only PT, only FA, and a mixture of 75% FA and 25% PT by weight. PGW was substituted in these geopolymers at rates of 10%, 20%, and 30%. The mortars were produced with a constant 10M NaOH content and subjected to an 8-hour thermal curing at 100 °C. The flexural and compressive strengths of the produced mortars were determined at 7, 28, and 90 days, and their performance at temperatures of 500 °C, 750 °C, and 1000 °C was evaluated. As a result of the experiments, it has been determined that substituting PGW in specimens containing PT and FA +PT up to 20% by weight has a positive effect on the ultimate compressive strength. However, in samples containing FA, the substitution of PGW has been found to have negative effects on the ultimate compressive strength. The highest values in strengths were achieved in samples containing FA+PT+PGW, with compressive strengths of 34.4 and 32.41 MPa, and flexural strengths of 6.46 and 6.3 MPa, respectively, at PGW substitution rates of 10% and 20%. It can be stated that the optimum PGW substitution rate is in the range of 10-20% in terms of flexural and compressive strengths. Substituting PGW material into FA adversely affects strength development based on curing age, while substituting PGW material in samples containing PT and FA+PT has positive effects on strength. The PGW material has had a positive effect on high-temperature performance in all groups. As the mass substitution percentage of PGW</i>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

material increased in the mixtures, strength losses decreased. In samples where 30% of the FA material was substituted with PGW, a strength increase of up to 40% was observed at 750 °C.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 02.02.2024

Kabul Tarihi : 23.05.2024

* Sorumlu yazar: scelikten@nevsehir.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1430527>

Research Article

Submission Date : 02.02.2024

Accepted Date : 23.05.2024

1. Giriş

Portland çimentosu üretimi sebebiyle meydana gelen çevresel ve ekonomik sorunlar, atık toz malzemelerin bağlayıcı olarak kullanımının ve alkali ile aktive edilen geopolimer kompozitlerin araştırılmasına yol açmıştır (Çelikten vd., 2019; Durak vd., 2021; Duxson vd., 2007; Hossain vd., 2015; Provis, 2014). Geopolimerler, uçucu kül gibi alüminosilikat içerikli malzemelerin alkali aktivatörler ile karıştırılmasıyla üretilmektedir (Atabey vd., 2020; Uğurlu vd., 2021; Ulugöl vd., 2021). Günümüzde çeşitli puzolanların farklı çözeltilerle karıştırılarak çimento içermeyen bağlayıcıların üretimini konu olan çalışmalar yapılmaktadır (Hojati ve Radlińska, 2017; Provis ve Bernal, 2014; Saridemir ve Celikten, 2017).

Ham perlit (genleşmemiş), perlit cevherinin kırılma, öğütme ve derecelendirme işlemleri ile elde edilmektedir. Perlit (PT), alümina (Al_2O_3) ve silisyum dioksit (SiO_2) içeriği ile geopolimer üretiminde potansiyele sahiptir (Demirboğa ve Gül, 2003; Işıkdag, 2015). Perlit malzemesinin bol miktarda bulunması ve bazı ülkelerde kolay ulaşılabilir olması, ham perlitin geopolimer hammaddesi olarak kullanımının araştırılmasına imkan sunmaktadır (Çelikten ve Işıkdag, 2020; Erdogan, 2015). Termik santral atığı olan UK malzemesi ise en çok kullanılan geopolimer hammaddelerinden biri olmakla birlikte, UK miktarının gelecekte azalacağı öngörülmektedir. Bu nedenle geopolimer üretiminde UK malzemesi yerine farklı atık malzemelerin kullanılması, kaynakların verimli kullanılması açısından önemlidir.

Çömlek üzeri kaplamalar, çanak çömlek grubu ürünlerin elle ya da kazıma yöntemiyle üzerine farklı renklerde kil sürülerek ya da içine boya karıştırılan sırlarla süslenmesinde kullanılan astar veya boyalı sırlar olarak tanımlanabilmektedir (Doğan, 2018). Nemli çömlekler üzerinde, çömlek çamurundan yapılan kaplamalar, ıslak çömlekler üzerinde yarı ya da yarıdan biraz fazla pişmemiş killer kullanılmaktadır (Işıkhani, 2015). Hem kullanılan boya ve killer hem de nemli-ıslak çömlek ürünlerden bileşim içine dâhil olabilen kil, kopan, ayrılan parça vb. ile bu kaplamalar zamanla kullanılamaz duruma gelmekte ve tanklarda bekletilip atık olarak kenara ayrılmaktadır. İşlem yapılan ürünlerin nem seviyesinin yüksek olması da çömlek

sır/kaplama atık (ÇSA) miktarının artmasında etken oluşturmaktadır.

UK ve PT malzemelerinin geopolimer hammaddesi olarak kullanıldığı kapsamlı araştırmalar bulunmaktadır. Durak vd. (2021), UK esaslı geopolimer harçların ısıl kür öncesi ön dinlendirme süresinin mekanik özellikleri ve mikroyapıları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. ısıl kür öncesi ön dinlendirmeye tabi tutulan numunelerin, ön dinlendirmesiz numunelere göre mekanik özelliklerinde iyileşme sağlandığı ifade edilmiştir. Ayrıca, ön dinlendirme işleminin geopolimerik reaksiyon ürünlerini artırdığını ve daha yoğun bir mikroyapı meydana getirdiği tespit edilmiştir. Bakharev (2005), çalışmasında F sınıfı UK esaslı geopolimer malzemelerin yüksek sıcaklıkta kürlenmesinin faz bileşimi, mikroyapı ve mukavemet gelişimi üzerindeki etkisini araştırmıştır. ısıl kür işleminden önce oda sıcaklığındaki uzun ön kürlenmenin, mukavemet gelişimi için faydalı olduğu ifade edilmiştir. Geopolimer numunelerdeki ana reaksiyon ürününün amorf alkali alüminosilikat jeli olduğunu ve buna ek olarak şabazit, Linde Tip A, Na-P1 (gismondin) zeolitler ve hidroksisodalit ürünlerinin de meydana geldiği belirtilmiştir. Reaksiyonlar ile oluşan zeolit türünün ve alüminosilikat jelin bileşiminin kürlenme geçmişine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Atabey vd. (2020), farklı F sınıfı UK içeren geopolimer numunelerde kullanılan Na miktarının %6'dan %15'e çıkarılmasının dayanıklılık özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Dayanıklılık deneylerinde, sadece sodyum hidroksit içeren numunelerin, sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren numunelere göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Çelikten ve Işıkdag (2020), geopolimer numunelerde PT ve sodyum hidroksit içeren, farklı sıcaklık ve sürelerde ısıl kür işlemine tabi tutulan numunelerin dayanımlarını ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, artan ısıl kür süresi ve sıcaklıklarına ek olarak artan NaOH molaritesi ile dayanım değerlerinin arttığı ifade edilmiştir. En yüksek dayanıma (41,59 MPa) sahip numunelerde reaksiyona girmemiş, zayıf ve iyi reaksiyona girmiş PT, mikro çatlak oluşumları gözlenmiştir. XRD analizinde kuvars albit ve lösit mineralleri için pikler görüldüğü bildirilmiştir. Işıkdag (2015), çalışmasında geliştirilmiş PT esaslı harç içeren hafif ferrocement panellerin sehim ve çatlakları incelenmiştir. Çimento oranı arttıkça geliştirilmiş PT

esaslı harçların basınç dayanımının arttığı, çatlak genişliklerinin azaldığı bildirilmiştir. Genleşmiş PT malzemesinin agrega olarak kullanımının, harçlarda mikro gözenek oluşumunun başlamasını hızlandırdığı, bu sebeple mukavemet ve birim ağırlık parametrelerinde düşüşe yol açtığı tespit edilmiştir. Dişçi ve Polat (2022), PT içeren geopolimere nanomalzemeler ekleyerek mekanik özelliklerde iyileştirilme amaçlamışlardır. Nano Al_2O_3 'ün PT esaslı geopolimer numunelerde basınç dayanımı açısından etkili olduğu ve optimum kür koşulunun ısı+ortam kürü olduğu bildirilmiştir. Nano malzemelerin kullanımının çatlak ve gözenek oluşumunu engellediği ve numunelerdeki makro gözenek sayısının azaltılmasında fayda sağladığı ifade edilmiştir. El-Mir vd. (2023), bağlayıcı içeriği, atık PT tozu ikame oranı, alkali aktivatör-bağlayıcı oranı ve sodyum silikat-sodyum hidroksit oranının yüksek fırın cürufu ve atık PT tozu içeren geopolimer harçlarda taze, mekanik ve dayanıklılık performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Atık PT tozu ve yüksek fırın cürufu içeren harçların basınç dayanımının, %0-50 atık PT tozu kullanımı, 0.60-0.70 s/b ve 1.0-2.0 sodyum silikat-sodyum hidroksit aralıklarında 40 MPa'yı aştığı belirtilmiştir. Atık PT tozu oranı arttıkça ortalama nihai priz süresinin de arttığı ifade edilmiştir. SEM ve EDX analizleri sonucunda, atık PT tozu içeren harçlarda C-A-S-H ve C-S-H jellerinden oluşan kohezyonlu ve yoğun bir mikroyapı elde edildiği ve optimum oranın %25 olduğu tespit edilmiştir. Acar vd. (2023), çalışmalarında ham PT ve standart kumun alkali aktivasyonuna dayalı çimentosuz hafif harçlar üretmeyi amaçlamışlardır. Karışımlarda PT, alkali aktivatörler ($NaOH$ ve Na_2SiO_3) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, karışımlara PT kütlelerine göre %0,25 H_2O_2 kullanımının, nihai dayanımda kayda değer bir kayıp olmadan daha düşük yoğunluk ve daha düşük termal iletkenlik katsayısına sahip hafif harçların üretilmesini sağladığını belirtmişlerdir. İşlenebilirlik, mukavemet, yoğunluk ve termal iletkenlik özellikleri açısından optimum oranların H_2O_2 /PT oranının %0,25 ve Su/PT yüzdesinin %40 olması önerilmiştir. Baran vd. (2021), sodyum hidroksit ve hidrotermal yöntemle zeolit sentezinden elde edilen sıvı kalıntı kullanarak UK ve PT bazlı geopolimer numuneler üretmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, %10 PT ilavesinin malzeme elastikiyetinde artış sağlarken, basınç dayanımını %40 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, hidrotermal yöntemle zeolit sentezinden elde edilen sıvı kalıntı içeren numunelerin, $NaOH$ kullanılarak elde edilen numunelere göre daha düşük basınç dayanımına sahipken, daha yüksek ısı yalıtım özelliklerine sahip olduğu belirtilmiştir.

Yüksek sıcaklık direnci, yangın durumunda inşaat malzemeleri için önemli bir özelliktir (Saridemir ve Bulut, 2021). Isı, kararlılıkları ve moleküler yapıları üzerindeki etkisi nedeniyle etkilenen maddelerin özelliklerini değiştirir. Yüksek sıcaklığın F sınıfı UK veya

PT bazlı geopolimerlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi üzerine yapılmış kapsamlı çalışmalar bulunmaktadır (Amran vd., 2021; Zhang vd., 2020). Zhang vd. (2020), metakaolin ve UK içeren geopolimer beton üzerinde 700 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda yaptıkları deneyler ile geopolimer betonun yüksek sıcaklık performansını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda geopolimer numunelerin referans numunelere kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği, yüksek sıcaklık sebebiyle daha düşük dayanım kaybı meydana geldiği ifade edilmiştir. Geopolimer betonda gerçekleşen sinterleme reaksiyonu nedeniyle, özellikle 500 °C üzerinde, geçirgenliğin yüksek oranda etkilendiği bildirilmiştir. Çelikten vd. (2020), alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarına kalsine PT ilavesinin mekanik ve yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, kalsine PT oranının artışı harçların eğilme ve basınç dayanım değerlerinde olumsuz etkiler meydana getirirken, numunelerin yüksek sıcaklık performanslarında önemli ölçüde iyileştirme sağladığı belirtilmiştir. Photisan ve Sangphong (2022), çalışmalarında UK ve PT içeren geopolimer harçlarda kısmi ince agrega ikamesi olarak geri dönüştürülmüş atık camı kullanmışlardır. PT, UK ikamesi olarak %0-40 oranlarında kullanılmıştır. Harçların işlenebilirliğinin ve basınç dayanımının PT içeriği ile beraber azaldığı belirtilmiştir. UK ve PT içeren geopolimer harçların 28 günlük dayanımları 44-51 MPa aralığında tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık (500 °C) deneyi sonuçlarında ise en yüksek dayanım 95 MPa ile %70 UK, %30 PT içeriğinden elde edilmiştir. Turhan vd. (2021), geopolimer beton üretiminde PT ve kırmızı çamur kullanmışlardır. 90 °C'de 72 saatlik ısıl kürün ardından, basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve her bir karışımdan alınan numuneler 50 donma-çözülme döngüsüne ve üç farklı yüksek sıcaklığa (300 °C, 500 °C ve 700 °C) maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda, kırmızı çamur içeren karışımların basınç dayanımlarının %100 PT içerenlere göre daha yüksek olduğu, diğer yandan, donma-çözünme ve yüksek sıcaklık performansı açısından %100 PT içeren karışımların kırmızı çamur içeren karışımlara kıyasla daha yüksek dayanıklılığa sahip olduğu belirtilmiştir. Çelikten ve Erdoğan (2022), ince öğütülmüş ham PT ve F Sınıfı UK içeren geopolimer karışımların yüksek sıcaklık performansını incelemişlerdir. Geopolimer harçlar 90 °C'de 4, 8 ve 24 saat ısıl kür işlemi ve farklı UK/P kütle oranlarıyla üretilmiştir. Ayrıca geopolimer harçlar, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda, optimum sonuçlar 75/25 UK/PT kütle oranı ile üretilen geopolimer harçlarda tespit edilmiştir. Numunelerin 800 °C sonrası eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin, 600 °C sonrası değerlerden daha yüksek olduğu, 800 °C sıcaklık etkisinde yeni kristal fazlar oluştuğu belirtilmiştir. Literatürde çömek sırası atığı malzemesinin geopolimer malzemelerde kullanımı ile ilgili herhangi bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, perlit (PT)

Tablo 1. UK, PT ve ÇSA kimyasal kompozisyonu

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	K. K.
UK	61.49	21.87	7.91	1.86	1.82	0.71	1.23	0.27	-	-	2.84
PT	72.46	13.38	1.02	1.13	0.23	-	3.31	5.29	0.21	-	2.97
ÇSA	55.87	16.13	6.15	4.55	2.05	0.08	0.76	2.78	0.66	0.10	10.57

ve uçucu kül (UK) bazlı geopolimerlere çömlek sır atığı (ÇSA) ilavesinin mekanik özellikler ve yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında geopolimer harçlarda F sınıfı uçucu kül (UK), ince öğütülmüş ham perlit (PT) ve çömlek sır atığı (ÇSA) malzemeleri kullanılmıştır. PT malzemesi Türkiye'deki Kütahya ilinde bulunan Genper Şirketler Grubu'ndan temin edilmiştir. PT malzemesi perlit cevherinin kırılma, öğütülme ve derecelendirilme işlemleri ile elde edilmiştir. PT malzemesinin özgül ağırlığı 2.32 g/cm³, 45 µm elek üzerindeki kalıntısı %28'dir. UK malzemesi ise Sugözü termik santralinden (Adana, Türkiye) temin edilmiştir. UK malzemesinin 45 µm elek üzerindeki kalıntısı %21 ve özgül ağırlığı 2,29 g/cm³'dür. Buna ek olarak, çömlek sır atığı malzemesi Anadolu Çömlekçilik fabrikasından (Nevşehir) temin edilmiş, kurutulduktan sonra bilyeli değirmende 63 mikron altına geçecek şekilde öğütmeye tabi tutulmuştur. ÇSA, PT ve UK malzemelerinin oksit bileşimleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Harç karışımlarında, alkali aktivatör olarak 10M sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan dere kumunun tane dağılımı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Dere kumuna ait tane dağılımı

Elek Çapı, mm	Geçen, %
4.00	100
2.00	94.6
1.00	59.1
0.5	37.2
0.25	20.6
0.125	12.5
0.063	5.7
Tava	0

Bu çalışmada 3 farklı seride 12 farklı geopolimer harç karışımı oluşturulmuştur. 1. seride uçucu kül, 2. seride ise perlit yerine %10, 20 ve 30 oranlarında Al, Si ve Ca bakımından zengin ÇSA ikame edilerek harç karışımları oluşturulmuştur. 3. seride ise literatürde daha önce belirlenen (Çelikten ve Erdoğan, 2022) en uygun UK/PT kütle oranı olan 75/25 oranı ile üretilen harçlara %10, 20 ve 30 oranlarında ÇSA ikame edilmiştir. Üç hücreli 40 × 40 × 160 mm boyutlarındaki kalıplar için karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Harçlar, UK, PT, ÇSA hammaddeleri, dere kumu ve 10 M NaOH çözeltisi karıştırılarak TS EN 196-1 (2016),

Tablo 3. Harç karışımları, gr

Karışım	UK	PT	ÇSA	NaOH	Su	Kum
UK100	450	-	0	80	200	1300
UK90ÇSA10	405	-	45	80	200	1300
UK80ÇSA20	360	-	90	80	200	1300
UK70ÇSA30	315	-	135	80	200	1300
P100	-	450	0	80	200	1300
P90ÇSA10	-	405	45	80	200	1300
P80ÇSA20	-	360	90	80	200	1300
P70ÇSA30	-	315	135	80	200	1300
UKP0	337.5	112.5	-	80	200	1300
UKP10	303.75	101.25	45	80	200	1300
UKP20	270	90	90	80	200	1300
UKP30	236.25	78.75	135	80	200	1300

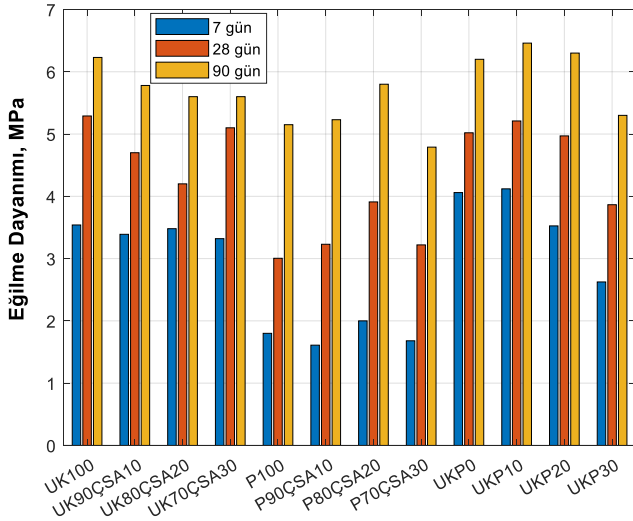
standardına göre üretilmiştir. Geopolimer harç numuneleri dökümden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve 8 saat 100 °C ısıtma şartlarında kürlenmiştir. Numuneler 100 °C'deki ısıtma külden sonra deney gününe kadar laboratuvar ortamında kürlenmiştir.

Geopolimer numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri TS EN 1015-11/A1 (2020)'e göre gerçekleştirilmiştir. Tüm eğilme ve basınç dayanımı değerleri, her karışım için üç numunenin ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık performanslarını belirlemek için yapılan deneylerde 90 gün boyunca kürlenmiş numuneler, ısıtma hızı 5 °C/dakika olacak şekilde 1 saat boyunca sırasıyla 500 °C, 750 °C ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Fırın kapatıldıktan sonra numuneler soğumaya bırakılmıştır. Buna ek olarak, 500 °C, 750 °C'ye maruz bırakılan numuneler üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklık nedeniyle numunelerde meydana gelen kütle değişimleri de ölçülmüştür.

3. Bulgular

3.1 Eğilme Dayanımı

Çalışma kapsamında 7, 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

ÇSA malzemesi içermeyen UK100, P100 ve UKP0 gruplarının 7, 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla 1.8-4.06 MPa, 3.0-5.29 MPa ve 5.15-6.23 MPa aralıklarında elde edilmiştir. ÇSA malzemesini içermeyen karışımlarda en yüksek eğilme dayanımları sadece UK içeren (UK100) ve 75/25 UK/P içeren (UKP0) numunelerde tespit edilmiştir. Sadece PT içeren P100 grubunda diğer gruplara göre nispeten daha düşük eğilme dayanımları tespit edilmiştir. Karışımlara ÇSA malzemesinin ilave edilmesi, UK+ÇSA malzemesini içeren grupta eğilme dayanımlarında olumsuz bir etki meydana getirirken, PT+ÇSA, UK+PT+ÇSA içeren grupların, %20 ÇSA içeriğine kadar, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımlarında sırasıyla %11, %30 ve %12 artışlar ile olumlu etki göstermiştir. 7 günlük dayanımlar değerlendirildiğinde en yüksek eğilme dayanımı 4.12 MPa olarak UK+PT malzemelerine kütlece %10 ÇSA malzemesi ilave edilen UKP10 grubunda elde edilmiştir. 28 günlük dayanımlarda ise en iyi performansı sırasıyla 5.29 ve 5.02 MPa ile UK100 ve UKP10 grupları göstermiştir. Buna ek olarak, 90 günlük dayanımlarda PT+ÇSA içeren numunelerde %10-20 ÇSA oranlarında sırasıyla 5.23 ve 5.8 MPa, UK+PT+ÇSA içeren numunelerde ise sırasıyla 6.46 ve 6.3 MPa eğilme dayanımları ile diğer gruplara göre yüksek eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

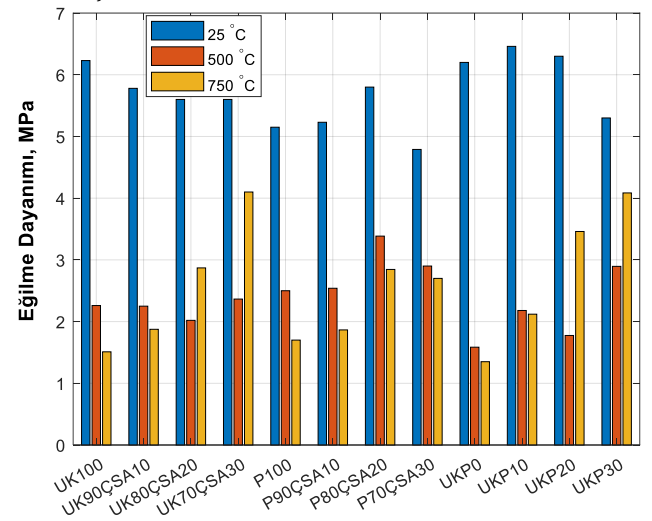
ÇSA malzemesinin kullanımının kür yaşına göre dayanım gelişimleri üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, UK+ÇSA içeren numunelerde ÇSA malzemesi, kür yaşına göre dayanım gelişimlerini olumsuz etkilerken, PT+ÇSA ve UK+PT+ÇSA içeren numunelerde dayanım gelişimlerinde olumlu etkiler meydana getirmiştir.

Şekil 2'de gösterildiği şekliyle 1000 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler bütünlüklerini koruyamadıklarından 1000 °C sıcaklık etkisinde eğilme dayanımı değerleri elde edilememiştir.



Şekil 2. 1000 °C sıcaklık deneyi sonrası numunelerin dış görünüşleri

Çalışma kapsamında 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



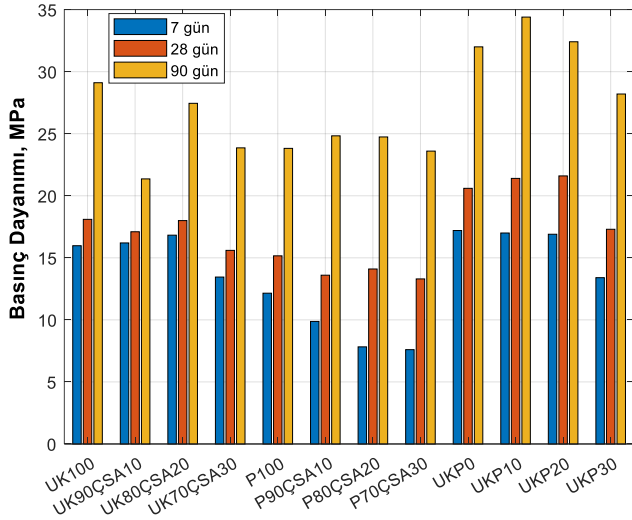
Şekil 3. Harçların yüksek sıcaklık (500 °C, 750 °C) deneyleri sonrası eğilme dayanımları

Geopolimer numunelerdeki dayanım kayıpları yüzdesel olarak incelendiğinde, ÇSA malzemesi içermeyen UK100, P100 ve UKP0 gruplarında 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda meydana gelen dayanım kayıpları sırasıyla %63.72-75.76, %51.46-66.99 ve %74.44-78.23'tür. ÇSA malzemesinin karışımlarda kütlece yüzdesinin %30 olduğu durumda 500 °C'deki dayanım kayıpları %39.46'ya kadar, 750 °C'de ise dayanım kayıpları %22.92'ye kadar gerilemiştir. UK+ÇSA ve UK+PT+ÇSA içeren numunelerden %20 ve %30 ÇSA ilavesi olan gruplarda 500 °C'de %63.93'e varan dayanım kayıpları görülürken, 750 °C'de %48.75'e varan dayanım kaybı tespit edilmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda, UK+ÇSA ve UK+PT+ÇSA içeren numuneler %20 ve %30 ÇSA ilavesinde 750 °C'de 500 °C'ye göre daha yüksek performans göstermiştir.

ÇSA malzemesinin karışımlara ilave edilmesi yüksek sıcaklık performansı açısından tüm gruplarda olumlu etki göstermiştir. ÇSA malzemesinin karışımlarda kütlece yüzdesi arttıkça, dayanım kayıpları azalmıştır.

3.2 Basınç Dayanımı

Çalışma kapsamında 7, 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

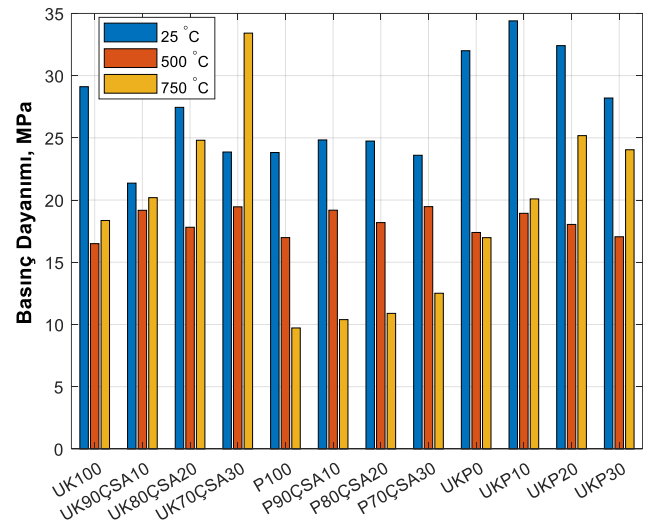
ÇSA malzemesi içermeyen UK100, P100 ve UKP0 gruplarının 7, 28 ve 90 günlük dayanımları sırasıyla 12.15-17.12 MPa, 15.16-20.6 MPa ve 23.82-32 MPa aralıklarında elde edilmiştir. ÇSA malzemesini içermeyen karışımlarda en yüksek basınç dayanımları sadece UK içeren (UK100) ve 75/25 UK/PT içeren (UKP0) numunelerde tespit edilmiştir. Sadece PT içeren P100 grubunda diğer gruplara göre nispeten daha düşük basınç dayanımları tespit edilmiştir. Karışımlara ÇSA malzemesinin ilave edilmesi ile UK ve ÇSA malzemesini içeren grupta %20 ÇSA içeriğine kadar, 7 günlük basınç dayanımlarında %5.3'e varan artışlar elde edilirken; UK+ÇSA, PT+ÇSA ve UK+PT+ÇSA içeren diğer tüm gruplarda 7 günlük basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiştir. Buna ek olarak, 28 günlük basınç dayanımlarında UK+PT+ÇSA içeren numunelerde %20 ÇSA içeriğine kadar %4.85'e varan dayanım artışları elde edilmiştir. 90 günlük basınç dayanımlarında ise yine %20 ÇSA içeriğine kadar PT+ÇSA ve UK+PT+ÇSA içeren gruplarda sırasıyla %4.24 ve %7.5 dayanım artışları tespit edilmiştir.

Bu değerler genel olarak değerlendirildiğinde, ÇSA malzemesinin PT ve UK+PT içeren numunelere kütlece %20 oranına kadar ilave edilmesinin nihai basınç dayanımı açısından olumlu yönde etkileri olduğu, UK içeren numunelerde ise ÇSA ilavesinin ise nihai basınç dayanımı açısından olumsuz etkileri olduğu söylenebilir. 7 günlük dayanımlar değerlendirildiğinde ÇSA içeren gruplar arasında en yüksek basınç dayanımı 17 MPa olarak UK+PT malzemelerine kütlece %10 ÇSA malzemesi ilave edilen UKP10 grubunda elde edilmiştir. 28 günlük dayanımlarda ise en iyi performansı sırasıyla 21.4 ve 21.6 MPa ile UKP10 ve UKP20 grupları göstermiştir. Buna ek olarak, 90 günlük dayanımlarda UK+PT+ÇSA içeren numunelerde %10-20 ÇSA

oranlarında sırasıyla 34.4 ve 32.41 MPa basınç dayanımları ile diğer gruplara göre daha yüksek dayanımlar tespit edilmiştir.

ÇSA malzemesinin kullanımının kür yaşına göre basınç dayanımı gelişimleri üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, eğilme dayanımlarındaki gelişimlerle uyumlu olarak, UK+ÇSA içeren numunelerde ÇSA malzemesi, kür yaşına göre dayanım gelişimlerini olumsuz etkilerken, PT+ÇSA ve UK+PT+ÇSA içeren numunelerde dayanım gelişimlerinde olumlu etkiler meydana getirmiştir.

Çalışma kapsamında 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Harçların yüksek sıcaklık (500 °C, 750 °C) deneyleri sonrası basınç dayanımları

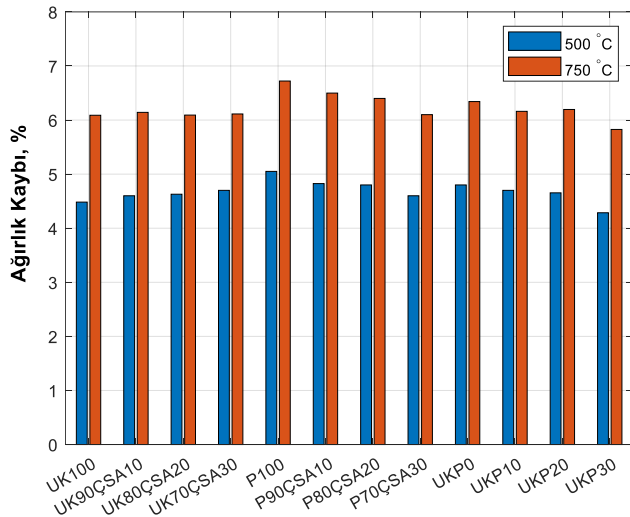
Şekil 2'de gösterildiği şekliyle 1000 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler bütünlüklerini koruyamadıklarından 1000 °C sıcaklık etkisinde basınç dayanımı değerleri elde edilememiştir. Geopolimer numunelerdeki dayanım kayıpları yüzdesel olarak incelendiğinde, ÇSA malzemesi içermeyen UK100, P100 ve UKP0 gruplarında 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda meydana gelen dayanım kayıpları sırasıyla %43.33-36.94, %28.72-59.19 ve %45.64-46.95'tir.

ÇSA malzemesinin karışımlarda kütlece yüzdesinin %30 olduğu durumda 500 °C'deki dayanım kayıpları %17.50'ye kadar, 750 °C'de ise dayanım kayıpları %9.64'e kadar gerilemiş ve bu sonuçlara ek olarak UK+ÇSA içeren numunelerde ÇSA oranının %30 olduğu durumda 750 °C'de %40'a varan dayanım artışı elde edilmiştir. Sır malzemesinin karışımlara ilave edilmesi yüksek sıcaklık performansı açısından tüm karışımlarda olumlu sonuç verirken; UK+ÇSA içeren gruplar en yüksek performansa sahiptir. PT+ÇSA ve UK+PT+ÇSA içeren numuneler karşılaştırıldığında, PT+ÇSA içeren gruplar 500 °C'de, UK+PT+ÇSA içeren gruplar ise 750 °C'de daha iyi performans göstermiştir. UK+ÇSA ve

UK+PT+ÇSA içeren numunelerden %20 ve %30 ÇSA ilavesi olan gruplarda 500 °C'de %44.34'e varan dayanım kayıpları görülürken, 750 °C'de %40'a varan dayanım artışı tespit edilmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda, eğilme dayanımlarındaki malzeme davranışına benzer olarak, UK+ÇSA ve UK+ PT+ÇSA içeren numuneler %20 ve %30 ÇSA ilavesinde 750 °C'de 500 °C'ye göre daha yüksek performans göstermiştir. Bazı geopolimer bağlayıcılarda belirli bir sıcaklık seviyesinden daha yüksek sıcaklıklarda faz dönüşümleri meydana gelebilmektedir (Amran vd., 2021). Bu faz dönüşümleri de mekanik özelliklerde değişimlere yol açmaktadır. 750 °C etkisi sonrasında 500 °C'ye göre daha yüksek dayanım değerleri elde edilmesinin nedeni faz dönüşümleri olabilir. ÇSA malzemesinin karışımlara ilave edilmesi yüksek sıcaklık performansı açısından tüm gruplarda iyi performans göstermiştir. ÇSA malzemesinin karışımlarda kütlece yüzdesi arttıkça, dayanım kayıpları genel olarak azalmış ve dayanım artışı görülen numuneler de olmuştur. Literatürde, hem yüksek Si/Al oranının hem de CaO içeriğinin geopolimer harçlarda basınç dayanımı değerlerini arttırdığı belirtilmektedir (Bayer Öztürk ve Çam, 2023; Davidovits, 1989). Buna göre hem Si/Al, CaO içeriği yüksek olan çömlek sırtı atığı hem de uçucu küllü harçlara kıyasla belirtilen içeriğin yüksek olduğu PT+ÇSA içeren numunelerin basınç dayanımlarının bu nedenle arttığı düşünülmektedir.

3.3 Ağırlık Kayıpları

Çalışma kapsamında 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerdeki yüzdesel ağırlık kayıpları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Harçların yüksek sıcaklık (500 °C, 750 °C) deneyleri sonrası ağırlık kayıpları

1000 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler bütünlüklerini koruyamadıklarından 1000 °C sıcaklık sonrası ağırlık kayıpları elde edilememiştir. ÇSA malzemesi içermeyen UK100, P100 ve UKP0 gruplarında 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda meydana

gelen ağırlık kayıpları yüzdesel olarak sırasıyla %4.5-6.1, %5.1-6.7 ve %4.8-6.3'tür. Karışımlardaki PT içeriğinin artışıyla meydana gelen yüksek ağırlık kayıplarının nedeni olarak PT malzemesinin sahip olduğu bünyesel su gösterilebilir (Singh ve Garg, 1991). PT+ÇSA ve UK+PT+ÇSA içeren numunelerde ÇSA malzemesinin oranı arttıkça, yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen ağırlık kayıpları %4.3'e kadar gerileyerek olumlu bir etki göstermiştir. UK+ÇSA içeren numunelerde ise ÇSA oranı arttıkça, ağırlık kayıplarında 500 °C'de sınırlı bir artış görülürken, 750 °C'de ağırlık kayıpları %6.1 olarak sabit kalmıştır. Genel olarak UK+ÇSA grupları hariç diğer tüm gruplarda ÇSA malzemesinin ilave edilmesi yüksek sıcaklık etkisinde meydana gelen ağırlık kayıpları açısından olumlu etkiler göstermiştir. ÇSA malzemesinin ikamesi harçlardaki PT miktarının azalmasına, dolayısıyla da bünyeden buharlaşacak suyun da daha az olmasına yol açtığı için ağırlık kayıpları azalmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, perlit (PT) ve uçucu kül (UK) bazlı geopolimerlere çömlek sırtı atığı (ÇSA) ikamesinin mekanik ve yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- ÇSA malzemesinin PT ve UK+PT içeren numunelere kütlece %20 oranına kadar ikame edilmesinin nihai basınç dayanımı açısından olumlu yönde etkileri olduğu, UK içeren numunelerde ise ÇSA ikamesinin ise nihai basınç dayanımı açısından olumsuz etkileri olduğu tespit edilmiştir.
- Nihai dayanımlarda en yüksek değerler, 34.4 ve 32.41 MPa basınç ve 6.46 ve 6.3 MPa eğilme dayanımları ile UK+PT+ÇSA içeren numunelerde sırasıyla %10 ve %20 ÇSA oranlarında elde edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımları açısından optimum ÇSA oranının %10-20 aralığında olduğu söylenebilir.
- Eğilme ve basınç dayanımları açısından geopolimerlerde UK malzemesi yerine ÇSA malzemesinin ikamesi, kür yaşına göre dayanım gelişimlerini olumsuz etkilerken, PT ve UK+PT içeren numunelere ÇSA malzemesinin ikame edilmesi dayanım gelişimlerinde olumlu etkiler meydana getirmiştir.
- ÇSA malzemesinin karışımlarda kullanılması yüksek sıcaklık performansı açısından tüm gruplarda olumlu etki meydana getirmiştir. ÇSA malzemesinin karışımlardaki kütlece yüzdesi arttıkça, dayanım kayıpları azalmıştır. Buna ek olarak, UK malzemesi yerine %30 ÇSA malzemesinin ikame edildiği UK70ÇSA30 karışımında 750 °C'de %40'a varan dayanım artışı tespit edilmiştir.
- UK+ÇSA içeren numunelerde ÇSA oranı arttıkça, ağırlık kayıplarında 500 °C'de sınırlı bir artış

görülürken, 750 °C'de ağırlık kayıpları sabit kalmıştır. Genel olarak UK+ÇSA grupları hariç diğer tüm gruplarda ÇSA malzemesinin ilave edilmesi yüksek sıcaklık etkisinde meydana gelen ağırlık kayıplarını azaltmıştır.

Teşekkür

Yazarlar, çömlük sır atığı temini için Anadolu Çömlükçilik Firmasına, perlit temini için Genper Şirketler Grubuna teşekkür ederler.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Serhat ÇELİKTEN, deney tasarımı, bulguların analizi; Bilal BARAN, Literatür araştırması, deneylerin gerçekleştirilmesi; Zahide BAYER ÖZTÜRK, Malzemelerin temini, bulguların yorumlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Acar, M. C., Çelik, A. İ., Kayabaşı, R., Şener, A., Özdöner, N., ve Özkılıç, Y. O. (2023). Production of perlite-based-aerated geopolymer using hydrogen peroxide as eco-friendly material for energy-efficient buildings. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 81-99. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.179>

Amran, M., Debbarma, S., ve Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials* (C. 270). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>

Atabey, İ. İ., Karahan, O., Bilim, C., ve Atiş, C. D. (2020). The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120268>

Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1224-1232. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.031>

Baran, P., Nazarko, M., Włosińska, E., Kanciruk, A., ve Zarębska, K. (2021). Synthesis of geopolymers derived from fly ash with an addition of perlite. *Journal of Cleaner Production*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126112>

Bayer Öztürk, Z., ve Çam, T. (2023). Performance of eco-friendly fly ash-based geopolymer mortars with

stone-cutting waste. *Materials Chemistry and Physics*, 307, 128112. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128112>

Çelikten, S., ve Erdoğan, G. (2022). Effects of perlite/fly ash ratio and the curing conditions on the mechanical and microstructural properties of geopolymers subjected to elevated temperatures. *Ceramics International*, 48(19), 27870-27877. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.089>

Çelikten, S., ve Işıkdag, B. (2020). Strength Development of Ground Perlite-Based Geopolymer Mortars. *Advances in Concrete Construction*, 9(3), 227-234. <https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.3.227>

Çelikten, S., Sarıdemir, M., ve Akçaözoglu, K. (2020). Effect of calcined perlite content on elevated temperature behaviour of alkali activated slag mortars. *Journal of Building Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101717>

Çelikten, S., Sarıdemir, M., ve Özgür Deneme, İ. (2019). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag + fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 217, 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.055>

Davidovits, J. (1989). Geopolymers and Geopolymeric New Material. *Journal of Thermal Analysis*, 35, 429-441.

Demirboğa, R., ve Gül, R. (2003). The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 723-727. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01032-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01032-3)

Dişçi, E., ve Polat, R. (2022). The influence of nano-CaO and nano-Al₂O₃ and curing conditions on perlite based geopolymer concrete produced by the one-part mixing method. *Construction and Building Materials*, 346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128484>

Doğan, H. (2018). Erişim adresi: <http://www.turktarim.gov.tr/Haber/82/insanlik-tarihi-kadar-eski-bir-sanat-comlekçilik>

Durak, U., İlkentapar, S., Karahan, O., Uzal, B., ve Atiş, C. D. (2021). A new parameter influencing the reaction kinetics and properties of fly ash based geopolymers: A pre-rest period before heat curing. *Journal of Building Engineering*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102023>

- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., ve van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of "green concrete". *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590-1597. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>
- El-Mir, A., Hwalla, J., El-Hassan, H., Assaad, J. J., El-Dieb, A., ve Shehab, E. (2023). Valorization of waste perlite powder in geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130491>
- Erdogan, S. T. (2015). Properties of Ground Perlite Geopolymer Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001172](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001172)
- Hojati, M., ve Radlińska, A. (2017). Shrinkage and strength development of alkali-activated fly ash-slag binary cements. *Construction and Building Materials*, 150, 808-816. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.040>
- Hossain, M. M., Karim, M. R., Hossain, M. K., Islam, M. N., ve Zain, M. F. M. (2015). Durability of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: A review. *Çinde Construction and Building Materials* (C. 93, ss. 95-109). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.094>
- Işıkdağ, B. (2015). Characterization of lightweight ferrocement panels containing expanded perlite-based mortar. *Construction and Building Materials*, 81, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.009>
- Işıkhan, S. (2015). Tarihi Çanakkale seramiklerinin yeniden üretimine yönelik güncel-teknolojik denemeler. *Atatürk Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi*, 34, 133-169.
- Photisan, M. S., ve Sangphong, O. (2022). STRENGTH DEVELOPMENT OF FLY ASH-PERLITE BASED GEOPOLYMER MORTAR USING RECYCLED WASTE GLASS AS FINE AGGREGATE. *Naresuan University Journal: Science and Technology*, 31(1), 1-9.
- Provis, J. L. (2014). Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(1-2), 11-25. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0211-5>
- Provis, J. L., ve Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
- Sarıdemir, M., ve Bulut, M. (2021). Effects of ground basaltic pumice and high temperatures on the properties of HSMS. *Journal of Building Engineering*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102772>
- Sarıdemir, M., ve Celikten, S. (2017). The strength properties of alkali-activated silica fume mortars. *Computers and Concrete*, 19(2), 153-159. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.2.153>
- Singh, M., ve Garg, M. (1991). Perlite-based building materials — a review of current applications. *Construction and Building Materials*, 5(2), 75-81. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(91\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(91)90004-5)
- TS EN 196-1. (2016). TS EN 196-1, Turkish Standards European Norms, Methods of Testing Cement-Part 1: Determination of Strength, Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey.
- TS EN 1015-11/A1. (2020). TS EN 1015-11/A1, Methods of Test for Mortar for Masonry- Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar, Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.
- Turhan, D., Karagöl, F., ve Polat, R. (2021). Investigation of the Properties of Perlite-Based Geopolymer Concrete with Red Mud. In *PACE-2021 International Congress on the Phenomenological Aspects of Civil Engineering*, 1-7.
- Uğurlu, A. İ., Karakoç, M. B., ve Özcan, A. (2021). Effect of binder content and recycled concrete aggregate on freeze-thaw and sulfate resistance of GGBFS based geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124246>
- Ulugöl, H., Günal, M. F., Yaman, İ. Ö., Yıldırım, G., ve Şahmaran, M. (2021). Effects of self-healing on the microstructure, transport, and electrical properties of 100% construction- and demolition-waste-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104081>
- Zhang, H. Y., Qiu, G. H., Kodur, V., ve Yuan, Z. S. (2020). Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Composites*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103483>