

Kür Koşullarına Bağlı Olarak Kolemanit ve Kurşun Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Alkali Aktive Harçların Performansı

***Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 04.01.2026

Kabul/Accepted: 19.09.2026

Yayımlandı/Published: 06.10.2026

Performance of Colemanite and Lead-Added Self-Compacting Alkali-Activated Mortars Depending on Curing Conditions

Sibel SAĞLIYAN* 

Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elazığ, Türkiye



© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, uçucu kül (UK) esaslı kendiliğinden yerleşen alkali aktive harçlarda kolemanit (KO) ve kurşun tozu (KU) ikamesinin farklı kür sıcaklığı ve süreleri altında taze ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Harçlar, uçucu külün yerine kütlece %10 KO, %10 KU ve %5 KO + %5 KU ikame edilerek hazırlanmış, 14 M NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri ile aktive edilmiştir. Numuneler 30, 60 ve 90 °C sıcaklıklarda 4, 8 ve 24 saat süreyle kürlenmiştir. Mini çökme-yayılma deneyleri, kolemanit katkısının akışkanlığı azaltarak yayılma çapını 24,6 cm'ye düşürdüğünü, kurşun tozu katkısının ise 26,0 cm ile referans karışımla aynı yayılma değerini sağladığını göstermiştir. KO5KU5 karışımı 25,0 cm yayılma çapı ile ara bir davranış sergilemiştir. Mekanik deneyler, kür sıcaklığı ve süresinin hem eğilme hem de basınç dayanımı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. En yüksek dayanımlar tüm karışımlarda 90 °C'de 24 saat kür uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Bu koşulda referans karışım 7,16 MPa eğilme ve 32,57 MPa basınç dayanımı gösterirken, KO10 karışımında bu değerler sırasıyla 6,21 MPa ve 28,17 MPa, KU10 karışımında ise 6,94 MPa ve 30,47 MPa olarak belirlenmiştir. KO5KU5 karışımı her iki dayanım türünde referans ile tekli katkı karışımlar arasında yer almıştır. Sonuçlar, uygun kür sıcaklığı ve süresinin alkali aktive harçların mekanik performansını önemli ölçüde artırdığını, kurşun tozunun kolemanite göre mekanik özellikleri daha sınırlı düzeyde etkilediğini ve KO ile KU'nun birlikte kullanımının dengeli bir performans sağladığını göstermektedir.

Abstract

In this study, the effect of colemanite (KO) and lead powder (KU) substitution in fly ash (FA)-based self-compacting alkali-activated mortars on fresh and mechanical properties was investigated under different curing temperatures and durations. The mortars were prepared by replacing fly ash with 10% by mass KO, 10% KU, and 5% KO + 5% KU, and were activated with 14 M NaOH and Na₂SiO₃ solutions. The specimens were cured at temperatures of 30, 60, and 90 °C for 4, 8, and 24 hours, respectively. Mini slump-spread tests showed that the colemanite additive reduced flowability, lowering the spread diameter to 24.6 cm, while the lead powder additive yielded a spread value of 26.0 cm, identical to that of the reference mixture. The KO5KU5 mixture exhibited intermediate behavior with a spread diameter of 25.0 cm. Mechanical tests revealed that curing temperature and duration were decisive factors for both flexural and compressive strength. The highest strengths were obtained in specimens from all mixtures cured at 90 °C for 24 hours. Under these conditions, the reference mixture exhibited a flexural strength of 7.16 MPa and a compressive strength of 32.57 MPa, while these values were determined to be 6.21 MPa and 28.17 MPa, respectively, for the KO10 mixture, and 6.94 MPa and 30.47 MPa for the KU10 mixture. The KO5KU5 mixture ranked between the reference and single-additive mixtures in both types of strength. The results show that appropriate curing temperature and duration significantly improve the mechanical performance of alkali-activated mortars, that lead powder affects mechanical properties to a more limited extent compared to colemanite, and that the combined use of KO and KU provides balanced performance.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen harç; Alkali aktive harç; Kür sıcaklığı; Kür süresi; Kolemanit; Kurşun tozu.

Keywords: Self-compacting mortar; Alkali-activated mortar; Curing temperature; Curing time; Colemanite; Lead powder.

1. Giriş

Beton ve betonarmenin temel bileşeni olan çimento üretiminde kullanılan hammaddeler, doğal kaya stoklarının azalmasına neden olmakta ve üretim süreci yüksek düzeyde enerji tüketimi gerektirmektedir. Yapılan araştırmalara göre çimento üretiminin, küresel karbondioksit (CO₂) salınımına katkısı yaklaşık %5–8

arasındadır (Abiodun et al., 2022). Doğal kaynakların tükenmesi, hava kirliliği ve yüksek enerji tüketimi gibi çevresel sorunların azaltılması amacıyla, araştırmacılar alternatif bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır (Arslan et al., 2019; Aygörmüş et al., 2020; Gök & Sengül, 2023). Günümüzde, endüstriyel ve evsel enerji ihtiyacının büyük bölümünü karşılayan kömür

yakıtlı enerji santralleri, her yıl milyonlarca ton UK üretmektedir (Davidovits, 2013; Deb et al., 2013; Dhadse et al., 2008). Bu yan ürünün yönetimi, çevresel etkiler açısından her zaman önemli bir endişe kaynağı olmuştur. Üretilen uçucu külün yalnızca yaklaşık %60'ı çimento ve beton üretiminde katkı veya dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilmekte, geri kalan kısmı ise atık depolama alanlarına gönderilmektedir (Davidovits, 2013). Bu nedenle, söz konusu atıkların ekonomik değere dönüştürülmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, alkali ile aktive edilen kompozitler dikkat çekici alternatif bağlayıcı sistemler olarak öne çıkmaktadır (Ghosh et al., 2018; Gök S G; Şengül Ö., 2023). Alkali aktive kompozitler; uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi alüminosilikat esaslı bağlayıcı malzemelerin, sodyum silikat, potasyum silikat, sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit gibi alkali aktivatörlerle polimerizasyonu sonucunda oluşan yeni nesil inorganik bağlayıcılardır (Arslan et al., 2019; Aygörmüş et al., 2020; Davidovits, 2013; Pradhan et al., 2022). Alkali ile aktive edilen kompozitlerin mekanik dayanımı ve dayanıklılığı; kullanılan aktivatör tipi, bağlayıcı türü, hammadde kaynağı, kür sıcaklığı ve süresi gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Henigal et al., 2017a; Sahin et al., 2021). Alüminosilikat bağlayıcılardan biri olan uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ise kömür kaynağı, yanma koşulları, tozlaşma derecesi, kül toplama yöntemi ve bertaraf süreci gibi etkenlere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Nitekim literatürde, aynı tesiste üretilen uçucu küllerin dahi birbirinden oldukça farklı özellikler sergileyebildiği belirtilmiştir (Amran et al., 2021).

Meesala vd., uçucu kül esaslı geopolimer kompozitlerin basınç dayanımının sıcaklık ve alkali çözelti konsantrasyonunun artmasıyla arttığını, alkali çözelti/uçucu kül oranı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir (Meesala et al., 2020). Chen ve diğerleri kürleme sıcaklığı ve süresinin metakaolin bazlı geopolimerlerin özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmada, kür sıcaklığının artmasıyla basınç dayanımının arttığını, ancak yüksek sıcaklıkta (80°C ve 100°C) kürlenmiş numunelerde geopolimerizasyon için gerekli olan nemin bir kısmını kaybetmesiyle dayanımında azalmaya neden olduğu, en yüksek basınç dayanımının 168 saat boyunca 60°C de kürleme sıcaklığında elde edildiği ifade edilmiştir (Chen et al., 2016). Rovnanik (2010), metakaolin esaslı harç numunelerinde 10°C ile 80°C arasındaki farklı kürleme sıcaklıkları ve sürelerinin, numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ile mikro yapısal ve gözeneklilik özellikleri üzerindeki etkilerini incelediği çalışmada alkali aktive malzemenin hem erken yaş hem de nihai mekanik

özelliklerinin büyük ölçüde kürleme sıcaklığına bağlı olduğunu bildirmiştir. Aynı çalışmada pozimetre ölçümleri, ortalama gözenek boyutunun yaşlanmayla birlikte hafifçe azaldığını ve bunun farklı kürleme koşullarında işlenen tüm numuneler için geçerli olduğu belirtilmiştir (Rovnanik, 2010a).

Kovalent ve iyonik bağlara dayanan üç boyutlu ağ yapısına sahip bir tür inorganik polimerik silikat malzeme olan alkali aktive kompozitler (geopolimer) mükemmel asit ve alkali korozyon direnci ile yüksek sıcaklık direnç özellikleri, yaygın olarak kullanılan inorganik beton koruyucu malzemelerin çoğunda yoktur. Bu nedenle geopolimerler beton yüzey korunmasında da potansiyel uygulama yöntemlerinden olabilir (Wiyono et al., 2015; Zarina, Y., Al Bakri Abdullah, M.M., et al., 2013).

Birçok araştırmacı, herhangi bir dış müdahale olmadan sık donatılı, dar kesitli yapısal elemanlarda donatı ile güçlü aderans, daha az bakım, hızlı inşaat süreci, düşük maliyet ve daha az gürültü kirliliği gibi avantajları ile geleneksel portland çimento betonun bir evrimi olarak tanımlanan kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerini uygulayarak geopolimer beton çalışmalarını sürdürmektedir (Ghafoor et al., 2021a, 2022; Ghafoor & Fujiyama, 2022; Gülşan et al., 2019a; Hekimoğlu et al., 2021; Henigal et al., 2017b; Manjunath & Ranganath, 2019; Memon et al., 2013; Yön & Karataş, 2022). Yapılan çalışmalarda ağırlıkça süper akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranının %0.6 ile %1.19 aralığında olduğu belirtilmiştir (Benabed et al., 2012; Benli, 2019; Liu & Poon, 2016). Ancak yüksek viskoziteli yapıları nedeniyle, kendiliğinden yerleşen geopolimer beton/harçların bağlı akış hızı ve bağlı akış alanı kriterlerini karşılayabilmesi için %4–9 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılması gerektiği ve araştırmacıların bu oranlarla gerekli şartların sağlandığını belirttiği görülmüştür (Demie et al., 2011; Ghafoor et al., 2021b; Gülşan et al., 2019b).

Bu kapsamda, çevresel sürdürülebilirlik ve yerel hammadde kullanımı açısından alternatif mineral katkıların araştırılması önem kazanmaktadır. Türkiye'nin sahip olduğu zengin bor minerali rezervleri bu açıdan dikkate değer bir potansiyel sunmaktadır. Dünya bor rezervlerinin yaklaşık %72'sine sahip olan Türkiye, aynı zamanda yılda yaklaşık 2 milyon ton bor minerali ve bileşiği üretmektedir. Bu minerallerin en önemlileri kolemanit, üleksit ve tinkaldir. Kalsiyum borat minerali olan saf kolemanitin zenginleştirilmesi (konsantrasyonu) sırasında çok sayıda yan ürün ortaya çıkmakta ve bu yan ürünler atık olarak çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu atıklardan kaynaklanan kirliliğin en aza indirilmesi amacıyla, söz konusu malzemeler çimento ve beton gibi

farklı proseslerde değerlendirilmektedir (Sevim, 2011a). Kula ve ark.(2001), kolemanit atıklarının soğuk taban külü ve uçucu kül ile birlikte çimento özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmalarında, %10'a kadar kolemanit atığı ilavesinin mekanik özellikleri olumlu yönde iyileştirdiğini belirtmişlerdir (Kula et al., 2001). Madencilik ve metalurji endüstrilerinden gelen birçok endüstriyel ve konut atığı önemli miktarda ağır metal içermektedir. Ancak bunların ekosisteme salınmasının önlenmesi, çoğu ekoloji uzmanının dikkatini çekmektedir. Dünya çapında ağır metal içeren malzemeleri güvenli bir şekilde işlemek için birçok teknik bulunmaktadır; bunlar arasında çimento bazlı malzemeler kullanılarak katılaştırma/stabilizasyona dayalı olanlar ile alkali aktive edilmiş ve diğer alternatif bağlayıcı sistemeler yer almaktadır (Glasser, 1997; Kontopoulos, 1996). Düşük geçirgenlikleri, yüksek asit dirençleri ve dayanıklılıkları nedeniyle alkali aktivasyon teknolojisinin, atık arıtma uygulamaları ile toksik kirleticilerin ve radyoaktif atıkların immobilizasyonunda uzun yıllardır araştırılan ve en umut verici tekniklerden biri olduğu belirtilmiştir (Davidovits, 2011; Deja, 2002; Khater & Ghareib, 2020; N.B. Milestone, 2006; Palomo & López dela Fuente, 2003; Palomo & Palacios, 2003; Van Jaarsveld & Van Deventer, 1999). Deja (2002), alkali aktive edilmiş cüruf bağlayıcılarında krom, kadmiyum, çinko ve kurşun iyonlarının immobilizasyonunu incelediği çalışmada, bu iyonların bağlayıcının mekanik özelliklerini etkilediğini ifade etmiştir (Deja, 2002). Van Jaarsveld vd. (1999), küçük miktarda kurşun ilavesinin silikatla aktive edilen uçucu kül/kaolinit geopolimerlerinin mukavemetini artırdığını belirtmiştir (Van Jaarsveld & Van Deventer, 1999). Palomo ve Palacios (2003) çimento ve alkali aktive matrislerde krom ve kurşunun stabilizasyon kapasitesinin incelendiği çalışmada alkali aktive matrislerde kurşunun immobilizasyonunun sağlandığını, mekanik dayanımda ise bir miktar azalma olduğu belirtilmiştir (Palomo & Palacios, 2003).

Bu çalışmanın motivasyonu, endüstriyel yan ürün niteliğindeki uçucu kül ve kolemanitin değerlendirilmesi ile kurşun tozunun alkali aktive harçların özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması yoluyla, mevcut yapı elemanlarının yüzeylerinde kullanılabilecek sürdürülebilir ve çevre dostu kendiliğinden yerleşen alkali aktive ince tamir ve siva harçlarının geliştirilmesidir. Bu kapsamda kurşun tozu, mevcut çalışmada yalnızca taze ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla kullanılmış; ayrıca yüksek yoğunluğu nedeniyle aynı

projenin sonraki aşamalarında araştırılması planlanan radyasyon zırhlama performansı açısından potansiyel bir mineral katkı olarak değerlendirilmiştir. Kolemanit ve kurşun tozu, aynı projenin ilerleyen çalışmalarında radyasyon zırhlama özelliklerinin araştırılmasına olanak sağlayabilecek potansiyel katkı malzemeleri olarak seçilmiş olmakla birlikte, bu çalışmanın kapsamı yalnızca farklı kür sıcaklığı ve kür süresinin taze ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin belirlenmesiyle sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte, alkali aktive edilmiş harçların yaygın kullanımının önündeki en önemli teknik zorluklardan biri, geopolimerizasyon reaksiyonunun etkin biçimde gerçekleşebilmesi için gerekli olan uygun sıcaklıkta kür uygulanması ve kür süresinin optimize edilmesidir. Bu nedenle, farklı oranlarda kolemanit ve kurşun tozu içeren kendiliğinden yerleşen alkali aktive harçlarda kür sıcaklığı ve kür süresinin mekanik performans etkileri sistematik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Na_2SiO_3 ve NaOH bazlı alkali aktivatörler kullanılarak hazırlanan harç numuneleri, 30°C, 60°C ve 90°C sıcaklıklarda, 4, 8 ve 24 saatlik kür sürelerine tabi tutulmuş ve üretilen numunelerin dayanımları incelenerek elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada, alkali aktive edilmiş harçların üretiminde Adana Sugözü Termik Santralinden (İSKEN) temin edilen uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Sugözü UK'nın kimyasal bileşimleri X-ışını floresans spektrometresi (XRF) kullanılarak belirlenmiş ve Çizelge 1'de verilmiştir. Sugözü UK ASTM C618 standardına göre $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin %70'in üzerinde olması ve CaO miktarının %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir (ASTM C618, 2023). Özgül yüzeyi $3631 \text{ cm}^2/\text{gr}$, tane yoğunluk değeri $2,35 \text{ gr}/\text{cm}^3$, kızdırma kaybı ise 2.36'dır.

Çizelge 1. Uçucu külün kimyasal bileşimi

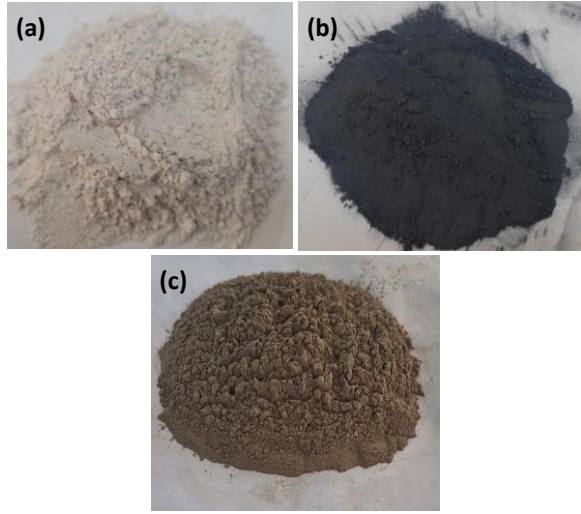
Kimyasal bileşim	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	K_2O
%	58,8	7,9	20,9	3,4	1,1	1,9	1,6

Balıkesir Eti Maden Fabrikasından temin edilen inceliği $45\mu\text{m}$ 'lik bir elekten geçen KO'nun kimyasal bileşimleri X-ışını floresans spektrometresi (XRF) kullanılarak belirlenmiş ve Çizelge 2'de verilmiştir. Ayrıca KO'nun özgül yüzeyi $4153 \text{ cm}^2/\text{gr}$, tane yoğunluğu $2,43\text{gr}/\text{cm}^3$, kızdırma kaybı ise 22,82'dir.

Çizelge 2. Kolemanitin kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim	B_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	SrO	Fe_2O_3
%	36,01	10,20	1,08	22,08	0,50	4,51	1,50	0,26

Çalışmada kullanılan KU, Nanografi firmasından temin edilmiş olup, parçacık boyut dağılımı 40–47 μm aralığında olup %99.9 saflık derecesine sahiptir. Kurşun tozunun ergime sıcaklığı 327.43 $^{\circ}\text{C}$, yoğunluğu ise 11.34 g/cm^3 'tür. Çalışmada kullanılan toz malzemeler Şekil 1'de verilmiştir.



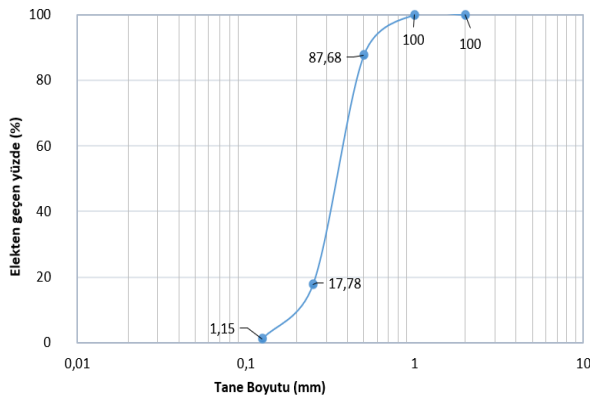
Şekil 1. Karışımda kullanılan (a) kolemanit, (b) kurşun tozu ve (c) uçucu kül

Mevcut yapıların veya bileşenlerinin yüzeylerine uygulanabilecek kurşun ve/veya kolemanit katkılı ince

alkali aktive sıva harçlarının geliştirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada numunelerin yüzeye uygulanabilirliği, homojenliği ve mikro yapısal özelliklerinin daha kontrollü değerlendirilebilmesi için, maksimum tane çapı 1 mm olan yüksek saflıktaki silis kumu kullanılmıştır. Kullanılan silis kumunun tane boyutu dağılımı Şekil 2'de sunulmuştur. Geopolimerizasyon reaksiyonunun temel bileşeni olan silikanın yüksek saflıkta olması, reaksiyonun verimini artırmasının yanı sıra, kumun düzgün ve yuvarlak parçacık morfolojisi sayesinde harcın akışkanlığını da iyileştireceği öngörülmüştür. Silis kumunun kimyasal bileşimi Çizelge 3'te verilmiştir. Silis kumunun özgül ağırlık ve su emme özellikleri ASTM C128-94 standardına göre belirlenmiş olup, bu değerlere göre özgül ağırlık 2.44 g/cm^3 , su emme oranı ise %1.8 olarak tespit edilmiştir. Alkali aktivatörler olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Na_2SiO_3 (SS), %8,92 Na_2O , %26,76 SiO_2 'den oluşmaktadır. SS'nin silika oranı ($\%\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 3'tür. SH ve SS'nin özgül ağırlıkları sırasıyla 1,24 g/cm^3 ve 1,38 g/cm^3 'dür. Çalışmada özgül ağırlığı 1,08 g/cm^3 olan polikarboksilik eter bazlı süperakışkanlaştırıcı (SP) kullanılmıştır.

Çizelge 3. Kumun kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2
%	98,86	0,25	0,15	0,01	0,10	0,02	0,03	0,13



Şekil 2. Silis kumunun tane büyüklük dağılımı

2.2 Yöntem

KU ve KO katkılı uçucu kül esaslı alkali aktive harçlarda kür sıcaklığı ve kür süresinin dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla karışımlar 14 M NaOH + Na_2SiO_3 çözeltileri kullanılarak hazırlanmıştır. 14 M NaOH derişimi, ön deneme karışımlarında elde edilen mekanik performans sonuçları ile literatürde uçucu kül esaslı alkali aktive sistemler için önerilen molarite aralığı dikkate alınarak seçilmiştir. TTM uçucu kül ile ikame malzemeleri olan kolemanit ve kurşun tozunun toplamıdır. Alkali aktivatör/toplam toz malzeme (AA/TTM) oranı 0,43,

sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) oranı ise 3,0 olarak tüm karışımlarda sabit tutulmuştur. SH çözeltisi, ekzotermik çözünme reaksiyonunun karışım sıcaklığını etkilemesini önlemek amacıyla deneyden bir gün önce hazırlanmış ve oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra SS çözeltisi ile karıştırılarak kullanılmıştır. Karışımlarda uçucu kül ve ikame edilen kolemanit ve/veya kurşun tozu toplamı (toplam toz malzeme) ile alkali aktivatör miktarı sırasıyla 700 kg/m^3 ve 300 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Çalışma kapsamında seçilen alkali aktivatör/toplam toz malzeme oranı, SS/SH oranı, uçucu kül dozajı ve katkı oranları literatürde önerilen değerler ile gerçekleştirilen ön yapılan deneme karışımlarından elde edilen işlenebilirlik ve mekanik performans sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Kolemanit katkısının %10 seviyesine kadar mekanik özellikler üzerinde kabul edilebilir performans gösterdiğinin literatürde bildirilmesi (Kula et al., 2001) ve ön deneme karışımlarında bu oran dengeli sonuçlar vermesi nedeniyle tekli katkı oranı %10 olarak seçilmiştir. %5 KO +%5 KU karışımı ise iki katkının birlikte kullanımından kaynaklanabilecek olası sinerjik etkinin değerlendirilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Kendiliğinden yerleşen harç karışımlarının işlenebilirlik özelliklerinin EFNARC (EFNARC, The European Guidelines

for Selfcompacting Concrete: Specification, Production and Use, 2005) standardında kendiliğinden yerleşen harçlar için önerilen mini çökme- yayılma deneyi esas alınmış, karışımların yeterli akıcılığı sağlayabilmesi amacıyla süper akışkanlaştırıcı miktarı, toplam toz malzeme miktarının %8'i olarak optimize edilmiştir. Buna göre referans numune grubu (REF) olarak, toplam toz malzeme miktarının ağırlıkça %10'unun kurşun (KU10), %10'unun kolemanit (KO10), %5 kurşun + %5 kolemanit (KU5KO5) ile ikame edildiği karışımlar hazırlanmıştır. Kendiliğinden yerleşen alkali aktive harçlara ait karışım oranları Çizelge 4'te verilmiştir. Karışımların hazırlanmasında 1,8 litre kapasiteli laboratuvar tipi harç mikser kullanılmıştır. DeneySEL çalışmadan bir gün önce,

sodyum hidroksit çözeltisi su kullanılarak 14 M derişimde hazırlanmış ve karışımın hazırlanmasından en az 1 saat önce, sodyum hidroksit çözeltisi sodyum silikat ile 1:3 oranında karıştırılarak alkali aktivatör çözeltisi oluşturulmuştur. Karışım hazırlanırken, kuru bileşenler (uçucu kül, kurşun, kolemanit ve silis kumu) 140 rpm hızda 1,5 dakika süreyle homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Ardından alkali aktivatör çözeltisi (SH (14 M) + SS) ilave edilerek karıştırma işlemi aynı hızda 1 dakika ve 285 rpm hızda 1 dakika olacak şekilde sürdürülmüştür. Son olarak, süper akışkanlaştırıcı (SP) eklenmiş ve karışım aynı hızda 1 dakika daha karıştırılarak işlem tamamlanmıştır.

Çizelge 4. Kendiliğinden yerleşen alkali aktive edilmiş harç karışım tasarımları

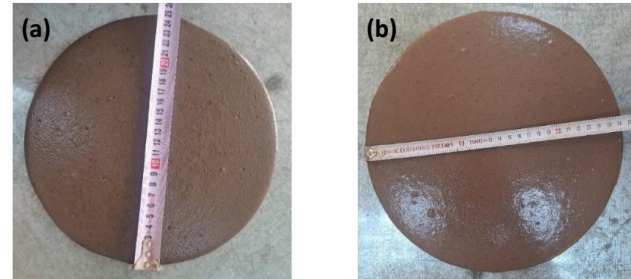
Karışım Kodu	TTM (kg/m ³)	UK (kg/m ³)	KU/TTM %	KU (kg/m ³)	KO/TTM %	KO (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	AA/TTM	SS (kg/m ³)	SH (kg/m ³)	SP (%)
REF	700	700	0	0	0	0	992	0,43	225	75	8
KO10	700	630	0	0	10	70	995	0,43	225	75	8
KU10	700	630	10	70	0	0	1050	0,43	225	75	8
KU5KO5	700	630	5	35	5	35	1022	0,43	225	75	8

UK:Uçucu kül, KU:Kurşun tozu, KO:Kolemanit AA:Alkali çözelti, TTM:Toplam toz malzeme, SS:Sodyum silikat, SH:Sodyum hidroksit, SP:Süperakışkanlaştırıcı

Elde edilen taze harçların yayılma özellikleri, EFNARC (EFNARC, The European Guidelines for Selfcompacting Concrete: Specification, Production and Use, 2005) yönergelerine dayalı mini çökme-yayılma testi ile belirlenmiştir. Bu testte, kesik koni biçimindeki kalıp düz bir plaka üzerine yerleştirilip harçla doldurulmuş, ardından kalıp dikey olarak kaldırılmıştır. Harcın serbestçe yayılması sonucunda, birbirine dik iki doğrultuda ölçülen yayılma çaplarının ortalaması alınarak yayılma değeri belirlenmiştir. Sertleşmiş numune dayanımlarının belirlenmesi amacıyla taze alkali aktive harçlar, 40×40×160 mm boyutlarındaki çelik kalıplara dökülmüş ve su kaybını önlemek için streç film ile kaplanarak 1 saat ön kurlama süresine bırakılmıştır. Ardından numuneler, 30°C, 60°C ve 90°C sıcaklıklarda 4, 8 ve 24 saat süreyle ısı kurlanmış, sonrasında ise ortam sıcaklığında (23 ± 2°C) kurlamaya devam edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımlarının kür sıcaklığı ve süresine bağlı değişimini incelemek amacıyla hazırlanan numuneler, ASTM C348 (2002) ve ASTM C349-02 standardlarına uygun olarak 7 ve 28 günlük yaşlarda test edilmiştir. Öncelikle prizmatik numuneler üç nokta eğilme testine tabi tutulmuş, ardından eğilme testi sonrası elde edilen iki yarım parça, uzak kenarlarından basınç testine tabi tutulmuştur. Eğilme deneyinde yükleme hızı 0,05 kN/s, basınç deneyinde ise 2,4 kN/s olarak uygulanmıştır. Mekanik dayanım sonuçları, her bir test için üç numunenin ortalaması alınarak sunulmuştur.

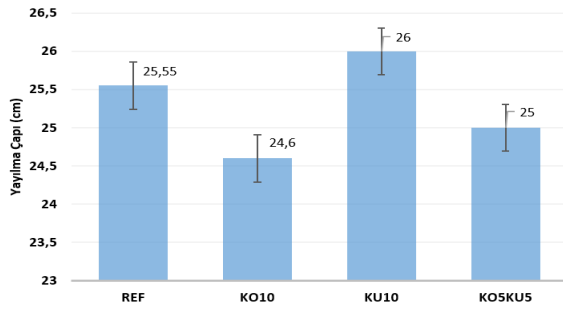
3. Bulgular ve Tartışma

Mini çökme-yayılma akış çapı testi ile harç karışımlarının akıcılık özellikleri değerlendirilmiştir. Şekil 3a ve Şekil 3b, sırasıyla KO10 ve KU10'un yayılma akışını göstermektedir.



Şekil 3. Harç karışımlarının mini çökme-yayılma deneyleri

Şekil 4'te sunulan mini çökme-yayılma sonuçları incelendiğinde, kolemanit ve kurşun tozunun harçların reolojik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen mini çökme-yayılma değerleri, EFNARC (2005) standardında esas alınan mini çökme-yayılma değerlendirmesi açısından tüm karışımların kendiliğinden yerleşen alkali aktive harçlar için hedeflenen işlenebilirlik düzeyini sağlandığını göstermektedir. KO10 numunesinin yayılma çapı, referans numunesine kıyasla daha düşük olup 24,6 cm olarak ölçülmüştür. Bu durumun, kolemanit tozunun suyu bağlama kapasitesi nedeniyle harç viskozitesini artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



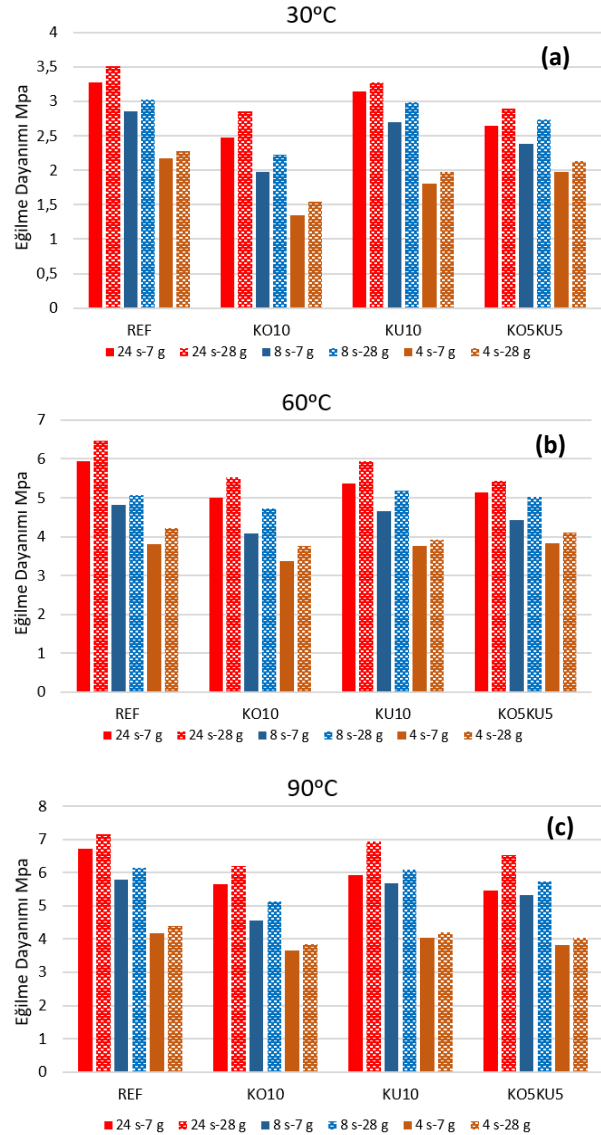
Şekil 4. Harç karışımlarının mini çökme-yayılma grafiği

Literatürde de benzer şekilde, kolemanit ilavesinin harç ve beton karışımlarında yayılma değerlerini azalttığı bildirilmiştir (Özen et al., 2022; Yön et al., 2024). Bor içeriği yüksek bir bileşen olan kolemanitin, alkali aktivasyon ortamında kısmen çözünerek matriste jel oluşumunu teşvik ettiği ve bu süreçte iç sürtünmeyi artırarak akışkanlığı azalttığı değerlendirilmektedir. Buna karşılık, KU10 numunesi 26 cm yayılma çapı ile en yüksek akışkanlık değerini göstermiştir. Kurşun tozunun pürüzsüz parçacık morfolojisi ve literatürde bildirilen düşük kimyasal reaktivitesi nedeniyle matris içerisinde kayganlığı artırarak harcın daha rahat yayılmasına katkı sağlamış olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, kurşun tozunun alkali ortamdaki davranışına ilişkin bu değerlendirme literatürde bildirilen bulgulara dayanmaktadır. Mevcut çalışmada bu durum XRD, SEM-EDS veya benzeri mikro yapısal analizlerle doğrulanmamıştır. KO5KU5 numunesinde 25 cm yayılma ile referans numuneye çok yakın bir yayılma değeri göstermiştir. Bu durum, kolemanitin akışkanlığını azaltıcı etkisi ile kurşun tozunun akışkanlığı artırıcı etkisinin birbirini dengelediği görülmektedir (Duxson et al., 2007; Erdogmus, 2014; Gencel et al., 2016; Khater & Ghareib, 2020; Kontopoulos, 1996; Palomo & López dela Fuente, 2003; Palomo & Palacios, 2003; Wan et al., 2020).

Sertleşmiş numune özelliklerini araştırmak amacıyla numuneler üzerinde ASTM C348 (2002)'e (ASTM C348 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, 2002) uygun olarak üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Şekil 5'de KO ve KU ilaveli uçucu kül esaslı alkali aktive harçların farklı sıcaklıklarda (30 °C, 60°C, 90°C) ve farklı kür sürelerinde (4, 8 ve 24 saat) eğilme dayanımlarındaki değişim görülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, kür sıcaklığı ve ısıl kür süresi eğilme dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. DeneySEL çalışmada 90 °C'de 24 saat kür uygulanan numunelerde en yüksek eğilme dayanımı 7 günlük yaşta 6,73 MPa ile referans karışımda, en düşük değer ise 5,45 MPa ile KO5KU5 karışımda elde edilmiştir. KO10 katkısı, aynı kür koşullarında referansa göre en fazla %16 oranında, KU10 katkısının ise %12 oranında eğilme

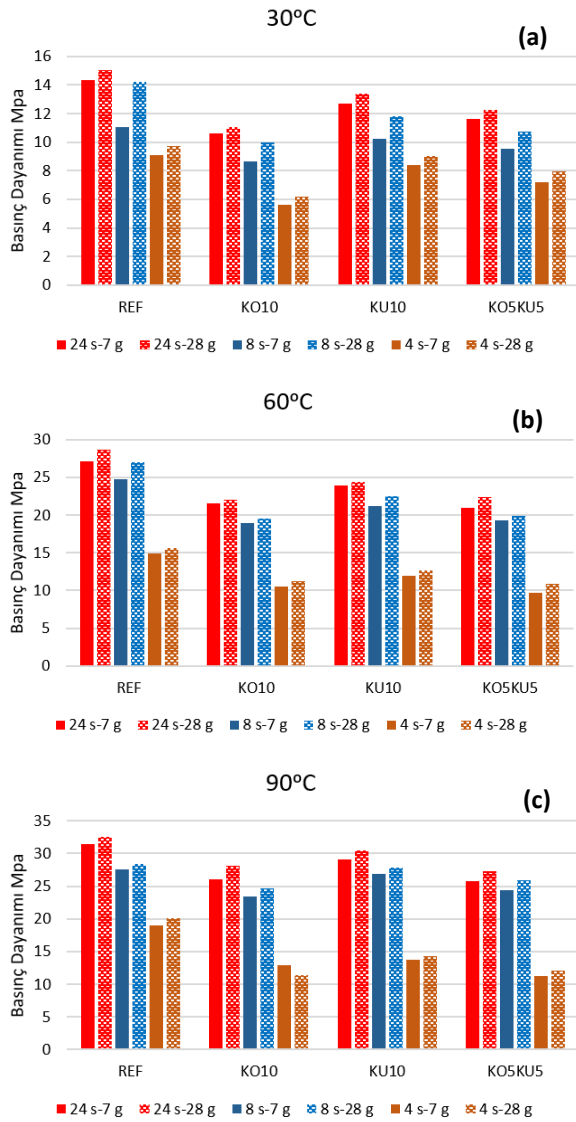
dayanımında azalmaya neden olduğu görülmüştür. KO5KU5 karışımında ise bu azalma en fazla %19 olduğu belirlenmiştir. Aynı kür şartlarında 28 günlük yaşta 7,16 MPa ile en yüksek eğilme dayanımı referans numunesinde, en düşük eğilme dayanımı ise 6,21 MPa ile KO10 katkısı numunesinde elde edilmiştir. KO10 katkısı %13, KU10 katkısı %3, KO5KU5 katkılı numunelerde ise %9 eğilme dayanımında azalmaya neden olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 30° C(a), 60° C(b) ve 90° C(c) sıcaklıklarda ve farklı ısıl kürleme sürelerinde 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değişimleri

Eğilme dayanımına ısıl kür süresinin kısaltılmasının etkisi ele alındığında 7 günlük yaşta REF için 90 °C'de 24 saat 6,73 MPa iken 8 saatlik kürde 5,78 MPa olup bu azalma yaklaşık %14'tür; 4 saatlik kürde ise 4,17 MPa'a düşerek %38'lik bir kayıp olduğu belirlenmiştir. KO10, KU10 ve KO5KU5 karışımlarında 90 °C'de kür sürelerinin 24 saatten ve 4 saate azaltılması halinde eğilme dayanımlarındaki azalış ise; KO10'da %35, KU10'da %32 ve KO5KU5'de %30 azalma olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük yaşta kür

süresinin 24 saatten 4 saate azaltılmasının eğilme dayanımındaki azalma 7 günlük yaşta meydana gelen azalmaya yakın olduğu görülmüştür. Aynı şekilde 7 günlük eğilme dayanımında 30 °C’de kür sıcaklığında kür süresinin 24 saatten 4 saate azaltılması halinde karışım tasarımlarının eğilme dayanımları ele alındığında REF’de %34, KO10’da %46, KU10’da %43, KO5KU5’de ise %25 azalış meydana geldiği belirlenmiştir. 28 günlük eğilme dayanımlarında da yaklaşık aynı azalışların meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, yüksek sıcaklıkta uzun süreli kürün reaksiyon ürünlerinin olgunlaşmasını hızlandırdığını, düşük sıcaklık veya kısa süreli kürün ise geopolimerizasyonun tamamlanamamasına bağlı olarak dayanımı sınırladığını göstermektedir. Bu eğilimler literatürdeki bulgularla da uyumludur (Rovnaník, 2010b; Sajan et al., 2021).



Şekil 6. 30°C (a), 60° C(b) ve 90°C (c) sıcaklıklarda ve farklı kürleme sürelerinde 7 ve 28 günlük basınç dayanım değişimleri. Karışım numunelerinin basınç dayanımları ASTM C349-02 (2002)’e (ASTM C349-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars

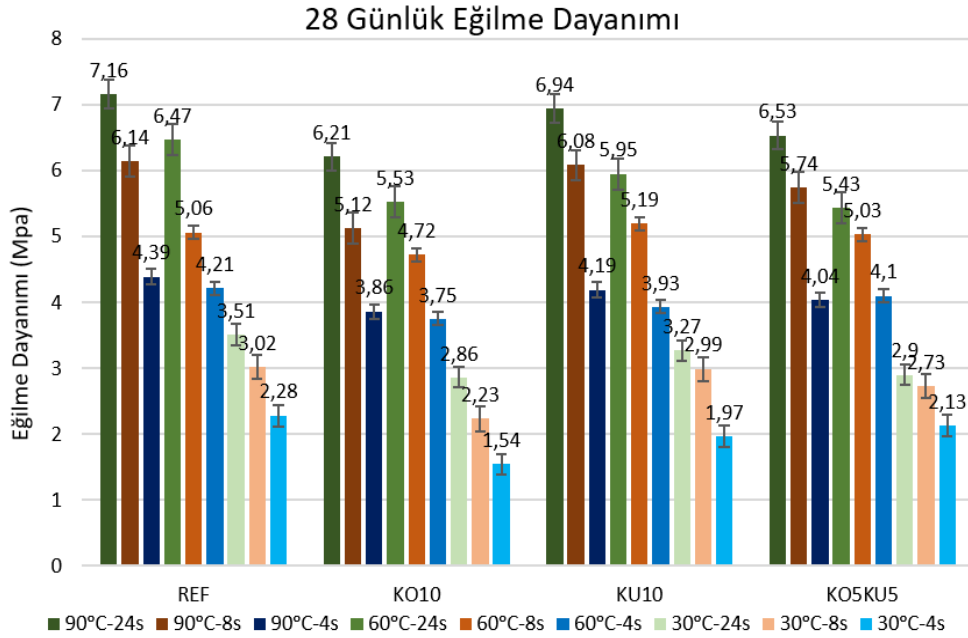
(Using Portions of Prisms Broken in Flexure), 2002) uygun olarak yapılmış, Şekil 6’da kolemanit (KO) ve kurşun tozu (KU) katkıları uçucu kül esaslı alkali aktive edilmiş harçların farklı sıcaklıklarda (30°C, 60°C, 90°C) ve farklı kür sürelerinde (4, 8 ve 24 saat) basınç dayanımlarındaki değişim görülmektedir. Şekil 6 (a)’da 30°C, (b)’de 60°C ve (c)’de 90°C sıcaklıklarda 7 günlük (çubuklar) 28 günlük (noktalı çizgiler) eğilme dayanımlarını belirtmektedir.

Basınç dayanımı sonuçları, kür sıcaklığı ve süresinin alkali aktive edilmiş uçucu kül esaslı harçların mekanik performansı üzerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır. 90 °C’de 24 saat kürlenen numunelerde en yüksek 7 günlük basınç dayanımı 31,48 MPa (REF) olarak belirlenmiştir. KU10 karışımı, 29,05 MPa dayanım değeriyle referansa oldukça yakın bir performans sergileyerek yalnızca %7,7 daha düşük sonuç vermiştir. Buna karşılık, KO10 karışımında dayanım %17, KO5KU5 karışımında ise %18 oranında azalma göstermiştir. Kolemanit katkısının neden olduğu bu düşüş, su bağlama kapasitesinin artmasıyla matrisin viskozitesinin yükselmesi ve reaksiyon ürünlerinin homojen dağılmasının sınırlandırılmasıyla ilişkilendirilmektedir. Kür süresi 8 saate düşürüldüğünde 90 °C’de elde edilen 7 günlük basınç dayanımı 27,54 MPa (REF) seviyesine gerilemiş, ancak bu azalma oranı yaklaşık %12,5 düzeyinde kalmıştır.

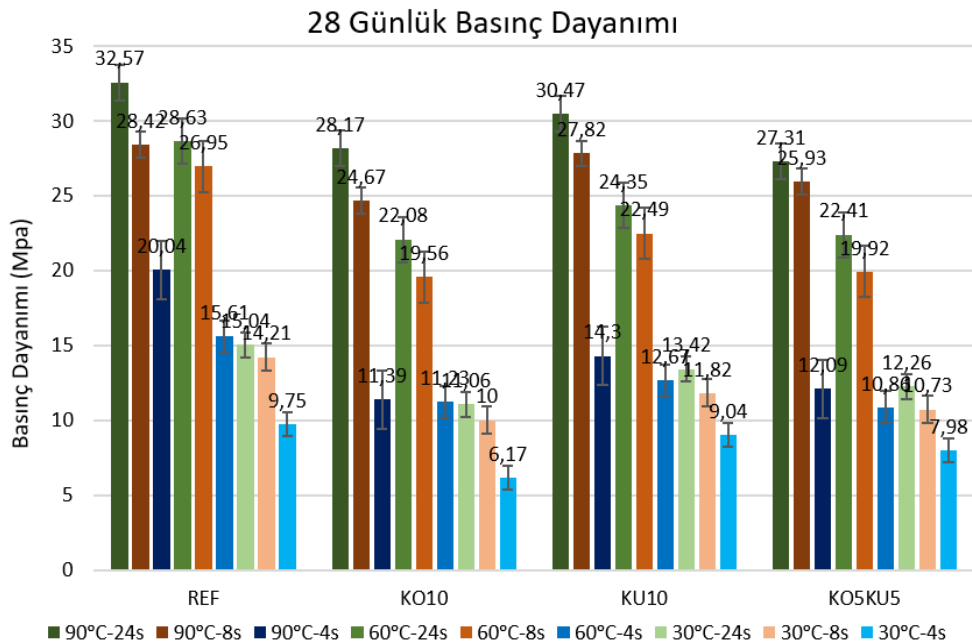
Bu bulgu, yüksek sıcaklıkta geopolimerizasyon reaksiyonlarının hızlanması nedeniyle daha kısa kür sürelerinde de yüksek dayanımın korunabileceğini göstermektedir. 60 °C’de 24 saat kür uygulanan numunelerde 7 günlük dayanımlar 27,16 MPa (REF) ve 23,89 MPa (KU10) olarak ölçülmüş, 30 °C’de ise bu değerler sırasıyla 14,33 MPa ve 12,67 MPa’a düşmüştür. Düşük sıcaklıklarda kürlenen karışımların dayanım kaybı, reaksiyon kinetiğinin yavaşlaması ve geopolimer ağ yapısının tam olarak gelişmemesiyle açıklanabilir. Bu sonuçlar literatürdeki bulgularla güçlü bir uyum göstermektedir. Sajan ve ark. (2021), uçucu kül esaslı geopolimerlerde kür sıcaklığının 60–80 °C aralığında artırılmasının dayanımı hızla geliştirdiğini, bu nedenle yüksek sıcaklıklarda daha kısa kür sürelerinin yeterli olabileceğini belirtmiştir (Sajan et al., 2021). Benzer şekilde, Rovnaník (2010), 40–80 °C aralığında kür sıcaklığının artmasıyla erken yaşta basınç dayanımının hızla arttığını, ancak 90 °C’nin üzerinde mikroçatlak oluşumuna bağlı olarak uzun vadeli dayanım artışının sınırlı kaldığını bildirmiştir (Rovnaník, 2010b). Bu bulgular, mevcut çalışmada 90 °C’de 8 saatlik kür uygulamasıyla elde edilen dayanımın 24 saatlik kür sonuçlarına yakın olmasını desteklemektedir. Genel olarak, kurşun tozu katkısının (KU) alkali aktive edilmiş matrisin yoğunluğunu

ve bağ sürekliliğini iyileştirerek basınç dayanımını REF numunesinin basınç dayanımına yakın, buna karşın kolemanit katkısının (KO) basınç dayanımındaki azalışın daha fazla olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, yüksek kür sıcaklıklarında geopolimerizasyon hızının artması sayesinde kür süresinin azaltılabileceğini, buna rağmen

düşük sıcaklıklarda uzun süreli kürün gerekli olduğunu göstermektedir. 7 günlük en yüksek basınç dayanımı 90 °C'de 24 saat kürlenmiş REF numunesinde (31,48 MPa), en düşük değer ise 30 °C'de 4 saat kürlenmiş KO10 karışımında (5,62 MPa) elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 7. Farklı sıcaklık ve ısıtma sürelerinde 28 günlük eğilme dayanımı (a) ve basınç dayanımı (b) değişimleri

Şekil 7 (a)'da 28 günlük eğilme dayanım değerleri, (30°, 60° ve 90°C) ve süreleri (4, 8 ve 24 saat) değişimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kür sıcaklığı ve süresinin arttırılması tüm karışımlar için eğilme dayanımında

belirgin bir artış sağlamıştır. Kür sıcaklığı ve süresinin en yüksek olduğu 90°C / 24 saat koşulunda en yüksek değer 7.16 MPa ile referans numunesinde elde edilmiştir. KO10 karışım numuneleri REF karışım numunelerine göre daha

düşük dayanım sergilemiştir. Bu durum, kolemanitin yapısındaki bor elementinin geopolimerizasyon sürecindeki çözünürlüğünün sınırlı olması ve matriste boşluklu yapı eğilimi ile ilişkilendirilebilir. KU10 karışım numuneleri, düşük sıcaklık koşullarında dahi kolemanit KO10 karışımlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı sağlamış ve yüksek sıcaklıkta referans numunesinin değerlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu etkinin, kurşun tozunun yüksek yoğunluğu ve dolgu etkisi ile mikro yapının boşluk oranını azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kolemanit ve kurşun ikamelerinin performans üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, KO'nun tek başına katkı olarak kullanıldığında sınırlı bir katkı sağladığı görülmüştür (Kula et al., 2001; Sevim, 2011b). KU'nun ise özellikle basınç dayanımında daha olumlu sonuçlar verdiği ve literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür (Milasi et al., 2023; Saedi et al., 2023). Bu durum, Van Jaarsveld vd.(1999) tarafından yapılan çalışmada kurşun katkısının geopolimer yapının mukavemetini artırabileceği yönündeki bulgularla örtüşmektedir (Van Jaarsveld & Van Deventer, 1999). Milasi vd.(2023), yaptıkları çalışmada katkı maddesi olarak kurşun tozunun %20 ilave edildiğinde basınç dayanımını %12 artırdığını ifade etmişlerdir (Milasi et al., 2023). Bununla birlikte, KO ve KU'nun birlikte kullanıldığı KO5KU5 karışımı ise katkıların tek başına kullanıldığı durumlara göre anlamlı bir sinerjik etki gözlenmemiş, dayanım değerleri iki katkının ortalama seviyelerinde kalmıştır. Şekil 7(b)'de karışım tasarım numunelerinin 28 günlük basınç değerleri, farklı kürlenme sıcaklık (30°C, 60°C ve 90°C) ve sürelerindeki (4, 8 ve 24 saat) değişimleri verilmiştir. Elde edilen veriler, kürlenme sıcaklığının artmasının tüm karışımlarda basınç dayanımını anlamlı düzeyde arttırdığı görülmüştür. 90°C /24 saat kür koşulu, geopolimerleşme reaksiyonlarının hızlanmasına ve bağ yapısının güçlenmesine bağlı olarak en yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Referans karışım tüm kür koşullarında yüksek performans sergilemiş olup, 90°C/24 saat koşulunda 32.57 MPa ile en yüksek değere ulaşmıştır. KO10 numunesi, 90°C/ 24 saat kür süresinde 28.17 MPa, KU10 numunesinde ise 30.47 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Farklı kür sıcaklıkları ve kürlenme süreleri için yapılan değerlendirmelerde, KU10 numunelerinin basınç dayanımlarının, KO10 numunelerine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Kolemanit ve kurşun tozunun birlikte kullanıldığı karışım (KO5KU5)'da ise 90°C/24 saat kürlenmede 25.79 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. REF numunesinde düşük kür sıcaklığında (30°C/ 24 saat) elde edilen basınç dayanımı 15.04 MPa, daha yüksek kür sıcaklığında (60°C/4 saat) elde edilen basınç dayanımına

yaklaşık eşit, çok daha yüksek sıcaklık (90°C/4 saat) elde edilen basınç dayanımının ise %75'i kadardır. Yüksek sıcaklıkta kısa süreli kürleme sonucunda elde edilen basınç dayanımlarının, düşük sıcaklıkta daha uzun süreli kürleme ile ulaşılan değerlere yaklaştığı belirlenmiştir. Benzer eğilim literatürde de rapor edilmiş olup (Sajan et al., 2021), bu durum kür sıcaklığının geopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırarak dayanım gelişimini daha kısa sürede tamamlaması ile açıklanmaktadır. Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar bu literatür bulgularıyla uyumlu olmakla birlikte, söz konusu mekanizmayı doğrulamaya yönelik mikro yapısal analizler gerçekleştirilmemiştir.

4. Sonuçlar

Çevresel risk oluşturan önemli endüstriyel atıklar olan kolemanit ve kurşun tozunun alkali aktive edilmiş matrisi içinde immobilize edilerek kabul edilebilir mekanik dayanıma sahip çevresel açıdan sürdürülebilir bir yapı malzemesi üretiminin hedeflendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Mini çökme–yayılma deneyleri, kolemanit ve kurşun tozunun %10'a kadar olan ikamesinin harçların reolojik davranışında karşıt yönlü etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Kolemanit ikamesi (%10 KO), yayılma çapını 24,6 cm'ye düşürerek akışkanlığı belirgin biçimde azaltırken; aynı orandaki kurşun tozu ikamesi (%10 KU) yayılma çapını 26 cm'ye yükseltmiştir. Her iki katkının eşit oranda kullanıldığı KO5KU5 karışımı ise 25 cm yayılma değeri ile referans numuneyle oldukça yakın bir davranış sergilemiş ve katkıların zıt etkilerinin dengelendiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, katkı oranının taze halde performans tasarımında kritik bir belirleyici olduğunu göstermektedir.
- Kür sıcaklığı ve süresi hem eğilme hem de basınç dayanımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. 90 °C'de 24 saat kür uygulaması, tüm karışımlar için en yüksek dayanım değerlerini sağlamıştır.
- Eğilme dayanımı, kür sıcaklığı ve süresiyle doğru orantılı olarak artmıştır. 90 °C/24 saat koşulunda en yüksek değer 7,16 MPa ile referans karışımda elde edilmiştir. Kolemanit katkısı (KO10) referansa göre %13 oranında, kurşun tozu katkısı (KU10) %3 oranında daha düşük eğilme dayanımı göstermiştir. KO ve KU'nun birlikte kullanıldığı karışım (KO5KU5) ise arada bir değer sergileyerek katkıların etkisinin dengelediğini göstermiştir.
- Basınç dayanımı açısından 90 °C/24 saat kür koşulu optimum sonuçları vermiştir. 7 günlük en yüksek dayanım 31,48 MPa (REF), 29,05 MPa (KU10) ve 26,02

MPa (KO10) olarak belirlenmiştir. Kür süresinin 24 saatten 8 saate düşürülmesiyle dayanımlarda en fazla %12 azalma gözlenmiş, 4 saatlik kürde ise %40–56 seviyelerinde düşüşler tespit edilmiştir.

- Kurşun tozu katkısı (KU), alkali aktive edilmiş matrisin yoğunluğunu artırarak hem eğilme hem basınç dayanımlarını korumuş; düşük sıcaklıklarda bile kolemanit katkısına göre daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Kolemanit katkısı (KO), su bağlama kapasitesi ve yüksek viskozitesi nedeniyle harçların akışkanlığını azaltmış ve dayanımı düşürmüştür. Kolemanit ikamesi, özellikle kısa süreli kürlerde geopolimerizasyonu sınırlamış ve dayanımlarda daha belirgin azalışlara neden olmuştur.
- Kolemanit ve kurşun tozunun birlikte kullanıldığı karışım tasarımı ile çevresel atıkların geri kazanımı hem de yüksek performanslı, sürdürülebilir yapı malzemesi üretimi açısından büyük potansiyel taşıdığı belirlenmiştir.

5. Öneriler

Bu çalışmada, kolemanit ve kurşun tozu katkı kendiliğinden yerleşen alkali aktive harçlarda kür sıcaklığı ve kür süresinin taze ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kolemanit ve kurşun tozunun gama radyasyon soğurma katsayısına etkisini değerlendirmeye yönelik çalışmalar ise hâlen devam etmektedir. İleride yapılacak araştırmalarda, uzun dönem mekanik performansın yanı sıra yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve çeşitli durabilite testlerinin de gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Kavramlaştırma, Finansman sağlama, Deney, Analiz ve yorumlama, Yazma, Düzenleme, Görselleştirme, Denetleme

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

6. Kaynaklar

Abiodun, Y. O., Olanrewaju, O. A., Gbenebor, O. P., Ochulor, E. F., Obasa, D. V., & Adeosun, S. O. (2022). Cutting Cement Industry CO₂ Emissions through Metakaolin Use in Construction. *Atmosphere*, 13(9), 1494.

<https://doi.org/10.3390/atmos13091494>

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>

Arslan, A. A., Uysal, M., Yılmaz, A., Al-mashhadani, M. M., Canpolat, O., Şahin, F., & Aygörmmez, Y. (2019). Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 225, 909–926. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.235>

ASTM C348 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. (2002).

ASTM C349-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). (2002).

ASTM C618. (2023). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. <https://doi.org/10.1520/C0618-22>

Aygörmmez, Y., Canpolat, O., & Al-mashhadani, M. M. (2020). Assessment of geopolymer composites durability at one year age. *Journal of Building Engineering*, 32, 101453. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101453>

Benabed, B., Kadri, E. H., Azzouz, L., & Kenai, S. (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1167–1173. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2012.07.007>

Benli, A. (2019). Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume. *Structural Concrete*, 20(3), 1096–1108. <https://doi.org/10.1002/SUCO.201800302>

Chen, L., Wang, Z., Wang, Y., & Feng, J. (2016). Preparation and properties of alkali activated metakaolin-based geopolymer. *Materials*, 9(9), 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma9090767>

Davidovits, J. (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications* (3rd ed.) (3rd ed.).

Davidovits, J. (2013). Geopolymer Cement a review. *Geopolymer Science and Technics*, (0), 1–11.

Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2013). Properties of fly ash and slag blended geopolymer concrete cured at ambient temperature. *ISEC 2013 - 7th International Structural Engineering and Construction*

- Conference: New Developments in Structural Engineering and Construction, 571–576.
<https://doi.org/10.3850/978-981-07-5354-2-M-55-433>
- Deja, J. (2002). Immobilization of Cr 6+ , Cd 2+ , Zn 2+ and Pb 2+ in alkali-activated slag binders.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00904-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00904-3)
- Demie, S., Nuruddin, M. F., Ahmed, M. F., & Shafiq, N. (2011). Effects of curing temperature and superplasticizer on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete. 2011 National Postgraduate Conference - Energy and Sustainability: Exploring the Innovative Minds, NPC 2011, 1-5.
<https://doi.org/10.1109/NATPC.2011.6136362>
- Dhadse, S., Kumari, P., & Bhagia, L. J. (2008). Fly ash characterization, utilization and government initiatives in India - A review. Journal of Scientific and Industrial Research, 67(1), 11–18.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science, 42(9), 2917–2933.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Erdogmus, E. (2014). Combined effect of waste colemanite and silica fume on properties of cement mortar. Science and Engineering of Composite Materials, 21(3), 369–375.
<https://doi.org/10.1515/secm-2013-0041>
- Gencil, O., Brostow, W., Özel, C., & Filiz, M. (2010). An investigation on the concrete properties containing colemanite. International Journal of Physical Sciences, 5(3), 216–225.
- Ghafoor, M. T., & Fujiyama, C. (2022). Performance of Superplasticizers in Alkaline Environment of Self Compacting Geopolymer Mortar. Journal of Advanced Concrete Technology, 20(11), 676–690.
<https://doi.org/10.3151/jact.20.676>
- Ghafoor, M. T., Fujiyama, C., & Maekawa, K. (2022). Hardened Mechanical Properties of Self Compacting Geopolymer Mortar. Journal of Advanced Concrete Technology, 20(4), 287–299.
<https://doi.org/10.3151/jact.20.287>
- Ghafoor, M. T., Khan, Q. S., Qazi, A. U., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S. (2021a). Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature. Construction and Building Materials, 273, 121752.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121752>
- Ghafoor, M. T., Khan, Q. S., Qazi, A. U., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S. (2021b). Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature. Construction and Building Materials, 273, 121752.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121752>
- Ghosh, R., Sagar, S. P., Kumar, A., Gupta, S. K., & Kumar, S. (2018). Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser. Journal of Building Engineering, 16(August 2017), 39–44.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.009>
- Glasser, F. P. (1997). Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. Journal of Hazardous Materials, 52(2–3), 151–170.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(96\)01805-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(96)01805-5)
- Gök S G; Şengül Ö. (2023). Geopolimer Üretiminde Atık Cam Kullanımı. Beton 2023, 588–597.
- Gok, S. G., & Sengul, O. (2023). Mechanical properties of alkali-activated slag based SIFCON incorporating waste steel fibers and waste glass. Construction and Building Materials, 408, 133697.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133697>
- Gülşan, M. E., Alzeebaree, R., Rasheed, A. A., Niş, A., & Kurtoğlu, A. E. (2019a). Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber. Construction and Building Materials, 211, 271–283.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.228>
- Gülşan, M. E., Alzeebaree, R., Rasheed, A. A., Niş, A., & Kurtoğlu, A. E. (2019b). Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber. Construction and Building Materials, 211, 271–283.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.228>
- Hekimoğlu, G., Nas, M., Ouikhalfan, M., Sarı, A., Kurbetci, Ş., Tyagi, V. V., Sharma, R. K., & Saleh, T. A. (2021). Thermal management performance and mechanical properties of a novel cementitious composite containing fly ash/lauric acid-myristic acid as form-stable phase change material. Construction and Building Materials, 274.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122105>
- Henigal, A. M., Sherif, M. A., & Hassan, H. H. (2017a). Study on Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 14(02), 52–66.
<https://doi.org/10.9790/1684-1402075266>
- Henigal, A. M., Sherif, M. A., & Hassan, H. H. (2017b). Study on Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 14(02), 52–66.
<https://doi.org/10.9790/1684-1402075266>

- Khater, H. M., & Ghareib, M. (2020). Optimization of geopolymers mortar incorporating heavy metals in producing dense hybrid composites. *Journal of Building Engineering*, 32.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101684>
- Kontopoulos, A. , K. K. and A. X. (1996). Environmental characterization of lead smelter slag in Lavrion . In *Proceedings of the IMM Minerals Metals and the Environment II Conference*, 3–6.
- Kula, I., Olgun, A., Erdogan, Y., & Sevinc, V. (2001). Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 491–494.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00486-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00486-5)
- Liu, R. xin, & Poon, C. sun. (2016). Effects of red mud on properties of self-compacting mortar. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1170–1178.
<https://doi.org/10.1016/J.CLEPRO.2016.07.052>
- Manjunath, R., & Ranganath, R. V. (2019). Performance Evaluation of Fly-ash based Self-compacting geopolymer concrete mixes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 561(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012006>
- Meesala, C. R., Verma, N. K., & Kumar, S. (2020). Critical review on fly-ash based geopolymer concrete. *Structural Concrete*, 21(3), 1013–1028.
<https://doi.org/10.1002/suco.201900326>
- Memon, F. A., Nuruddin, M. F., & Shafiq, N. (2013). Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 20(2), 205–213.
<https://doi.org/10.1007/s12613-013-0714-7>
- Milasi, S. E., Mostofinejad, D., & Bahmani, H. (2023). Improving the resistance of ultra-high-performance concrete against nuclear radiation: Replacing cement with barite, hematite, and lead powder. *Developments in the Built Environment*, 15, 100190.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100190>
- N.B. Milestone. (2006). Reactions in cement encapsulated nuclear wastes: Need for toolbox of different cement types. *Advances in Applied Ceramics*, 105(1), 13–20.
- Özen, S., Durgun, M. Y., Kobya, V., Karakuzu, K., & Mardani-Aghabaglou, A. (2022). Effect of Colemanite Ore Wastes Utilization on Fresh Properties and Compressive Strength of Cementitious Systems. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(10), 12873–12887.
<https://doi.org/10.1007/s13369-022-06641-8>
- Palomo, A., & López dela Fuente, J. I. (2003). Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes. *Cement and Concrete Research*, 33(2), 281–288.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00963-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00963-8)
- Palomo, A., & Palacios, M. (2003). Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes. *Cement and Concrete Research*, 33(2), 289–295.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00964-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00964-X)
- Pradhan, P., Panda, S., Kumar Parhi, S., & Kumar Panigrahi, S. (2022). Factors affecting production and properties of self-compacting geopolymer concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 344(June), 128174.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128174>
- Rovnaník, P. (2010a). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023>
- Rovnaník, P. (2010b). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023>
- Saedi, A., Jamshidi-Zanjani, A., Mohseni, M., Khodadadi Darban, A., & Nejati, H. (2023). Mechanical activation of lead–zinc mine tailings as a substitution for cement in concrete construction. *Construction and Building Materials*, 364, 129973.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129973>
- Sahin, F., Uysal, M., Canpolat, O., Cosgun, T., & Dehghanpour, H. (2021). The effect of polyvinyl fibers on metakaolin-based geopolymer mortars with different aggregate filling. *Construction and Building Materials*, 300(July), 124257.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124257>
- Sajan, P., Jiang, T., Lau, C., Tan, G., & Ng, K. (2021). Combined effect of curing temperature, curing period and alkaline concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer. *Cleaner Materials*, 1, 100002.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100002>
- Sevim, U. K. (2011a). Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(1), 187–193.
<https://doi.org/10.1617/s11527-010-9618-4>
- Sevim, U. K. (2011b). Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(1), 187–193.
<https://doi.org/10.1617/s11527-010-9618-4>

- Van Jaarsveld, J. G. S., & Van Deventer, J. S. J. (1999). The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers. In *Cement and Concrete Research* 29(8), 1189-1200
- Wan, X., Shen, C., Wang, P., Zhao, T., & Lu, Y. (2020). A study on fracture toughness of ultra-high toughness geopolymer composites based on Double-K Criterion. *Construction and Building Materials*, 251, 118851.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118851>
- Wiyono, D., Antoni, P., & Hardjito, D. (2015). Improving the durability of pozzolan concrete using alkaline solution and geopolymer coating. *Procedia Engineering*, 125, 747–753.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.121>
- Yön, M. Ş., & Karataş, M. (2022). Evaluation of the mechanical properties and durability of self-compacting alkali-activated mortar made from boron waste and granulated blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, 61(September), 1–19.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105263>
- Yön, M. Ş., Yön, B., Karataş, M., & Benli, A. (2024). Sustainable use of boron waste and volcanic scoria in slag-based self-compacting alkali-activated mortars: Fresh, mechanical and durability properties. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 41, 101664.
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101664>
- Zarina, Y., Al Bakri Abdullah, M.M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., & Abd Razak, R. (2013). Reviews on the geopolymer materials for coating application. *Advanced Materials Research*, 626, 958–962.