



Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)

Cilt 9 - Sayı 3: 1292-1300 / Mayıs 2026

(Volume 9 - Issue 3: 1292-1300 / May 2026)

MADEN PROSES ATIKLARININ HARÇLARDA AGREGA OLARAK KULLANIMINDA ATIKLARIN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN HARCIN MEKANİK PERFORMANSINA ETKİSİ

Serkan TÜYLÜ¹, Deniz ADIGÜZEL¹, İsmail DEMİR^{2*}

¹Istanbul University-Cerrahpaşa, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, Mining Division, 34500, Istanbul, Türkiye

²Istanbul University-Cerrahpaşa, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, Mineral Processing Division, 34500, Istanbul, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, farklı maden proses atıklarının standart kum yerine agrega olarak kullanıldığı harçların mekanik performansına, söz konusu atıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda Pb-Zn, altın, bakır ve demir madeni proses atıkları farklı ikame oranlarında TS EN 196-1 standardına uygun harç karışımlarında değerlendirilmiş ve 28 ile 56 günlük kür süreleri sonunda basınç dayanımı değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca agregaların tane boyutu dağılımı, özgül yüzey alanı (BET), gerçek yoğunluk ve kimyasal bileşimleri (XRF) belirlenerek fiziksel-kimyasal özellikler ile mekanik performans arasındaki ilişkiler birlikte analiz edilmiştir. Deneysel sonuçları, Pb-Zn maden atıklarının özellikle %20 ikame oranında referans karışımlara kıyasla belirgin performans artışı sağladığını göstermiştir. Bu kapsamda 28 günlük basınç dayanımı 47 MPa'a, 56 günlük basınç dayanımı ise 53 MPa'a ulaşarak referans numunelere (32-36 MPa) göre önemli bir iyileşme elde edilmiştir. Bakır maden atıkları ise sınırlı ancak kabul edilebilir düzeyde mekanik katkı sağlamıştır. Buna karşılık, demir ve altın madeni atıkları içeren numunelerde basınç dayanımı değerlerinin sırasıyla yaklaşık 8-12 MPa ve 5-8 MPa aralığında kaldığı ve bunun ince tane boyutu ile yüksek özgül yüzey alanına bağlı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, agregaların fiziksel özellikleri (tane boyutu dağılımı, yüzey alanı, porozite) ile kimyasal bileşimlerinin birlikte mekanik performansı belirlediğini göstermektedir. Sonuç olarak, uygun fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip maden atıklarının doğal agregalara sürdürülebilir bir alternatif oluşturabileceği ve bu yaklaşımın inşaat sektöründe atıkların yeniden değerlendirilmesine bilimsel ve uygulamaya yönelik önemli katkılar sunabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Maden proses atıkları, Agregasyon ikamesi, Mekanik performans, Fiziksel ve kimyasal özellikler


Effect of the Physical and Chemical Properties of Mining Process Wastes on the Mechanical Performance of Mortars When Used as Aggregates


Abstract: This study experimentally investigates the effect of the physical and chemical properties of different mining process wastes on the mechanical performance of mortars in which these wastes are used as a replacement for standard sand as aggregate. In this context, Pb-Zn, gold, copper, and iron mining process wastes were evaluated at different replacement ratios in mortar mixtures prepared in accordance with TS EN 196-1, and their compressive strength values were compared after 28 and 56 days of curing. In addition, the particle size distribution, specific surface area (BET), true density, and chemical composition (XRF) of the aggregates were determined, and the relationships between their physical-chemical properties and mechanical performance were analyzed comprehensively. The experimental results showed that Pb-Zn mining wastes provided a significant improvement in performance, particularly at a 20% replacement ratio, compared to the reference mixtures. In this case, the 28-day compressive strength reached 47 MPa and the 56-day compressive strength reached 53 MPa, indicating a considerable enhancement compared to the reference samples (32-36 MPa). Copper mining wastes, on the other hand, provided limited but acceptable mechanical contributions. In contrast, mortars containing iron and gold mining wastes exhibited compressive strength values in the ranges of approximately 8-12 MPa and 5-8 MPa, respectively, which were attributed to their finer particle size and higher specific surface area. The findings indicate that both the physical properties of aggregates (particle size distribution, surface area, and porosity) and their chemical composition jointly govern the mechanical performance. Consequently, mining wastes with suitable physical and chemical characteristics can serve as sustainable alternatives to natural aggregates, offering significant scientific and practical contributions to the reuse of industrial wastes in the construction sector.


Keywords: Mine process wastes, Aggregate replacement, Mechanical performance, Physical and chemical properties

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Istanbul University-Cerrahpaşa, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, Mineral Processing Division, 34500, Istanbul, Türkiye

E mail: dismail@iuc.edu.tr (İ. DEMİR)

Serkan TÜYLÜ  <https://orcid.org/0000-0002-8128-9840>

Deniz ADIGÜZEL  <https://orcid.org/0000-0002-1611-1296>

İsmail DEMİR  <https://orcid.org/0000-0003-0949-7706>

Gönderi: 17 Mart 2026

Kabul: 23 Nisan 2026

Yayınlanma: 15 Mayıs 2026

Received: March 17, 2026

Accepted: April 23, 2026

Published: May 15, 2026

Cite as: Tüylü, S., Adigüzel, D., & Demir, İ. (2026). Effect of the physical and chemical properties of mining process wastes on the mechanical performance of mortars when used as aggregates. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 9(3), 1292-1300.



1. Giriş

Madencilik faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan proses atıkları (ince fraksiyonlu zenginleştirme artıkları ve proses kaynaklı yan ürünler), depolama alanı gereksinimi, tozuma, yüzey ve yer altı suyu kirliliği ile potansiyel ağır metal sızması gibi çevresel riskler nedeniyle önemli bir sürdürülebilirlik problemi oluşturmaktadır (Adiguzel vd., 2022; Rather ve Hasan, 2024). Diğer taraftan inşaat sektörü, özellikle beton ve harç üretiminde kullanılan doğal agregaya olan yüksek talep nedeniyle doğal kaynakların tükenmesi ve ekosistem üzerindeki baskının artması gibi sorunlarla karşı karşıyadır (Trujillo López vd., 2024). Bu iki problemin birlikte ele alınabilmesi açısından, maden proses atıklarının yapı malzemelerinde ikincil hammadde olarak değerlendirilmesi, döngüsel ekonomi yaklaşımıyla uyumlu, çevresel ve ekonomik fayda potansiyeli taşıyan önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (El Machi vd., 2024).

Literatürde maden proses atıklarının çimentolu sistemlerde kullanımı genel olarak iki ana eksende incelenmektedir: (i) bağlayıcı sisteminde çimento ikamesi (SCM) ve (ii) ince veya kaba agrega ikamesi. Özellikle altın ve Pb-Zn atıkları üzerine yapılan çalışmalar, çimento ikamesi yaklaşımının mikro-yapı ve dayanım gelişimi açısından önemli sonuçlar sunduğunu göstermektedir (Saedi vd., 2023a; Bueno-Gomez vd., 2025; Fajarani vd., 2025). Bununla birlikte, bu bulguların agrega ikamesi senaryolarına doğrudan aktarılması her zaman mümkün değildir. Agregaya ikamesi yaklaşımında malzemenin tane boyutu dağılımı, tane şekli, yüzey pürüzlülüğü, gerçek yoğunluk ve porozite gibi fiziksel özellikleri; harçta agrega iskeletinin sürekliliğini ve hamur-agrega ara yüzey bölgesinin (ITZ) kalitesini belirleyerek mekanik performansı doğrudan etkilemektedir (Vazquez vd., 1991; Kruger vd., 2021). Bu nedenle, agrega ikamesi uygulamalarında yalnızca kimyasal bileşim değil, granülometri ve mikro-yapı parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir.

Mevcut çalışmalar, maden atıklarının agrega olarak kullanımında atık türüne bağlı olarak farklı mekanik davranışlar sergilediğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Pb-Zn kökenli kalsiyumca zengin atıkların belirli oranlarda kullanılmasıyla dayanımda artış sağlanabildiği; bakır kökenli ince atıkların ise uygun derecelenme sağlandığında gözenek yapısını iyileştirerek mekanik performansa katkı verebildiği rapor edilmiştir (Zhang vd., 2019; Rezaei Vahdat vd., 2024). Buna karşılık, ince fraksiyon oranının artması veya yüksek porozite karakterinin baskın hale gelmesi durumunda su ihtiyacının artması ve ITZ bölgesinde zayıf yapı oluşumu nedeniyle mekanik performansın olumsuz etkilenebileceği belirtilmektedir (Kruger vd., 2021; Li vd., 2025). Ayrıca, özellikle Pb-Zn sistemlerinde çevresel güvenlik açısından sızma davranışı ve ağır metal stabilizasyonu, yapı malzemesi uygulamalarında dikkate alınması gereken önemli bir parametredir (Yang vd.,

2026).

Bu bulgulara rağmen, literatürde dikkat çeken temel boşluk, farklı maden proses atıklarının aynı deneysel koşullar altında doğrudan karşılaştırıldığı ve fiziksel (tane boyutu dağılımı, BET özgül yüzey alanı, gerçek yoğunluk) ile kimyasal (XRF ana oksit bileşimi) özelliklerin mekanik performans ile birlikte bütüncül olarak değerlendirildiği çalışmaların sınırlı olmasıdır (Vazquez vd., 1991; El Machi vd., 2024; Rather ve Hasan, 2024). Bu tür entegre yaklaşımlar, yalnızca hangi atığın daha yüksek performans sağladığını değil, aynı zamanda hangi fiziksel ve kimyasal parametrelerin hangi mekanizmalar üzerinden bu performansı belirlediğini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır.

Küresel ölçekte olduğu gibi Türkiye’de de maden atıklarının yönetimi, “Maden Atıkları Yönetmeliği” kapsamında düzenlenmekte olup, bu atıkların çevresel etkilerinin azaltılması ve yeniden kullanımına yönelik sürdürülebilir yaklaşımlar teşvik edilmektedir. Bu kapsamda, son yıllarda Türkiye’de gerçekleştirilen çalışmalar, maden proses atıklarının çimento esaslı malzemelerde değerlendirilmesinin hem çevresel yüklerin azaltılması hem de doğal kaynak tüketiminin sınırlandırılması açısından önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, söz konusu literatür boşluğunu gidermek amacıyla Pb-Zn, altın, bakır ve demir maden proses atıkları standart kum yerine agrega ikamesi yaklaşımıyla TS EN 196-1 standardına uygun harç karışımlarında değerlendirilmiştir. Farklı ikame oranlarında hazırlanan numuneler 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda basınç dayanımı açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca, agregalara ait tane boyutu dağılımı, BET özgül yüzey alanı, helyum piknometresi ile belirlenen gerçek yoğunluk ve XRF ile ana oksit bileşimi analiz edilerek, fiziksel ve kimyasal özellikler ile mekanik performans arasındaki ilişkiler bütüncül bir yaklaşımla ortaya konulmuştur.

Bu yönüyle çalışma, farklı maden atıklarının aynı deneysel protokol altında sistematik olarak karşılaştırılmasını sağlayan ve mekanik davranışın fiziksel-kimyasal temellerini birlikte ele alan sınırlı sayıdaki çalışmalardan biri olup, literatüre karşılaştırmalı ve çok parametreliliği analiz yaklaşımı açısından katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulguların, uygun özelliklere sahip maden atıklarının doğal agregalara sürdürülebilir alternatif olarak kullanımına yönelik bilimsel altyapı sağlayacağı ve gelecekte yapılacak mikro-yapısal ve dayanıklılık temelli çalışmalara yön vereceği değerlendirilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 32,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Referans harç karışımlarında agrega olarak TS EN 196-1 standardında belirtilen standart RILEM kumu tercih edilmiştir. Referans olarak kullanılan standart kum, CEN standardına uygun olup 0,08-2,00 mm aralığında

kontrollü tane boyutu dağılımına sahiptir. Deneysel karışımlarda ise standart kum yerine farklı maden proses atıkları agrega olarak kullanılmıştır.

Agrega olarak değerlendirilen maden proses atıkları dört farklı maden işletmesinden temin edilmiştir: (i) Erzincan ilinde faaliyet gösteren bir altın madeni, (ii) Balıkesir ilinde faaliyet gösteren bir kurşun-çinko (Pb-Zn) madeni, (iii) Kastamonu ilinde faaliyet gösteren bir bakır madeni ve (iv) Sivas ilinde faaliyet gösteren bir demir madeni. Elde edilen atıklar herhangi bir kimyasal veya termal işleme tabi tutulmadan, yalnızca kurutma (105 ± 5 °C) ve uygun tane boyutu aralığını sağlamak amacıyla eleme işlemleri uygulanarak deneylerde kullanılmıştır.

Karışım suyu olarak şebeke suyu kullanılmış olup, tüm numunelerde su/çimento oranı TS EN 196-1 standardına uygun olarak sabit tutulmuştur ($w/c = 0,5$).

2.2. Agregaların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Maden proses atıklarının fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla tane boyutu dağılımı, özgül yüzey alanı ve gerçek yoğunluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu dağılımı, lazer kırınım prensibine dayanan Malvern Mastersizer cihazı kullanılarak belirlenmiş olup, ölçümler uygun dispersiyon koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Agregaların özgül yüzey alanı, BET (Brunauer-Emmett-Teller) yöntemi kullanılarak azot adsorpsiyonu esasına göre ölçülmüş olup, analiz öncesinde numuneler uygun degazlama koşullarında hazırlanmıştır. Gerçek yoğunluk değerleri ise helyum piknometresi kullanılarak belirlenmiştir.

Agregaların kimyasal bileşimleri X-ışını floresans (XRF) yöntemiyle analiz edilmiştir. XRF analizleri kapsamında numunelerin başlıca oksit bileşenleri (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 vb.) belirlenmiştir.

2.3. Harç Karışım Tasarımı ve Numune Hazırlama

Referans ve deneysel harç karışımları TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Karışımlarda 450 gr çimento, 1350 gr agrega ve 225 gr su kullanılmıştır. Referans karışımlarda standart kum kullanılırken, deneysel karışımlarda standart kumun kütlece %5, %10 ve %20 oranlarında maden proses atıkları ile ikame edilmesi esas alınmıştır.

Bu çalışmada tercih edilen ikame oranları, literatürde maden atıklarının çimento esaslı malzemelerde kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılan düşük ve orta seviyedeki aralıkları temsil etmektedir. Düşük ikame oranlarında dolgu etkisi ve yoğunluk artışı nedeniyle mekanik performansta iyileşme gözlemlendiği, daha yüksek oranlarda ise agrega iskeletinin sürekliliği ve tane boyutu dağılımına bağlı olarak performansın değişkenlik gösterebildiği bilinmektedir (Yalley vd., 2022; Johansson vd., 2024). Bu nedenle seçilen oranlar, hem olumlu hem de olumsuz etkilerin gözlemlenebileceği aralığı kapsayacak şekilde belirlenmiştir.

Hazırlanan harçlar $40\times 40\times 160$ mm boyutlarında prizmatik kalıplara yerleştirilmiş ve standart sarsma tablası kullanılarak sıkıştırılmıştır. Kalıplardan çıkarılan numuneler, deney gününe kadar 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kirece doygun su içerisinde kürlenmiştir.

2.4. Mekanik Deneyler

Harç numuneleri, 28 ve 56 gün kür sürelerinin sonunda tek eksenli basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı deneyleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, $40\times 40\times 160$ mm boyutlarındaki prizmatik numunelerin kırılmasından elde edilen yarım prizma örnekleri üzerinde yürütülmüştür.

Yükleme işlemi sabit hızda (≈ 2400 N/s) uygulanmış ve deneyler uygun kapasiteli basınç test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım için üç numune test edilmiş ve elde edilen sonuçlar ortalama \pm standart sapma olarak raporlanmıştır.

3. Bulgular

Farklı maden proses atıklarının (Pb-Zn, altın, bakır ve demir) standart kum yerine agrega olarak kullanılması durumunda elde edilen harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları incelenmiştir. Deneysel program kapsamında, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda elde edilen dayanım değerleri üzerinden agrega türü, ikame oranı ve kür süresinin mekanik performans üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, Pb-Zn atıklarının özellikle yüksek ikame oranlarında mekanik performansı artırabildiğini, buna karşılık altın ve demir atıklarının düşük dayanım değerleri ile sınırlı kaldığını göstermektedir. Bakır atıkları ise ara bir davranış sergilemiştir.

Deneysel sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiş olup, kür süresine bağlı dayanım değişimleri Şekil 1'de grafiksel olarak sunulmuştur.

3.1. Basınç Dayanımı Deneyleri

Farklı maden atıklarının standart kum yerine agrega olarak kullanılmasıyla elde edilen 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Kontrol numunesi, yalnızca standart kum içeren referans karışım olarak değerlendirilmiş olup, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 32 ± 3 MPa ve 36 ± 3 MPa olarak belirlenmiştir.

Pb-Zn maden atığı kullanılan numunelerde, standart kum yerine Pb-Zn atığının ikame edilmesiyle birlikte basınç dayanımında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Ortalama olarak 28 günlük basınç dayanımı 42 ± 6 MPa, 56 günlük basınç dayanımı ise 51 ± 5 MPa seviyelerine ulaşmıştır. Bu artış, Pb-Zn atıklarının daha dengeli tane boyutu dağılımı ve nispeten yoğun yapısı sayesinde agrega-hamur ara yüzeyinde daha iyi mekanik etkileşim sağlaması ve matris yoğunluğunu artırması ile ilişkilendirilmektedir.

Bu bulgu, kalsiyum içeriği yüksek ve uygun tane boyutu dağılımına sahip metalik maden atıklarının agrega olarak kullanıldığında harç ve beton sistemlerinde mekanik performansı artırabileceğini ortaya koyan literatür ile uyumludur. Nitekim yapılan çalışmalarda, maden atıklarının agrega veya bağlayıcı ikamesi olarak kullanımında basınç dayanımının belirli bir optimum ikame oranına kadar arttığı, ancak bu oranın aşılması durumunda agrega iskeletinin zayıflaması ve boşluk yapısının artması nedeniyle mekanik performansın

azaldığı rapor edilmiştir (Yalley vd., 2022; Johansson vd., 2024). Ayrıca Pb-Zn gibi metalik atıkların orta düzey ikame oranlarında kullanıldığında dayanım gelişimine olumlu katkı sağladığı belirtilmektedir (Saedi vd., 2022; Saedi vd., 2023b; Wang vd., 2024). Altın maden atığı kullanılan numunelerde ise basınç dayanımı değerlerinin kontrol numunesine kıyasla belirgin şekilde düşük

olduğu gözlenmiştir. Ortalama olarak 28 ve 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 18±8 MPa ve 22±6 MPa olarak belirlenmiştir. Bu durum, altın atıklarının ince tane boyutu, yüzey özellikleri ve zayıf agrega-çimento hamuru aderansı nedeniyle etkin bir taşıyıcı iskelet oluşturamaması ile ilişkilendirilmektedir.

Tablo 1. Standart kum ve farklı maden atıklarının agrega olarak kullanıldığı harç numunelerinin 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları

Agrega Türü	İkame Oranı (%)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	56 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
Kontrol (standart kum)	0	32±3	36±3
Pb-Zn madeni atığı	5-10-20	42±6	51±5
Bakır madeni atığı	5-10-20	23±4	26±4
Altın madeni atığı	5-10-20	18±8	22±6
Demir madeni atığı	5-10-20	8±4	12±3

Bakır maden atığı kullanılan numunelerde, standart kuma kıyasla orta düzeyde bir mekanik performans elde edilmiştir. Ortalama olarak 28 ve 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 23±4 MPa ve 26±4 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Bakır atıklarının agrega olarak kullanılabilir olduğunu ancak mekanik katkısının sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu davranış, uygun tane boyutu dağılımı sağlanmadığında veya ince fraksiyon oranı arttığında bakır ve benzeri maden atıklarının su ihtiyacını artırarak boşluk yapısını olumsuz etkilemesi ve agrega-hamur ara yüzeyinde zayıf bölgeler oluşturması ile açıklanabilir. Literatürde de bakır madeni atıklarının belirli bir aralıkta optimum performans gösterdiği, ancak yüksek ince fraksiyon içeriği durumunda mekanik performansın azaldığı rapor edilmiştir (Thomas vd., 2013; Ghazi vd., 2022; Johansson vd., 2024).

Demir maden atığı kullanılan numunelerde erken yaş dayanımlarının oldukça düşük olduğu dikkat çekmektedir. Ortalama 28 günlük basınç dayanımı 8±4 MPa, 56 günlük basınç dayanımı ise 12±3 MPa olarak belirlenmiştir. Kür süresiyle birlikte dayanımda sınırlı bir artış gözlenmiş olmakla birlikte, tüm ikame oranlarında elde edilen değerler kontrol numunesinin oldukça altında kalmıştır. Bu mekanizma, demir atıklarının ince tane boyutu ve yüksek özgül yüzey alanına bağlı olarak zayıf bir agrega iskeleti oluşturması ile açıklanabilir. Yüksek özgül yüzey alanına sahip ince partiküller, su ihtiyacını artırarak işlenebilirliği düşürmekte, boşluk oranını yükseltmekte ve hamur-agrega ara yüzey bölgesinde (ITZ) zayıf yapı oluşumuna neden olmaktadır (Eker vd., 2023; Demir Şahin ve Eker, 2024). Bu bulgular literatür ile uyumlu olup, ince partikül içeriğinin artmasıyla birlikte matris yapısının zayıfladığı ve özellikle yüksek ikame oranlarında basınç dayanımının azaldığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Yalley vd., 2022; Johansson vd., 2024). Ayrıca altın ve demir gibi metalik maden atıklarında, daha yüksek ikame oranlarında mekanik performans kayıplarının belirgin hale geldiği

literatürde belirtilmektedir (Luo ve Luo 2022; Liang vd., 2025).

3.2. Kür Süresinin Dayanım Gelişimine Etkisi

Kür süresinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, 28 ve 56 günlük dayanım değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 1'de sunulmuştur.

Şekil 1'de verilen sonuçlar, kür süresinin tüm karışımlar için basınç dayanımını artırdığını, ancak bu artışın agrega türüne bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Pb-Zn maden atığı içeren numunelerde, 28 günden 56 güne geçişte dayanımın yaklaşık %20 oranında arttığı ve bu artışın kontrol numunesine kıyasla daha belirgin olduğu görülmektedir (32→36 MPa kontrol, 42→51 MPa Pb-Zn). Bu durum, Pb-Zn atıklarının daha yoğun yapı oluşturarak hidrasyon sürecine olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

Altın maden atığı içeren numunelerde dayanım artışı gözlenmekle birlikte, değerler düşük seviyelerde kalmıştır (18→22 MPa). Bu durum, ince tane boyutu ve yüksek yüzey alanı nedeniyle matris yapısının zayıf kalması ile ilişkilendirilmektedir. Bakır maden atığı kullanılan numunelerde ise kür süresiyle birlikte sınırlı bir dayanım artışı meydana gelmiş (23→26 MPa), ancak bu artışın Pb-Zn atıklarına kıyasla daha düşük seviyede olduğu belirlenmiştir.

Demir maden atığı içeren numunelerde ise kür süresinin etkisi en sınırlı seviyede kalmıştır. 28 günlük dayanımın 8 MPa'dan 56 günde yaklaşık 12 MPa seviyesine yükselmesine rağmen, bu değerler kontrol numunesinin oldukça altında kalmıştır. Bu durum, demir atıklarının ince tane boyutu ve yüksek özgül yüzey alanına bağlı olarak etkin bir agrega iskeleti oluşturamaması ile açıklanmaktadır.

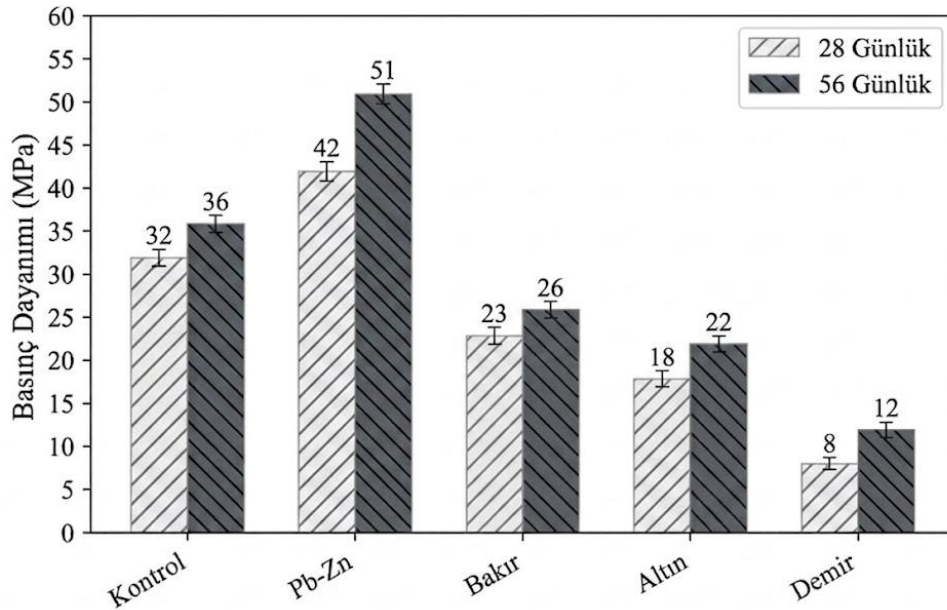
Elde edilen bulgular, kür süresinin tek başına dayanım gelişimini belirleyen bir parametre olmadığını, agrega türü ve fiziksel özelliklerin bu süreçte kritik rol oynadığını göstermektedir. Özellikle uygun tane boyutu dağılımına ve yoğun yapıya sahip Pb-Zn atıklarının

dayanım gelişimini desteklediği, buna karşılık ince fraksiyon oranı yüksek altın ve demir atıklarının mekanik performansı sınırladığı görülmektedir.

3.3. Agregaların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri ile Mekanik Performans Arasındaki İlişki

Harç numunelerinin mekanik performansı üzerinde agrega olarak kullanılan maden atıklarının fiziksel özelliklerinin etkisini ortaya koymak amacıyla, atıklara ait BET özgül yüzey alanı, helyum piknometresi ile belirlenen gerçek yoğunluk ve karakteristik tane boyutu (d_{80}) değerleri birlikte değerlendirilmiştir (Tablo 2). Ayrıca, agregaların tane boyutu dağılım eğrileri Şekil 2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu fiziksel parametrelerin birlikte ele alınması, agrega iskeletinin sürekliliği, boşluk yapısı ve hamur-agrega ara yüzey davranışının basınç dayanımı üzerindeki rolünün daha net şekilde yorumlanmasına olanak sağlamıştır. Söz konusu fiziksel özellikler, harçların basınç dayanımı

gelişimini doğrudan etkileyen temel parametreler olup, bu çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 2’de özetlenmiştir. Bu kapsamlı değerlendirme yaklaşımı, agregaların yalnızca kimyasal bileşimine değil, aynı zamanda granülometri, tane boyutu dağılımı, özgül yüzey alanı ve porozite gibi fiziksel parametrelerine bağlı olarak mekanik performansın değiştiğini ortaya koyan önceki çalışmalarla örtüşmektedir (Gou vd., 2019; Johansson vd., 2024). Genel olarak değerlendirildiğinde, maden proses atıklarının mekanik performans üzerindeki etkisinin yalnızca kimyasal bileşime değil, aynı zamanda fiziksel özelliklere bağlı olduğu literatürde açıkça vurgulanmaktadır. Özellikle optimum ikame oranına kadar dayanım artışı, bu seviyeden sonra ise agreganın taşıyıcı iskeletini zayıflatmasına bağlı olarak mekanik performansın azaldığı birçok çalışmada rapor edilmiştir (Yalley vd., 2022; Johansson vd., 2024).



Şekil 1. 28 ve 56 günlük kür süresi sonunda farklı maden atıklarının agrega olarak kullanıldığı harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri.

Tablo 2. Farklı maden proses atıklarının fiziksel özellikleri (BET, gerçek yoğunluk ve karakteristik tane boyutu)

Agrega Türü	Mineralojik Bileşimler	BET Özgül Yüzey Alanı (m ² /gr)	Gerçek Yoğunluk (gr/cm ³)	d ₈₀ (µm)
Pb-Zn atığı	Kalsit, kuvars ve kısmen feldspat mineralleri	1,47	3,16	610
Bakır atığı	Kuvars, silikat mineralleri ve sülfidik fazlar	11,46	3,38	390
Altın atığı	Kuvars, feldspat ve kil mineralleri	11,59	2,74	270
Demir atığı	Hematit ve kuvars	21,72	2,93	220

Tablo 2’de sunulan kimyasal analiz sonuçları dikkate alındığında, maden proses atıklarının literatür ve bileşim verilerine dayanarak mineralojik olarak kuvars (SiO₂), kalsit (CaCO₃), feldspat grubu mineraller ve demir oksit

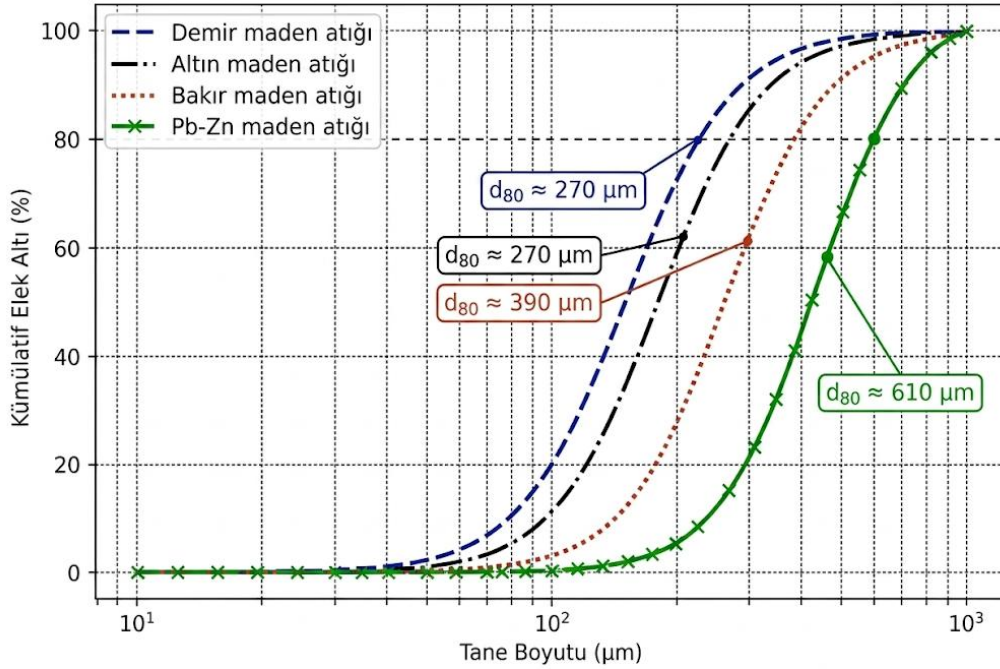
fazları (hematit, manyetit) içerebileceği öngörülmektedir. Ayrıca Pb-Zn ve bakır atıklarında sülfidik fazların (örneğin galen, sfalerit ve kalkopirit) bulunma olasılığı da söz konusudur. Bu mineralojik yapı, agregaların

yoğunluk, yüzey özellikleri ve bağlanma davranışı üzerinde etkili olarak mekanik performansı dolaylı olarak etkilemektedir.

Tablo 2 incelendiğinde, Pb-Zn maden atığının diğer atıklara kıyasla daha düşük BET özgül yüzey alanına ve daha yüksek gerçek yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Bu özellikler, Pb-Zn atıklarının daha kompakt bir agregaya iskeleti oluşturmaya ve hamur-agrega ara yüzeyinde daha etkin bir etkileşim sağlamasına katkıda bulunduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Buna karşılık, demir ve altın maden

atıklarının yüksek BET yüzey alanı ve daha ince karakteristik tane boyutları, su ihtiyacının artmasına, boşluk oranının yükselmesine ve buna bağlı olarak basınç dayanımının düşmesine neden olmuştur.

Şekil 2'de sunulan tane boyutu dağılım eğrileri de bu bulguları desteklemektedir. Pb-Zn atıkları daha dengeli ve süreklilik gösteren bir granülometri sunarken, demir ve altın atıklarında ince fraksiyon oranının belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, agregaya iskeletinin sürekliliğini zayıflatarak yük transfer mekanizmasını olumsuz etkilemektedir.



Şekil 2. Farklı maden proses atıklarının tane boyutu dağılım eğrileri.

Şekil 2'de görüldüğü üzere, Pb-Zn maden atıkları diğer maden atıklarına kıyasla daha dengeli ve süreklilik gösteren bir granülometri sunmakta, ancak CEN referans kumuna göre daha ince bir dağılım sergilemektedir. Bu durum, agregaya iskeletinin daha iyi oluşmasına ve boşluk oranının azalmasına katkı sağlamıştır. Buna karşılık, altın ve demir maden atıklarında tane boyutu dağılımının daha düzensiz olduğu ve ince fraksiyon oranının arttığı görülmektedir. İnce tanelerin artması, dolgu etkisine rağmen agregaya iskeletinin sürekliliğini zayıflatmış ve yük transfer mekanizmasını olumsuz etkilemiştir. Bu granülometrik uyumsuzluk, söz konusu atıklarla üretilen harçlarda gözlenen düşük basınç dayanımı değerlerinin temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 2 ve Şekil 2 birlikte değerlendirildiğinde, Pb-Zn maden atığının düşük BET yüzey alanı ve yüksek gerçek yoğunluğu sayesinde diğer maden atıklarına kıyasla daha uygun bir granülometrik davranış sergilediği görülmektedir. Bu özellikler, Pb-Zn agregalı harçlarda gözlenen yüksek basınç dayanımı değerlerini açıklayan temel fiziksel parametrelerdir. Bakır maden atıkları ise orta düzey BET yüzey alanı ve nispeten yüksek gerçek yoğunluk değerleri ile kabul edilebilir bir agregaya

davranışı sergilemekle birlikte, tane boyutu dağılımının standart kuma kıyasla daha ince fraksiyonlara kayması nedeniyle mekanik katkılarının sınırlı kaldığı değerlendirilmektedir.

Buna karşılık, altın ve demir maden atıklarının yüksek BET yüzey alanı ve ince tane boyutu dağılımı, artan su ihtiyacı ve boşluk oranı ile birlikte bu atıkların harç bünyesinde etkin bir taşıyıcı iskelet oluşturamamasına neden olmuştur. Bu durum, söz konusu agregalarla üretilen harçlarda elde edilen düşük basınç dayanımı değerleri ile uyumlu bir fiziksel açıklama sunmaktadır. Bu sonuçlar, mekanik performansın yalnızca tek bir parametreye değil; özgül yüzey alanı, tane boyutu dağılımı ve gerçek yoğunluk gibi birden fazla fiziksel özelliğin birlikte etkisine bağlı olduğunu açıkça göstermektedir.

Agregaların kimyasal bileşimlerinin mekanik performans üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen XRF analizlerinden elde edilen ana oksit bileşenleri Tablo 3'te sunulmuş olup, bu bulgular aşağıda detaylı olarak tartışılmıştır.

Tablo 3'te sunulan XRF sonuçları, maden proses atıklarının kimyasal bileşimindeki belirgin farklılıkları

ortaya koymaktadır. Pb-Zn maden atıklarında CaO içeriğinin yüksek olması, çimento hamuru ile kimyasal etkileşimi artırarak mekanik performansa olumlu katkı sağlamıştır. Buna karşılık, altın ve bakır atıklarında baskın olan SiO₂ içeriği, bu malzemelerin daha inert bir davranış sergilemesine neden olmuştur. Demir maden atıklarında ise yüksek Fe₂O₃ oranı, fiziksel olarak yoğun bir yapı sunmasına rağmen, yüksek BET yüzey alanı ve ince tane boyutu ile birleştiğinde mekanik performans üzerinde sınırlayıcı bir etki oluşturmuştur.

Elde edilen bulgular, agrega olarak kullanılacak maden atıklarının performansının yalnızca kimyasal bileşime değil, aynı zamanda özgül yüzey alanı, tane boyutu dağılımı ve gerçek yoğunluk gibi fiziksel özelliklerin birlikte etkisine bağlı olduğunu açıkça göstermektedir.

Bu bağlamda, düşük özgül yüzey alanı ve dengeli granülometriye sahip atıkların daha yüksek mekanik performans sağladığı; ince fraksiyon oranı yüksek ve porozite etkisi baskın olan atıkların ise dayanım gelişimini sınırladığı belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, literatürde tanımlanan “optimum ikame oranı-performans ilişkisi” yaklaşımı ile uyumlu olup, maden atıklarının beton ve harç sistemlerinde kullanımında performansın lineer değil, belirli bir optimum aralıkta maksimuma ulaştığını göstermektedir (Maali vd., 2026). Bu sonuçlar, uygun fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip maden proses atıklarının belirli ikame oranlarında doğal agregalara alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Maden proses atıklarının XRF ile belirlenen ana oksit bileşimleri

Agrega Türü	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
Pb-Zn atığı	21,4	34,6	18,2
Bakır atığı	48,2	6,7	22,5
Altın atığı	63,8	4,1	9,6
Demir atığı	32,9	3,8	41,7

4. Sonuç

Bu çalışmada, farklı maden proses atıklarının standart kum yerine agrega olarak kullanıldığı harç numunelerinin mekanik performansı deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Pb-Zn maden atıkları, özellikle %20 ikame oranında, referans karışımlara kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sağlamış olup, bu durum uygun tane boyutu dağılımı ve yüksek gerçek yoğunluk ile ilişkilendirilmektedir.
- Altın ve demir maden atıkları, yüksek özgül yüzey alanı ve ince tane boyutu nedeniyle agrega iskeletinin sürekliliğini zayıflatmış ve basınç dayanımında belirgin düşüslere neden olmuştur.
- Bakır maden atıkları, düşük ve orta ikame oranlarında sınırlı ancak kararlı bir mekanik katkı sağlamış olup, uygun koşullarda alternatif agrega olarak değerlendirilebilir.
- Kür süresi tüm karışımlarda dayanım artışı sağlamış olmakla birlikte, bu etkinin büyüklüğü agrega türüne bağlı olarak değişmiş; Pb-Zn atıklarında belirgin, altın ve demir atıklarında ise sınırlı kalmıştır.
- Mekanik performansın yalnızca kimyasal bileşime değil; özgül yüzey alanı, tane boyutu dağılımı ve gerçek yoğunluk gibi birden fazla fiziksel parametrenin birlikte etkisine bağlı olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, maden proses atıklarının agrega olarak kullanımında performansın lineer olmadığını ve belirli bir optimum ikame aralığında maksimuma ulaştığını göstermektedir. Bu nedenle, farklı atık türleri için uygun ikame oranlarının belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

Altın ve demir atıkları için tane boyutu kontrolü, yıkama ve yüzey modifikasyonu gibi işlemler önerilirken; Bakır atıkları için granülometrik iyileştirme ve optimum oran belirlenmesi önem taşımaktadır. Pb-Zn atıkları ise mevcut performansları ile umut verici olup, uzun dönem dayanıklılık ve çevresel etkiler açısından detaylı olarak incelenmelidir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	S.T.	D.A.	İ.D.
K	50	30	20
T	40	30	30
Y	50	20	30
VTI	30	40	30
VAY	50	30	20
KT	40	30	30
YZ	30	40	30
KI	30	40	30
GR	20	30	50

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Adiguzel, D., Tuylu, S., & Eker, H. (2022). Utilization of tailings in concrete products: A review. *Construction and Building Materials*, 360, 129574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129574>
- Bueno-Gómez, T., López-Bernier, Y., Caycedo-García, M. S., Ardila-Rey, J. D., Rodríguez-Caicedo, J. P., & Joya-Cárdenas, D. R. (2025). Valorization of Gold Mining Tailings Sludge from Vetas, Colombia as Partial Cement Replacement in Concrete Mixes. *Buildings*, 15(9), 1419. <https://doi.org/10.3390/buildings15091419>
- Demir Şahin, D., & Eker, H. (2024). Effects of Ultrafine Fly Ash against Sulphate Reaction in Concrete Structures. *Materials*, 17(6), 1442. <https://doi.org/10.3390/ma17061442>
- Eker, H., Demir Şahin, D., & Çullu, M. (2023). Effect of Reduced Fineness of Fly Ash Used on the Alkali-Silica Reaction (ASR) of Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 2203-2217. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01090-1>.
- El Machi, A., El Berdai, Y., Mabroum, S., Safhi, A. e. M., Taha, Y., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2024). Recycling of Mine Wastes in the Concrete Industry: A Review. *Buildings*, 14(6), 1508. <https://doi.org/10.3390/buildings14061508>
- Fajarani, I.S., Nelfia, L.O., Meret, J., Amiri, O., & Syamsunur, D. (2025). An Investigation of the Characteristics and Microstructure of Gold Tailing Powder Utilized as a Cement Substitute. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(5), 26351-26358. <https://doi.org/10.48084/etasr.10513>
- Ghazi, A. B., Jamshidi-Zanjani, A., & Nejati, H. (2022). Utilization of Copper Mine Tailings as a Partial Substitute for Cement in Concrete Construction. *Construction and Building Materials*, 317, 125921. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:244936332>.
- Gou, M., Zhou, L., & Then, N.W.Y. (2019). Utilization of Tailings in Cement and Concrete: A review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 449-464. <https://doi.org/10.1515/secm-2019-0029>.
- Johansson, L., Bahrami, A., Wallhagen, M., & Cehlin, M. (2024). A Comprehensive Review on Properties of Tailings-based Low-carbon Concrete: Mechanical, Environmental, and Toxicological Performances. *Developments in the Built Environment*, 18, 100428. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100428>.
- Kruger P., Serbai P., Chinellato A.S.A., & Pereira E. (2021). Influence of particle size distribution of conventional fine aggregate and construction demolition waste aggregate in Portland cement mortar. *Ceramica*, 67(383), pp. 269-276. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833035>
- Li J., Cao S., Song W., & Sun L. (2025). Visualization and quantification of pore structure in cement tailings waste rock composites using X-ray computed tomography and deep learning. *Construction and Building Materials*, 476, 141341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141341>
- Liang, Q., Zhang, S., Zhang, N., Ge, Z., Lv, L., Ling, H., & Zhang, H. (2025). Properties of Lightweight Foamed Concrete Containing Gold Tailings as Subgrade Filler. *Structural Concrete*, 26(5), 5901-5918. <https://doi.org/10.1002/suco.202300580>
- Luo, B., & Luo, Z. (2022). Influence of Curing Regimes on the Mechanical Properties and Microstructure of Ultra-High-Performance Concrete Blended with Gold Mine Tailings. *Materials Letters*, 311, 131527. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131527>
- Maali, A., Mohamedelhassan, E., & Bediwy. A. (2026). Utilization of Mine Tailings in Concrete Production: A Bibliometric and Technical Review of Challenges, Potential, and Innovation Pathways. *Materials Today Sustainability*, 34, 101325. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2026.101325>
- Rather, H.M. & Hasan, M. (2024). A Review on Sustainable Utilisation of Zinc Mine Tailing in Concrete Production. *2024 International Conference on Civil, Materials, and Environment for Sustainability, ICCMES 2024*, 596, 1029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20245961029>
- Rezaei Vahdat F., Ashtari P., & Dehghani, H. (2024). Sustainable utilization of mine wastes in mortar production as a part of aggregates: a case study on calcareous wastes of Angoran lead and zinc mine. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(36), pp. 49300-49316. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34401-8>
- Saedi, A., Jamshidi-Zanjani, A., Darban, A.K., Mohseni, M., & Nejati, H. (2022). Utilization of Lead-Zinc Mine Tailings as Cement Substitutes in Concrete Construction: Effect of Sulfide Content. *Journal of Building Engineering*, 57, 104865. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104865>
- Saedi A., Jamshidi-Zanjani A., Mohseni M., Khodadadi Darban A., & Nejati H. (2023a). 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>
- Saedi, A., Jamshidi-Zanjani, A., Mohseni, M., & Darban, A.K. (2023b). Effect of Mechanochemical Activation on Hydration Properties of Lead-Zinc Sulfide Tailings for Concrete Construction, *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01996. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01996>.
- Thomas, B.S., Damare, A., & Gupta, R.C. (2013). Strength and Durability Characteristics of Copper Tailing Concrete. *Construction and Building Materials*, 48, pp. 894-900. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.075>.
- Trujillo López L.M., González Suárez J., Pérez C.L.-C., García I., Serrano Lopez M.A., & Gayarre F.L. (2024). Mining wastes as aggregates for concrete. *The Path to Green Concrete: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, pp. 289-317. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19165-7.00005-8>
- Vazquez E., Roca A., Lopez-Soler A., Fernandez-Turiel J.L., Querol X., & Felipe M.T. (1991). Physico-chemical and mineralogical characterization of mining wastes used in construction. *Studies in Environmental Science*, 48, pp. 215-223. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)70405-9](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)70405-9)
- Wang, M., Chen, Z., Tao, Q., Yang, Y., Xie, L., Wu, D., Jin, D., & Luo, L. (2024). Effect of High Temperatures on Mechanical and Shielding Properties of Lead-Zinc Tailings Concrete for Radiation Protection. *Buildings*, 14(4), 1104. <https://doi.org/10.3390/buildings14041104>.
- Valley, P.P., & Kankam, C.K. (2022). Compressive, Flexural and Corrosion Permeability Resistance Properties of Concrete with Bauxite Tailing as Supplementary Mineral Admixtures. *Scientific African*, 18, e01409. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01409>
- Yang B., Gu X., Li Z., Hu Z., Liu J., & Wang Q. (2026). Safe and sustainable recycling of lead-zinc smelting slag in cementitious systems: Structure, reactivity and leaching risk evaluation. *Process Safety and Environmental Protection*, 208,

108437. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2026.108437>
Zhang, L., Liu, S., & Song, D. (2019). Effect of the Content of
Micro-Active Copper Tailing on the Strength and Pore

Structure of Cementitious Materials. *Materials*, 12(11), 1861.
<https://doi.org/10.3390/ma12111861>