

Termal Enerji Santrali Atıklarının Harç ve Beton Üretiminde Kullanımı: Bir İnceleme Çalışması

Use of Thermal Power Plant Wastes in Mortar and Concrete Production: A Review Study

Prof. Dr. Salih Taner YILDIRIM

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye.

styildirim@kocaeli.edu.tr

ORCID: 0000-0003-0021-0625

Makale Türü:

ARAŞTIRMA

Gönderilme Tarihi:

20 Nisan 2026

Kabul Tarihi:

1 Mayıs 2026

Öz

Bu çalışmada, termik santrallerden (uçucu kül, taban külü, senosfer ve biyokütle külü) elde edilen malzemeler ve nano katkıların harç, beton ve geopolimer beton üretiminde kullanımı ele alınmıştır. Son çalışmalar karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Termik santral atık ürünleri olan F ve C sınıfı uçucu küller, taban külleri, senosferler ve biyokütle küllerinin ve termik santral atığı olmayan destekleyici nano katkı maddelerinin (nano SiO₂, nano MgO) taze harç ve beton performansı ile sertleşmiş haldeki dayanıklılık performansı üzerindeki etkileri, kullanım oranı aşamaları incelenerek araştırılmıştır. Sonuçlar, F sınıfı uçucu külün çimentonun %15-%60'ı arasındaki oranlarda dayanıklılığı artırdığını ve yüksek pozvolanik performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. C sınıfı uçucu kül daha yüksek başlangıç dayanımlarına ulaşabilir, ancak değişken yapısı sorunlara yol açabilir. Isıya dayanıklı kompozit malzemeler için kullanılan geopolimerler, %40'ı geçmeyen oranlarda senosfer kullanılarak üretilebilir ve senosfer sayesinde hafif olması sağlanabilir. %1-4 oranında nano SiO₂ katkı maddesinin kullanımı, harç ve beton yapısı içinde C-S-H oluşumunu artırarak iç yapıyı daha güçlü hale getirir; ancak daha yüksek yüzdelerde zararlı sonuçlar ortaya çıkabilir. Biyokütle külü bazlı geopolimerlerin geleneksel betona kıyasla yüksek oranda CO₂ emisyonu azaltımı sağlayabildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yapılan mevcut çalışmaların uzun vadeli durabilite ve standardizasyon açısından sınırlı olduğu, bu alanlarda sürdürülebilirlik açısından daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu bildirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, Taban Külü, Senosfer ve Biyokütle Külü, Nano Katkılar, Harç ve Beton, Geopolimer, Durabilite, Sürdürülebilirlik.

Abstract

This study examines the use of materials obtained from thermal power plants (fly ash, bottom ash, cenosphere, and biomass ash) and nano-additives in the production of mortar, concrete, and geopolymer concrete through polymerization. Recent studies are compared and evaluated. The effects of class F and C fly ashes, bottom ashes, cenospheres, biomass ashes, and non-thermal power plant waste supporting nano-additives (nano SiO₂, nano MgO) on the fresh mortar and concrete performance and the hardened strength performance are investigated by examining the usage ratio stages. The results show that class F fly ash increases strength and exhibits high pozzolanic performance at ratios between 15% and 60% of cement. Class C fly ash can achieve higher initial strengths, but its variable structure may lead to problems. Geopolymers used for heat-resistant composite materials can be produced using cenosphere at ratios not exceeding 40%, and their lightness can be ensured thanks to the cenosphere. The use of 1-4% nano SiO₂ additives strengthens the internal structure of mortar and concrete by increasing C-S-H formation; however, higher percentages may lead to harmful results. Biomass ash-based geopolymers have been found to provide a significant reduction in CO₂ emissions compared to conventional concrete. However, it is reported that current studies are limited in terms of long-term durability and standardization, and more research is needed in these areas regarding sustainability.

Keywords: Fly Ash, Bottom Ash, Cenosphere, and Biomass Ash, Nano Additives, Mortar and Concrete, Geopolymer, Durability, Sustainability.

1. Giriş

Sürdürülebilir inşaat ve çevresel etki azaltımı açısından, çimento üretimi ile ilişkili enerji yoğunluğunun ve CO₂ emisyonlarının azaltılması giderek daha hayati bir önem taşımaktadır; burada, düşük klinker içeriğine sahip yeni çimento türleri ve mineral katkı maddeleri önemli bir rol oynamaktadır (Generowicz ve Kulczycka, 2025; Chen vd., 2022; Branca vd., 2020). Üretim zincirinin karbon emisyonu, klinker talebinin azaltılmasıyla hafifletilebilir; çimentoya mineral katkı maddeleri (örneğin, uçucu kül (UK), granüle edilmiş yüksek fırın cürufu) eklenmesi, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ile desteklenen klinker gereksiniminde bir azalmaya yol açmakta ve emisyon azaltımı için önemli bir strateji oluşturmaktadır (Generowicz ve Kulczycka, 2025; Branca vd., 2020). Ayrıca, endüstriyel yan ürünler ve atıklar, geopolimerler ve karbonat yapı malzemeleri gibi alternatif bağlayıcılar kullanılarak, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla önemli ölçüde CO₂ eşdeğerlerinde azalma sağlanabilmektedir. Bu sonuçlar, YDD çalışmaları kapsamında da defalarca doğrulanmıştır (Yalçinkaya vd., 2023; Sawant vd., 2023; Sureshkumar vd., 2019; Javadabadi vd., 2019).

Bu bağlamda, biyokütle külü ve kentsel katı atık yakma külü gibi atıkların, uygun işleme ve sınıflandırma süreçlerinden sonra çimento ve beton uygulamalarında kullanılabileceği belirtilmiştir; bu durum, enerji talep eden malzemelere olan ihtiyacı azaltmaktadır (Yalçinkaya vd., 2023; Tosti, 2021; Lam vd., 2010; Vincëviča-Gaile vd., 2021). Ayrıca, karbonatlama ve karbon yakalama yöntemleri aracılığıyla çimento bazlı malzemelerin sürdürülebilirliğinin daha da artırılması fırsatına da değinilmektedir; karbonatlama süreçleri, bazı atık akışlarının CO₂'i depolayan değerli kaynaklara dönüştürülmesini sağlamaktadır (Mäkikouri vd., 2021; Baciocchi vd., 2021).

Aşağıda, alternatif bağlayıcılar ve endüstriyel atıklar kullanarak çimento üretiminden CO₂ emisyonlarını azaltabilecek yaygın yöntemler yer almaktadır. Bu çabalarla ilgili olarak YDD tabanlı erişilebilir kanıtlar mevcuttur. Birçok çalışma; kül, metakaolin ve cüruf gibi katkı maddelerinin kullanımının, özellikle kısmi klinker modifikasyonunda emisyon azaltımı üzerinde büyük bir etki yarattığını göstermiştir (Rylko-Polak vd., 2022; Lelicińska-Serafin vd., 2020; Branca vd., 2020; Urbaniec vd., 2017). Diğer araştırmalar, atıkların kullanımının her zaman bir fayda sağlamayabileceğini veya hatta bir açıkla sonuçlanabileceğini belirtmiştir; bu nedenle, kapsamlı analizlerin YDD çerçevesinde gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Baena-Moreno vd., 2022; Mäkikouri vd., 2021; Deviatkin vd., 2021).

Bu inceleme, çeşitli termal enerji santrali atıklarının (UK, taban külü, biyokütle külü vb.) harç ve beton üretiminde kullanımını, taze/sertleşmiş beton özellikleri ve dayanıklılık performansları üzerine odaklanarak detaylı bir şekilde ele almaktadır. Çalışma, güncel literatürdeki verileri derleyerek harç ve beton özellikleri üzerindeki farklı kül işleme yöntemlerinin verilerini toplamakta ve bulgularını sunmaktadır. Böylece, özellikle son yıllardaki farklı literatür bulgularını tek bir çalışma çerçevesinde derleyerek ileride yapılacak deneysel ve uygulamalı çalışmalara temel oluşturması hedeflenmektedir.

.....

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, termik santral atıklarının geri dönüştürülerek harç ve beton üretiminde kullanımını ele alan güncel literatürün sistematik bir incelemesi olarak tasarlanmıştır. Literatür; Web of Science, Scopus, ScienceDirect ve Google Scholar veritabanları taranarak oluşturulmuştur. Bu kapsamda ağırlıklı olarak 2017-2025 yılları arasında yayımlanmış çalışmalar değerlendirilmiş; ayrıca önemli görülen bazı önceki tarihli kaynaklara da yer verilmiştir. Arama sürecinde “fly ash”, “bottom ash”, “biomass ash”, “cenosphere”, “nano silica”, “nano MgO”, “geopolymer concrete”, “supplementary cementitious materials”, “mortar”, “durability” ve “CO₂ emission” gibi anahtar kelimeler kullanılarak, Dünya’daki önemli dergilerde yer alan çalışmalar taranmıştır. Çalışmada ayrıca termik santral atıkları yanında destekleyici ürünlerin harç ve beton üretiminde kullanımı ve ortaya çıkan ürünlerin taze halde özellikleri ile sertleştikten sonraki dayanım ve durabilite performansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar bilimsel olarak tartışılarak değerlendirilmiş ve bir gelecek vizyonu ortaya konmuştur.

3. Termal Enerji Santrali Atıkları

F sınıfı ve C sınıfı UK ve taban külü davranışları, sınıflandırma için başlangıç faktörü olarak işlev gören külün kimyasal bileşimi ve mineralojik fazları tarafından tanımlanmaktadır; genellikle yüksek silika/alümina içeriği, bir külü F sınıfı olarak sınıflandırmakta ve hidrasyon reaksiyonlarının başlamasından kısa bir süre sonra puzolanik reaksiyonların meydana geldiğine dair kanıtlar sunmaktadır (Arroudj vd., 2018; Sigvardsen vd., 2019). İlerleyen aşamalarda, hidrasyon ürünleri, aşırı puzolanik etkisini gösterirken, C sınıfı kül türlerinin daha yüksek CaO içeriği, hidrasyon üzerinde potansiyel olarak gecikmeli katkılar veya aktivasyon gerektiren etkiler sağlayabilir ve bu durum standart süreçten sapmaya devam edebilir (Du vd., 2021).

Ultra ince UK, mikrosferler (senosferler), ultra ince kül ile nano ve mikro boyutlu bileşenler, erken aşama mikro dolgu etkileri sırasında C-S-H oluşumunu teşvik edebilir, ayrıca gözeneklilik yoğunlaşması ve hidrasyon reaksiyonlarını artırabilir (Supit vd., 2013; Neckel vd., 2022; Sobolev vd., 2022; Pławecka vd., 2022; Sidodikromo vd., 2019; Zhang vd., 2021).

Düşük CaO içeriğine sahip F sınıfı UK, genellikle oldukça yüksek silika-alümina bileşenlerine sahiptir ve C-S-H içeren bağlayıcılar hazırlamak için aktif puzolanik özellik gösterir; ayrıca, bu malzeme sınıfındaki düşük alkali-nite ve kalsiyum içeriği, geoteknik ve geopolimer uygulamalarda dayanıklılığı artırmaktadır (Amran vd., 2021; Ram ve Mohanty, 2022). Çok sayıda çalışma, külün gözeneklilik azaltma ve sızdırmazlık direnci üzerindeki faydalı rolünü belirtmiştir (Amran vd., 2021; Liu vd., 2020; Seetharaman vd., 2022; Tiwari vd., 2020). Bununla birlikte, literatür, F sınıfı’nın hidrasyon hızı ve erken yaş dayanım gelişimi üzerindeki etkisinin değişebileceğini ve bazı durumlarda bu etkilerin nanomodifikasyon ile optimize edilebileceğini göstermektedir (Beddu vd., 2024; Seetharaman vd., 2022).

C sınıfı UK, özellikle linyit/alt bitümlü kaynaklı kül, kendiliğinden sertleşme yeteneğine ve daha yüksek CaO içeriği ile puzolanik özelliklere sahiptir ve belirli bir ölçüde erken dayanım gelişimini teşvik etmektedir, ancak F sınıfı kadar tutarlı veya küresel olarak etkili değildir (Ram ve Mohanty, 2022; Blessen ve Rao, 2023; Seetharaman vd., 2022). Kül kullanımı, bileşen oranlarına bağlı olarak çeşitli sonuçlar doğurabilir (Naveen ve Bat, 2022; Khan, 2020).

Senosferler, kül içinde bulunan içi boş kürelerdir; düşük yoğunlukları ve mikro sertlikleri nedeniyle hafif yapı malzemelerinde ısı yalıtımı ve segregasyon kontrolüne katkıda bulunurlar; ayrıca bu mikroküreler, ultra hafif yüksek dayanımlı kompozitler için gözeneklilik yönetimi ve yoğunluk azaltımında önemli bir rol oynamaktadır (Zanjad vd., 2024; Walbrück vd., 2020; Huang vd., 2022; Beddu vd., 2024).

Öte yandan, organik biyokütle külleri (ahşap, zeytin atığı ve tarımsal atık yakımından elde edilen alt kül) karşılaştırılabilir puzolanik ve gecikmeli hidrasyon performansı sergilese de, farklı üretim ve zararlı uçucu bileşenlerin içeriği, mesleki güvenlik açısından değişiklikler göstermektedir; bu nedenle, üretim parametreleri (yakma sıcaklığı, yakıt türü) etkileri, külün fizikokimyasal özellikleri ile ilişkilendirilerek dikkate alınmalıdır (Reddy vd., 2024; Hamada vd., 2018; Zheng vd., 2025; Sigvardsen vd., 2019).



(a) Uçucu kül



(b) Taban külü



(c) Senosfer



(d) Biyokütle külü

Şekil 1: Termik Santral Atıklarının Görünümleri: (a) Uçucu Kül, (b) Taban Külü, (c) Senosfer, (d) Biyokütle Külü.

Yukarıda tanıtılan termik santral atıklarının (uçucu kül, taban külü, senosfer ve biyokütle külü) görsel görselleri Şekil 1’de bir araya getirilmiştir. Uçucu kül ve biyokütle külü toz, taban külü ve senosfer ise içi boşluklu malzemelerdir. Malzeme renklerinin genellikle kahverengi, gri ve fümeye olduğu görülmektedir ve elde edilme yerine göre farklılık arz edebilir.

4. Termik Santral Külleri ve Yardımcı Nano Katkıların Harç ve Beton Özelliklerine Etkileri

4.1. Taze Harç ve Beton Özelliklerine Etkileri

Nano silika, nano tortu ve UK katkı maddeleri, harçların akışkanlık ve sıkıştırma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir; optimum dozlarda nano silika ve ultra ince UK kombinasyonu, yüksek hacimli UK ile sonuçlanmaktadır. UK harçlarının basınç dayanımını artırabilmesine

rağmen, yüksek dozların mekanik davranış üzerinde olumsuz bir etkisi olabileceği belirtilmiştir (Supit vd., 2013; Seetharaman vd., 2022). Harç tasarımında, erken dayanım iyileştirmesi ve dayanıklılık performansı için UK türü ile F ve C sınıfı farklılıkları dikkate alınmalıdır (Beddu vd., 2024; Seetharaman vd., 2022).

Ultra ince UK ve nano silika, çimentonun hidrasyonuna katkıda bulunarak puzolanik reaksiyon yoluyla kalsiyum hidroksiti (CH) silikatlar ile bağlayarak C-S-H jel yoğunluğunu yükseltmekte ve kapiler gözenek çapını azaltmaktadır; yüksek hacimli UK içerikli betonlarda erken yaş dayanım yönetimi bu katkılarla iyileştirilebilir, ancak bazı bulgular, erken dayanımın mikro yapısal dolgu farklılıkları ve farklı hidrasyon mekanizmalarına bağlı olarak azalabileceğini veya gecikebileceğini vurgulamıştır (Supit vd., 2013; Sobolev vd., 2022).

Bu bağlamda, biyokütle külü (tarımsal atık yakımından elde edilen odun veya alt kül), puzolan davranışı sergileyebilmekte ve bazen bağlayıcı yönünden katılaştırıcı

özellikler gösterebilmektedir; Na veya K tipi geopolimerlerde, kalsine amorf silika/ Al_2O_3 yapısı sunan katkı maddeleri olarak kullanılmaktadır (Blesson ve Rao, 2023; Azarsa ve Gupta, 2020). Bu külün taze beton ve harçtaki değerlendirmeleri, su-çimento oranı, ayar süresi ve akışkanlık gibi taze özelliklerle ilişkilidir. Tarım endüstrisi atıklarının çimentolu ya da alkali aktiviteli olarak uygulanması, çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olmaları ve reaktivite ile erken dayanım gelişimi açısından değerli olan kalsinasyon etkisi nedeniyle akıllıca bir yaklaşımdır (Blesson ve Rao, 2023).

Birçok çalışmada, UK kullanımının etkisinin genellikle işlenebilirliği artırdığı ve küresel parçacık morfolojisinin karışım akışkanlığı üzerinde olumlu bir etki yarattığı gösterilmiştir. Ancak bu etki, külün türüne, inceliğine ve ikame oranına bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik göstermektedir.

4.2. Harç ve Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri

Nano ölçekli katkı maddeleri, örneğin, nano-silika/nano-magnezyum oksit, polimer/çimento matrisinin geliştirilmesi, hidrasyon hızının artırılması ve CH içeriğini azaltarak aşınma mekanizmalarının (örneğin, korozyon/klorid penetrasyonu) sınırlandırılması açısından faydalıdır; yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar, nano ölçekli parçacıkların mikro yapı sıkıştırması nedeniyle porozite arayüz geçiş bölgesi iyileştirmesi sağladığını desteklemektedir (Liu vd., 2020; Tiwari vd., 2020; Supit vd., 2013; Seetharaman vd., 2022).

SiO_2 , hidrasyon hızı, C-S-H jel yoğunluğu ve arayüzey performansını artırarak, porozite azalması sağlar (Liu vd., 2020; Supit vd., 2013). Nano MgO ve nano çözeltilerin kullanımı ile belirli bir dayanım derecesi sağlanmıştır (Giannakopoulou vd., 2021), ancak daha büyük dozlarda zararlı olduğu bulunmuştur. Nano ölçekli katkı maddeleri ayrıca esnekliği artırabilir veya belirli sıcaklıklarda dayanımı artırabilir (Huang vd., 2022).

UK ve bu atık malzemelere dayanan geopolimer betonların, klasik beton ile karşılaştırıldığında %40-80 oranında CO_2 azaltımı sağlarken, klasik dayanıklılık ve performans özelliklerini karşıladığı da görülmektedir. Bu durum, yaşam döngüsü kesitsel analizleri ile doğrulanmıştır (Yalçınkaya vd., 2023; Sawant vd., 2023; Sureshkumar vd., 2019).

Senosferlerin ve nano katkıların ısıya maruz beton üzerindeki performansları değişkendir. Ayrıca, senosfer

kullanılan ultra hafif geopolimer beton $700\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar sıcaklıklara dayanmakta ve bazı durumlarda sıradan betona kıyasla üstün ısı direnci gösterdiği kanıtlanmıştır (Huang vd., 2022).

Nano katkıların mikro yapı üzerindeki etkisini araştıran çalışmalar, nano-silika ve nano-alümina gibi katkı maddelerinin kullanılmasının porozite yoğunluğunu azalttığını, boşlukları doldurduğunu ve böylece aşırı kapiler akışkanlık olasılığını azalttığını; mikroskobik ölçek düzeyinde hidrasyon ürünlerinin oluşumunu hızlandırdığını; yüksek hacimli UK veya biyokütle külü içeren betonlarda erken güç artışları veya belirli arayüzey sıklığı sağladığını göstermektedir (Elrahman vd., 2021; Sidodikromo vd., 2019; Zhang vd., 2021; Pa vd., 2017).

Son derece düşük dozlarda betonun performansını artırma potansiyeline rağmen, nano katkıların beton mikro yapısına entegrasyonu sırasında işlenebilirlik ve dağılım sorunlarının da ele alınması gerekmektedir; bu nedenle, uygun dağıtıcıların yanı sıra, mümkün olduğunda nano katkıların etkisini maksimize ederken aglomerasyonu önleyen karıştırma teknolojilerinin kullanılması gereklidir (Elrahman vd., 2021; Zhang vd., 2021; Ashwini ve Rao, 2021).

Biyokütle (ahşap) atıklarından elde edilen kül, biyokütle külünün artırılmış puzolanik ve hidrolik aktivitesi, $CaO-SiO_2$ ilişkileri aracılığıyla C-S-H ve karboalüminat oluşumu yoluyla stabiliteyi artırabilir (Hamada vd., 2018; Zong vd., 2025; Sigvardsen vd., 2019; Zailan vd., 2022).

Tarım-sanayi atıkları veya alkali aktif bağlayıcılar olarak CO_2 emisyonlarını azaltmaya yardımcı olmaktadır; bu atıkların kalsinasyonu ve dokusunun optimize edilmesi, puzolanik/asidik ortamlarda reaktiviteyi artırmakta ve erken dayanım kazanımını teşvik etmektedir (Blesson ve Rao, 2023). Biyokütle külü gibi farklı malzemeler, geopolimer ve çimento bazlı harçlarda birlikte kullanılabilir. Ayrıca, nano modifikasyonun arayüzey iyileştirmeleri ve mikroporozite üzerindeki biyokütle külü üzerinde faydalı etkileri bulunmaktadır (Blesson ve Rao, 2023).

4.3. Harç ve Beton Durabilite Özelliklerine Etkileri

Durabilite, beton ve harcın uzun vadeli performansını etkileyen temel bir faktördür. Termal enerji santrali külünün dayanıklı beton üzerindeki etkileri değerlendirirken, klorür geçirgenliği, sülfat direnci, alkali-silika reaksiyonu (ASR), donma-çözülme direnci ve karbonatlaşma gibi özellikler incelenmektedir.

UK'ün, çimento bazlı harçlarda difüzyon oranlarını ve klorür bağlama kapasitesini artırdığı (Liu vd., 2020) ve özellikle su doygun ortamlarında kullanıldığında mikro yapı özelliklerini desteklediği gösterilmiştir. Genellikle, F Sınıfı UK, daha yüksek puzolanik potansiyele sahiptir; silika, alümina ve demir içeriğinin yüksek olması, mikro yapıyı kapatmakta ve gözenekliliği azaltmaktadır; bazı çalışmalar, bunun geopolimer betonlar için daha uygun olduğunu göstermektedir (Ram ve Mohanty, 2022; Seetharaman vd., 2022). Ancak, C Sınıfı potansiyel olarak kendiliğinden sertleşen bir malzeme olup, bazı koşullar altında iyi bir erken dayanım sergilemektedir. Ancak bu sınıf UK'ler yüksek değişkenlik potansiyeline sahiptir (Ram ve Mohanty, 2022; Seetharaman vd., 2022).

Nano veya mikro düzeyde katkı maddelerinin, UK'ün mikro yapısındaki boyutsal dağılımı ve gözeneklilik mimarisini değiştirdiği, mekanik ve dayanım özelliklerini etkilediği, ayrıca sağlam dozajlar ve karıştırma protokollerinin özellikle yüksek hacimli UK, ultra yüksek dayanımlı beton ve geopolimer betonlar için dayanımı (ve su geçirmezliği) artırabileceği kavramı üzerinde durulmaktadır (Sidodikromo vd., 2019; Arasu vd., 2023; Ashwini ve Rao, 2021; Arroudj vd., 2018; Sigvardsen vd., 2019). Kömür UK'ü içeren beton üzerinde yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Zhang vd., 2021). Hem geopolimer beton hem de yüksek hacimli UK içerikli betonlar için, ultra ince UK ve mikrosferler için daha yüksek paketleme yoğunlukları, daha küçük kapiler gözenek boyutları ile ilişkilendirilmiştir (Pławiecka vd., 2022; Yang vd., 2013).

Beton ve çimento üretiminde emisyon azaltım potansiyelini etkileyen en önemli faktörlerden biri, çeşitli atık akışlarının enerjiye veya karbon yakalamaya dönüştürülme derecesidir (ve potansiyel olarak yeni ürünlere dönüştürülmesi) olup, özellikle "dolaşımli akışkan yataklı yakma teknolojisi" ile çalışan santrallerden elde edilen uçucu kül külü gibi akışların karbonatlaşma yoluyla değerli agregalar geliştirilmesinde ve CO₂ depolama potansiyelinde önemli bir rol oynamaktadır (Mäkikouri vd., 2021; Baciocchi vd., 2021). Ancak, bazı çalışmalar, yaşam döngüsü çerçevesinde çimentodaki atıkları hesaba kattıklarında, net faydanın değişebileceğini ve bazı durumlarda bu malzemelerin karbon ayak izinin beklenenden daha büyük olabileceğini ortaya koymuştur (Baena-Moreno vd., 2022; Mäkikouri vd., 2021; Deviatkin vd., 2021).

Bu nedenle, endüstriyel atıkların sürdürülebilir kullanımı, doğaları (tip, işleme yöntemi ve uygulanabilirlik açısından) ile ilgili karmaşık ve bağlama bağlı araştırmalar gerektirmektedir; örneğin, bir kentsel katı atık yakma tesisinden elde edilen küldeki belirli bileşenlerin yeterince işlenmediğinde çevresel endişe oluşturmaları, ancak uygun ayrıştırma ve emisyon kontrolü ile çimento-beton sistemlerine faydalı girdiler olarak hizmet edebileceği bir durumdur (Chen vd., 2022; Lam vd., 2010; Javadabadi vd., 2019; Deviatkin vd., 2021).

Donma-çözülme direnci açısından, potasyum bazlı geopolimer betonun performans değerlendirmesi ve sızıntı potansiyeli incelenmiş olup, bu alternatif bağlayıcı harçların uzun vadeli dayanıklılıkları açısından eleştirel bir şekilde gözden geçirilmesi gerektiği belirtilmiştir (Azarsa ve Gupta, 2020). Durabilite araştırmaları açısından, mekanik olarak aktive edilmiş Ca zengini akışkan yataklı yakma UK'ünün alternatif bağlayıcıların hazırlanmasında potansiyel kullanımı da belirtilmelidir (Paaver vd., 2020).

5. Tartışma

Tablo 1'de farklı atık türlerinin kıvam, mekanik özellikler ve durabilite üzerindeki etkileri özetlenmektedir. Termik santral atıklarının beton, harç ve geopolimer gibi yapı malzemelerinde kullanımına ilişkin literatür bulguları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Literatürde bazı görüş ayrılıkları mevcuttur. UK ve cüruf, çimento ile karıştırıldığı orana bağlı olarak karbon emisyonunu azaltmaktadır. Ancak bu puzolanik atıklar sağlık, çevre güvenliği ve YDD dışı maliyetler açısından dikkat gerektirmektedir (Husgafvel vd., 2015; Baena-Moreno vd., 2022; Mäkikouri vd., 2021; Deviatkin vd., 2021). Generowicz ve Kulczycka (2025) ile Branca vd., (2020) düşük klinker içerikli çimentoların CO₂ azaltılması gerektiğini belirtirken, Baena-Moreno vd., (2022) ile Deviatkin vd., (2021) bu atık türlerinin faydalı olması için kapsamlı analize ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Küller, doğru sınıflandırma ve emisyon kontrolü ile değerli hale getirilebilir (Chen vd., 2022; Lam vd., 2010). Bölgesel politika çerçeveleri, atık yönetimi mevzuatı ve endüstriyel işbirliği yaklaşımlarıyla birlikte değerlendirilmelidir (Husgafvel vd., 2015; Urbaniec vd., 2017).

Tablo 1: Termik Santral Atıklarının Beton, Harç ve Geopolimer Ürünlerindeki Kıvam, Mekanik ve Durabilite Etkilerinin Karşılaştırmalı Özeti

Atık Türü	Ürün Türü	Kullanım Oranı (%)	Kıvam / İşlenebilirlik	Mekanik Özellikler	Durabilite Etkileri	Kaynaklar
F Sınıfı Uçucu Kül	Beton / ultra yüksek dayanımlı beton	%15-%60	Küresel parçacık yapısı akışkanlığı artırır; yüksek hacimlerde su ihtiyacını azaltır.	Erken dayanım düşebilir; 28-90 günde puzolanik reaksiyonla referansı yakalar veya aşar. Yüksek hacimde kullanıldığında ultra ince UK ile erken dayanım iyileştirilebilir.	Klorür difüzyonunu azaltır; poroziteyi düşürür; ASR riskini sınırlar. Sülfat direncini artırır.	Amran vd., 2021; Liu vd., 2020; Ram ve Mohanty, 2022; Supit vd., 2013
C Sınıfı Uçucu Kül	Beton / Harç	%10-%40	Yüksek CaO içeriği nedeniyle priz süresini kısaltabilir; işlenebilirlik değişken.	Erken dayanımı destekleyebilir (kendi kendine sertleşme); ancak uzun vadede performans değişkenliği yüksektir.	Belirli koşullarda erken dayanım avantajı sağlar; ancak sülfat direnci F sınıfına göre düşük olabilir.	Ram ve Mohanty, 2022; Seetharaman vd., 2022; Khan, 2020
Taban Külü	Beton (agrega ikamesi)	%10-%30 (agrega)	Porozitesi yüksek olduğundan su emme artar; işlenebilirliği olumsuz etkileyebilir.	Düşük yoğunluk avantajı sunar; yüksek ikame oranlarında basınç dayanımı düşer.	Donma-çözülme direnci düşebilir; uygun öğütme ile iyileştirilebilir.	Arroudj vd., 2018; Beddu vd., 2024; Paaver vd., 2020
Senosfer	Geopolimer / ultra yüksek dayanımlı beton	%5-%40 (hacimsel)	Düşük yoğunluk; hafif karışım tasarımı sağlar. Akışkanlığı belirli oranlarda olumlu etkiler.	Ultra hafif yapılarda avantaj sağlar; %40'ı aşan hacimlerde mekanik dayanım düşer. 700 °C'ye kadar ısıl dayanıklılık gösterebilir.	Porozite yönetimi ile su geçirimsizlik artırılabilir; aşırı kullanımda geçirgenlik artar.	Zanjad vd., 2024; Huang vd., 2022; Walbrück vd., 2020; Lu vd., 2024
Biyokütle Külü	Harç / Geopolimer	%5-%30	Kalsinasyon derecesine bağlı olarak priz süresi uzayabilir; incelik artışı ile işlenebilirlik iyileşir.	Pozzolanik aktivite ile C-S-H ve karboalüminat oluşumu; kalsinasyon ve incelik arttıkça dayanım yükselir.	Sızdırmazlık ve uzun vadeli dayanıklılık verileri sınırlı; standardizasyon gereklidir.	Blesson ve Rao, 2023; Yalçınkaya vd., 2023; Sigvardsen vd., 2019; Hamada vd., 2018
Nano SiO ₂ + Uçucu Kül	Beton / Harç	Nano SiO ₂ : %1-%4; UK: %20-%60	Nano silika su ihtiyacını artırabilir; ancak Ultra ince UK ile dengeli karışımlarda akışkanlık korunur.	Hidratasyon hızını artırır; C-S-H yoğunluğunu yükseltir; %3-4 üzerinde kullanımda olumsuz etki görülebilir.	Arayüzeyi iyileştirir; poroziteyi azaltır; darbe direncini artırır; klorür penetrasyonunu düşürür.	Zhang vd., 2021; Liu vd., 2020; Supit vd., 2013; Elrahman vd., 2021
Ultra İnce Uçucu Kül	Yüksek hacimli UK kullanılan Harç / Beton	%40-%70 (toplam bağlayıcı)	Mikro dolgu etkisiyle kapiler boşlukları daraltır; işlenebilirliği genellikle iyileştirir.	Erken yaş dayanımı iyileştirilebilir; CH tüketimini artırır ve C-S-H oluşumunu hızlandırır.	Su geçirimsizliğini artırır; puzolanik etkiyle uzun vadeli dayanıklılığı destekler.	Supit vd., 2013; Sobolev vd., 2022; Pławecka vd., 2022

Atık Türü	Ürün Türü	Kullanım Oranı (%)	Kıvam / İşlenebilirlik	Mekanik Özellikler	Durabilite Etkileri	Kaynaklar
Nano MgO + Uçucu Kül	Beton	Nano MgO: %1- %5; UK: %15- %30	Düşük oranlarda işlenebilirliğe etkisi sınırlı.	Düşük oranlarda güç kazanımı sağlar; aşırı Nano MgO olumsuz etki yapar.	Belirli koşullarda esneklik artışı sağlar; aşırı dozda genleşme riski taşır.	Giannakopoulou vd., 2021; Tiwari vd., 2020
Uçucu Kül Bazlı Geopolimer	Geopolimer Beton	%70-%100 (bağlayıcı)	Alkali aktivatör oranına bağlı; geleneksel betona göre farklı reoloji.	Sıradan betona eşdeğer veya üstün mekanik özellikler elde edilebilir; CO ₂ emisyonlarında %40-80 azalma potansiyeli.	Yüksek sıcaklık dayanıklılığı; donma-çözülme performansı dikkatli değerlendirilmeli.	Yalçinkaya vd., 2023; Sawant vd., 2023; Azarsa ve Gupta, 2020; Turkey vd., 2023
Dolaşım Akişkan Yataklı Yakma Külü	Karbonatlama ile Agregası	Değişken	Karbonatlama sonrası agregası formunda kullanılır; taze özellik etkisi sınırlı.	Karbonatlama ile CO ₂ depolama potansiyeli taşır; agregası dayanımı işleme bağlıdır.	CO ₂ tutma kapasitesi ile çevresel katkı sağlar; uzun vadeli performans verisi sınırlıdır.	Bacocchi vd., 2021; Mäkkikouri vd., 2021; Paaver vd., 2020

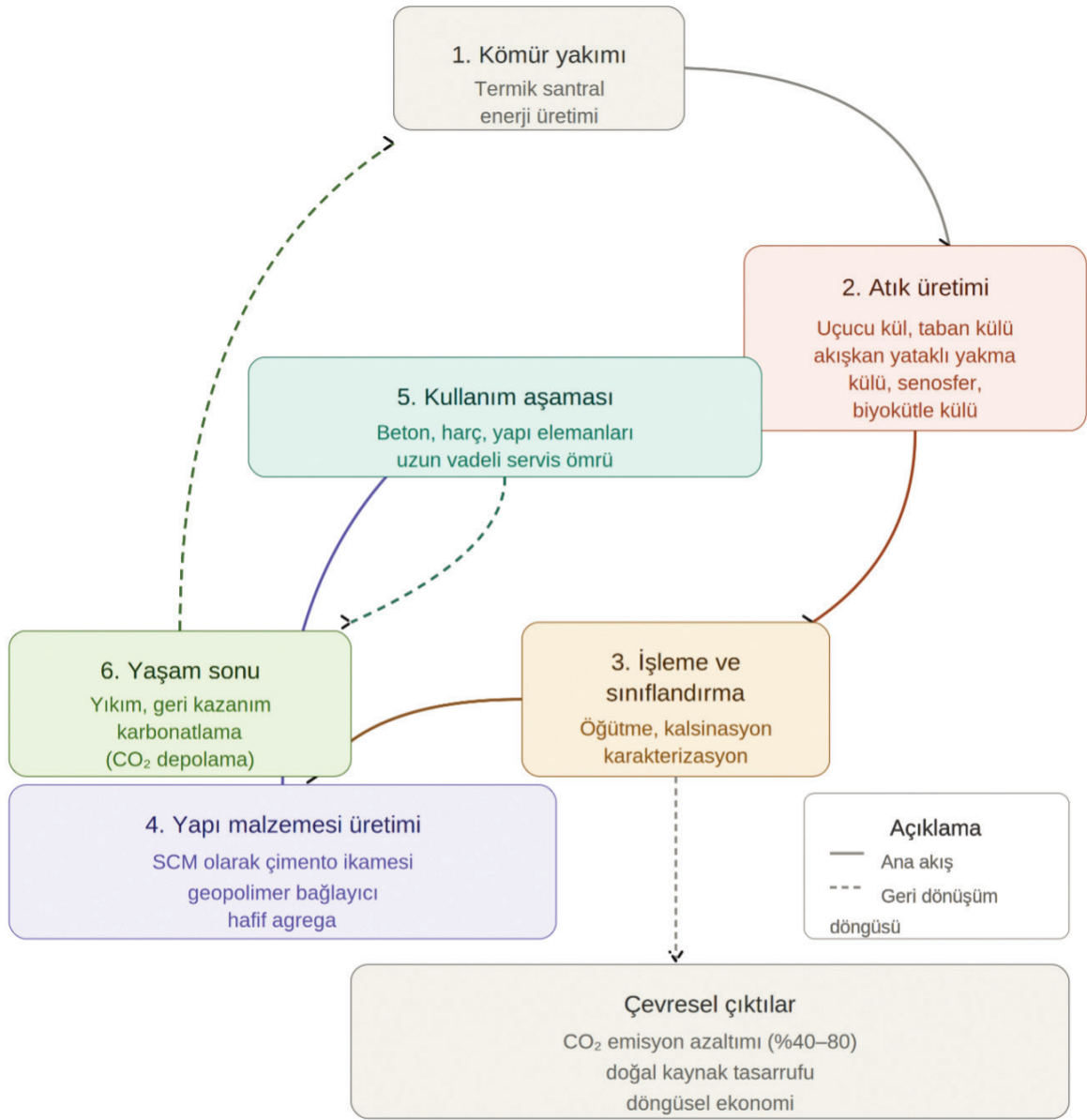
Tablo 1’de ifade edildiği gibi, F sınıfı uçucu kül, klorür geçirimsizliğini, poroziteyi ve ASR riskini azaltan puzolanik kapasitesi yüksek bir atık türüdür (Amran vd., 2021; Liu vd., 2020; Ram ve Mohanty, 2022). C sınıfı ise daha fazla CaO içeriği ile kendi kendine sertleşme özelliğinden dolayı erken dayanım yönünden F tipine göre avantajlıdır, ancak uzun vadede tutarlı performans göstermeyebilir (Ram ve Mohanty, 2022; Seetharaman vd., 2022). Hangi sınıfın geopolimer ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda daha avantajlı olduğu konusunda literatürde tam bir görüş birliği yoktur (Ram ve Mohanty, 2022; Seetharaman vd., 2022).

Senosferlerin, hafiflik ve yalıtım kapasitesine ek olarak, hacimsel olarak %40’ı aştığında porozite artışı ve mekanik dayanım kaybına neden olabileceği bildirilmektedir (Walbrück vd., 2020; Elenain vd., 2025). Uygun oranlarda ise ultra hafif geopolimerlerde 700 °C’ye kadar ısıl dayanıklılık elde etmek mümkündür (Huang vd., 2022; Zanjad vd., 2024). Nano katkıların etkisi kullanılan orana bağlıdır: nano SiO₂, %1-4 aralığındaki oranlarda C-S-H yoğunluğunu yükselterek arayüzey performansını iyileştirirken (Supit vd., 2013; Elrahman vd., 2021; Zhang vd., 2021; Liu vd., 2020), daha yüksek oranlarda olumsuz etkileri de vardır (Giannakopoulou vd., 2021; Zanjad vd., 2024) ve nano MgO için de aynı durum geçerlidir ve yüksek oranlarda genleşme riski mevcuttur (Giannakopoulou vd., 2021; Tiwari vd., 2020). Nano katkılar ve senosferler erken yaş performansına katkıda bulunurken, dolgu olarak fazla kullanıldıklarında dayanım düşüşlerine de yol açabilir ve optimal kullanım oranları deneysel olarak belirlenmelidir (Seetharaman vd., 2022; Lu vd., 2024).

Biyokütle külleri puzolanik aktiviteyi yükseltir ve biyokütle külü bazlı geopolimerler C-S-H ve karboalüminat oluşumunu temin edebilir (Blesson ve Rao, 2023). Biyokütle külü bazlı geopolimerler, daha fazla kül kullanımı mümkün olduğundan ve çimento içermediğinden dolayı geleneksel betona göre karbon ayak izini azaltmakla birlikte, farklı yakma koşullarından kaynaklanan değişkenlikler nedeniyle standardizasyona ihtiyaç duyulmaktadır (Yalçinkaya vd., 2023; Tosti, 2021; Sureshkumar vd., 2019; Hamada vd., 2018; Sigvardsen vd., 2019). Özellikle sızdırmazlık direnci, tehlikeli madde salınımı ve uzun vadeli dayanıklılık konularında literatür yetersizdir (Blesson ve Rao, 2023; Azarsa ve Gupta, 2020).

CO₂ emisyonlarını %80’e kadar azaltabilecek uçucu kül bazlı geopolimerlerde (Yalçinkaya vd., 2023; Sawant vd., 2023; Sureshkumar vd., 2019) uçucu külün bağlayıcıdaki oranları %100’e kadar olabilir. Senosfer içeren ultra hafif geopolimerler, bazı durumlarda sıradan betondan daha iyi özellikler gösterebilmektedir (Huang vd., 2022). Bununla birlikte, geopolimer betonun donma-çözülme performansı ve sızdırmazlık kapasitesine dikkat çekicidir (Azarsa ve Gupta, 2020). Karbonatlama stratejileri özellikle dolaşım akişkan yataklı yakma külü gibi atıkların CO₂ depolayan agregalara dönüştürülmesi mümkündür (Bacocchi vd., 2021; Mäkkikouri vd., 2021; Paaver vd., 2020).

Bu sonuçlardan yola çıkarak, termik santral atıkları sürdürülebilirlik açısından kullanılabilir yapı malzemeleridir. Ancak, uzun vadeli durabilite verileri, katkı oranlarının optimize edilmesi ile geopolimerlerde donma-çözülme ve karbonatlaşma gibi durabilite parametreleri konularında daha çok araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2: Termik Santral Atıklarının Geri Dönüşümü ve Yaşam Döngüsü.

Şekil 2’de görüldüğü gibi termik santral atıklarının geri dönüşümü ile bir yaşam döngüsü oluşmaktadır. Öncelikle termik santralde enerji üretimi sırasında mevcut atıklar (Uçucu kül, taban külü, akışkan yataklı yakma külü, senosfer ve biyokütle külü) açığa çıkar. Öğütme, kalsinasyon ve

karakterizasyon ile atıklar uygun hale getirilir. Malzemeler çimento ile ikame edilerek beton ve harçta servis ömrü boyunca kullanılır. Yıkım sonrası geri kazanım ve karbonatlama ile CO₂ depolama işlemi ile döngü başa döner.

6. Sonuç

Yapılan araştırmaya göre elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Termik santral atıklarının (uçucu kül, taban külü, biyokütle külü ve senosfer) beton, geopolimer beton ve harç üretiminde kullanımı, çimento ve beton sektöründen kaynaklı karbon emisyonlarını azaltarak, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir malzemeler üretilmesini sağlamaktadır.
- F sınıfı uçucu küller puzolanik reaksiyonları sayesinde 28 günden daha uzun vadeli dayanımı ve durabiliteyi artırmakta ise; C sınıfı küller, yüksek kalsiyum içerikleriyle erken yaş dayanımında avantaj sağlamaktadır.
- Nano-silika gibi katkı maddelerinin özellikle %4 civarına kadar düşük oranda kullanımı, betonun iç yapısındaki boşlukları doldurarak daha yoğun ve güçlü bir matris oluşumunu tetiklemektedir.
- Senosferler içi boş kürecikler olduğundan, bu malzeme ile üretilen kompozitler beton ve harcı hafifletirken, 700 °C'ye kadar ulaşan sıcaklıklara dayanıklılık sağlamaktadır.

- Uçucu kül ve biyokütle külü kullanılan geopolimer betonlar, diğer özelliklerde de iyi performanslar sergileyerek, geleneksel betona göre karbon ayak izini %40-%80 arası oranlarda düşürebilmektedir.
- Biyokütle ve kentsel atık küllerinin kaynaklandığı yakıt türüne göre gösterdiği büyük değişkenliği minimize etmek amacıyla, bu malzemelerin fizikokimyasal özellikleri için küresel standartlar geliştirilmelidir.

Geleceğe yön vermek açısından, geopolimer beton ve/veya yüksek hacimli kül içeren betonların donma-çözülme, karbonatlaşma ve klorür penetrasyonu testleri 5-10 yıla kadar yapılmalıdır, hatta bu çalışmalar sahada yürütülebilir. Nano katkıların topaklanmasını önleyecek yöntemler üzerine çalışmalar yapılması mümkündür. Atık malzemeler beton içinde olmalarına rağmen, zamanla zararlı madde salınımı yaparak çevreye zarar verip vermediği konusu da araştırılmalıdır. Bu atıkların endüstriyel ölçekte maliyetini ve nakliyesini de değerlendiren kapsamlı YDD yapılmalıdır.

Teşekkür ve Bilgilendirme

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FAA-2025-4204 nolu Acil Altyapı Destek projesi kapsamında desteklenmiştir. Makale projede kullanılan literatür bilgisi ile oluşturulmuştur.

Kaynakça

- Amran, M., Fedjuk, R., Murali, G., Avudaiappan, S., Ozbakkaloglu, T., Vatin, N., ... Gholampour, A. (2021). Fly Ash-Based Eco-Efficient Concretes: A Comprehensive Review of the Short-Term Properties. *Materials*, 14(15), 4264. <https://doi.org/10.3390/ma14154264>
- Arasu, A. N., Muthusamy, N., Natarajan, B., Parthasaarathi, R. (2023). Optimization of High Performance Concrete Composites by Using Nano Materials. *Research on Engineering Structures and Materials*, 9(3): 843-859. <https://doi.org/10.17515/resm2022.602ma1213>
- Arroudj, K., Dorbani, S., Oudjit, M., Tagnit-Hamou, A. (2018). Use of Algerian Natural Mineral Deposit as Supplementary Cementitious Materials. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 34, 48-58. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.34.48>
- Ashwini, K. and Rao, P. (2021). Evaluation of Empirical Relation between Compressive and Flexural Strength of Concrete Partially Using Alccofine and Nano-Silica. *Advanced Materials Research*, 1167, 77-86. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1167.77>
- Azarsa, P. and Gupta, R. (2020). Freeze-Thaw Performance Characterization and Leachability of Potassium-Based Geopolymer Concrete. *Journal of Composites Science*, 4(2), 45. <https://doi.org/10.3390/jcs4020045>
- Baciocchi, R., Costa, G., Librandi, P., Stendardo, S., Zingaretti, D. (2021). Assessment of a Carbonation-Based CO₂ Utilization Process for the Valorization of CFBC Ash. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(29), 10814-10825. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01126>
- Baena-Moreno, F., Leventaki, E., Riddell, A., Wojtasz-Mucha, J., Bernin, D. (2022). Effluents and Residues from Industrial Sites for Carbon Dioxide Capture: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 319-337. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01513-x>
- Beddu, S., Basri, N., Kamal, N., Mohamad, D., Itam, Z., Sivakumar, N., ... Nazri, F. (2024). Characterization of Coal Combustion Products from Malaysian Power Plant for Building Materials Applications. *Matec Web of Conferences*, 400, 01007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202440001007>
- Blesson, S. and Rao, A. (2023). Agro-Industrial-Based Wastes as Supplementary Cementitious or Alkali-Activated Binder Material: A Comprehensive Review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01096-8>
- Branca, T., Colla, V., Algermissen, D., Granbom, H., Martini, U., Morillon, A., ... Rosendahl, S. (2020). Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe. *Metals*, 10(3), 345. <https://doi.org/10.3390/met10030345>
- Chen, D., Zhang, Y., Xu, Y., Nie, Q., Yang, Z., Sheng, W., ... Qian, G. (2022). Municipal Solid Waste Incineration Residues Recycled for Typical Construction Materials—A Review. *RSC Advances*, 12(10), 6279-6291. <https://doi.org/10.1039/d1ra08050d>
- Deviatkin, I., Horttanainen, M., Havukainen, J. (2021). Sustainability of Waste Management Systems: Energy Recovery. *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, 1-13. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02006-4_415-1
- Du, S., Zhao, Q., Shi, X. (2021). High-Volume Fly Ash-Based Cementitious Composites as Sustainable Materials: An Overview of Recent Advances. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1). <https://doi.org/10.1155/2021/4976169>
- Elenain, M., Moussa, O., Shaheen, Y., Morsi, A. (2025). A Review of Research and Performance Assessment on the Sustainable Application of Industrial Slag in Reinforced Ferrocement Slabs. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1530(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1530/1/012035>
- Elrahman, M., Sikora, P., Chung, S., Stephan, D. (2021). The performance of Ultra-Lightweight Foamed Concrete Incorporating Nanosilica. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(2). <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00234-2>
- Generowicz, N. and Kulczycka, J. (2025). LCA of Cement with Alternative Additives: Pathways to Sustainable Production. *Materials*, 18(13), 3057. <https://doi.org/10.3390/ma18133057>
- Giannakopoulou, P., Rogkala, A., Lampropoulou, P., Kalpogiannaki, M., Petrounias, P. (2021). Evaluation of Cement Performance Using Industrial Byproducts Such as Nano MgO and Fly Ash from Greece. *Applied Sciences*, 11(24), 11601. <https://doi.org/10.3390/app112411601>
- Hamada, H., Jokhio, G., Yahaya, F., Humada, A. (2018). Applications of Nano Palm Oil Fuel Ash and Nano Fly Ash in Concrete. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 342, 012068. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/342/1/012068>
- Huang, H., Wu, X., Zheng, X., Lu, H., Li, J., Liao, Z. (2022). Mechanical Properties of Ultra-Lightweight Geopolymer Composite after Elevated Temperature Exposure. *Key Engineering Materials*, 931, 153-160. <https://doi.org/10.4028/p-lyh7r7>
- Husgafvel, R., Nordlund, H., Heino, J., Mäkelä, M., Watkins, G., Dahl, O., ... Paavola, I. (2015). Use of Symbiosis Products from Integrated Pulp and Paper and Carbon Steel Mills: Legal Status and Environmental Burdens. *Journal of Industrial Ecology*, 20(5), 1187-1198. <https://doi.org/10.1111/jiec.12348>
- Javadabadi, M., Kristiansen, D., Redie, M., Baghban, M. (2019). Sustainable Concrete: A Review. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 126-132. <https://doi.org/10.18178/ijscer.8.2.126-132>
- Khan, A. (2020). Microstructure Investigation of Fly Ash F and Fly Ash C Geopolymer Concrete Using Synergy of Recycle Aggregates. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 15(9). <https://doi.org/10.26782/jmcms.2020.09.00027>
- Lam, C., Ip, A., Barford, J., McKay, G. (2010). Use of Incineration MSW Ash: A Review. *Sustainability*, 2(7), 1943-1968. <https://doi.org/10.3390/su2071943>

- Lelicińska-Serafin, K., Wojtkowska, M., Kledyński, Z., Walczak, J., Bogdan, M., Jackiewicz-Rek, W., ... Rucińska, J. (2020). Wykorzystanie Popiołów Lotnych Ze Współspalania Biomasy W Kompozytach Cementowych. *Archives of Civil Engineering*, 66(3), 249-261. <https://doi.org/10.24425/ace.2020.131820>
- Liu, J., Liu, J., Huang, Z., Zhu, J., Liu, W., Zhang, W. (2020). Effect of Fly Ash as Cement Replacement on Chloride Diffusion, Chloride Binding Capacity, and Micro-Properties of Concrete in a Water Soaking Environment. *Applied Sciences*, 10(18), 6271. <https://doi.org/10.3390/app10186271>
- Lu, Z., Huang, Z., Feng, X., Qin, T., Zhu, X., Zhang, A. (2024). Optimizing Binders with Maximum Using of Industrial Waste to Develop Low Carbon Ultra-High Performance Concrete. *Engineering Research Express*, 6(3), 035106. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad6665>
- Mäkikouri, S., Vares, S., Korpijärvi, K., Papakonstantinou, N. (2021). The Carbon Dioxide Emissions Reduction Potential of Carbon-Dioxide-Cured Alternative Binder Concrete. *Recent Progress in Materials*, 03(02), 1-28. <https://doi.org/10.21926/rpm.2102018>
- Naveen, S. and Bat, G. (2022). An Exhaustive Review on The Development of The Role of Cementitious Supplementary Cementitious Material in Ductile Engineered Cementitious Composite (ECC). *ASPS Conference Proceedings*, 1(1), 1663-1669. <https://doi.org/10.38208/acp.v1.703>
- Neckel, A., Pinto, D., Adelodun, B., Dotto, G. (2022). An Analysis of Nanoparticles Derived from Coal Fly Ash Incorporated into Concrete. *Sustainability*, 14(7), 3943. <https://doi.org/10.3390/su14073943>
- Pa, N., Ibrahim, M., Ghani, A., Ali, A., Arshad, M. (2017). Compressive Strength of Construction Materials Containing Agricultural Crop Wastes: A Review. *MATEC Web of Conferences*, 103, 01018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710301018>
- Paaver, P., Paiste, P., Liira, M., Kirsimäe, K. (2020). Mechanical Activation of the Ca-Rich Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ash: Development of an Alternative Binder System. *Minerals*, 11(1), 3. <https://doi.org/10.3390/min11010003>
- Pławiecka, K., Bazan, P., Lin, W., Korniejewko, K., Sitarz, M., Nykiel, M. (2022). Development of Geopolymers Based on Fly Ashes from Different Combustion Processes. *Polymers*, 14(10), 1954. <https://doi.org/10.3390/polym14101954>
- Ram, A. and Mohanty, S. (2022). State of the Art Review on Physiochemical and Engineering Characteristics of Fly Ash and its Applications. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1). <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00472-6>
- Reddy, P., Vijay, K., Kavyatheja, B., Reddy, G., Reddy, A., Jindal, B., ... Kumar, A. (2024). Impacts of Corrosion Inhibiting Admixture and Supplementary Cementitious Material on Early Strength Concrete. *Discover Applied Sciences*, 6(7). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06032-8>
- Ryłko-Polak, I., Komala, W., Białowiec, A. (2022). Synergistic Effect of Biomass and Industrial Waste Reuse in Bio-Composite Construction Materials for Decreasing of Natural Resources Use and Mitigation the Environmental Impact of the Construction Industry. A Review. *Preprints*, 2022, 2022050009. <https://doi.org/10.20944/preprints202205.0009.v1>
- Sawant, R., Joshi, D., Menon, R., Wadhwa, L. (2023). Identification of Sustainability factors of Self-Compacting Geopolymer Concrete for Precast Construction Using SEM. *E3S Web of Conferences*, 405, 04031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340504031>
- Seetharaman, S., Jayalakshmi, S., Singh, R., Leong, W., Nai, M., Gupta, M. (2022). Mechanical Properties of Sustainable Metal Matrix Composites: A Review on the Role of Green Reinforcements and Processing Methods. *Technologies*, 10(1), 32. <https://doi.org/10.3390/technologies10010032>
- Sidodikromo, E., Chen, Z., Habib, M. (2019). Review of The Cement-Based Composite Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). *The Open Civil Engineering Journal*, 13(1), 147-162. <https://doi.org/10.2174/1874149501913010147>
- Sigvardsen, N., Kirkelund, G., Jensen, P., Geiker, M., Ottosen, L. (2019). Impact of Production Parameters on Physiochemical Characteristics of Wood Ash for Possible Utilisation in Cement-Based Materials. *Resources Conservation and Recycling*, 145, 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.034>

- Sobolev, K., Pradoto, R., Flores-Vivián, I., Kozhukhova, M., Zhernovskaya, I. (2022). Top-Down Production of Nano-Seeds from Activated Fly Ash Tuned for Enhancing the Early Strength in Blended Cements. *Nanomaterials*, 12(14), 2347. <https://doi.org/10.3390/nano12142347>
- Sureshkumar, M. P., Sathish, K. B., Ravikanth, J. (2019). Green Concrete – A Review. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 458-464. <https://doi.org/10.34256/irjmtcon64>
- Supit, S., Shaikh, F., Sarker, P. (2013). Effect of Nano Silica and Ultrafine Fly Ash on Compressive Strength of High Volume Fly Ash Mortar. *Applied Mechanics and Materials*, 368-370, 1061-1065. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.368-370.1061>
- Tiwari, S., Srivastava, K., Gehlot, C., Srivastava, D. (2020). Epoxy/ Fly ash from Thermal Power Plant/Nanofiller Nanocomposite: Studies on Mechanical and Thermal Properties: A Review. *International Journal of Waste Resources*, 10(01). <https://doi.org/10.35248/2252-5211.20.10.375>
- Tosti, L. (2021). Improving Circularity Of Biomass Ash: A Theoretical, Experimental and Modelling Approach to Find Sustainable Solutions for Application in Cement or Soil. PhD Thesis, Wageningen University. <https://doi.org/10.18174/550164>
- Turkey, F., Beddu, S., Al-Hubboubi, S., Fawzi, N. (2023). Elevated Temperature Effects on Geo-Polymer Concrete: An Experimental and Numerical-Review Study. *Annales De Chimie Science Des Matériaux*, 47(5), 325-340. <https://doi.org/10.18280/acsm.470507>
- Urbaniec, K., Mikulčić, H., Rosen, M., Duić, N. (2017). A Holistic Approach to Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. *Journal of Cleaner Production*, 155, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.119>
- Vincēviča-Gaile, Z., Teppand, T., Kriipsalu, M., Krievāns, M., Jani, Y., Kļaviņš, M., ... Burlakovs, J. (2021). Towards Sustainable Soil Stabilization in Peatlands: Secondary Raw Materials as an Alternative. *Sustainability*, 13(12), 6726. <https://doi.org/10.3390/su13126726>
- Walbrück, K., Maeting, F., Witzleben, S., Stephan, D. (2020). Natural Fiber-Stabilized Geopolymer Foams—A Review. *Materials*, 13(14), 3198. <https://doi.org/10.3390/ma13143198>
- Yalçinkaya, B., Špirek, T., Bouša, M., Louda, P., Růžek, V., Rapiejko, C., ... Buczkowska, K. (2023). Unlocking the Potential of Biomass Fly Ash: Exploring Its Application in Geopolymeric Materials and a Comparative Case Study of BFA-Based Geopolymeric Concrete against Conventional Concrete. *Ceramics*, 6(3), 1682-1704. <https://doi.org/10.3390/ceramics6030104>
- Yang, W., Feng, N., Hui, T., Li, J., Cheng, B. (2013). Study on the Dense-Packing Effect and Properties of Multi-Component Cementitious Material. *Advanced Materials Research*, 856, 29-35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.856.29>
- Zailan, S., Mahmed, N., Abdullah, M., Rahim, S., Halin, D., Sandu, A., ... Yahya, Z. (2022). Potential Applications of Geopolymer Cement-Based Composite as Self-Cleaning Coating: A Review. *Coatings*, 12(2), 133. <https://doi.org/10.3390/coatings12020133>
- Zanjad, N., Pawar, S., Nayak, C. (2024). Review on Application of Lightweight Cenosphere in Construction Material. *Macromolecular Symposia*, 413(1). <https://doi.org/10.1002/masy.202300006>
- Zhang, P., Sha, D., Li, Q., Zhao, S., Ling, Y. (2021). Effect of Nano Silica Particles on Impact Resistance and Durability of Concrete Containing Coal Fly Ash. *Nanomaterials*, 11(5), 1296. <https://doi.org/10.3390/nano11051296>
- Zheng, Y., Xie, Y., Zhang, Y., Wan, C., Li, M., Zhang, P. (2025). Valorization of River Sediments in Sustainable Cementitious Gel Materials: A Review of Characteristics, Activation, and Performance. *Gels*, 11(9), 755. <https://doi.org/10.3390/gels11090755>
- Zong, Y., Zhu, D., Yue, L., Tao, X., Min, C. (2025). Preparation of high-flowability ultra-early-strength grouting material and investigation of its mechanical properties in reinforcing fractured sandstone. *PLoS ONE*, 20(7), e0327032. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327032>