



Performance and Sustainability of Electric Arc Furnace Slag in Conventional Wearing Courses: A Comparative Literature Review

Fatih Yonar^{1,a,*}

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Çanakkale, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 09/03/2026

Accepted: 04/06/2026

ABSTRACT

Electric Arc Furnace (EAF) slag is an industrial by-product generated during the remelting of scrap metal in electric arc furnaces, consisting predominantly of calcium, iron, silicon and magnesium oxides. Its high hardness, angular particle morphology, and rough surface texture make EAF slag a promising alternative aggregate for asphalt pavements. Incorporating EAF slag in asphalt mixtures helps to alleviate pressure on natural aggregate resources and supports the integration of steelmaking by-products into a circular economy framework. The present study comprehensively reviews the existing literature on the use of electric arc furnace slag in conventional dense-graded asphalt wearing courses, evaluating material characteristics, mixture design, mechanical performance, surface functionality, and environmental sustainability aspects. The literature was retrieved from Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink and Google Scholar databases, focusing primarily on peer-reviewed studies published over the last twenty years (2005–2025), and the collected findings were synthesized using a comparative qualitative analysis rather than a quantitative meta-analysis. Literature findings indicate that the high hardness, angularity, and rough surface texture of electric arc furnace slag can significantly enhance resistance to permanent deformation and improve skid resistance performance. In particular, replacement ratios of approximately 25–50% in the coarse aggregate fraction are reported to provide a balance between rutting resistance and fatigue performance. However, due to its relatively high density and porous structure, binder absorption may increase, and the optimum binder content generally needs to be increased by approximately 0.3–0.7%. In terms of volumetric stability, the expansion potential associated with free CaO and MgO represents an important risk; nevertheless, aging and stabilization processes can substantially reduce this risk. Environmental assessments demonstrate that heavy metal leaching is significantly limited by bitumen encapsulation and that meaningful reductions in greenhouse gas emissions can be achieved under appropriate logistical conditions. Overall, when used in conjunction with proper stabilization and performance-based mixture design, electric arc furnace slag can be considered a technically viable and sustainable aggregate alternative for conventional asphalt wearing courses.

Keywords: Electric arc furnace slag, Asphalt wearing course, Steel slag aggregate, Permanent deformation resistance, Sustainable construction materials

Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Geleneksel Aşınma Tabakalarındaki Performansı ve Sürdürülebilirliği: Karşılaştırmalı Bir Literatür Derlemesi

ÖZ

Elektrik Ark Ocağı (Electric Arc Furnace, EAF) cürufu, hurda metalin elektrik ark ocaklarında yeniden ergitilmesi sırasında açığa çıkan ve ağırlıklı olarak kalsiyum, demir, silisyum ile magnezyum oksitlerinden oluşan endüstriyel bir yan üründür. Yüksek sertliği, köşeli tane yapısı ve pürüzlü yüzey dokusu, EAF cürufunu asfalt kaplamalar için umut verici bir alternatif agrega hâline getirmektedir. Cürufun asfalt karışımlarında değerlendirilmesi, doğal agrega kaynakları üzerindeki baskının hafifletilmesine ve çelik üretiminden kaynaklanan atık yükünün döngüsel ekonomi içerisinde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışma, elektrik ark ocağı cürufunun geleneksel yoğun gradasyonlu asfalt aşınma tabakalarında kullanımına ilişkin mevcut literatürü kapsamlı biçimde inceleyerek malzeme özellikleri, karışım tasarımı, mekanik performans, yüzey fonksiyonelliği ve çevresel sürdürülebilirlik boyutlarını değerlendirmektedir. Literatür taraması Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink ve Google Scholar veri tabanlarında, ağırlıklı olarak son yirmi yıl (2005–2025) içinde yayımlanmış hakemli çalışmalar üzerinden gerçekleştirilmiş; elde edilen bulgular nicel meta-analiz yerine karşılaştırmalı nitel analiz yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Literatür bulguları, elektrik ark ocağı cürufunun yüksek sertlik, köşellilik ve pürüzlü yüzey dokusu sayesinde kalıcı deformasyon direncini ve kayma-sürtünme performansını belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. Özellikle iri agrega fraksiyonunda %25–50 civarındaki ikame oranlarının kalıcı deformasyon direnci ile yorulma performansı arasında dengeli sonuçlar verdiği rapor edilmektedir. Bununla birlikte, yüksek yoğunluk ve gözenekli yapı nedeniyle bağlayıcı absorpsiyonu artırmakta ve optimum bağlayıcı içeriğinin genellikle %0,3–0,7 oranında yükseltilmesi gerekmektedir. Hacimsel stabilite açısından serbest CaO ve MgO kaynaklı genleşme potansiyeli önemli bir risk oluşturmaktadır; ancak yaşlandırma ve stabilizasyon işlemleri bu riski önemli ölçüde düşürebilmektedir. Çevresel değerlendirmeler, bitüm kapsüllemesi sayesinde ağır metal için önemli ölçüde sınırlandırıldığını ve uygun lojistik koşullar altında sera gazı emisyonlarında anlamlı azalmalar sağlanabildiğini göstermektedir. Genel olarak elektrik ark ocağı cürufu, uygun stabilizasyon ve performans temelli karışım tasarımı ile birlikte uygulandığında, geleneksel aşınma tabakalarında hem teknik performans hem de sürdürülebilirlik açısından uygulanabilir bir agrega alternatifi olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik ark ocağı cürufu, Asfalt aşınma tabakası, Çelik cürufu agregası, Kalıcı deformasyon direnci, Sürdürülebilir inşaat malzemeleri

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

Giriş

Artan Altyapı İhtiyacı ve Doğal Kaynak Baskısı

Ulaşım altyapısının günden güne genişlemesi, yol yapımı ve bakımında kullanılan doğal agregalara yönelik sürdürülebilir talebi yükseltmektedir (Picardo ve ark., 2023; Wilson ve ark., 2023). Agregalar, asfalt karışımlarında yük taşıma kapasitesi, deformasyona karşı direnç ve iç yapısal stabilite sağlamaktadır; dolayısıyla yol üstyapı mühendisliği açısından güvenilir agreganın tedariki büyük önem arz etmektedir (Wilson ve ark., 2023). Ancak taş ocaklarında doğal agrega üretimi, habitat bozulması, toz, gürültü ve peyzaj bozulması gibi artan çevresel direnç ve yüklerle karşı karşıyadır (Wilson ve ark., 2023). Yakındaki kaynaklar tükendikçe, uzak taş ocaklarına bağımlılık nakliye mesafelerini ve buna bağlı emisyonları artırarak, potansiyel olarak genel proje maliyetlerini ve olumsuz çevresel etkileri artırmaktadır (Agioutantis ve ark., 2013; Wilson ve ark., 2023). Mevcut baskılar, çevresel etkisi düşük, dayanıklı asfalt karışımlarını destekleyen alternatif agregaların araştırılmasını teşvik etmektedir (Hoy ve ark., 2024; Wilson ve ark., 2023).

Elektrik Ark Ocağı Cürufu Üretimi ve Bertaraf Sorunları

Çelik sektöründe önemli miktarda yan ürün ortaya çıkmaktadır. Bu yan ürünlerden biri olan çelik cürufu, ham ton çelik başına 120 ila 170 kg aralığındadır (Skaf ve ark., 2017). Elektrik ark ocağı (Electric Arc Furnace, EAF) çelik üretim sürecinin geri dönüşüm odaklı doğasına rağmen, cürufun depolama yoluyla bertarafı, arazi işgali, maliyet, ağır metal sızıntısı ve alkali akışla ilgili endişeler dahil olmak üzere yasal kısıtlamalar nedeniyle çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilir değildir (Teo ve ark., 2020). EAF cürufunun yol yapımında değerlendirilmesi, cürufu atık sahalarından uzaklaştırarak ve yeni agrega talebini azaltarak döngüsel ekonomi hedefleriyle bağdaşmaktadır (Autelitano ve Giuliani, 2021; Teo ve ark., 2020).

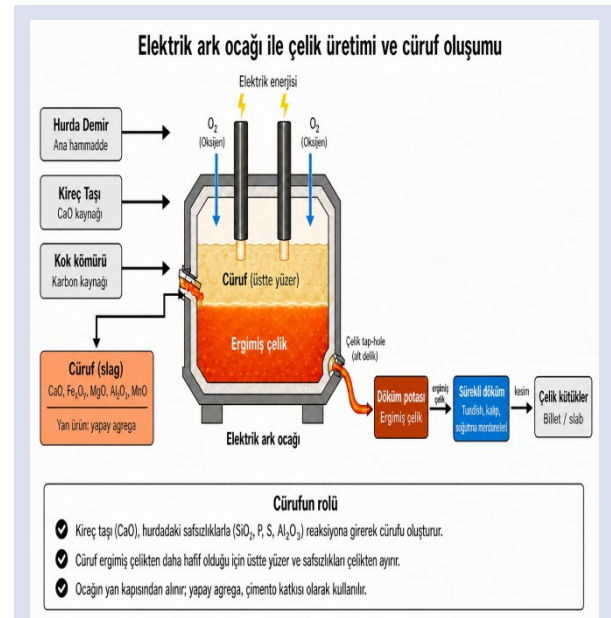
Asfalt karışımlarında cürufun kullanımı potansiyel olarak iki fayda sağlamaktadır: mekanik özelliklerin iyileştirilmesi yoluyla asfalt betonunun performansının artırılması ve cürufun atık sahalarına yönlendirilmesinin ve taş ocağı kullanımının azaltılması yoluyla yaşam döngüsü boyunca çevresel yüklerin azaltılması (Pasetto ve ark., 2023; Kurecki ve ark., 2024).

Çelik Cürufu Türleri ve Oluşum Süreçleri

Çelik üretiminde, hammaddenin tipi ve uygulanan rafinasyon süreci, ortaya çıkan cürufun mineralojik yapısı, fiziksel özellikleri ve mühendislik davranışı üzerinde belirleyicidir. Endüstriyel pratikte üç ana cüruf türü tanımlanmaktadır: bazik oksijen ocağı cürufu (Basic Oxygen Furnace, BOF), elektrik ark ocağı cürufu (Electric Arc Furnace, EAF) ve pota fırını (Ladle Furnace, LF) cürufu (Yıldırım ve Prezzi, 2011; Brand ve Fanijo, 2020; Bulatbekova ve ark., 2024).

BOF cürufu, sıcak metalin (sıvı pik demir) bazik oksijen ocaklarında oksijen üflenerek çeliğe dönüştürülmesi sırasında oluşur. Cevher esaslı bu süreçte, sıcak metalden karbon, silisyum, manganez ve fosfor gibi bileşenler oksitlenerek cürufa geçer. Elde edilen BOF cürufu, yüksek demir oksit (Fe_xO_y) içeriği, yüksek özgül ağırlık ve genellikle EAF cürufundan daha yüksek serbest CaO içeriği ile karakterize edilir; bu durum hacimsel stabilite riskini de yükseltmektedir (Yıldırım ve Prezzi, 2011; Bulatbekova ve ark., 2024).

EAF cürufu, hurda metalin elektrik ark ocaklarında yeniden ergitilmesi sırasında ortaya çıkar. Geri dönüşüm odaklı bu süreçte hurda kompozisyonu ve eklenen akı/refrakter malzemeleri cüruf bileşimini etkilemektedir (Şekil 1). Tipik olarak EAF cürufu; yüksek sertlik, köşeli tane yapısı, pürüzlü yüzey dokusu ve yüksek özgül ağırlık ($\approx 3,2-3,8 \text{ g/cm}^3$) sergilemekte; bu özellikler onu asfalt aşınma tabakalarında potansiyel iri agrega adayı yapmaktadır (Skaf ve ark., 2019; Teo ve ark., 2020; Piemonti ve ark., 2021).



Şekil 1. Elektrik ark ocağı (EAF) ile çelik üretim sürecinin şematik gösterimi ve cüruf oluşumu. Hurda demir, kireç taşı (CaO kaynağı) ve kok kömürü (karbon kaynağı) ocağa şarj edilir; grafit elektrotlar üzerinden sağlanan elektrik enerjisi ve oksijen üfleme ile yüksek sıcaklıkta ertitme gerçekleştirilir. Yoğunluk farkı nedeniyle cüruf, ergimiş çeliğin üzerinde köpüksü bir katman oluşturur ve ocağın üst yan kapisından ayrı bir akış olarak alınır; ergimiş çelik ise alttaki tap-hole'dan döküm potasına aktarılır ve sürekli döküm hattında (tundish, bakır kalıp, soğutma merdaneleri) şekillendirilerek çelik kütükler (billet/slab) elde edilir. Bileşiminde CaO, Fe_xO_y , MgO, Al_2O_3 ve MnO bulunan EAF cürufu, yapay agrega olarak inşaat uygulamalarında veya çimento katkısı olarak değerlendirilmektedir (Yonar ve Tozsın, 2026'dan uyarlanarak hazırlanmıştır).

Pota fırını cürufu (LF) ise BOF veya EAF süreçlerinden alınan sıvı çeliğin pota fırınında ikincil rafinasyonu sırasında oluşur ve genellikle çok daha düşük tane boyu, daha yüksek alümina (Al_2O_3) ve daha düşük Fe_xO_y içeriği ile karakterizedir. LF cürufu çoğu zaman toz hâlinde elde edilir ve hidrolik bağlayıcı özellikler sergileyebildiğinden çimento veya filler olarak değerlendirilebilmektedir (Bulatbekova ve ark., 2024; Terrones-Saeta ve ark., 2020). Söz konusu kaynak farklılıkları, kalite kontrol ve sınıflandırma sistemlerinin önemine işaret etmekte; özellikle aşınma tabakalarındaki uygulamada cüruf türünün açıkça belirtilmesi ve performans temelli sınıflandırma çerçevelerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Kurecki ve ark., 2024).

Bu çalışma, kaynak farklılıkları nedeniyle değişkenliği görece daha iyi dokümanite edilmiş, mühendislik özellikleri kapsamlı biçimde incelenmiş ve aşınma tabakası uygulamalarında en sık değerlendirilen tür olan EAF cürufuna odaklanmaktadır.

Geleneksel Aşınma Tabakalarında Gereksinimler

EAF cürufu üstyapı inşaatında granüler tabakalarda yaygın olarak araştırılmıştır, fakat aşınma tabakaları yapısal direnç ve yüzey işlevselliği arasında sıkı bir denge gerektirmektedir (Autelitano ve Giuliani, 2021; Pasetto ve ark., 2023). Yoğun gradasyonlu aşınma tabakaları, yüksek trafik ve çevresel maruziyet altında istikrarlı bir doku, kayma-sürtünme direnci ve hizmet verilebilirlik sağlarken, kalıcı deformasyona ve nem hasarına karşı dirençli olmalıdır (Pasetto ve Baldo, 2011; Kehagia, 2009).

EAF cürufu, kenetlenme ve kayma-sürtünme direncini artırabilen yüksek sertlik, köşellilik ve pürüzlü doku sunmaktadır (Skaf ve ark., 2017; Skaf ve ark., 2019). Aynı zamanda, daha yüksek özgül ağırlık ve gözeneklilik, hacimsel tasarımı karmaşıktırabilen ve bağlayıcı absorpsiyonunu artırabilmekte, gerekli önlemler alınmazsa etkili bağlayıcı film kalınlığını ve yorulma dayanıklılığını azaltabilmektedir (Skaf ve ark., 2019; Benavides ve ark., 2024). Serbest CaO ve MgO ile ilgili kimyasal endişeler, yüzey düzgünlüğünün ve bütünlüğünün korunması gereken ince kaplamalarda kritik bir risk olan gecikmiş genleşmeye yol açabilmektedir (Teo ve ark., 2020; Kurecki ve ark., 2024).

Dolayısıyla, yoğun gradasyonlu aşınma tabakalarında EAF cürufunun kullanımı, malzeme, tasarım, performans, durabilite, çevre ve sürdürülebilirliği ele alan kanıta dayalı bir sentez gerektirmektedir.

Amaç ve Kapsam

Bu inceleme, geleneksel aşınma tabakalarında EAF cürufunun kullanımına ilişkin kanıtları sentezlemekte ve (i) cürufun fiziksel/kimyasal özellikleri ve stabilitesi, (ii) karışım tasarımı uyarlamaları ve bağlayıcı gereksinimleri, (iii) mekanik performans (kalıcı deformasyon, nem, sertlik, yorulma, düşük sıcaklıkta çatılma), (iv) işlevsel yüzey performansı (kayma-sürtünme, gürültü, parlaklık/görünürlük), (v) çevresel davranış (liç, kapsüllenme) ve (vi) sürdürülebilirlik ve ekonomik etkiler

üzerinde dururken, temel engelleri ve araştırma önceliklerini belirlemektedir (Pasetto ve ark., 2023; Kurecki ve ark., 2024).

Literatürde EAF cürufunun asfalt karışımlarındaki kullanımına yönelik çok sayıda çalışma yer almakla birlikte, mevcut derlemelerin önemli bir kısmı genellikle binder, taban ve aşınma tabakalarını birbirinden ayırt etmeden değerlendirmekte; performans bulgularını yalnızca özetleme düzeyinde sunmakta ve hacimsel tasarım, bağlayıcı film kalınlığı, hacimsel stabilite ve çevresel davranış arasındaki etkileşimleri ele almamaktadır. Bu çalışmanın özgün katkısı, yalnızca yoğun gradasyonlu aşınma tabakalarına odaklanarak EAF cürufunun malzeme özellikleri, karışım tasarımı, mekanik performans, fonksiyonel yüzey davranışı ve çevresel/ekonomik sürdürülebilirlik boyutlarını bütünlük bir çerçevede karşılaştırmalı olarak değerlendirmesidir. Çalışma; ikame oranı, bağlayıcı düzeltilmesi, stabilizasyon süreçleri ve liç davranışına ilişkin literatürdeki tutarsız bulguları neden-sonuç ilişkileri içinde yorumlayarak, aşınma tabakası özelinde performans esaslı tasarım önerileri ve standardizasyon ihtiyaçlarına yönelik kanıt temelli bir sentez sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, salt bir kaynak taraması olmanın ötesine geçerek mevcut literatürdeki bilgi boşluklarını tanımlayan ve gelecekteki araştırma önceliklerini belirleyen değerlendirici bir derleme niteliği taşımaktadır.

Yöntem

Bu çalışma, EAF çelik cürufunun geleneksel yoğun gradasyonlu asfalt aşınma tabakalarında kullanımını değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir literatür incelemesi yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlgili bilimsel yayınlar *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *SpringerLink* ve *Google Scholar* gibi başlıca akademik veri tabanlarında yapılan taramalar yoluyla belirlenmiştir.

Literatür taraması, çelik cürufunun asfalt kaplamalarda kullanımı ile ilişkili anahtar kelimeler temel alınarak yürütülmüştür. Tarama sürecinde kullanılan başlıca anahtar kelimeler şunlardır:

- Electric arc furnace slag (Elektrik ark ocağı cürufu)
- Steel slag asphalt mixture (Çelik cürufu asfalt karışımı)
- Steel slag aggregate (Çelik cürufu agregası)
- Asphalt pavement performance (Asfalt kaplama performansı)
- Skid resistance steel slag (Çelik cürufunda kayma-sürtünme direnci)
- Fatigue performance of slag asphalt mixtures (Cürufu asfalt karışımlarında yorulma performansı)

Gerçekleştirilen ilk tarama sonucunda yol mühendisliği ve asfalt karışımlarında çelik cürufu kullanımına ilişkin geniş bir yayın havuzu elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar incelenerek özellikle

asfalt karışımları ve üstyapı yüzey tabakaları ile doğrudan ilişkili çalışmalar belirlenmiştir.

İlk tarama sonucunda elde edilen çalışmalar, araştırma konusuyla olan ilişkilerine göre değerlendirilmiştir. Literatür incelemesine dahil edilen çalışmalar aşağıdaki kriterler dikkate alınarak seçilmiştir:

- Çalışmanın EAF çelik cürufunu incelemesi
- Cürufun asfalt karışımları veya üstyapı yüzey tabakalarında kullanılması
- Çalışmada mekanik performans, yüzey performansı, çevresel etki veya sürdürülebilirlik değerlendirmelerinin yer alması
- Yayının hakemli dergilerde veya bilimsel konferans bildirilerinde yayımlanmış olması

Buna karşılık, yalnızca çimento esaslı malzemeler veya asfalt uygulamaları ile doğrudan ilişkili olmayan cüruf kullanımını inceleyen çalışmalar değerlendirme dışında bırakılmıştır.

Seçilen çalışmalardan elde edilen bilgiler değerlendirme yapılabilmesi amacıyla belirli tematik başlıklar altında sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda incelenen başlıca konular şunlardır:

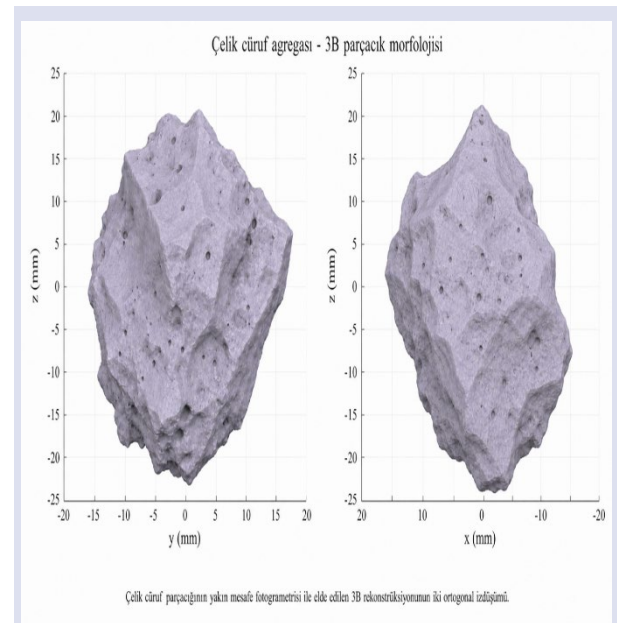
- EAF cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri
- Asfalt karışım tasarımı ve ikame oranları
- Mekanik performans göstergeleri
- Üstyapı yüzey performansı ve fonksiyonel özellikler
- Çevresel davranış ve liç potansiyeli
- Sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü değerlendirmeleri

Toplanan veriler nicel bir meta-analiz yerine karşılaştırmalı nitel analiz yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu yöntem tercihinin temel gerekçesi, incelenen literatürün metodolojik heterojenliğidir. EAF cürufu içeren asfalt karışımları üzerine yapılan çalışmalar; karışım gradasyonu (yoğun, açık, kesikli, poroz), ikame stratejisi (kütle/hacim bazlı; iri/ince fraksiyon), bağlayıcı türü ve modifikasyonu, deney protokolleri (Marshall, Superpave, dinamik sünme, Hamburg tekerlek izi, dört noktalı yorulma, SCB, vb.) ve performans göstergeleri açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Cüruf bileşiminin tesisler arası değişkenliği ve ön işlem koşullarındaki tutarsızlık, ölçüm sonuçlarına ait varyansın bir kısmını malzemeden değil, deney koşullarından kaynaklanır hâle getirmektedir. Bu bağlamda, etki büyüklüğü temelli nicel bir meta-analiz; ortak bir performans göstergesi, harmonize deney koşulları ve standardize edilmiş raporlama formatları gerektirdiğinden, mevcut literatür havuzu için uygun olmayan bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir. Bunun yerine, kuramsal olarak performans tabanlı tasarım çerçevesi (performance-based mix design) temel alınmış; bulgular malzeme özellikleri–karışım tasarımı–mekanik/işlevsel performans–çevresel davranış zinciri içinde, neden–sonuç ilişkilerine dayalı karşılaştırmalı nitel analiz yöntemiyle yorumlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde literatürde rapor edilen bulgular karşılaştırılmış, ortak performans eğilimleri belirlenmiş ve mevcut araştırma boşlukları ortaya konulmuştur.

Aşınma Tabakaları Açısından EAF Cürufu Özellikleri

Fiziksel Özellikler ve Karışım Davranışına Etkileri

EAF cürufu genellikle soğutma ve ardından kırma işlemi sırasında oluşan pürüzlü, veziküler yüzey dokularına sahip yüksek açılı tanelerden oluşmaktadır (Şekil 2) (Skaf ve ark., 2019; Teo ve ark., 2020). EAF cürufunun düşük yassılık indeksi değerleri (%1-6), yoğun gradasyonlu iskeletler içinde tanelerin birbirine kenetlenmesini ve kesme direncini artıran kübik yapıyı desteklemektedir (Skaf ve ark., 2019; Piemonti ve ark., 2021). Tanelerdeki 0,01–10 µm mertebesindeki mikrogözeneklerin güçlü agrega-bağlayıcı etkileşimine katkıda bulunduğu; buna karşılık bağlayıcı absorpsiyonunu da yükselttiği bildirilmiştir (Teo ve ark., 2020).



Şekil 2. Çelik cüruf agregasının tipik 3B parçacık morfolojisinin temsili gösterimi: aynı parçacığın iki ortogonal izdüşümü (sol: y-z düzlemi; sağ: x-z düzlemi). Yüzeydeki gözenekli yapı, köşeli kenarlar ve düzensiz morfoloji elektrik ark ocağı (EAF) cürufunun karakteristik özellikleridir. Görsel, Paixão ve Fortunato (2021) tarafından yakın mesafe fotogrametri yöntemiyle elde edilen orijinal şekilden esinlenerek bilgilendirme amaçlı hazırlanmıştır.

EAF cürufunun belirleyici bir özelliği olan zahiri yoğunluk değerleri, genellikle 2,8–3,9 g/cm³ aralığındadır ve sıklıkla 3,2–3,8 g/cm³ civarında kümelenmektedir (Skaf ve ark., 2019; Piemonti ve ark., 2021; Teo ve ark., 2020). Yüksek yoğunluk, stabiliteyi ve kalıcı deformasyon direncini artırabilmektedir. Ancak karışımın tasarım özelliklerinin korunabilmesi açısından ikame için hacimsel yaklaşımların dikkate alınması gerekebilmektedir (Skaf ve ark., 2019).

Gözeneklilik ve absorpsiyon dayanıklılığı ve bağlayıcı ihtiyacını etkilemektedir. Toplam gözeneklilik genellikle %7-14 arasında değişirken, su emilimi genellikle %0,5-4 arasında değişmektedir, fakat daha ince veya daha taze fraksiyonlarda daha yüksek değerler de gözlemlenebilmektedir (Piemonti ve ark., 2021; Teo ve ark., 2020). Artan absorpsiyon, etkili bağlayıcı içeriğini azaltmakta ve gerekli önlemler alınmazsa bağlayıcı film kalınlığı incelebilmektedir. Düşük etkili bağlayıcı içeriği ve ince film kalınlığı, yüzey katmanlarında sökülme ve çatlama riskini artırmaktadır (Pasetto ve ark., 2023; Benavides ve ark., 2024).

EAF cürufu genellikle mukavim tanelerden oluşmaktadır. Los Angeles aşınma değerleri genellikle %14 ile %24 arasında değişmektedir. Mohs sertliği 6-7 civarında olup, yoğun trafikli yüzeyler için uygun sürdürülebilir kayma-sürtünme direncini desteklemektedir (Skaf ve ark., 2019; Piemonti ve ark., 2021; Teo ve ark., 2020). Bu özellikler, yüzey dokusunun ve cilalama direncinin uzun süre korunması gerekliliği olan aşınma tabakalarındaki kayma-sürtünme direncini desteklemektedir (Kehagia, 2009; Liapis ve Likoydis, 2012).

EAF cürufunun fiziksel özelliklerine ilişkin literatürden elde edilen veriler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. EAF Cürufunun Fiziksel Özellikleri

Özellik	Tipik Aralık	Olası Sonuçlar	Referanslar
Yoğunluk	2,8–3,9 g/cm ³	Yüksek karışım yoğunluğu, gelişmiş kalıcı deformasyon direnci, hacimsel tasarım zorunluluğu.	Skaf ve ark., 2019; Piemonti ve ark., 2021; Teo ve ark., 2020
Su Absorpsiyonu	0,5–4%	Artan bağlayıcı oranı, düzeltme yapılmadığı takdirde düşen film kalınlığı.	Teo ve ark., 2020; Benavides ve ark., 2024
Toplam Porozite	7–14%	Adezyonda ve absorpsiyonda artış.	Piemonti ve ark., 2021
Los Angeles Aşınma	14–24%	Trafik etkisi altında aşınmaya direnç.	Skaf ve ark., 2019
Mohs Sertliği	6–7	Yüksek cilalanma direnci.	Teo ve ark., 2020
Yassılık İndeksi	1–6%	Kübik taneler ile yüksek kenetlenme.	Skaf ve ark., 2019

Kimyasal Bileşim ve Mikroyapı

EAF cürufu bileşimi, ocak koşullarına, hurda girdilerine, aklara ve refrakter aşınmasına bağlıdır. Değişken bileşim, standardizasyonu zorlaştırmakta kaynaklar arası değişkenlik yaratmaktadır (Teo ve ark., 2020; Menad ve ark., 2021). Tipik ana oksit aralıkları arasında CaO (ağırlıkça %20-60), toplam FeOx (ağırlıkça

%10-40), SiO₂ (ağırlıkça %6-34) ve önemli miktarda MgO ve Al₂O₃ fraksiyonları (ağırlıkça %3-15) bulunmaktadır (Yıldırım ve Prezzi, 2011; Teo ve ark., 2020; Kurecki ve ark., 2024). Krom ve vanadyum gibi ağır metaller düşük konsantrasyonlarda bulunmakla birlikte ağır metallerin düşük konsantrasyonları dahi çevre açısından önem arz etmektedir (Teo ve ark., 2020; Menad ve ark., 2021).

X-ışını floresans spektrometresi (XRF), X-ışını kırınım yöntemi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak mineralojik ve mikroyapısal karakterizasyon, kararlı silikat/spinel fazları reaktif serbest oksitlerden ayırt etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Teo ve ark., 2020; Brand ve Fanijo, 2020). Krom immobilizasyonu genellikle stabil spinel tipi fazlarla ilişkilendirilirken, diğer fazlar bileşim ve soğuma geçmişine bağlı olarak vanadyum davranışını etkileyebilmektedir (Mombelli ve ark., 2016a; Kurecki ve ark., 2024). Mineralojik ve mikroyapısal değişkenlik, EAF cürufunun aşınma tabakasında kullanımı durumunda kalite kontrol ve sınıflandırma çerçevelerine olan ihtiyaca dikkat çekmektedir (Kurecki ve ark., 2024; Teo ve ark., 2020).

Hacimsel Stabilité ve Genleşme Riski

Hacimsel stabilite, aşınma tabakaları için ek bir öneme sahiptir. Küçük genleşmeler yüzeyde çatlaklara neden olmakta, yüzey düzgünlüğünün bozulmasına ve sürüş kalitesinin düşmesine neden olabilmektedir (Pasetto ve ark., 2023; Kurecki ve ark., 2024). Genleşme, esas olarak serbest CaO'nun Ca(OH)₂'ye hidratasyonu ve MgO'nun (periklaz) Mg(OH)₂'ye hidratasyonundan kaynaklanmaktadır; her ikisi de hacimsel değişimlerle sonuçlanmakta ve MgO'ya bağlı genleşme aylar ve hatta yıllar sürebilmektedir (Yıldırım ve Prezzi, 2011; Kurecki ve ark., 2024). Kontrollü yaşlandırma koşulları altında Ca(OH)₂'nin CaCO₃'e karbonatlaşması, hacimsel stabiliteyi büyük ölçüde destekleyebilmektedir (Santamaría ve ark., 2018).

Kullanım öncesinde EAF cürufunun yaklaşık 2-3 ay açık hava koşullarında bekletilmesinin (yaşlandırma), hidratasyon ve karbonatlaşmanın meydana gelmesi nedeniyle genleşmeyi kabul edilebilir sınırlara (<%1) düşürdüğü bildirilmiştir (Arribas ve ark., 2015; Santamaría ve ark., 2018). Fakat yaşlandırma sonrasında tekrar kırma işlemi, açığa çıkan yüzeylerin genleşme potansiyelini yeniden aktive edebileceği için önerilmemektedir (Santamaría ve ark., 2018). Su veya buharla yaşlandırma gibi hızlandırılmış teknikler, tespit edilebilir serbest oksitleri azaltarak stabilizasyon süresini kısaltabilmektedir (Liu ve ark., 2024). Seyreltilmiş asit çözeltilerinin kullanımı gibi kimyasal işlemlerin de genleşme kontrolü ve ağır metal sızıntısını azaltma konusunda etkinlik gösterdiği belirtilmektedir (Sukmak ve ark., 2023; Testini ve ark., 2025).

Aşınma tabakalarının hassasiyeti göz önüne alındığında, aşınma tabakalarına özgü stabilizasyon protokolleri ve genleşme eşikleri, önemli bir standardizasyon ihtiyacı olmaya devam etmektedir (Pasetto ve ark., 2023; Kurecki ve ark., 2024).

EAF cürufunun kimyasal özelliklerine ve genişleme potansiyeline ilişkin literatürden elde edilen veriler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Kimyasal Bileşim ve Hacimsel Stabilité Özellikleri

Parametre	Tipik Aralık	Risk	Onleme Stratejisi	Referanslar
CaO	%20–60 (ağırlıkça)	Serbest kireç hidratasyon genişlemesi	2-3 aylık yaşlandırma	Yıldırım ve Prezzi, 2011; Santamaría ve ark., 2018
MgO	%3–15 (ağırlıkça)	Gecikmeli genişleme (periklaz)	Yaşlandırma, sulama	Yıldırım ve Prezzi, 2011; Liu ve ark., 2024
Fe ₂ O ₃	%10–40 (ağırlıkça)	Yüksek yoğunluk, koyu renk	Hacimsel düzeltme	Teo ve ark., 2020
Ham Cüruf Sızıntı Suyu pH’ı	10–12,5	Alkalin yüzey akışı riski	Bitüm kapsüllemesi	Teo ve ark., 2020; Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024
Krom ve Vanadyum	Eser miktarda	Çevresel sorun	Stabilizasyon + Kapsülleme	Mombelli ve ark., 2016a; Salas ve ark., 2025
Kabul Edilebilir Genişleme	<%1	Kabul edilebilir değerlerin üzerinde çatlama olasılığı	Standartlaştırılmış kontrol protokolleri	Kurecki ve ark., 2024

Bu bölümde derlenen bulgular birlikte değerlendirildiğinde, EAF cürufunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin aşınma tabakası performansı üzerinde birbirini destekleyen ancak çoğu zaman karşılıklı bir denge gerektiren etkiler oluşturduğu görülmektedir. Yüksek yoğunluk, düşük yassılık indeksi ve düşük Los Angeles aşınma değerleri kalıcı deformasyon ile kayma-sürtünme performansı bakımından net bir avantaj sağlarken; yüksek absorpsiyon kapasitesi ve serbest CaO ile MgO kaynaklı genişleme eğilimi karşı yönde önemli tasarım riskleri ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, literatürde olumlu olarak bildirilen mekanik bulguların yalnızca uygun yaşlandırma süresi ve hacimsel düzeltme protokollerinin birlikte uygulandığı çalışmalarda tutarlı biçimde elde edilebildiği gerçeğiyle örtüşmektedir. Dolayısıyla EAF cürufunun fiziksel-kimyasal karakterizasyonu, ön işlem ve karışım tasarımı kararlarından bağımsız değil, bunlarla birlikte yorumlanması gereken bir bütün olarak ele alınmalıdır.

Yoğun Gradasyonlu Aşınma Tabakalarında Karışım Tasarımı

İkame Stratejileri

EAF cürufunun yüksek yoğunluğu, kütle bazlı ikameyi güvenilir hale getirebilmekte ve genellikle hava boşluklarında (V_a) ve agregalar arası boşlukta (VMA)’da dengesizliğe yol açabilmektedir (Skaf ve ark., 2019; Pasetto

ve ark., 2023). Bu nedenle, her bir tane fraksiyonu için ayrı ayrı özgül ağırlık ölçümü ile hacimsel bazlı ikame önerilmektedir (Skaf ve ark., 2019).

Araştırmalar, kaba fraksiyonun ikame edilmesinin etkili strateji olduğunu göstermektedir. Kaba agrega miktarının %25 ile %75 arasında ikame edilmesi, genellikle kenetlenmeyi güçlendirmekte ve cıllanma direncini artırmakta, stabilizeyi, kalıcı deformasyon direncini ve kayma-sürtünme performansını iyileştirmektedir (Skaf ve ark., 2017; Pasetto ve Baldo, 2011; Autelitano ve Giuliani, 2021). Rijitlik artışı ve kırılma riski arasında pratik bir denge olarak %25-50 civarında bir optimum ikame oranı birçok çalışmada önerilmektedir (Autelitano ve Giuliani, 2021; Skaf ve ark., 2019). Bağlayıcı miktarının düzeltilmesi ve kompaksiyon kontrolü şartlarıyla daha yüksek kaba malzeme ikamesi (75% veya hatta 100%’e kadar) mümkün olmakla birlikte, artan rijitlik kırılma riskini de artırmaktadır (Gowda ve Naveen, 2023; Pasetto ve ark., 2023).

%50’nin üzerindeki ince fraksiyon ikamesi, tutarsız sonuçlar üretme eğilimindedir ve genellikle hava boşluklarını ve rijitliği artırırken yorulma performansını düşürmektedir. Dolayısıyla EAF cürufunun ince agrega veya filler olarak kullanımı genellikle özenli bir değerlendirme gerektirmektedir (Skaf ve ark., 2019; Saha ve ark., 2018).

Adezyon Mekanizmaları

Güçlü bağlayıcı etkileşimi sıklıkla cüruf alkalinitesi ve yüksek yüzey enerjisine atfedilmektedir; yüzey serbest enerjisi (Surface Free Energy, SFE) çalışmaları, bazı doğal agregalara kıyasla cüruf-bitüm sistemlerinde adezyonun daha güçlü olduğunu göstermektedir (Skaf ve ark., 2017; Qazizadeh ve ark., 2018). Yüksek adezyon, agrega-bağlayıcı bağının iyileşmesi yoluyla hem çatlak büyümesini yavaşlatabilmekte hem de tekrarlı yükleme altında nem direncini destekleyebilmektedir (Kavussi ve Qazizadeh, 2014; Qazizadeh ve ark., 2018).

Cürufun gözenekli morfolojisi bağlayıcıyı absorbe etmekte; bağlayıcı miktarının veya absorpsiyonun düzeltilmemesi durumunda etkili bağlayıcı miktarı ile film kalınlığı azalmakta ve film kalınlığına bağlı yorulma davranışı doğrudan etkilenmektedir (Mikhailenko ve ark., 2023; Benavides ve ark., 2024). Bağlayıcı seçimi ve modifikasyonu da adezyon ile sertlik dengesini önemli ölçüde belirlemektedir. Organik mum esaslı katkıları (sasobit), kimyasal ılık karışım katkıları (Evotherm, Cecabase RT vb.), zeolit esaslı köpürtücüler (Aspha-min, Advera), polimer modifiyeleri (özellikle stiren-bütadien-stiren (SBS) ve etilen vinil asetat (EVA)) ile atık lastik esaslı kauçuk modifiyeleri (Crumb Rubber Modifier, CRM), cüruf içeren karışımlarda sıcaklık duyarlılığını, kırılma davranışını ve yorulma direncini iyileştirebilmektedir (Motevalizadeh ve ark., 2020; Kumar ve ark., 2023; Pasetto ve ark., 2017; Pasetto ve Baldo, 2012). Söz konusu katkıları; karışımın işlenebilirlik aralığını genişleterek cürufun yüksek özgül ağırlığı ve yüksek absorpsiyon kapasitesinden kaynaklanan tasarım zorluklarını yumuşatabilmekte, ayrıca düşük sıcaklıklarda kırılma azaltarak kalıcı deformasyon direnci ile yorulma-kırılma davranışı arasındaki dengenin sağlanmasına katkı sunmaktadır. Nem davranışına ilişkin nicel sonuçlar (TSR, ITS oranları, ikame oranı etkileri) 5.2 bölümünde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

Optimum Bağlayıcı İçeriği ve Film Kalınlığı

Kaba fraksiyonlu cürufun özellikle orta ila yüksek oranda kullanılması, absorpsiyon ve yüzey pürüzlülüğünü etkilemekte ve bu sebeple kullanılan optimum bağlayıcı içeriğini %0,3 ila %0,7 oranında artırmaktadır (Pasetto ve ark., 2023; Ziaee ve Behnia, 2020). Yorulma ömrü odaklı çalışmalar, film kalınlığının önemini vurgulamaktadır. Yüksek cüruf içeriği, bağlayıcı film kalınlığını değiştirmekte ve yüksek gerilim altında yorgunluk ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Bağlayıcı oranının gerekli miktarda artırılarak film kalınlığının optimize edilmesi ile yorulma ömrünün yaklaşık %20 ila %22 oranında arttığı gözlemlenmiştir (Benavides ve ark., 2024). Cürufun sadece filler olarak kullanıldığı mikro yüzey kaplama (microsurfacing) karışımlarında da benzer bağlayıcı artışları bildirilmiştir (Keymanesh ve ark., 2021).

Dolayısıyla geleneksel aşınma tabakalarında cürufun kullanımını durumunda karışım tasarımının hacimsel kontroller ile absorpsiyon düzeltmesi dikkate alınarak ve kalıcı deformasyon-yorulma dengesi gözetilerek gerçekleştirilmesi önerilmektedir (Pasetto ve ark., 2023; Shiha ve ark., 2020). Tablo 3'te literatürde önerilen cüruf ikame oranları sunulmuştur.

Tablo 3. Önerilen Cüruf İkame Oranları

İkame Stratejisi	Aralık	Gözlemlenen Performans	Referanslar
İri Agregat İkamesi	%25-50 (optimum)	Kalıcı deformasyon ve yorulma arasında denge	Autelitano ve Giuliani, 2021; Skaf ve ark., 2017
İri Agregat İkamesi	%50-75	Maksimum kalıcı deformasyon direnci	Ziaee ve Behnia, 2020; Pattanaik ve ark., 2018
İri Agregat İkamesi	100%	Yüksek sertlik	Lee ve ark., 2022
İnce Agregat İkamesi	<%50 (önerilen)	Değişken yorulma performansı	Skaf ve ark., 2019; Saha ve ark., 2018
Bağlayıcı Oranının Arttırılması	+%0,3–0,7	Film kalınlığının korunması	Pasetto ve ark., 2023; Ziaee ve Behnia, 2020

Bu bölümde incelenen çalışmalar, ikame stratejisi, bağlayıcı düzeltmesi ve adezyon mekanizmalarının birbirinden bağımsız değil, birlikte yorumlanması gereken parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Kaba fraksiyonda %25–50 düzeyindeki ikamenin literatürde tutarlı biçimde optimum aralık olarak öne çıkması, kalıcı deformasyon kazanımı ile yorulma performansının korunması arasındaki dengenin bu eşikte sağlanmasıyla açıklanabilmektedir. %50'nin üzerine çıktığında bildirilen tutarsız sonuçlar; cürufun gözenekli yapısının bağlayıcı absorpsiyonunu artırarak efektif film kalınlığını düşürmesi ve sistem rijitliğini aşırı seviyelere yükseltmesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu doğrultuda farklı çalışmaların ortak çıkarımı, hacimsel temelli ikame, bağlayıcı oranının yaklaşık +%0,3–0,7 düzeyinde düzeltilmesi ve modifiye bağlayıcı tercihinin

entegre biçimde ele alındığı performans esaslı bir tasarım yaklaşımının zorunlu olduğudur.

Mekanik Performans

Kalıcı Deformasyon Direnci

Kalıcı deformasyon (tekerlek izinde oturma), özellikle yüksek sıcaklıklarda, bağlayıcının yumuşaması kesme direncini azalttığında, tekrarlanan yükleme altında biriken plastik gerilme nedeniyle meydana gelmektedir (Pasetto ve Baldo, 2011; Joumbat ve ark., 2023). EAF cürufu, yüksek sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra, içsel sürtünmeyi ve agrega kilitlenmesini artıran yüksek açısallık ve pürüzlü dokusu sayesinde kalıcı deformasyon direncini artırmaktadır (Skaf ve ark., 2019; Pasetto ve Baldo, 2011).

Nicel olarak ölçülen iyileşmeler önemli düzeydedir. Cüruf içeren yoğun gradasyonlu asfalt karışımları, ~%44'e varan sünme modülü artışları ve daha düşük deformasyon oranları göstermiştir (Pasetto ve Baldo, 2010, 2011). İlk asfalt karışım çalışmalarında, kaba agrega %25-75 oranında cüruf ile ikame edildiğinde, kalıcı deformasyon direncinde %343'e varan iyileşmeler bildirilmiştir (Ziaee ve Behnia, 2020). Açık gradasyonlu yüzey karışımlarında, Hamburg tekerlek izi ve sünme testlerinde %50-75 kaba cüruf ikamesi ile optimum kalıcı deformasyon performansı gözlemlenmiştir (Pattanaik ve ark., 2018). Cürufun %100 oranında ikame edilmesi durumunda da kalıcı deformasyonda performans artışı gözlemlenmiştir, ancak açısallık ve yoğunluk nedeniyle kompaksiyon ve işleme ek dikkat gerektirmektedir (Lee ve ark., 2022; Skaf ve ark., 2019). EAF cürufunun kullanıldığı bitümlü harç kaplama sistemlerinde de kalıcı deformasyon direncinde %72,8 oranında iyileşme bildirilmiştir (Rachman ve Yang, 2023).

Dinamik sünme deneyleri, EAF cürufu karışımların kalıcı deformasyon ve tekerlek izi performansının değerlendirilmesinde merkezi bir gösterge konumundadır. İri agregada %75'e varan cüruf ikamesi içeren ılık ve sıcak karışımlarda dinamik sünme performansında belirgin kazanımlar bildirilmiş; sünme direncinde kireçtaşı esaslı karışımlara kıyasla yaklaşık %343'e ulaşan iyileşmeler rapor edilmiştir; bu kazanım çekme dayanımındaki artıştan çok daha yüksek düzeydedir (Ziaee ve Behnia, 2020). Yoğun gradasyonlu sıcak karışımlarda %80 EAF cürufu ile %20 bakır maden atığı kombinasyonu test edilen karışımlar arasında en yüksek dinamik sünme modülünü vermiş; ayrıca yaşlandırma süreciyle birlikte dinamik sünme modülünün daha da yükseldiği bildirilmiştir (Oluwasola ve ark., 2015a, 2015b). Yüksek sıcaklıklarda (örneğin 40 °C) yapılan dinamik sünme deneyleri, EAF cürufu karışımların tekrarlı yükleme altında daha yüksek sertlik ve daha düşük birikimli birim deformasyon değerleri verdiğini ortaya koymaktadır (Alsheyab ve Khedaywi, 2017; Fakhri ve Ahmadi, 2017). Bağlayıcı seçimi ve modifikasyonu da kritik rol oynamaktadır; ılık karışım katkısı olarak Sasobit kullanımı ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) ile birlikte EAF cürufunun

değerlendirilmesi, dinamik sünme deneylerinde sertliği ve göçme döngü sayısını artırmaktadır (Ziaee ve Behnia, 2020; Fakhri ve Ahmadi, 2017). Sürtünme tabakası karışımlarına yönelik açık gradasyonlu (Open-Graded Friction Course, OGFC) tasarımlarda da %75 oranına kadar iri EAF cürufu kullanımı, dinamik sünme ve Hamburg tekerlek izi deneylerinde kontrol numunelerine kıyasla üstün tekerlek izi direnci sağlamıştır (Pattanaik ve ark., 2018, 2021).

Nem Hassasiyeti

Soyulma, sökölme ve hızlanmış çatlak oluşumuna neden olan nem hasarı genellikle ITS ve TSR deneyleri ile değerlendirilmektedir (Pasetto ve Baldo, 2011). Cüruf karışımları, güçlü adezyon, alkali yüzey kimyası ve gelişmiş kenetlenme özelliği sayesinde genellikle daha iyi nem direnci göstermektedir (Skaf ve ark., 2017; Pasetto ve Baldo, 2011).

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, cüruf karışımlarının tipik TSR gereksinimlerini karşılayabildiği ve doğal agrega kontrol numunelerine kıyasla kuru ve ıslak koşullarda daha yüksek ITS değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir (Pasetto ve Baldo, 2011). İkame oranı nem hasarı bağlamında da önem taşımaktadır. Gowda ve Naveen (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yaklaşık %30 cüruf ikame oranı optimum TSR ile ilişkilendirilmişken, hacimsel stabilite ve bağlayıcı film kalınlığı düzgün bir şekilde yönetilmezse daha yüksek seviyelerin (örneğin %50) performansı düşürebileceği belirtilmiştir (Gowda ve Naveen, 2023). Mikhailenko ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan çalışmada ise hacimce yaklaşık %13 cüruf içeren kesikli gradasyonlu asfalt karışımlarının, kumtaşı kontrol karışımları ile benzer nem hassasiyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir (Mikhailenko ve ark., 2023). Çelik cürufuyla üretilen poroz asfalt sistemlerinde kontrol numunelerine benzer nem duyarlılığı sağlanmıştır, ancak yüksek boşluk oranı, bağlayıcı oranında düzeltme yapılmazsa parçalanma riskini artırabilmektedir (Skaf ve ark., 2019). Kumar ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan ılık karışım çalışmalarında, Sasobit gibi katkı maddelerinin nem hasarı direncinin daha da artırılabilceği belirlenmiştir (Kumar ve ark., 2023).

Sertlik ve Yorulma Performansı

Cüruf karışımlarında sertlik artışları yaygın olarak rapor edilmektedir; özellikle cüruf kaba fraksiyonlarda kullanıldığında, iç kaymanın azalması ve modülün artmasıyla kalıcı deformasyon direnci artmaktadır (Shiha ve ark., 2020; Skaf ve ark., 2019). Orta düzeyde cüruf seviyeleri, hacimce %13 cüruf içeren kesikli gradasyonlu karışımlarda gözlemlendiği gibi, belirli karışım türlerinde kontrol numunelerine benzer sertliği koruyabilmektedir (Mikhailenko ve ark., 2023).

Yorulma performansı cüruf içeriğine, gerilme seviyesine, gradasyona, bağlayıcı tipine ve efektif bağlayıcı film kalınlığına bağlıdır (Kavussi ve Qazizadeh, 2014; Pasetto ve ark., 2017). Adezyonda elde edilen avantajlar, çatlak başlangıcı direncini artırabilirken, aşırı

sertlik ve düşük film kalınlığı yüksek gerilme altında yorulma ömrünü azaltabilmektedir (Benavides ve ark., 2024). Kanıtlar, film kalınlığını geri kazandıran bağlayıcı düzeltmesinin yorulma performansını iyileştirebileceğini ve yorulma ömründe %22'lik bir iyileşme sağlayabileceğini göstermektedir (Benavides ve ark., 2024). Yaşlanma doğrultusunda yapılan çalışmalar da cüruf karışımlarının, daha güçlü bağlanma özellikleri sayesinde geleneksel karışımlara göre yorulmaya direncini daha etkili bir şekilde koruyabileceğini göstermiştir (Kavussi ve Qazizadeh, 2014).

Dolayısıyla, yorulma performansı, sadece cüruf içeriği yerine sertlik-film kalınlığı-gerilme çerçevesi ile en iyi şekilde yorumlanabilmektedir (Pasetto ve ark., 2023; Benavides ve ark., 2024).

Termal Çatlak Davranışı

Termal çatlama, kısıtlanmış ısıl büzülmenin düşük sıcaklıklarda kırılma direncini aşan çekme gerilmeleri oluşturması sonucunda meydana gelmektedir (Pasetto ve ark., 2023; Skaf ve ark., 2017). Cüruf, sertliği artırma eğilimindedir. Ayrıca bağlayıcı oranı ve film kalınlığı optimize edilmezse kırılma direnci artırılabilmektedir (Motevalizadeh ve ark., 2020; Benavides ve ark., 2025). ılık asfalt karışımlarında yapılan kırılma temelli çalışmalarda, kaba cüruf içeriği %75'e kadar arttırıldığında, malzemenin çekme etkisiyle açılmaya çalışan bir çatlak karşı dayanma kapasitesi olarak tanımlanan Mod I kırılma tokluğunda %35'e kadar ve kırılma enerjisinde %16'ya kadar iyileşmeler olduğu bildirilmiştir. Dolayısıyla optimize edilmiş tasarımın düşük sıcaklıkta kırılma direncinin artabileceği belirlenmiştir (Tamizi ve ark., 2024). Ek olarak, Sasobit modifikasyonunun düşük sıcaklıklarda kırılma eğilimini azalttığı ve yarım daire eğilme testi (Semi-Circular Bending, SCB) tabanlı değerlendirmelerde çatlama direncini artırdığı gözlemlenmiştir (Motevalizadeh ve ark., 2020).

Çok ölçekli eğilme analizleri, cürufli karışımlarda daha yüksek kopma birim şekil değiştirmesi ile karakterize edilen yarı gevrek davranış rapor etmiştir; söz konusu bulgu, güçlü adezyon ve geniş bir kırılma süreci bölgesinin varlığı ile ilişkilendirilmiştir (Bai ve ark., 2024). Geçirgen asfalt karışımlarında lif takviyesi, düşük sıcaklıklarda maksimum çekme deformasyonu ve gerilme taşıma kapasitesi açısından yaklaşık %50 cüruf ve %0,45 lif içeriğinin optimum düzey olduğunu ortaya koymuştur (Zhang ve ark., 2022). Tamamen EAF çelik cüruflarından imal edilen poroz asfalt karışımları, yüksek boşluk oranına karşın yeterli durabilite performansı ortaya koymuş ve referans karışımlara göre termal çatlak oluşumuna daha az eğilim göstermiştir (Skaf ve ark., 2019).

Literatürde bazı çalışmalar, daha karmaşık bir davranışa dikkat çekmektedir: sistem rijitliğinin aşırı yükselmesi durumunda çatlak oluşumuna karşı başlangıç direnci artabilmekte; ancak kırılmanın tetiklenmesini takiben çatlak ilerleme hızı ivmelenmektedir (Benavides ve ark., 2025).

Dolayısıyla, özellikle düşük sıcaklık koşullarında kullanılacak karışımlar için bağlayıcı özelliklerinin titizlikle optimize edilmesi ve performansın kırılma mekaniği esaslı yöntemlerle doğrulanması kritik önem taşımaktadır (Pasetto ve ark., 2023; Benavides ve ark., 2025). Tablo 4'te EAF cürufunun doğal agrega yerine ikame edilmesi durumunda elde edilen mekanik performans artışları sunulmuştur. Tablo 5'te ise EAF cürufu içeren karışımların nem hasarına karşı performans sonuçları sunulmuştur.

Tablo 4. Mekanik Performans Artışı

Performans Göstergesi	Artış Oranı	Deney Metodu	Referanslar
Kalıcı Deformasyon Direnci (Ilık Asfalt) Sünme Modülü	+%343'e kadar +%44	Dinamik Sünme Statik Sünme	Ziaee ve Behnia, 2020 Pasetto ve Baldo, 2010; 2011
Kalıcı Deformasyon Direnci (Harç Tipi Yüzey Kaplama)	+%72,8	Tekerlek İzinde Oturma	Rachman ve Yang, 2023
Yorulma Ömrü (düzeltilmiş bağlayıcı oranında)	+%22	Dört Noktalı Yorulma Deneyi	Benavides ve ark., 2024
Kırılma Tokluğu	+%35	Yarım Daire Eğilme Deneyi	Tamizi ve ark., 2024
Kırılma Enerjisi	+%16	Üç Noktalı Eğilme Deneyi	Tamizi ve ark., 2024

Tablo 5. Nem hasarına karşı performans

Gösterge	Gözlemlenen Eğilim	İkame Etkisi	Referanslar
TSR	Teknik şartname gerekliliklerini sağlamakta veya üzerinde performans göstermektedir.	Optimum %30	Pasetto ve Baldo, 2011; Gowda ve Naveen, 2023
ITS (kuru/yaş)	Kontrol numunesine kıyasla çoğu zaman daha yüksektir.	Yüksek Adezyon	Skaf ve ark., 2017

Yenilikçi Deney Yaklaşımları ve Mekanistik–Ampirik Modelleme

EAF cürufu içeren asfalt karışımlarına ilişkin literatür, geleneksel Marshall esaslı tasarımın ötesine geçen geniş bir deney yelpazesi içermektedir. Bu yelpaze; mekanik dayanım, kalıcı deformasyon, yorulma–kırılma davranışı, çevresel davranış ve performans odaklı modelleme yaklaşımlarını kapsamaktadır.

Standart mekanik testler arasında Marshall stabilitesi, dolaylı çekme dayanımı (ITS), dirençli modül (Mr) ve nem hassasiyeti deneyleri, EAF cürufu karışımların doğal agregalı kontrol numuneleriyle karşılaştırılmasında yaygın biçimde kullanılmaktadır

(Pasetto ve Baldo, 2010, 2011; Gowda ve Naveen, 2023; Oluwasola ve ark., 2015a; Ameri ve ark., 2013; Mikhailenko ve ark., 2023; Sorlini ve ark., 2012; Falchetto ve Moon, 2015). Kalıcı deformasyon ve tekerlek izi açısından dinamik sünme, tekrarlı yükleme altında kademeli sünme (IRLPD), Hamburg tekerlek izi, yüklü tekerlek ve döngüsel basınç deneyleri öne çıkmaktadır (Pasetto ve Baldo, 2010, 2011; Gowda ve Naveen, 2023; Rachman ve Yang, 2023; Pattanaik ve ark., 2018, 2021; Oluwasola ve ark., 2016; Ziaee ve Behnia, 2020).

Yorulma ve kırılma davranışına yönelik daha gelişkin deney yaklaşımları arasında, düşük sıcaklıklarda lineer ve elasto-plastik kırılma mekaniği temelli yarım daire eğilme (Semi-Circular Bending, SCB) ile kırılma süreci bölgesinin (Fracture Process Zone, FPZ) belirlenmesi (Motevalizadeh ve ark., 2020), dört noktalı eğilme yorulma deneyi ve gerinim taraması (EBADE) ile yorulma ömrünün cüruf içeriği ve bağlayıcı film kalınlığına bağlanması (Benavides ve ark., 2024) ve kesikli gradasyonlu (semi-dense) karışımlarda döngüsel dolaylı çekme yorulması (Mikhailenko ve ark., 2023) yer almaktadır. Lee ve arkadaşlarının (2022) %100 EAF/BOF cürufu karışımlar üzerine yürüttüğü çalışmada Viskoelastik Sürekli Hasar (Viscoelastic Continuum Damage, VECD/LVECD) ve üç boyutlu sonlu eleman analizleri kullanılarak laboratuvar modülü ve yorulma verileri kaplama ölçeğine taşınmıştır.

Çevresel ve dayanım odaklı testler içerisinde, dinamik yüzey liçi deneyleri (Dynamic Surface Leaching Test, DSLT) ve denge liçi deneyleri, EAF cürufu asfalt sistemlerinden eser metal salınımının nicel olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu deneyler, ham cürufa kıyasla bitüm matrisinde kapsüllenene cürufun salınım değerlerinin düzenleyici eşiklerin oldukça altında kaldığını ortaya koymaktadır (Salas ve ark., 2025; Sorlini ve ark., 2012). Mekanik testleri yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA) ile birleştiren çalışmalar; karbon ayak izi ve eko-puanlardaki kazanımları ortaya koyarken, artan bağlayıcı ihtiyacının net çevresel iyileşmeyi kısmen sınırlayabildiğini de göstermektedir (Rachman ve Yang, 2023; Plati ve ark., 2024; Mikhailenko ve ark., 2023). Uzun dönemli davranış için yaşlandırma, soğuk aşınma, donma–çözülme ve nem hassasiyeti deneyleri; özellikle gözenekli ve cüruf oranı yüksek karışımlarda termal çatlama duyarlılığı ile sökülme/soyulma riskinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Salas ve ark., 2025; Skaf ve ark., 2019; Pattanaik ve ark., 2018; Terrones-Saeta ve ark., 2020; Mikhailenko ve ark., 2023).

Yapısal ölçekteki davranışın öngörülmesinde mekanistik–ampirik yaklaşımlar belirleyici hâle gelmektedir. VECD/LVECD ve üç boyutlu sonlu eleman analizleri, cüruf oranının yapı tabakalarındaki gerilim/şekil değiştirme tepkisine yansımalarının modellenmesinde uygulanmıştır (Lee ve ark., 2022). Shiha ve arkadaşları (2020), ANSYS tabanlı analizler ve gözden geçirilmiş evrensel dirençli modül modelleriyle tabanın EAF cüruf içeriğine bağlı tepkisini öngörmüş;

ayrıca laboratuvar E* ve Mr değerlerini, kalitesel şartname yazılımı (QRSS) içerisinde tam kaplama kesiti üzerinden tahmini AC tekerlek izi derinliği ve yorulma çatlama yüzdesine taşımıştır.

Sonuç olarak, EAF cürufu asfalt karışımlarında uygulanan yenilikçi deney yaklaşımları; gelişmiş kırılma mekaniği (SCB, lineer/elasto-plastik kırılma mekaniği), gelişmiş yorulma protokolleri (dört noktalı eğilme, EBADE, VECD), mekanistik–ampirik tasarım modellemesi ve ayrıntılı çevresel liç–yaşam döngüsü değerlendirmelerini kapsamaktadır. Söz konusu yöntemler birlikte değerlendirildiğinde, uygun tasarım koşulları altında EAF cürufu içeren karışımların hem mekanik performans hem de dayanım ve çevresel uyumluluk açısından geleneksel karışımları yakaladığı veya geçtiği gösterilmektedir.

Bu bölüm boyunca derlenen sonuçlar, EAF cürufunun mekanik performans üzerindeki etkisinin tek bir parametre üzerinden değil, kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük sıcaklıkta çatlama davranışlarının birlikte ele alındığı bir çerçeve içerisinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Kalıcı deformasyon direncinde literatürde rapor edilen %72,8 ile %343 arasında değişen iyileşmeler, cürufun açısallık, sertlik ve kenetlenme avantajının doğrudan bir yansıması iken; yorulma ömründe yalnızca bağlayıcı düzeltmesi yapıldığında elde edilen yaklaşık %20–22 düzeyindeki iyileşme, film kalınlığının kritik kontrol parametresi olduğunu doğrulamaktadır. Düşük sıcaklık çatlama ile ilgili bulgular ise daha çelişkili bir tablo ortaya koymaktadır; bazı çalışmalarda kırılma tokluğunda %35'e varan iyileşme rapor edilirken, sistem rijitliğinin aşırı yükseldiği durumlarda çatlak ilerleme hızının arttığı belirtilmektedir. Bu karşılaştırma, cürufu karışımlarda mekanik performansın kazanım–risk dengesi içinde, kırılma mekaniği esaslı doğrulama testleriyle birlikte yorumlanmasının zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

Fonksiyonel Yüzey Özellikleri

Kayma-Sürtünme Direnci

Kayma direnci, özellikle ıslak koşullarda yol güvenliğini belirgin biçimde etkileyen temel bir performans parametresidir ve mikro doku, makro doku ile cilalanma direncine bağlıdır (Kehagia, 2009). EAF cürufu, yüksek cilalanma direnci ve köşeli yüzey dokusu sayesinde hem başlangıçta yüksek sürtünme kapasitesi sağlamakta hem de bu performansı uzun vadede koruyabilmektedir (Skaf ve ark., 2017; Skaf ve ark., 2019). Yaklaşık 58 düzeyinde rapor edilen cilalanmış taş değeri (Polishing Stone Value, PSV), söz konusu malzemenin yoğun trafik koşullarına uygunluğunu göstermektedir (Terrones-Saeta ve ark., 2020).

Arazi performansına ilişkin bulgular dikkat çekici düzeydedir. EAF cürufu içeren yüksek kayma dirençli yüzey kaplamasının, Yunanistan'daki otoyol uygulamalarında 30-41 aylık izleme süresi boyunca makro doku derinliği ve sürtünme katsayısını istikrarlı

biçimde muhafaza ettiği gözlemlenmiştir (Liapis ve Likoydis, 2012). Daha önceki değerlendirmelerde ise 14 aylık servis süresi sonunda kayma direncinde yalnızca %0 ila %6 düzeyinde bir azalma saptanmış ve ölçülen değerlerin teknik şartname limitlerinin üzerinde kaldığı bildirilmiştir (Liapis, 2007). Ayrıca, kum yama deneyi ile belirlenen makro doku derinliğinin cüruf esaslı aşınma tabakalarında 1,0 mm'nin üzerinde süreklilik gösterdiği ifade edilmiştir (Kehagia, 2009).

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen cilalanma simülasyonları da durabilite performansını desteklemektedir. Ultra ince sürtünme tabakalarında, 120 km/saat hızda ölçülen dinamik sürtünme katsayısının başlangıçta bazalta kıyasla 1,12 kat daha yüksek olduğu; 400.000 cilalanma çevrimi sonrasında ise bu oranın 3,11 kata ulaştığı rapor edilmiştir (Luo ve ark., 2024). Açık gradasyonlu karışımlarda yapılan çalışmalarda, cüruf ikame oranı arttıkça sürtünme ve yüzey dokusu performansının iyileştiği; çoğu araştırmada en uygun sonuçların %50–75 oranında iri agrega ikamesi düzeyinde elde edildiği belirlenmiştir (Pattanaik ve ark., 2018). Karşılaştırmalı çalışmalar ayrıca, cilalanma sonrasında çelik cürufalarının kuru ve ıslak koşullar altında sürtünme performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Pathak ve ark., 2022).

Söz konusu sonuçlar, EAF cürufunun geleneksel aşınma tabakalarında kayma direncinin sürekliliği için en umut verici agregalardan biri olduğunu göstermektedir (Kehagia, 2009; Liapis ve Likoydis, 2012). Tablo 6'da EAF cürufunun literatürden elde edilen kayma direnci ve yüzey dokusu dayanıklılığı verileri sunulmuştur.

Tablo 6. Kayma Direnci ve Yüzey Dokusu Dayanıklılığı

Parametre	Performans Seviyesi	Referanslar
Cilalanmış Taş Değeri	58	Terrones-Saeta ve ark., 2020
Kayma-Sürtünme Değeri Kaybı (14 ay) Uzun Dönem Makrodoku Stabilitesi	%0 ila %6 oranında azalma 41 aya kadar stabil	Liapis, 2007
Makrodoku Derinliği	>1,0 mm	Liapis ve Likoydis, 2012
Cilalanmadan Sonra Dinamik Sürtünme (400.000 çevrim)	Bazaltın 3,11 katı	Kehagia, 2009
		Luo ve ark., 2024

Gürültü Performansı

Lastik-yol gürültüsü, yüzey makro dokusu, porozite ve hava boşluklarının sürekliliği tarafından belirlenmekte olup, söz konusu parametreler hava pompalama mekanizması ile ses yutma kapasitesini kontrol etmektedir (Poulidakos ve ark., 2024; Lee ve Le, 2026). Çelik cürufu ile imal edilmiş aşınma tabakalarında doğrudan gürültü ölçümleri (Close-Proximity Method, CPX veya Statistical Pass-By Method, SPB) yöntemleriyle dB(A) cinsinden sınırlı sayıdadır; bu nedenle değerlendirmelerin önemli bir bölümü yüzey dokusu ve boşluk yapısına ilişkin dolaylı bulgulara dayandırılmaktadır (Mikhailenko ve ark., 2023; Pattanaik ve ark., 2018).

EAF cürufunun yüksek yüzey pürüzlülüğü makro doku derinliğini artırarak ıslak koşullarda lastik–yol temasında su filminin kırılmasını kolaylaştırmakta ve böylece sürtünme performansını iyileştirmektedir. Fakat özellikle yoğun gradasyonlu karışımlarda makro dokunun aşırı artması, yüksek frekanslı gürültü bileşenlerinde artışa yol açabilmektedir. Buna karşılık, açık ve kesikli gradasyonlu tasarımlarda mevcut olan birbirine bağlı boşluk ağı, akustik enerjinin bir bölümünü sönmüleyebilmekte ve suyun yüzeyden hızla uzaklaştırılmasını sağlayarak sıçrama ve sprej oluşumunu azaltmaktadır. İki mekanizma birlikte değerlendirildiğinde, doku kaynaklı olası gürültü artışlarının kısmen dengelenebileceği anlaşılmaktadır (Pattanaik ve ark., 2018; Mikhailenko ve ark., 2023).

EAF cürufu içeren ince poroz kaplamalara ilişkin uzun dönem saha izleme sonuçları, hizmet süresi boyunca makro doku derinliği ve geçirgenliğin istikrarlı biçimde korunduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, yüzey karakteristiklerinin zamanla bozulmadığını ve akustik performans açısından süreklilik sağlandığını göstermektedir (Liapis ve Likoydis, 2012). Ayrıca hacimce %13 oranında cüruf içeren kesikli gradasyonlu asfalt karışımlarının hedeflenen boşluk aralığını (%10–18) muhafaza ettiği ve kontrol karışımlarıyla benzer mekanik özellikler sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, uygun tasarım yaklaşımı benimsendiğinde düşük gürültüye yönelik performans kriterlerinin korunabileceğine işaret etmektedir (Mikhailenko ve ark., 2023).

Düşük gürültülü kaplamalarda uzun dönemli performans kaybının çoğunlukla yalnızca agrega türünden değil, boşlukların tıkanması ve trafik yükü altında meydana gelen sıkışma gibi mekanizmalardan kaynaklandığı belirtilmektedir (Poulidakos ve ark., 2024; Lee ve Le, 2026). Mevcut bulgular, cüruf kullanımının bu tür bozunma süreçlerini hızlandırdığına dair bir kanıt ortaya koymamaktadır; aksine, yüksek cilalanma direncinin yüzey dokusunun zaman içinde korunmasına katkı sağlayabileceği ifade edilmektedir (Kehagia, 2009; Liapis ve Likoydis, 2012).

Parlaklık ve Görünürlük

Yüzey parlaklığı ve görünürlük, gece sürüş güvenliği ile yol çizgilerinin kontrast performansını doğrudan etkilemekte olup mineralojik bileşim, renk, yüzey dokusu ve cilalanma davranışı tarafından belirlenmektedir (Liapis ve Likoydis, 2012). EAF cürufu, içerdiği demir oksitler nedeniyle genellikle koyu renklidir ve yüzey parlaklığını azaltma potansiyeline sahiptir; ancak parlaklık katsayısı ve retroreflektiflik değerlerine ilişkin nicel veriler sınırlıdır (Kehagia, 2009). Nicel verilerin sınırlı olmasına karşın, yüzey dokusunun sürekliliğine ilişkin bulgular daha nettir. Kararlı makro doku, etkin drenaj sağlayarak su filmi oluşumunu sınırlandırmakta ve özellikle ıslak koşullarda görünürlüğü iyileştirmektedir (Liapis ve Likoydis, 2012). Ayrıca yüksek cilalanma direnci, yüzeyin zamanla pürüzsüz bir hale gelmesini geciktirmekte; aksi takdirde artabilecek yansımayı sınırlayarak yüzey optik özelliklerin daha dengeli kalmasına dolaylı katkı sunmaktadır (Kehagia, 2009; Skaf ve ark., 2019).

Termal stabilite ve kalıcı deformasyon direnci, yüzey geometrisinin korunmasına katkı sağlayarak suyun birikebileceği çöküntülerin oluşumunu sınırlandırmakta; böylece özellikle ıslak koşullarda görünürlüğü olumsuz etkileyen sıçratma, yansıtma ve su filmi etkisini minimize etmektedir (Barra Bizinotto ve ark., 2016; Pasetto ve Baldo, 2011). Ancak fotometrik karakterizasyon açısından belirgin bir bilgi boşluğu bulunmaktadır. Özellikle kuru ve ıslak koşullar için luminans katsayıları, retroreflektif özellikler ve yol çizgisi kontrastının zaman içindeki değişimi gibi parametrelerin nicel olarak ortaya konulmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Termal Davranış

Asfalt kaplamalarda EAF cürufunun termal davranışı; kar/buz eritme, buz çözme ve yüzey sıcaklığının yönlendirilmesine yönelik özel fonksiyonel kaplama sistemleri kapsamında ele alınmaktadır. EAF cürufunun yüksek Fe_2O_3 içeriği ve ferromanyetik davranışı, mikrodalga absorpsiyonunu ve termal iletkenliği artırmakta; gözenekli yapısı ise ısı depolama kapasitesini desteklemektedir (Gao ve ark., 2017; Jiao ve ark., 2020). İletkenlik–içerik ilişkisinin doğrusal olmadığı; hacimce yaklaşık %40–60 düzeyindeki cüruf içeriklerinin ısı transferi ve sıcaklık üniformluğu açısından dengeli sonuçlar verdiği, %100 ikamenin ise lokal aşırı ısınma ve sıcaklık gradyanlarının yoğunlaşmasına yol açabildiği bildirilmektedir (Gao ve ark., 2017; Jiao ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2023). Termal davranışa odaklanmış karışımlarda yüksek sıcaklık deformasyon direncinde kazanım rapor edilirken, yüksek cüruf içeriklerinde düşük sıcaklık çatılma ve nem direncinde azalma gözlemlenmektedir (Zhang ve ark., 2023; Gao ve ark., 2017).

Buzlanma ve Buz Çözme Performansı

EAF cürufunun buzlanma ve buz çözme uygulamaları, yüksek $FeOx$ içeriğinin sağladığı güçlü mikrodalga absorpsiyonu ve termal iletkenlik avantajından yararlanan özel fonksiyonel kaplama sistemleri kapsamında ele alınmaktadır; bu nedenle aşağıdaki bulgular da 6.4'te olduğu gibi geleneksel yoğun gradasyonlu aşınma tabakası kapsamı dışındadır. Literatürde üç temel yaklaşım öne çıkmaktadır: mikrodalga ya da indüksiyon ile aktif ısıtma, gömülü iletken sistemlerle elektrik–termal ısıtma ve cüruf agregasının faz değişim malzemesi (Phase Change Material, PCM) için taşıyıcı olarak kullanıldığı pasif sistemler (SS-CPCA) (Gao ve ark., 2017; Jiao ve ark., 2020; Xu ve ark., 2022). Optimum buz çözme performansı tipik olarak hacimce %40–60 cüruf içeriği ve 4,75–13,2 mm tane boyu aralığında elde edilmekte; bu koşullarda buz erime süresinde %29–46 düzeyinde azalma rapor edilmektedir (Gao ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2023). Bununla birlikte yüksek cüruf içerikleri sıcaklık üniformluğunu bozarak lokal aşırı ısınma noktaları oluşturabilmekte; bazı karışımlarda nem ve yorulma direncinde azalma gözlenmektedir. Donma–çözülme döngüleri ve liç davranışı altında uzun dönemli saha doğrulaması, bu sistemlerin temel araştırma boşluğu olmaya devam etmektedir (Pasetto ve ark., 2023; Liu ve ark., 2022a).

Bu bölümde derlenen kayma-sürtünme, gürültü, parlaklık, termal davranış ve buzlanma verileri birlikte değerlendirildiğinde, EAF cürufunun fonksiyonel yüzey performansı üzerinde belirgin bir avantaj sunduğu, ancak bu avantajın eşit güçte belgelenmediği görülmektedir. Yüksek cilalanma direnci, makro doku derinliği ve uzun dönemli sürtünme katsayısı stabilitesi hem laboratuvar hem de saha çalışmalarında tutarlı biçimde rapor edildiğinden, bu alanda kanıt düzeyi yüksektir. Buna karşılık, doğrudan dB(A) ölçümlerine dayalı gürültü çalışmaları ile fotometrik karakterizasyona ilişkin nicel veriler oldukça sınırlı olduğundan, gürültü ve görünürlük performansına ilişkin sonuçlar büyük ölçüde dolaylı çıkarımlarla desteklenmektedir. Söz konusu kanıt eşitsizliği; gelecekteki çalışmalarda Yakın-Saha (Close-Proximity, CPX) ve İstatistiksel Geçiş (Statistical Pass-By, SPB) yöntemlerine dayalı doğrudan akustik ölçümlerin, retroreflektif ve luminans karakterizasyonu ile birlikte sistematik olarak ele alınması gerektiğine işaret etmektedir.

Çevresel Performans ve Sürdürülebilirlik

Liç Davranışı

Yüzey tabakalarında kullanılan malzemeler açısından çevresel uyumluluk, özellikle yüzey akışı (runoff) ile temas etmesi nedeniyle, Cr, V, Ba ve Mo gibi elementlerin salınımı bakımından kritik önem taşımaktadır (Autelitano ve Giuliani, 2021; Teo ve ark., 2020). İşlenmemiş, taze EAF cürufu sızıntı suları genellikle yüksek derecede alkalidir (pH $\approx$ 10,0–12,5) ve çoğu durumda sucul ortamlar için önerilen sınır değerleri aşabilmektedir (Teo ve ark., 2020; Korkmaz ve Dayioğlu, 2024).

Liç davranışı, cürufun baziklik derecesi, mikroyapısı ve faz dağılımı gibi parametrelere bağlıdır. Özellikle ince fraksiyonların daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle element salınımını artırabildiği bildirilmektedir (Mombelli ve ark., 2016b; Mombelli ve ark., 2016a). Kararlı spinel fazlarının kromu immobilize ederek çözünürlüğünü sınırlandırdığı; buna karşılık silikat fazlarının kimyasal bileşim ve soğuma koşullarına bağlı olarak vanadyumun davranışını etkileyebildiği ifade edilmektedir (Mombelli ve ark., 2016a; Kurecki ve ark., 2024).

Cürufun asfalt betonu üretimi için bitümle karıştırılması, kapsüllenme (encapsulation) etkisi sayesinde liç davranışını önemli ölçüde azaltmaktadır. Dinamik yüzey liçi deneylerinde, bağlayıcısız cürufa kıyasla krom salınımında yaklaşık %70, vanadyum salınımında ise yaklaşık %60 oranında azalma rapor edilmiş; difüzyon kontrollü koşullar altında ölçülen değerlerin düzenleyici eşiklerin oldukça altında kaldığı belirtilmiştir (Salas ve ark., 2025).

Saha koşullarını temsil eden çalışmalarda da, stabilize edilmiş ve uygun şekilde işlenmiş cüruf içeren aşınma tabakalarının liç performansının doğal agregalarla karşılaştırılabilir düzeyde olduğu bildirilmiştir (Kehagia, 2009).

Ön işlemler, çevresel performansın daha da iyileştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Yıkama işleminin Ba, Cr, Mo ve V salınımını azalttığı; asetik asit çözeltisinde

bekletme uygulamasının ise genişlemeyi düşürürken ağır metal salınımını sınır değerler içinde tuttuğu rapor edilmiştir (Sukmak ve ark., 2023; Testini ve ark., 2025).

Endüstriyel ölçekte uygulanan işlemler arasında kontrollü soğutma, ıslatma/yaşlandırma ve metalik demirin uzaklaştırılması amacıyla manyetik ayırma yer almakta; bu uygulamalar hem çevresel güvenliğin hem de hacimsel stabilitenin sağlanmasına katkı sunmaktadır (Gostečnik ve ark., 2020).

Karbon Ayak İzi

Yaşam döngüsü açısından elde edilen kazanımlar; doğal agrega ocak işletmeciliğinin ikame edilmesi, katı atık sahalarına gönderilen atık miktarının azaltılması ve cüruf kaynaklarının asfalt plantlerine yakın olması durumunda taşıma mesafelerinin kısalması gibi etkenlerden kaynaklanmaktadır (Teo ve ark., 2020; Kurecki ve ark., 2024). Elverişli lojistik koşullar altında, cüruf içeren aşınma tabakalarının tamamen doğal agregalı karışımlara kıyasla yaklaşık %20–30 oranında sera gazı emisyonu azaltımı sağlayabildiği rapor edilmiştir (Pasetto ve ark., 2023).

Kesikli gradasyonlu asfalt karışımlarına ilişkin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment, LCA) çalışmaları, özellikle depolama alanından kaçınma ve hammadde çıkarım yükünün azalması sayesinde küresel ısınma potansiyeli ile ekolojik kıtlık göstergelerinde belirgin düşüşler ortaya koymaktadır (Mikhailenko ve ark., 2023). Yoğun gradasyonlu karışımlara yönelik karşılaştırmalı LCA çalışmalarında da geleneksel karışımlara kıyasla birden fazla etki kategorisinde azalma bildirilmektedir; ancak sonuçların sistem sınırları ve tahsis varsayımlarına duyarlı olduğu vurgulanmaktadır (Plati ve ark., 2024; Katanalp ve ark., 2024).

Taşıma mesafesi, yaşam döngüsü performansını belirleyen en baskın parametrelerden biri olarak vurgulanmaktadır; uzun mesafeli nakliye, malzeme kaynaklı çevresel kazanımları önemli ölçüde dengeleyebilmekte, buna karşılık yerel cüruf temini belirgin avantajlar sağlamaktadır (Schneider ve ark., 2023). Eşik analizleri, doğal agregaların yaklaşık 144 km'den daha uzak mesafelerden taşınması gereken senaryolarda, cürufun çevresel performans bakımından daha üstün sonuçlar verebileceğini göstermektedir (Lizasoain-Arteaga ve ark., 2020).

Bağlayıcı gereksinimi, çevresel kazanımlar ile karışım tasarımı arasında bir optimizasyon problemi ortaya koymaktadır. Cürufun gözenekli yapısı ve yüksek absorpsiyon kapasitesi, daha yüksek bağlayıcı miktarını zorunlu kılabilmekte; bu artış ise yenilenemeyen enerji tüketimindeki azalışı sınırlandırarak sera gazı emisyonlarındaki net iyileşmeyi kısmen sınırlandırabilmektedir (Mikhailenko ve ark., 2023). Bu nedenle bağlayıcı içeriğinin ve türünün dikkatli biçimde optimize edilmesi, yalnızca mekanik ve dayanım performansını değil, aynı zamanda yaşam döngüsü temelli sürdürülebilirlik çıktılarının da iyileştirilmesini doğrudan etkilemektedir (Pasetto ve ark., 2023).

Ekonmik Değerlendirme

Ekonmik performans; cürufun temin edilebilirliği, taşıma mesafesi, işleme maliyetleri ve dayanıklılığa bağlı bakım tasarrufları gibi birden fazla değişkene bağlıdır (Schneider ve ark., 2023; Kurecki ve ark., 2024). Cüruf, bertaraf yükümlülüklerinin ortadan kalkması nedeniyle tesis çıkışında düşük ya da sıfıra yakın maliyetle temin edilebilmekte; ayrıca düzenli depolamadan kaçınma ekonomik katkı oluşturmaktadır (Mikhailenko ve ark., 2023; Ferreira ve ark., 2016). Ancak genişleme ve liç risklerini kontrol altına almak amacıyla gerekli kırma, yaşlandırma ve stabilizasyon işlemleri ek maliyet kalemleri doğurmaktadır (Pasetto ve ark., 2023; Bulatbekova ve ark., 2024).

Bununla birlikte, özellikle kalıcı deformasyon direnci ve kayma-sürtünme direnci dayanımındaki iyileşmeler sayesinde elde edilen durabilite artışı, servis ömrünü uzatabilmekte ve bakım müdahalelerinin sıklığını düşürebilmektedir. Başlangıç maliyetleri benzer düzeyde olsa dahi performans kazanımları yaşam döngüsü ekonomisi açısından toplam maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlayabilmektedir (Skaf ve ark., 2019; Pasetto ve ark., 2023).

Döngüsel ekonomiyle uyumlu politika mekanizmaları—örneğin, düzenli atık depolama vergileri ve çevresel kriterleri önceleyen kamu alım stratejileri—çevresel dışsallıkları mali yapıya dâhil ederek cüruf temelli çözümlerin piyasa rekabetini güçlendirebilmektedir (Kurecki ve ark., 2024; Mikhailenko ve ark., 2023).

Öte yandan, yoğun gradasyonlu aşınma tabakalarına özgü ayrıntılı net bugünkü değer esaslı yaşam döngüsü maliyet çalışmalarının sınırlı olduğu görülmektedir. Bu eksiklik, çevresel etkiler ile ekonomik performansı eşzamanlı değerlendirebilen entegre Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) ve Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (Life Cycle Cost Analysis, LCCA) yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (Pasetto ve ark., 2023; Kurecki ve ark., 2024). Cürufa ilişkin çevre ve sürdürülebilirlik göstergeleri Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. Çevre ve sürdürülebilirlik göstergeleri

Unsur	Nicel Sonuç	Açıklama	Referanslar
Krom Liçi Azalımı	70%	Kapsüllenme	Salas ve ark., 2025
Vanadyum Liçi Azalımı	60%	Diffüzyon kontrollü salım	Salas ve ark., 2025
Sera Gazı Azalımı	%20-30	Uygun lojistik koşullar	Pasetto ve ark., 2023
Maliyet Eşik	144 km	Yerel tedarik	Lizasoain-Arteaga ve ark., 2020
Taşıma Mesafesi			
Ekolojik Kaynak Baskısının Azaltılması	Kayda değer düşüş	Kesikli gradasyonlu karışım	Mikhailenko ve ark., 2023

Bu bölümde incelenen çevresel ve sürdürülebilirlik bulguları birlikte değerlendirildiğinde, EAF cürufunun çevresel performans avantajının koşullu nitelikte olduğu açıkça görülmektedir. Bitüm matrisi içerisinde kapsüllenme, krom ve vanadyum gibi ağır metallerin salınımını yaklaşık %60–70 oranında sınırlandırarak çevresel uyumluluğu önemli ölçüde iyileştirmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirmelerinde rapor edilen %20–

30 düzeyindeki sera gazı azalımı ise yalnızca taşıma mesafesinin yaklaşık 144 km eşiğinin altında kaldığı ve bağlayıcı içeriğinin aşırı yükselmediği senaryolarda gerçekleşebilmektedir. Bu karşılaştırma, çevresel kazanımların yalnızca malzeme tercihinin değil, lojistik koşullara ve karışım tasarımı kararlarına da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ekonomik tarafta ise düşük tedarik maliyeti ile stabilizasyon ek maliyetleri arasındaki denge, yaşam döngüsü maliyet analizleriyle birlikte ele alındığında, EAF cürufunun ekonomik üstünlüğünün de yine bölgesel koşullara duyarlı olduğunu göstermektedir.

Mevcut Kısıtlar ve Gelecek Araştırmalar

Reaktif serbest CaO ve MgO varlığı, özellikle ince aşınma tabakalarında önemli bir sınırlayıcı unsur olmaya devam etmektedir; zira bu tabakalar küçük hacimsel değişimlere dahi duyarlı olup, yüzey düzgünlüğünün bozulmasına ve çatlak oluşumunun tetiklenmesine yol açabilmektedir (Kurecki ve ark., 2024; Pasetto ve ark., 2023).

Stabilizasyon uygulamaları ise hem literatürde hem de endüstride önemli farklılıklar göstermekte; farklı yaşlandırma süreleri ve koşullandırma yöntemlerinin kullanılması genişleme kontrolünde tutarsız sonuçlara neden olmaktadır (Santamaría ve ark., 2018; Pasetto ve ark., 2023). Bu bağlamda, serbest kireç içeriği için performans esaslı sınır değerlerin belirlenmesi, genişleme eşiklerinin tanımlanması ve özellikle aşınma tabakalarına özgü standartlaştırılmış deney protokollerinin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Kurecki ve ark., 2024).

Birçok karışım tasarımında Marshall veya Superpave prosedürleri doğrudan uygulanmaktadır; ancak cürufun yüksek özgül ağırlığı ve absorpsiyon kapasitesi yeterince dikkate alınmadığında hacimsel hesaplamalarda sapmalar oluşabilmekte ve efektif bağlayıcı film kalınlığı yetersiz kalabilmektedir (Skaf ve ark., 2019; Pasetto ve ark., 2023).

Yorulma çalışmalarından elde edilen bulgular, bağlayıcı film kalınlığının belirleyici bir parametre olduğunu ortaya koymakta; uygun bağlayıcı düzeltmesi ile yorulma performansının yeniden iyileştirilebildiği gösterilmektedir (Benavides ve ark., 2024).

Bu doğrultuda, gelecekteki tasarım yaklaşımlarının yalnızca hacimsel kriterlere dayanmaktan ziyade; dinamik modül, numunenin sekonder deformasyon evresinden tersiyer (hızlanan) deformasyon evresine geçtiği çevrim sayısı olarak tanımlanan akma sayısı (flow number, FN), yorulma deneyleri ve kırılma enerjisi gibi mekanik temelli performans göstergeleriyle entegre edilmesi önerilmektedir (Shiha ve ark., 2020; Pasetto ve ark., 2023).

Kalıcı deformasyon direnci ve kayma direnci kapsamlı biçimde belgelenmiş olmakla birlikte, donma–çözülme döngüleri ve buz çözücü tuzlara maruziyet altındaki uzun dönemli saha performansı henüz yeterince ortaya konulmuş değildir (Aziz ve ark., 2020; Pasetto ve ark., 2023).

Hidratasyon, karbonatlaşma, mikroçatlak oluşumu, cılanma ve boşluk tıkanması gibi eş zamanlı ilerleyen kimyasal ve mekanik yaşlanma süreçlerinin birlikte değerlendirilmesi ve öngörü modellerine entegre edilmesi gerekmektedir (Yu ve ark., 2024; Yu ve ark., 2025).

Kapsülleme etkisi liç davranışını önemli ölçüde azaltmasına rağmen, özellikle yüzey akışına maruz kalan üst tabakalarda düzenleyici yaklaşımların temkinli tutumu devam etmektedir (Ferreira ve ark., 2016; Salas ve ark., 2025). Genleşme, cılanma direnci, liç performansı ve mekanik özelliklere ilişkin harmonize deney protokollerinin geliştirilmesi ise daha geniş ölçekli kabul ve uygulamayı destekleyebilecektir (Kurecki ve ark., 2024; Teo ve ark., 2020).

Tesis içi ve tesisler arası değişkenliğin yüksek düzeyde olması, süreklilik arz eden temel sorunlardan biri olarak değerlendirilmektedir (Teo ve ark., 2020; Kurecki ve ark., 2024). Genleşme ve liç riski temelinde cüruf türlerini sınıflandıran performans esaslı sistemlerin geliştirilmesi; buna ek olarak tesis içi bileşim kontrolü için XRF tabanlı hızlı izleme araçlarının kullanılması, literatürde sıklıkla önerilen çözüm yaklaşımları arasında yer almaktadır (Kurecki ve ark., 2024).

Yoğun gradasyonlu cüruf aşınma tabakalarına ilişkin farklı iklim koşulları ve trafik düzeylerini kapsayan çok yıllık saha denemeleri sınırlı sayıdadır; özellikle çatlak gelişimi, kayma direncinin zamana bağlı evrimi ve yüzey akışına ilişkin izleme çalışmaları yeterince ortaya konulmuş değildir (Pasetto ve ark., 2023).

Emisyonlar ve ekolojik kısıtlı göstergelerinde umut verici azalmalar bildirilmiş olmasına karşın, yüzey tabakalarına özgü yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), yaşam döngüsü maliyet analizi ve durabilite verilerini birlikte ele alan bütünlük sürdürülebilirlik modellemeleri de henüz sınırlı düzeydedir (Mikhailenko ve ark., 2023; Pasetto ve ark., 2023).

Gelecekteki araştırmaların, laboratuvar kalibrasyon çalışmalarını servis sürecindeki performans izleme verileriyle eşleştirerek daha sağlam mekanistik–ampirik tasarım yaklaşımları ve yaşam döngüsü temelli değerlendirme çerçeveleri oluşturması önerilmektedir (Pasetto ve ark., 2023; Kurecki ve ark., 2024).

Sonuçlar

Bu çalışma, EAF cürufunun geleneksel yoğun gradasyonlu aşınma tabakalarında kullanımına ilişkin literatürü karşılaştırmalı biçimde sentezlemiş; malzeme özellikleri, karışım tasarımı, mekanik performans, yüzey fonksiyonelliği, çevresel davranış ve sürdürülebilirlik boyutlarını bütüncül bir çerçevede değerlendirmiştir. Bulgular, uygun tasarım ve stabilizasyon koşulları sağlandığında EAF cürufunun teknik açıdan uygulanabilir ve performans artırıcı bir agrega alternatifi olduğunu göstermektedir.

Mekanik performans açısından en belirgin kazanım kalıcı deformasyon direncinde gözlenmektedir. Kaba agrega fraksiyonunda %25–75 aralığındaki ikame oranlarında, çalışmalar arası belirgin değişkenlikle birlikte,

tekerlek izi derinliğinde yaklaşık %30–70 azalma ve statik sünme modülünde %15–40 düzeyinde artış rapor edilmektedir. Bu kazanımlar EAF cürufunun yüksek açıcılık, pürüzlülük ve sertlik özellikleriyle ilişkilendirilmektedir. Ancak %50'nin üzerindeki ikame oranlarında rijitlik artışına bağlı kırılabilirlik riski ortaya çıkabilmekte ve yorulma performansı bağlayıcı film kalınlığına duyarlı hâle gelmektedir. Bağlayıcı oranının %0,3–0,7 artırılmasıyla film kalınlığının optimize edilmesi, yorulma ömründe iyileşme sağlayabilmektedir. Dolayısıyla optimum tasarım, kalıcı deformasyon direnci ile yorulma davranışı arasındaki dengeye dayalı performans temelli bir yaklaşım gerektirmektedir.

Nem hassasiyeti bakımından, cürufun alkali yüzeyi ve yüksek yüzey enerjisi güçlü agrega–bağlayıcı adezyonu sağlamakta; çoğu çalışmada TSR ve ITS değerleri teknik gereklilikleri karşılamaktadır. Ancak gözenekli morfoloji nedeniyle artan absorpsiyon, efektif bağlayıcı miktarının azalmasına yol açabilmekte ve gerekli düzeltmeler yapılmadığında nem hasarı ile çatlama riskini artırabilmektedir. Bu durum, tasarımların fraksiyon bazlı özgül ağırlık ölçümlerine dayalı hacimsel yaklaşımla gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Fonksiyonel yüzey performansı açısından EAF cürufu, yüksek cılanma direnci sayesinde uzun dönemli kayma-sürtünme performansının korunmasında belirgin avantaj sunmakta; saha ve laboratuvar verileri makro doku derinliğinin ve sürtünme katsayısının servis süresi boyunca kararlı kaldığını göstermektedir. Gürültü performansı doğrudan ölçümler bakımından sınırlı incelenmiş olmakla birlikte, açık ve kesikli gradasyonlu sistemlerde boşluk yapısının korunabildiği anlaşılmaktadır. Parlaklık ve fotometrik özellikler konusunda ise belirgin bir veri boşluğu bulunmaktadır.

Hacimsel stabilite, EAF cürufu kullanımının en kritik teknik sınırlayıcı unsurudur. Serbest CaO ve MgO kaynaklı hidratasyon genleşmesi, özellikle ince aşınma tabakalarında yüzey bütünlüğünü tehdit edebilmekte; açık hava koşullarında yaşlandırma (yaklaşık 2–3 ay), kontrollü karbonatlaşma ve hızlandırılmış stabilizasyon teknikleri ise genleşmeyi kabul edilebilir sınırlar (<%1) içine indirebilmektedir. Yaşlandırma koşullarındaki standardizasyon eksikliği ve tesisler arası kimyasal değişkenlik, performans temelli sınıflandırma sistemlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Çevresel açıdan bitüm kapsüllemesi liç davranışını önemli ölçüde azaltmakta; krom ve vanadyum salınımları %60–70 düzeyinde düşüşler rapor edilmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirmeleri, özellikle yerel temin senaryolarında sera gazı emisyonlarında %20–30 azalma potansiyeline işaret etmektedir. Bununla birlikte taşıma mesafesi ve artan bağlayıcı ihtiyacı çevresel kazanımların net büyüklüğünü belirleyen temel parametrelerdir; dolayısıyla sürdürülebilirlik avantajı koşulludur. Ekonomik açıdan düşük hammadde maliyeti ve bertaraf yükünden kaçınma önemli avantajlar sunmakta, ancak yoğun gradasyonlu aşınma tabakalarına özgü ayrıntılı LCCA çalışmalarının sınırlı olması önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır.

Genel değerlendirme çerçevesinde EAF cürufu; teknik olarak uygulanabilir, uygun ikame oranlarında performans artırıcı, stabilizasyon ve hacimsel tasarım kontrolü gerektiren, yerel temin koşullarında çevresel açıdan avantajlı ancak standardizasyon ihtiyacı süren bir alternatif agrega olarak tanımlanabilir. En dengeli yaklaşımın, kaba fraksiyonda %25–50 aralığında hacimsel ikame, bağlayıcı film kalınlığının optimize edilmesi, performans esaslı stabilizasyon ve mekanik temelli doğrulama testlerinin birlikte uygulanması olduğu görülmektedir.

Gelecekteki çalışmaların; uzun süreli saha performans verileri, donma–çözülme ve buz çözücü maruziyeti altındaki davranış, fotometrik karakterizasyon, harmonize genleşme–liç deney protokolleri ve entegre LCA–LCCA modellemeleri üzerine yoğunlaşması gerekmektedir. Laboratuvar bulgularının servis süreci verileriyle eşleştirildiği mekanistik–ampirik tasarım çerçeveleri, EAF cürufunun yoğun gradasyonlu aşınma tabakalarında daha geniş kabul görmesini destekleyecektir.

Referanslar

1. Agioutantis Z., Komnitsas K., Athousaki A. 2013. Aggregate transport and utilization: ecological footprint and environmental impacts. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 47(4), 1960-1969. <https://doi.org/10.12681/bgs.11005>
2. Alsheyab M., Khedaywi T. 2017. Dynamic creep analysis of Electric Arc Furnace Dust (EAFD) – Modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 146, 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.084>
3. Ameri M., Hesami S., Goli H. 2013. Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Construction and Building Materials*, 49, 611-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034>
4. Arribas I., Santamaría A., Ruiz E., Ortega-López V., Manso, J. M. 2015. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials*, 90, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003>
5. Autelitano F., Giuliani F. 2021. Optimization of electric arc furnace aggregates replacement in dense-graded asphalt wearing courses. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 14, 309–317. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0099-8>
6. Aziz M., Shokri M., Ahsan A., Liu H., Tay L., Muslim, N. 2020. An Overview on Performance of Steel Slag in Highway Industry. *Journal of Advanced Research in Materials Science*, 67(1), 1–10. <https://doi.org/10.37934/arms.67.1.110>
7. Bai X., Wang L., Chen X. 2024. Multiscale Study on Low Temperature Crack Resistance Mechanism of Steel Slag Asphalt Mixture. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 39, 705-715. <https://doi.org/10.1007/s11595-024-2929-z>
8. Benavides D., López-Montero T., Bizinotto M., Aponte D. 2024. Experimental study of asphalt mixtures with recycled resources: Influence of electric arc furnace slag aggregate roughness and bitumen film thickness on fatigue performance. *Cleaner Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100282>
9. Benavides D., López-Montero T., Aponte D. 2025. Evaluation of fatigue performance and crack propagation in asphalt mixtures with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 471, 140704. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140704>
10. Barra Bizinotto M., Aponte Hernández D. F., Vázquez Ramonich E., Méndez Candelario B. A., Miró Recasens J. R., Valls del Barrio S. 2016. Experimental study of the effect of the thermal conductivity of EAF slag aggregates used in asphaltic concrete of wearing courses on the durability of road pavements. In *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies: Las Vegas, Nevada, USA 7-11 August 2016*, University on Nevada Las Vegas USA (pp. 1-10).
11. Brand A., Fanijo E. 2020. A Review of the Influence of Steel Furnace Slag Type on the Properties of Cementitious Composites. *Applied Sciences*, 10(22), 8210. <https://doi.org/10.3390/app10228210>
12. Bulatbekova D., Vashistha P., Kim H., Pyo S. 2024. Effects of basic-oxygen furnace, electric-arc furnace, and ladle furnace slags on the hydration and durability properties of construction materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 92, 109670. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109670>
13. Fakhri M., Ahmadi A. 2017. Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 147, 630-638. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.117>
14. Falchetto A., Moon K. 2015. Remarks on the use of Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag in Asphalt Mixtures for Flexible Pavements. *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, 17, 25-33. <https://doi.org/10.7855/ijhe.2015.17.1.025>
15. Ferreira V., Vilaplana A., García-Armíngol T., Aranda-Usón A., Lausín-González C., López-Sabirón A., Ferreira G. 2016. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*, 130, 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.094>
16. Gao J., Sha A., Wang Z., Tong Z., Liu Z. 2017. Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. *Journal of Cleaner Production*, 152, 429-442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.113>
17. Gostecnik M., Šinik P., Mladenović A., Ščančar J., Milačić R. 2020. Environmental Impacts of Mixed Aggregates for use in Unbound Layers in Road Construction. *Materials and Geoenvironment*, 67(1), 3. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2020-0002>
18. Gowda K., Naveen G. 2023. Laboratory performance of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace slag and basic oxygen furnace slag as partial replacement for conventional aggregates. *Energy, Ecology and Environment*, 8, 586-595. <https://doi.org/10.1007/s40974-023-00285-6>
19. Hoy M., Horpibulsuk S., Chinkulkijniwat A., Suddeepong A., Buritatum A., Yaowarat T., Choenklang P., Udomchai A., Kantatham K. 2024. Innovations in recycled construction materials: paving the way towards sustainable road infrastructure. *Frontiers in Built Environment*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1449970>
20. Jiao W., Sha A., Liu Z., Li W., Jiang W., Qin W. 2020. Study on thermal properties of steel slag asphalt concrete for snow-melting pavement. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123574. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123574>
21. Joulblat R., Masri Z. A. B. A., Al-Khateeb G. G., Elkordi A., Tallis A. R. E., Absi J. 2023. State-of-the-Art Review on Permanent Deformation Characterization of Asphalt Concrete Pavements. *Sustainability*, 15(2), 1166. <https://doi.org/10.3390/su15021166>
22. Katanalp B. Y., Taştan M., Ahmedzade P. 2024. Recycling the electric arc furnace waste after geopolymerization in bitumen: experimental analyses and LCA study. *Materials and Structures*, 57(5). <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02376-0>
23. Kavussi A., Qazizadeh M. 2014. Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging. *Construction and Building Materials*, 72, 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052>

24. Kehagia F. 2009. Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates. *Waste Management & Research*, 27, 288 - 294. <https://doi.org/10.1177/0734242x08092025>
25. Keymanesh M., Ziari H., Zalnezhad H., Zalnezhad M. 2021. Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Construction and Building Materials*, 269, 121336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
26. Korkmaz B., Dayioglu A. Y. 2024. Utilization of Natural Soils as a Remediation Method for Electric Arc Furnace and Ladle Slags. *Sustainability*, 16(12), 5244. <https://doi.org/10.3390/su16125244>
27. Kumar S., Rahul M., Jakati S., Karthik M., Ramaraju H. 2023. Eco-friendly warm mix asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag as substitute to conventional aggregates. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01203-9>
28. Kurecki M., Meena N., Shyrokykh T., Korobeinikov Y., Örell T., Voss Z., Pretorius E., Jones J., Sridhar S. 2024. Recycling Perspectives of Electric Arc Furnace Slag in the United States: A Review. *steel research international*, 96. <https://doi.org/10.1002/srin.202300854>
29. Lee E., Park H., Suh Y., Lee J. 2022. Performance Evaluation of Asphalt Mixtures with 100% EAF and BOF Steel Slag Aggregates Using Laboratory Tests and Mechanistic Analyses. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 26, 4542 - 4551. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1985-1>
30. Lee S.-Y., Le T. H. M. 2026. Long-Term Evaluation of Acoustic Decay, Drainage, and Surface Resistance in Engineered Asphalt Pavements through Integrated Field and Laboratory Analysis. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 30(5), 100497. <https://doi.org/10.1016/j.kscce.2025.100497>
31. Liapis I., Likoydis S. 2012. Use of Electric Arc Furnace Slag in Thin Skid-Resistant Surfacing. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48, 907-918. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1068>
32. Liapis I. 2007. EAF slag aggregate behaviour in antiskid course in road construction industry. In *Proceedings of International Conference: Advance Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials* (p. 1555).
33. Liu J., Xu J., Liu Q., Wang S., Yu B. 2022a. Steel Slag for Roadway Construction: A Review of Material Characteristics and Application Mechanisms. *Journal of Materials in Civil Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004230](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004230)
34. Lizasoain-Arteaga E., Lastra-Gonzalez P., Indacochea-Vega I., Flintsch G. 2020. Comprehensive analysis of the environmental impact of electric arc furnace steel slag on asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123121>
35. Liu L., Liu L., Liu Z., Yang C., Li X., Huang Y. 2024. Effects of the Aging Treatment Process on the Properties of Steel Slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(jmcsee\)7.mteng-16508](https://doi.org/10.1061/(jmcsee)7.mteng-16508)
36. Luo H., Chen S., Zheng Y., Wu X., Chen C., Huang X. 2024. Improving skid-resistance durability of ultra-thin friction course in asphalt pavements through recycled steel slags as basalt replacements. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136138>
37. Menad N., Kana N., Seron A., Kanari N. 2021. New EAF Slag Characterization Methodology for Strategic Metal Recovery. *Materials*, 14(6), 1513. <https://doi.org/10.3390/ma14061513>
38. Mikhailenko P., Piao Z., Poulikakos L. 2023. Electric arc furnace slag as aggregates in semi-dense asphalt. *Case Studies in Construction Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02049>
39. Mombelli D., Mapelli C., Barella S., Cecca C. D., Saoût G. L., Garcia-Diaz É. 2016a. The effect of chemical composition on the leaching behaviour of electric arc furnace (EAF) carbon steel slag during a standard leaching test. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 1050. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.09.018>
40. Mombelli D., Mapelli C., Barella S., Cecca C., Saoût G., Garcia-Diaz E. 2016b. The effect of microstructure on the leaching behaviour of electric arc furnace (EAF) carbon steel slag. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 810-821. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.05.027>
41. Motevalizadeh S., Sedghi R., Rooholamini H. 2020. Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117965>
42. Oluwasola E., Hainin M., Aziz M. 2015a. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*, 2, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
43. Oluwasola E., Hainin M., Aziz M. 2015b. Evaluation of rutting potential and skid resistance of hot mix asphalt incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailing. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 22, 550-558.
44. Oluwasola E., Hainin M., Aziz M. 2016. Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, 122, 315-325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.051>
45. Pasetto M., Baldo N. 2010. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags.. *Journal of hazardous materials*, 181 1-3, 938-48. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.104>
46. Pasetto M., Baldo N. 2011. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25, 3458-3468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.037>
47. Pasetto M., Baldo N. 2012. Fatigue Characterization of Asphalt Rubber Mixtures with Steel Slags. In: *Scarpas A., Kringos N., Al-Qadi I., Loizos A. (eds) 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. RILEM Bookseries*, vol 4, pp. 729-737, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_71
48. Pasetto M., Baliello A., Giacomello G., Pasquini E. 2017. Sustainable solutions for road pavements: A multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *Journal of Cleaner Production*, 166, 835-843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.212>
49. Pasetto M., Baliello A., Giacomello G., Pasquini E. 2023. The Use of Steel Slags in Asphalt Pavements: A State-of-the-Art Review. *Sustainability*, 15(11), 8817. <https://doi.org/10.3390/su15118817>
50. Pathak S., Choudhary R., Kumar A., Pattanaik M. 2022. Friction Characteristics of Open Graded Asphalt Friction Courses with BOF and EAF Steel Slag Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004222](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004222)
51. Pattanaik M., Choudhary R., Kumar B. 2018. Laboratory Evaluation of Mix Design Parameters of Open-Graded Friction Course Mixes with Electric Arc Furnace Steel Slag. *Advances in Civil Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1520/acem20180071>
52. Pattanaik M., Choudhary R., Kumar B., Kumar A. 2021. Mechanical properties of open graded friction course mixtures with different contents of electric arc furnace steel slag as an alternative aggregate from steel industries. *Road Materials and Pavement Design*, 22(2), 268-292. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1620120>
53. Paixão, A., Fortunato, E. 2021. Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry. *Construction*

- and Building Materials, 267, 121225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121225>
54. Picardo A., Soltero V. M., Peralta E. 2023. Life Cycle Assessment of Sustainable Road Networks: Current State and Future Directions. Buildings, 13(10), 2648. <https://doi.org/10.3390/buildings13102648>
55. Piemonti A., Conforti A., Cominoli L., Sorlini S., Luciano A., Plizzari G. 2021. Use of Iron and Steel Slags in Concrete: State of the Art and Future Perspectives. Sustainability, 13(2), 556. <https://doi.org/10.3390/su13020556>
56. Plati C., Tsakoumaki M., Loizos A. 2024. Quality Assurance of Steel Slag Asphalt Mixtures for Sustainable Pavement Surface Courses. Recycling. <https://doi.org/10.3390/recycling9050091>
57. Poulikakos L. D., Schlatter F., Huber L., Mikhailenko P., Arraigada M., Griffa M., Angst C., Bühlmann E. 2024. Multi-scale mechanical and acoustic characterization of low noise pavements. Environmental Science and Pollution Research, 31(51), 61073. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35198-2>
58. Qazizadeh M., Farhad H., Kavussi A., Sadeghi A. 2018. Evaluating the fatigue behavior of asphalt mixtures containing electric arc furnace and basic oxygen furnace slags using surface free energy estimation. Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.035>
59. Rachman A., Yang S. 2023. A Cleaner Pavement Preventive Maintenance Approach: Performance and Emission Impact Analysis of Slurry Surfacing Containing Electric Arc Furnace Slag. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133056>
60. Saha A., Khan M., Sarker P. 2018. Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: A review. Resources, Conservation and Recycling. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.034>
61. Salas I., Cifrian E., Lastra-González P., Castro-Fresno D., Andrés A. 2025. Assessment of Dynamic Surface Leaching of Asphalt Mixtures Incorporating Electric Arc Furnace Steel Slag as Aggregate for Sustainable Road Construction. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su17083737>
62. Santamaría A., Faleschini F., Giacomello G., Brunelli K., San José J. T., Pellegrino C., Pasetto M. 2018. Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. Journal of Cleaner Production, 205, 599–609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.122>
63. Schneider P., Ahmed N., Mihai F., Belousova A., Kučera R., Oswald K., Lange T., Hung A. 2023. Life Cycle Assessment for Substitutive Building Materials Using the Example of the Vietnamese Road Sector. Applied Sciences. <https://doi.org/10.3390/app13106264>
64. Shiha M., El-Badawy S., Gabr A. 2020. Modeling and performance evaluation of asphalt mixtures and aggregate bases containing steel slag. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118710>
65. Skaf M., Manso J., Aragón Á., Fuente-Alonso J., Ortega-López V. 2017. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. Resources Conservation and Recycling, 120, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
66. Skaf M., Manso J., Chica J., Santamaría A., Pasquini E., Ortega-López V., Eñu S. 2019. The use of electric arc furnace slag in bituminous pavements. Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT5), Kingston University, London, UK. <https://doi.org/10.18552/2019/idscomt5097>
67. Sorlini S., Sanzeni A., Rondi L. 2012. Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. Journal of Hazardous Materials, 209-210, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.066>
68. Sukmak P., Sukmak G., De Silva P., Horpibulsuk S., Kassawat S., Suddepong A. 2023. The potential of industrial waste: Electric arc furnace slag (EAF) as recycled road construction materials. Construction and Building Materials, 368, 130393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130393>
69. Tamizi T., Shiraz M., Mansourian A., Ameri M. 2024. Investigation of the fracture resistance of warm mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates at low temperatures. Innovative Infrastructure Solutions, 9. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01662-8>
70. Teo P., Zakaria S., Salleh S., Taib M., Sharif M., Seman A., Mohamed J., Yusoff M., Yusoff A., Mohamad M., Masri M., Mamat S. 2020. Assessment of Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag Waste's Recycling Options into Value Added Green Products: A Review. Metals. <https://doi.org/10.3390/met10101347>
71. Terrones-Saeta J., Suárez-Macias J., Iglesias-Godino F., Corpas-Iglesias F. 2020. Evaluation of the Use of Electric Arc Furnace Slag and Ladle Furnace Slag in Stone Mastic Asphalt Mixes with Discarded Cellulose Fibers from the Papermaking Industry. Metals. <https://doi.org/10.3390/met10111548>
72. Testini L., Mombelli D., Dotelli G., Grosso M., Mapelli C. 2025. Outline of a Washing Treatment to Improve Electric Arc Furnace Slag Environmental Behavior. steel research international. <https://doi.org/10.1002/srin.202500755>
73. Wilson D. J., Kieu M., Sheng M. S., Sreenivasan A., Ivory V., Sharp B. 2023. A Review of Aggregates for Land Transport Infrastructure in New Zealand. Transportation Infrastructure Geotechnology, 10(6), 1186. Springer Science + Business Media. <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00259-x>
74. Xu P., Zhang D., Miao Y., Sani B., Zhang K. 2022. Development and characterization of a novel steel slag-based composite phase change aggregate for snow/ice melting of asphalt pavements. Construction and Building Materials, 341, 127769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127769>
75. Yildirim I., Prezzi M. 2011. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. Advances in Civil Engineering, 2011, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2011/463638>
76. Yonar, F., Tozsın, G. 2026. Evaluation of Steel Slag as a Sustainable, High-Performance Aggregate for Railway Ballast: A Comprehensive Review. Transportation Geotechnics, 60, 102017. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2026.102017>
77. Yu L., Jiang W. 2025. An interpretable model for predicting the performances of asphalt mixtures comprising the chemistry composition of steel slag. International Journal of Pavement Engineering, Article 2564342. <https://doi.org/10.1080/10298436.2025.2564342>
78. Yu S., Garrabrants A., Delapp R., Hubner T., Thornelee S., Kosson D. 2024. From leaching data to release estimates: Screening and scenario assessments of electric arc furnace (EAF) slag under unencapsulated use. Journal of hazardous materials, 479, 135522. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135522>
79. Zhang F., Wang D., Falchetto A., Cao Y. 2023. Microwave deicing properties and carbon emissions assessment of asphalt mixtures containing steel slag towards resource conservation and waste reuse. Science of The Total Environment, 912, 169189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169189>
80. Zhang T., Wu J., Hong R., Ye S., Jin A. 2022. Research on low-temperature performance of steel slag/polyester fiber permeable asphalt mixture. Construction and Building Materials, 334, 127214. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127214>
81. Ziaee S., Behnia K. 2020. Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. Journal of Cleaner Production, 274, 123092. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123092>