



Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Derleme (Review)

Cilt 9 - Sayı 4: 2132-2146 / Temmuz 2026
(Volume 9 - Issue 4: 2132-2146 / July 2026)

POTA OCAĞI CÜRUFUNUN YOL ALTYAPI ZEMİNLERİNİN STABİLİZASYONUNDA KULLANIMI: MEKANİZMALAR, PERFORMANS VE KISITLARA İLİŞKİN NİCEL BİR DERLEME

Fatih YONAR^{1*}

¹Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 17020, Çanakkale, Türkiye

Özet: Yol altyapı zeminlerinde geleneksel kimyasal stabilizasyon uygulamaları, başta Portland çimentosu olmak üzere yüksek karbon ayak izine sahip bağlayıcılara dayanmaktadır. Çalışma, çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan Pota Ocağı Cürufu'nun (Ladle Furnace Slag - LFS) killi yol zeminlerinin stabilizasyonundaki performansını eleştirel ve nicel bir bakış açısıyla değerlendiren sistematik bir derlemedir. Web of Science, Scopus ve Google Scholar veritabanlarından LFS odaklı 30 birincil araştırma makalesi ile geleneksel ve alternatif bağlayıcılarla karşılaştırma amacıyla 19 ek referans incelenmiştir. Derleme; LFS'nin fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonunu, kısa vadeli katyon değişimi ile orta ve uzun vadeli puzolanik (C-S-H) reaksiyon mekanizmalarını, makroskobik mühendislik performansını (UCS, CBR, plastisite, sıkışabilirlik), hacimsel kararlılığı ve çevresel-ekonomik etkileri bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Bulgular, optimum stabilizasyon performansının ağırlıkça %5-%20 LFS dozaj aralığında elde edildiğini; yüksek plastisiteli killerde %20 LFS ilavesinin UCS'yi %219 oranında artırarak 2368 kPa seviyesine çıkardığını ve konsolidasyon oturumlarını %30,5 oranında azalttığını göstermektedir. Düşük taşıma kapasiteli zeminlerde ise uygun koşullar altında %5 dozajda dahi CBR'nin bir merteye artırılabilirdiği raporlanmıştır. Buna karşılık, serbest CaO ve MgO kaynaklı gecikmeli genleşme (saf LFS'de %40'lara kadar, kil matrisinde %1'in altına düşen) en yaygın durabilite riski olarak öne çıkmaktadır. Çevresel açıdan, kil matrisinin tamponlama etkisiyle sızıntı suyunda pH değerinin 12,6'dan 9,8'e düştüğü, elektriksel iletkenliğin ise %81 azalarak 1,37 mS/cm seviyesine indiği; ağır metallerin (Pb, Cd) immobilize edildiği belirlenmiştir. Karbonatlaşma yoluyla kendi ağırlığının %9,6'sına kadar CO₂ tutabilen LFS, döngüsel ekonomi prensipleriyle uyumlu sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Mevcut bulguların, uzun süreli saha verileri, malzemeye özgü karakterizasyon protokolleri ve hibrit bağlayıcı sistemleri ile desteklenmesi gerekmektedir.

Anahtar kelimeler: Pota ocağı cürufu, Zemin stabilizasyonu, Yol altyapısı, Sürdürülebilirlik

Use of Ladle Furnace Slag in the Stabilization of Road Subgrade Soils: A Quantitative Review on Mechanisms, Performance, and Limitations

Abstract: Conventional chemical stabilization of road subgrade soils relies on binders with high carbon footprints, primarily Portland cement. This study is a systematic review that critically and quantitatively evaluates the performance of Ladle Furnace Slag (LFS), a byproduct of the steel industry, in stabilizing clayey subgrade soils. A total of 30 primary research articles on LFS were analyzed from the Web of Science, Scopus, and Google Scholar databases, along with 19 additional references for comparison with conventional and alternative binders. The review comprehensively addresses the physical, chemical, and mineralogical characterization of LFS; short-term cation exchange and medium- to long-term pozzolanic (C-S-H) reaction mechanisms; macroscopic engineering performance (UCS, CBR, plasticity, compressibility); volumetric stability; and environmental and economic impacts. The findings indicate that optimal stabilization performance is achieved at LFS dosages of 5–20% by weight. In high-plasticity clays, adding 20% LFS increases UCS by 219% to 2368 kPa and reduces consolidation settlements by 30.5%. In soils with low bearing capacity, even a 5% dosage has been reported to increase CBR by an order of magnitude under suitable conditions. However, delayed expansion caused by free CaO and MgO—reaching up to 40% in pure LFS but decreasing to below 1% within a clay matrix—emerges as the most commonly reported durability concern. From an environmental perspective, the clay matrix's buffering effect reduces leachate pH from 12.6 to 9.8 and decreases electrical conductivity by 81%, to 0.68 mS/cm, while immobilizing heavy metals such as Pb and Cd. Through carbonation, LFS can sequester up to 9.6% of its mass as CO₂, making it a sustainable alternative aligned with circular economy principles. The current findings should be supported by long-term field data, material-specific characterization protocols, and hybrid binder systems.

Keywords: Ladle furnace slag, Soil stabilization, Road infrastructure, Sustainability

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 17020, Çanakkale, Türkiye

E mail: fatihyonar@comu.edu.tr (F. YONAR)

Fatih YONAR <https://orcid.org/0000-0001-7508-3443>

Gönderi: 27 Ocak 2026

Kabul: 13 Mayıs 2026

Yayınlanma: 15 Temmuz 2026

Received: January 27, 2026

Accepted: May 13, 2026

Published: July 15, 2026

Cite as: Yonar, F. (2026). Use of ladle furnace slag in the stabilization of road subgrade soils: a quantitative review on mechanisms, performance, and limitations. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 9(4), 2132-2146.



1. Giriş

Ulaştırma altyapısının sürdürülebilirliği ve uzun vadedeki performansı, üstü yapı tabakalarından gelen dinamik trafik yüklerini taşıyan altyapı zeminlerinin mühendislik özelliklerine doğrudan bağlıdır (Dhatrak ve Kolhe, 2022). İnce taneli, yüksek plastisiteli ve şişme-büzülme potansiyeline sahip zayıf killi zeminler; düşük kayma mukavemetleri, yüksek sıkışabilirlikleri ve neme karşı hacimsel kararsızlıkları nedeniyle ciddi mühendislik zorlukları yaratmaktadır (Brand vd., 2020; Islam vd., 2024). Bu tür zeminler, karayolu kaplamalarında tekrarlı trafik yükleri altında kalıcı deformasyon, farklı oturma, çatlama ve nihai göçmelere yol açarak bakım maliyetlerini artırmakta ve altyapının ömrünü kısaltmaktadır (Arshad vd., 2021; Ghanizadeh vd., 2024; Khan vd., 2023; Abhishek vd., 2025).

Geleneksel kimyasal stabilizasyon uygulamalarında, killi zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yaygın olarak Portland çimentosu ve kireç gibi bağlayıcılar kullanılmaktadır (Abdolvand ve Sadeghiamirshahidi, 2024). Bu bağlayıcılar zemin dayanımını artırabilmekle birlikte, çimento üretimi yüksek miktarda enerji gerektirmekte ve küresel karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %8'ini oluşturarak çevresel açıdan ciddi zararlara yol açmaktadır (Andrew, 2019; Shinde, 2024; Wang vd., 2024). Sürdürülebilirlik hedefleri, artan sera gazı emisyonları ve tehlikeli atık depolama maliyetleri, geoteknik mühendislerini döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda daha düşük karbon ayak izine sahip alternatif bağlayıcı arayışına itmiştir (Wei vd., 2023; Almuaythir vd., 2024; Vakili vd., 2024).

Bu bağlamda, çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan ve sıvı çeliğin ikincil arıtım (rafinasyon) sürecinde koruyucu bir katman olarak ortaya çıkan Pota Ocağı Cürufu (Ladle Furnace Slag - LFS), zemin stabilizasyonunda geleneksel kirecin yerini alabilecek güçlü bir aday olarak öne çıkmaktadır (Sáez-de-Guinoa Vilaplana vd., 2015; Espinosa vd., 2023; Lopes vd., 2023). LFS, küresel çapta yılda yaklaşık 30 milyon ton açığa çıkan endüstriyel bir atıktır ve büyük bir kısmının atık sahalarında depolanması yeraltı suları için çevresel riskler taşımaktadır (Mahoutian ve Shao, 2016; Islam vd., 2024). LFS'nin yüksek serbest kireç ve çimentosu bileşik içeriği, malzemenin killi zeminlerin iyileştirilmesinde ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilme olasılığını ortaya çıkarmaktadır (Montenegro-Cooper vd., 2019; Espinosa vd., 2023). Ayrıca, LFS'nin soğuması sırasında yapısındaki γ -dikalsiyum silikat (γ -C₂S) fazının hacimsel dönüşümüyle LFS'nin kendiliğinden ince bir toza ufalanması (tozlaşma fenomeni; ayrıntılı mekanizma Bölüm 3.1'de) cürufa ince taneli bir yapı kazandırmaktadır (Ortega-López vd., 2014; Yıldırım ve Prezzi, 2017). İnce yapı sayesinde LFS, zemin uygulamalarında ek bir öğütme işlemine gerek kalmadan doğrudan kullanılabilen ve enerji avantajı sağlamaktadır (Ortega-López vd., 2014; Ouffa vd., 2024).

Bu derleme çalışmasının amacı, LFS'nin yol altyapı

zeminlerinin stabilizasyonundaki kullanımını; makroskobik mekanik performans (Unconfined Compressive Strength-UCS, California Bearing Ratio-CBR), mikroyapısal ve kimyasal mekanizmalar, hacimsel kararlılık ve çevresel etkiler çerçevesinde sistematik ve nicel bir yaklaşımla incelemektir (Wu vd., 2023). Çalışmada, literatürdeki mevcut veriler ışığında LFS'nin potansiyel avantajlarının yanı sıra, barındırdığı gecikmeli genleşme ve çevresel sızıntı gibi kısıtlar şeffaf bir şekilde ortaya konulmakta ve mühendislik kararlarına destek olacak ölçülebilir tasarım sınırlarının sunulması hedeflenmektedir (Manso vd., 2005; Setién vd., 2009; Wu vd., 2023).

2. İnceleme Yöntemi

Bu çalışma kapsamında Web of Science, Scopus ve Google Scholar veritabanlarında 'ladle furnace slag', 'soil stabilization', 'expansive clay' ve 'subgrade' anahtar kelimeleri kullanılarak yapılan taramalar sonucunda, belirlenen dahil etme kriterlerini karşılayan toplam 30 LFS-zemin stabilizasyonu odaklı araştırma makalesi detaylı nicel ve nitel incelemeye alınmıştır. LFS performansının Portland çimentosu, sönmüş kireç, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBS) ve uçucu kül gibi geleneksel/alternatif bağlayıcılarla nicel olarak karşılaştırılabilmesi amacıyla ek 19 araştırma kaynağı referans olarak değerlendirilmiştir. Çalışma, LFS'nin yol altyapı zeminlerinin stabilizasyonundaki kullanımını eleştirel, bütüncül ve mühendislik temelli bir bakış açısıyla değerlendirmek amacıyla sistematik bir literatür taraması olarak yapılandırılmıştır. LFS üzerine mevcut derleme makaleleri iki ana alana yoğunlaşmıştır: (i) malzemenin çimentolu sistemler ve beton katkısı olarak değerlendirilmesi (Brand ve Fanijo, 2020; Najm vd., 2021; Ouffa vd., 2024) ve (ii) temel fizikokimyasal karakterizasyonu (Jacob, 2023; Wu vd., 2023). Buna karşılık LFS'nin yol altyapı zeminlerindeki davranışını sayısal tasarım sınırları, optimum dozaj eşikleri ve geleneksel bağlayıcılarla nicel karşılaştırma çerçevesinde bütüncül biçimde değerlendiren bir derleme literatürde bulunmamaktadır. Mevcut çalışma bu boşluğu doldurmak üzere yapılandırılmıştır.

2.1. Makale Seçim Kriterleri ve Kapsam

İncelemeye dahil edilecek makalelerin belirlenmesinde, çalışmanın temel hedefleri doğrultusunda belirli dahil etme ve hariç tutma kriterleri gözetilmiştir. Bu kapsamda, literatür taraması şu ana odak alanları etrafında şekillendirilmiş ve bu başlıkları içeren çalışmalar seçilmiştir:

- **Malzeme Karakterizasyonu:** LFS'nin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerini geleneksel bağlayıcılar (Portland çimentosu, kireç) ve diğer endüstriyel atıklarla ağırlıkça nicel olarak karşılaştıran çalışmalar (Yıldırım ve Prezzi, 2017; Wang vd., 2025).
- **Zamana Bağlı Stabilizasyon Mekanizmaları:** Kısa vadeli katyon değişimi ve flokülasyon süreçleri ile orta/uzun vadeli doğrudan hidrasyon ve

puzolanik reaksiyonları (C-S-H ve C-A-S-H jel oluşumu) kimyasal denklemlerle inceleyen araştırmalar (Wei vd., 2023; Vakili vd., 2024).

- Makroskobik Mühendislik Performansı: LFS katkısının zeminlerin plastisite (Atterberg limitleri), sıkıştırılabilirlik (OMC, MDD), UCS ve CBR üzerindeki etkilerini sayısal sınırlarla ve yüzdesel artışlarla ortaya koyan deneysel makaleler (Espinosa vd., 2023; Islam vd., 2024).
- Durabilite ve Hacimsel Kararlılık: Serbest magnezyum oksit (MgO) ve serbest kireç (CaO) kaynaklı "gecikmeli genişleme" (delayed expansion) problemini, kil matrisinin bu genişlemeyi tamponlama etkisini ve konsolidasyon (oturma) karakteristiklerini analiz eden çalışmalar (Ortega-López vd., 2014; Montenegro-Cooper vd., 2019).
- Çevresel ve Ekonomik Etkiler: TCLP/SPLP testleriyle ağır metal sızıntısı (leaching), karbonatlaşma yoluyla CO₂ tutma potansiyeli ve Mekanik-Ampirik (M-E) kaplama tasarımı ile sağlanan ekonomik tabaka kalınlığı tasarruflarını ele alan araştırmalar (Bo, 2021; Korkmaz ve Dayioğlu, 2024).

Çalışma kapsamında toplanan veriler eleştirel bir değerlendirmeye tabi tutularak grafiksel sentezlere ve nicel karşılaştırma tablolarına dönüştürülmüştür. Literatürden elde edilen; UCS aralıkları, optimum LFS oranları, CBR iyileşme yüzdeleri, Atterberg limitlerindeki nicel değişimler ve konsolidasyon oturma miktarları istatistiksel eğilimleri yansıtacak şekilde tablolaştırılmıştır. Ayrıca LFS'nin zemin stabilizasyonundaki makroskobik mekanik davranışı ile mikroyapısal (taramalı elektron mikroskobu-SEM/x-ışını kırınım-XRD) evrimi ve çevresel sızıntı boyutları birbiriyle sistematik olarak ilişkilendirilerek, malzemenin potansiyeli ile barındırdığı mühendislik kısıtları net sınırlarla tanımlanmıştır.

3. LFS Karakterizasyonu ve Geleneksel Bağlayıcılarla Karşılaştırması

LFS'nin zemin stabilizasyonundaki davranışı; üretim sürecine, fizikokimyasal yapısına ve geleneksel bağlayıcılara kıyasla gösterdiği mineralojik farklılıklara dayanmaktadır. Dolayısıyla malzemenin stabilizasyon potansiyeli ve riskleri, öncelikle nicel bir karakterizasyon çerçevesinde incelenmiştir.

3.1. Üretim Süreci, Fiziksel Karakteristikler ve Tozlaşma Fenomeni

Çelik üretimi, birincil (yüksek fırın, temel oksijen fırını veya elektrik ark fırını) ve ikincil (rafinasyon) metalürji olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. LFS, sıvı çeliğin kalitesini artırmak amacıyla pota ocağında (ladle furnace) gerçekleştirilen ikincil arıtım işlemi sırasında; kükürdün ve oksijenin uzaklaştırılması, fırın refrakter astarının korunması ve safsızlıkların tutulması amacıyla ortama kireç (CaO) ile dolomit eklenmesi sonucu koruyucu bir katman olarak ortaya çıkmaktadır (Sáez-de-

Guinoa Vilaplana vd., 2015; Lopes vd., 2023).

Fiziksel özellikleri bakımından LFS'yi diğer çelik endüstrisi cürufurundan ayıran en belirgin özellik "tozlaşma" (dusting/falling slag) fenomenidir. Sıvı cürufun 1500°C'nin üzerindeki sıcaklıktan ortam sıcaklığına yavaş soğuması sırasında, yapısındaki dikalsiyum silikatın (C₂S) polimorfik dönüşümü gerçekleşmektedir. Yaklaşık 450°C-500°C seviyelerinde beta (β) fazındaki dikalsiyum silikatın, gama (γ) fazına dönüşmesiyle kristal yapıda %10'a varan hacimsel bir genişleme meydana gelmektedir (Ortega-López vd., 2014; Yıldırım ve Prezzi, 2017). İçsel genişleme, cüruf tanelerinin kendiliğinden ufalanarak ince bir toz haline gelmesine yol açmaktadır. Bu dönüşüm sayesinde LFS'nin kütlece %40 ile %70'lik kısmı 75 µm (200 numaralı elek) boyutunun altına inmektedir (Setién vd., 2009; Montenegro-Cooper vd., 2019). İnce taneli yapı, LFS'nin zemin uygulamalarında ek bir öğütme işlemine gerek kalmadan, Portland çimentosuna benzer biçimde bağlayıcı katkı olarak kullanılabilmesine olanak tanıyarak enerji ve maliyet avantajı sağlamaktadır (Ortega-López vd., 2014).

Ayrıca özgül ağırlık (G_s) açısından incelendiğinde, yüksek demir oksit içeren Elektrik Ark Ocağı cürufu 3,62 gibi yüksek bir değere sahipken, LFS'nin özgül ağırlığı genellikle 2,73 ile 2,89 aralığında olup doğal zemin tanelerine çok daha yakın bir profil sergilemektedir (Manso vd., 2005; Korkmaz ve Dayioğlu, 2024).

3.2. Kimyasal Kompozisyonun Karşılaştırması

LFS'yi çimentomsu bir bağlayıcı potansiyeline kavuşturan temel unsur, inorganik oksit içeriğidir. X-ışını floresans (XRF) analizlerine göre LFS, yüksek oranlarda kalsiyum oksit (CaO), silisyum dioksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve magnezyum oksit (MgO) içermektedir (Yıldırım ve Prezzi, 2017; Espinosa vd., 2023).

Mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen geleneksel stabilizatörler (Portland çimentosu, uçucu kül, GGBS) ve diğer endüstriyel cürufurlarla (EAF) (Jiang vd., 2018) kıyaslandığında, LFS'nin farklılıkları Tablo 1'de sunulmuştur. LFS, %45-60 bandındaki CaO içeriği ile uçucu kül (fly ash-FA) ve EAF'den üstün olup Portland çimentosuna oldukça yakın bir alkali kimyasına sahiptir. Ancak LFS'nin demir oksit (Fe₂O₃/FeO) oranı (%1-4) EAF cürufuna (%20-35) kıyasla düşüktür.

3.3. Mineralojik Kompozisyon ve Morfoloji

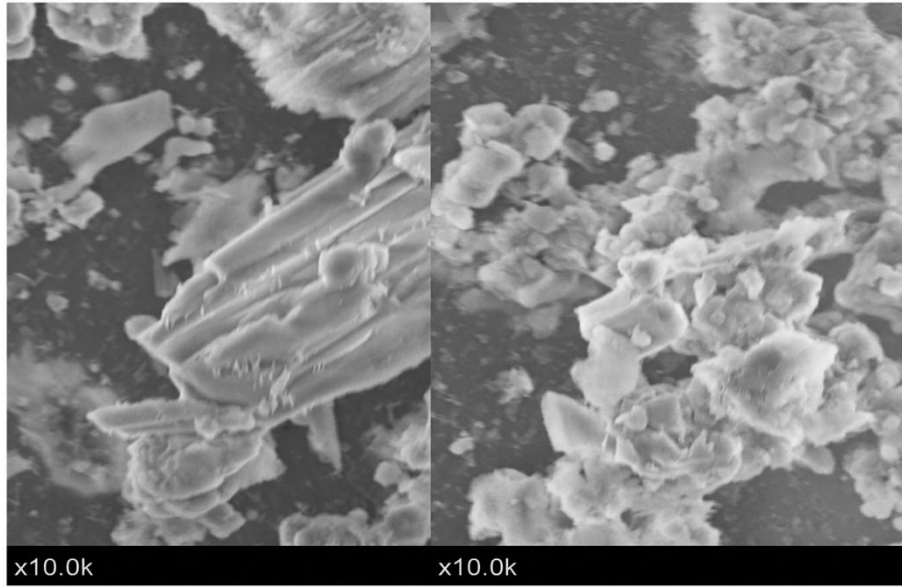
LFS'nin yüksek kalsiyum içeriği doğrudan Portland çimentosuna benzese de, mineralojik faz yapısı (XRD bulguları) stabilizasyon performansında farklılıklara neden olmaktadır. Çimentoda bağlayıcılığı sağlayan reaktif β-C₂S fazı iken, LFS'de baskın olan faz hidrolik reaktivitesi son derece düşük olan γ-dikalsiyum silikattır (γ-C₂S) (Shi, 2002; Yıldırım ve Prezzi, 2011; Araos vd., 2024). Bu durum, LFS'nin tek başına kullanıldığında Portland çimentosu kadar hızlı ve güçlü bir bağlayıcı matris oluşturmamasına neden olmaktadır. LFS'nin yapısında ayrıca; hızlı hidrate olan mayenit (C₁₂A₇), portlandit (Ca(OH)₂), kalsit (CaCO₃) ve uzun vadeli hacimsel genişleme riskine yol açan serbest periklas

(MgO) mineralleri tespit edilmektedir (Lopes vd., 2023; Ortega-López vd., 2014; Duan vd., 2024). Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri, LFS partiküllerinin köşeli, pürüzlü, düzensiz ve gözenekli bir morfolojiye (Şekil 1) sahip olduğunu ortaya koymaktadır

(Brand ve Fanijo, 2020; Aponte vd., 2020). LFS'nin bu amorf ve yüksek yüzey alanlı mikroskobik yapısı, ince taneli zemin matrisi içerisinde mekanik kilitlenmeyi artırarak zemin dayanımına yapısal bir katkı sunmaktadır.

Tablo 1. Zemin stabilizasyonunda kullanılan geleneksel bağlayıcılar ve LFS'nin ortalama kimyasal kompozisyonlarının ağırlıkça (%) karşılaştırması (Yıldırım ve Prezzi, 2017; Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024; Wang vd., 2025)

Oksit Türü	LFS	EAF Cürufu	GGBS	Sınıf F - FA	Portland Çimentosu
CaO	%45,0 - %60,0	%25,0 - %35,0	%35,0 - %45,0	%1,0 - %10,0	%60,0 - %67,0
SiO ₂	%10,0 - %25,0	%12,0 - %20,0	%30,0 - %40,0	%45,0 - %60,0	%17,0 - %25,0
Al ₂ O ₃	%5,0 - %25,0	%5,0 - %10,0	%10,0 - %16,0	%20,0 - %30,0	%3,0 - %8,0
Fe ₂ O ₃ /FeO	%1,0 - %4,0	%20,0 - %35,0	%0,2 - %2,0	%4,0 - %15,0	%0,5 - %6,0
MgO	%4,0 - %16,0	%5,0 - %12,0	%4,0 - %10,0	%1,0 - %3,0	%0,5 - %4,0



Şekil 1. LFS'nin mikroyapısı (Sarti vd., 2024).

3.4. Geleneksel Bağlayıcılarla Sayısal Performans Karşılaştırması

LFS, Portland çimentosu, sönmüş kireç, GGBS ve uçucu kül gibi geleneksel ve alternatif bağlayıcılarla performans açısından konumunu nicel olarak ortaya koyabilmek amacıyla, literatürde killi zeminler üzerinde raporlanan UCS, CBR ve hacimsel kararlılık verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bağlayıcı türüne bağlı olarak optimum dozaj aralıklarının belirgin şekilde farklılaştığı görülmekte olup, Portland çimentosu için ağırlıkça %4–8, sönmüş kireç için %2–6, LFS için %5–20, GGBS (alkali aktivatörlü veya LFS ile aktive edilmiş sistemlerde) için %10–30 ve uçucu kül için %6–15 aralığında, genellikle %6 kireç ilavesiyle birlikte kullanım yaygındır.

UCS performansı bakımından LFS'nin uygun dozaj ve kür koşullarında Portland çimentosu ile rekabet edebilir seviyelere ulaştığı görülmektedir. İslam vd. (2024), %20 LFS kullanımı ile UCS değerinin 742 kPa'dan 2368 kPa'a yükseldiğini rapor ederken, Espinosa vd. (2023) %5 LFS içeren karışımlarda 90 günlük kür sonunda 1612 kPa

değerine ulaştığını (yaklaşık %188 artış) bildirmiştir. Buna karşılık Portland çimentosu %6 dozajda 28 günlük kür sonunda yaklaşık 2200 kPa (Mostafa vd., 2024) ve 28–180 gün aralığında 910 kPa'dan 2840 kPa'a ulaşan dayanım gelişimi göstermektedir (Wang vd., 2025). Sönmüş kireç ile stabilize edilen zeminlerde %2 dozajda 90 günlük UCS değeri 945 kPa olarak raporlanmıştır (Espinosa vd., 2023). GGBS esaslı sistemlerde ise yaklaşık %20 bağlayıcı içeriği ile 28 günde ~1700 kPa seviyesine ulaşıldığı ve uzun süreli kürlenme ile 3310 kPa'a kadar çıktığı belirtilmektedir (Xu ve Yi, 2019; Wang vd., 2025).

CBR performansı açısından LFS'nin özellikle sönmüş kireç ile benzer davranış sergilediği dikkat çekmektedir. Aynı zayıf zemin üzerinde Espinosa vd. (2023), %2 kireç ile %70,4 ve %5 LFS ile %74 CBR değerleri elde etmiştir. Benzer şekilde Lopes vd. (2023), %15 LFS kullanımı ile killi zeminlerde CBR değerinin %8'den %44'e, kumlu zeminlerde ise %7'den %140'a yükseldiğini raporlamıştır. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde,

LFS'nin çimento üretimine kıyasla önemli avantajlar sunduğu görülmektedir. Portland çimentosunun yaklaşık 0,9 ton CO₂/ton karbon ayak izine sahip olduğu dikkate alındığında, LFS'nin endüstriyel yan ürün olarak değerlendirilmesi ve karbonatlaşma sürecinde kendi kütlelerinin yaklaşık %9,6'sı oranında CO₂ tutabilmesi önemli bir sürdürülebilirlik avantajı oluşturmaktadır (Bo, 2021).

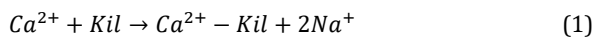
Hacimsel kararlılık, LFS kullanımında ayırt edici temel parametrelerden biridir. Saf LFS için ASTM D4792 kapsamında %38-40 seviyelerine ulaşabilen potansiyel genleşme değerleri raporlanmış olmakla birlikte (Ortega-López vd., 2014; Montenegro-Cooper vd., 2019), %5-20 aralığında kil matrisi içerisinde kullanıldığında genleşmenin %1'in altına düştüğü ve bu durumun Portland çimentosu ve GGBS sistemleri ile karşılaştırılabilir bir performans sunduğu belirtilmektedir (Espinosa vd., 2023; Lopes vd., 2023). Sönmüş kireç kullanımı, doğal zeminde %1,37 olarak ölçülen ödometre şişmesini %2 dozaj ile %1,22 seviyesine düşürmektedir (Espinosa vd., 2023). GGBS bazlı sistemlerde ise 15 donma-çözülme çevrimi sonrasında %3,16 düzeyinde düşük genleşme değerleri elde edilmiştir (Wang vd., 2025). Bununla birlikte, Parsaei vd. (2021), LFS'nin doğrudan Portland çimentosu ile birlikte kullanımının gecikmeli etrenjit oluşumu ve serbest CaO reaksiyonları nedeniyle şişme riskini artırabileceğini göstermiştir. Buna karşın, LFS-GGBS ikili sistemlerinin 56 günlük kür sonunda Portland çimentosu ile karşılaştırılabilir dayanım sağladığı raporlanmaktadır (Xu ve Yi, 2019).

4. LFS - Kil Etkileşiminde Stabilizasyon Mekanizmaları

LFS gibi inorganik yan ürünlerin zayıf killi zeminlere karıştırılmasıyla, zeminin mühendislik özelliklerini (plastisite, şişme potansiyeli ve taşıma gücü) değiştiren bir dizi fizikokimyasal reaksiyon başlamaktadır. Literatürdeki güncel yaklaşımlar doğrultusunda, LFS stabilizasyonunun tek aşamalı bir süreç olmadığı; sürece göre kısa, orta ve uzun vadeli mekanizmalardan oluşan karmaşık bir reaksiyon ağı barındırdığı görülmektedir.

4.1. Kısa Vadeli Fizikokimyasal Reaksiyonlar: Katyon Değişimi ve Flokülasyon

Killi zeminler, özellikle montmorillonit gibi yüksek şişme potansiyeline sahip olanlar, negatif yüklü kil plakalarından oluşmaktadırlar ve bu plakalar aralarında sodyum (Na⁺) veya potasyum (K⁺) gibi tek değerli katyonlar ile su moleküllerini tutarlar (Vakili vd., 2024). LFS, zemin ve su ile karıştırıldığında, içerdiği serbest kireç (CaO) hızla çözünerek ortamın pH seviyesini 11-12 seviyelerine çıkarır ve ortama yüksek değerlikli kalsiyum (Ca²⁺) iyonları salar (Espinosa vd., 2023). Bu süreçte gerçekleşen kimyasal yer değiştirme işlemi reaksiyon 1 ile ifade edilmektedir (Vakili vd., 2024).

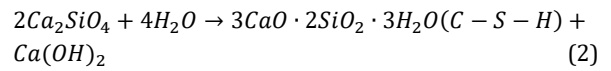


Konsantrasyonu yüksek olan Ca²⁺ iyonları, zayıf tek

değerli iyonların yerini alarak kil partiküllerinin etrafındaki elektriksel çift tabakanın (diffused double layer) kalınlığını daraltır (Wei vd., 2023). Çift tabakanın daralmasıyla elektrostatik itme kuvvetleri azalır ve kil zerreleri kenar-yüzey (edge-to-face) teması kurarak "flokülasyon ve aglomerasyon" adı verilen süreçle daha iri, granüler toplara dönüşür (Wei vd., 2023). Birkaç saat ile birkaç gün içinde tamamlanan bu mekanizma, zemin plastisitesinin azalmasına, işlenebilirliğin artmasına ve şişme potansiyelinin mekanik olarak baskılanmasına doğrudan katkı sağlar (Espinosa vd., 2023).

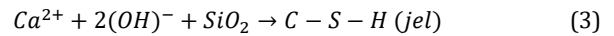
4.2. Orta ve Uzun Vadeli Etkiler: Doğrudan Hidratasyon ve Puzolanik Reaksiyonlar

Geleneksel Portland çimentosuna benzer şekilde, LFS bileşiminde larnit (β-C₂S) ve mayenit (C₁₂A₇) gibi kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat fazları barındırır. Su ile temas anında bu bileşikler doğrudan hidrate olarak LFS'ye sınırlı düzeyde de olsa kendiliğinden çimentolaşma (self-cementing) özelliği kazandırır (Espinosa vd., 2023). Bu erken/orta dönem hidratasyon sürecinin temel denklemi reaksiyon 2'de sunulmuştur (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024; Jiang vd., 2022).

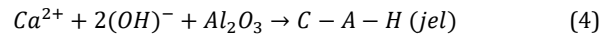


Zemin stabilizasyonunda asıl yüksek mekanik dayanımı sağlayan mekanizma ise aylar sürebilen uzun vadeli puzolanik reaksiyonlardır. LFS'nin hidratasyonuyla açığa çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂), kil minerallerinin (montmorillonit, kaolinit) kristal kafeslerini çözerek ortamda reaktif silika (SiO₂) ve alüminanın (Al₂O₃) serbest kalmasını tetikler (Vakili vd., 2024). Serbest kalan bu bileşenler, kalsiyum iyonlarıyla birleşerek ikincil ve kalıcı sementasyon ürünlerini (jelleri) oluşturur (reaksiyon 3-5) (Vakili vd., 2024; Wei vd., 2023):

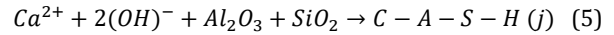
Kalsiyum Silikat Hidrat Oluşumu:



Kalsiyum Alüminat Hidrat Oluşumu:



Kalsiyum Alümino-Silikat Hidrat Oluşumu:

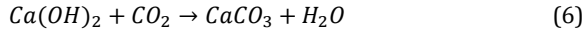


Oluşan jeller, bir ağ gibi zemin taneciklerini sararak boşlukları doldurur ve zemin matrisini zamanla sertleşen monolitik bir yapıya dönüştürür (Wang vd., 2024).

4.3. Uzun Vadeli Genleşme ve Karbonatlaşma Reaksiyonları

LFS kullanımındaki en kritik risk faktörü, "gecikmiş hacimsel genleşme" (delayed expansion) fenomenidir (Ortega-López vd., 2014). LFS içerisindeki serbest magnezyum (Periklas - MgO) ve kalsiyum oksit (CaO), atmosferik karbondioksit (Reaksiyon 6, Vakili vd., 2024) ve nem ile çok yavaş bir reaksiyona girerek hacimsel büyümeler yaratabilen brusit (Mg(OH)₂) ve hidromanyezit gibi fazlara dönüşür (Montenegro vd., 2013).

Karbonatlaşma süreci (reaksiyon 6):



Bu genleşmenin %5-%20 LFS dozajlarında kil matrisi tarafından tamponlanma mekanizması Bölüm 6.1'de detaylandırılmaktadır (Montenegro vd., 2013; Lopes vd., 2023). Literatürdeki birbirinden farklı mekanizmaları derleyen bütüncül reaksiyon ağı Tablo 2 ve Şekil 2'de özetlenmiştir.

5. Geoteknik ve Mekanik Performans

Önceki bölümlerde detaylandırılan katyon değişimi, flokülasyon ve puzolanik reaksiyon mekanizmaları, zeminlerin makroskobik düzeydeki fiziksel ve mekanik davranışlarını doğrudan değiştirmektedir. Bu bölüm, LFS'nin killi zeminlerin plastisite (Atterberg limitleri), sıkışabilirlik (Proctor parametreleri), UCS ve CBR gibi temel mühendislik parametreleri üzerindeki nicel etkilerini laboratuvar verileri ve istatistiksel artış oranlarıyla analiz etmektedir.

5.1. Plastisite ve Sıkışabilirlik

Killi zeminlerin su muhtevasına karşı gösterdiği hacimsel hassasiyet, Likit Limit (LL), Plastik Limit (PL) ve bu ikisi arasındaki fark olan Plastisite İndeksi (PI) ile ölçülmektedir. LFS eklendiğinde açığa çıkan kalsiyum iyonlarının çift tabakayı daraltması, kilin su tutma kapasitesini düşürerek zeminin işlenebilirliğini artırmaktadır.

Literatürdeki veriler incelendiğinde; Islam vd. (2024) tarafından yüksek plastisiteli bir kil (CH) üzerinde yapılan çalışmada, işlenmemiş zeminin %29,52 olan Plastisite İndeksi (PI), ağırlıkça %35 oranında LFS ilavesiyle %13,47'ye inerek yarı yarıya azalmıştır. Düşüş,

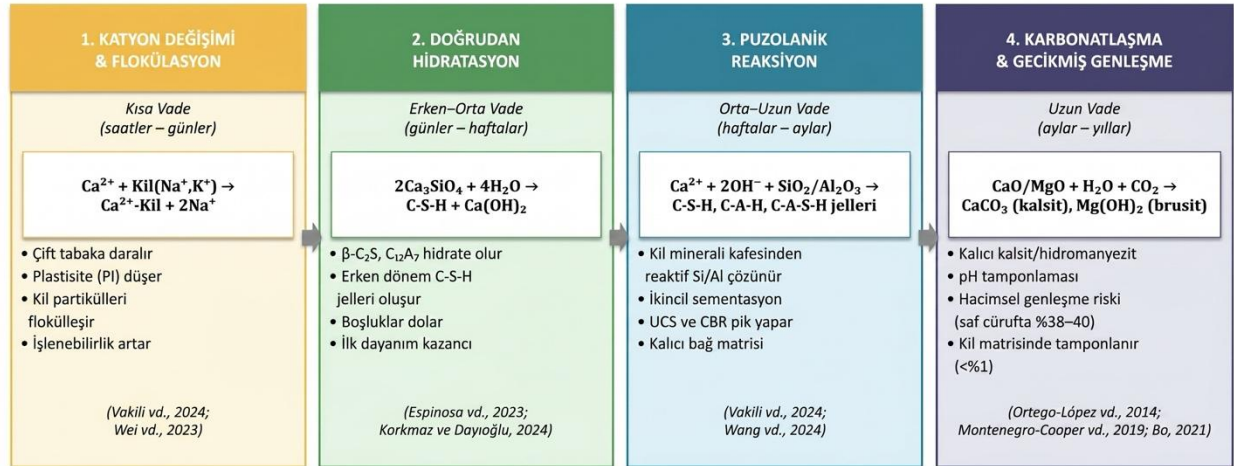
zeminin Casagrande sınıflandırmasında "Yüksek Plastisiteli Kil (CH)" statüsünden, mühendislik açısından çok daha elverişli olan "Düşük Plastisiteli Kil (CL)" statüsüne geçmesini sağlamıştır. Benzer şekilde Espinosa vd. (2023 ve 2025) yıllarında gerçekleştirdikleri çalışmalarda %5 oranında LFS kullanımının bile zeminlerin PI değerlerinde kayda değer bir düşüş yarattığını ve arazideki işlenebilirliği artırdığını sayısal modellerle göstermiştir.

Islam vd. (2024)'ün killi zeminler üzerinde ağırlıkça %5, %15, %20 ve %35 LFS dozajlarıyla yürüttüğü sistematik program, sıkıştırma davranışının LFS oranıyla doğrusal olmayan bir seyir izlediğini ortaya koymaktadır. Tablo 3'te de görüldüğü üzere MDD, ağırlıkça %15 LFS seviyesine kadar yükselmekte, bu noktayı aştıktan sonra hafifçe gerilemekte; ancak tüm dozajlarda işlenmemiş zemin değerinin (17,36 kN/m³) üzerinde kalmaktadır. OMC ise LFS'nin yüksek su emme kapasitesi nedeniyle dozajla birlikte monoton biçimde yükselerek %16,50'den %23,60'a çıkmaktadır. Atterberg limitleri açısından artan LFS oranı, LL ve PI değerlerini sürekli düşürerek zemini Casagrande sınıflandırmasında "Düşük Plastisiteli Kil (CL)" statüsüne yaklaştırmaktadır. Bu nicel bulgular, Brand vd. (2020)'nin kaolinit kili üzerindeki "OMC ve MDD birlikte artar" gözlemiyle uyumlu, Lopes vd. (2023)'ün ince öğütülmüş LFS ile saptadığı "OMC azalma eğilimi" bulgusuyla ise zıttır; dolayısıyla sıkıştırma davranışının yalnızca dozajla değil, partikül inceliği, mineralojik kompozisyon ve zemin tipiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini bir kez daha desteklemektedir.

Tablo 2. LFS-Kil etkileşiminde gerçekleşen faz dönüşümleri, zamana bağlı mekanizmalar ve mühendislik etkileri (Ortega-López vd., 2014; Wang vd., 2024; Vakili vd., 2024)

Reaksiyon Türü	Hedef Mineral / İyon	Giren Bileşenler	Ana Reaksiyon Ürünü	Fiziksel ve Mühendislik Etkisi
Katyon Değişimi	Montmorillonit, İllit	LFS (Ca ²⁺) + Zemin (Na ⁺ , K ⁺)	Kalsiyum-Kil Kompleksi	Çift tabaka kalınlığı azalır, plastisite düşer, hızlı flokülasyon (Kısa Vade).
Doğrudan Hidratasyon	Larnit (C ₂ S), Mayenit	Dikalasium Silikat + H ₂ O	C-S-H Jelleri	Erken dönem dayanım artışı, boşlukların doldurulması (Erken-Orta Vade).
Puzolanik Reaksiyon	Çözünmüş Silika ve Alümina	Ca ²⁺ + OH ⁻ + SiO ₂ / Al ₂ O ₃	C-S-H ve C-A-H Jelleri	Uzun dönemde UCS ve CBR taşıma kapasitesinde artış (Orta-Uzun Vade).
Karbonatlaşma ve Genleşme	Serbest CaO ve MgO	Ca(OH) ₂ + Mg(OH) ₂ + CO ₂	Kalsit (CaCO ₃), Hidromanyezit	Kalıcı katı faz oluşumu, pH tamponlaması, yüksek hacimsel genleşme riski (Uzun Vade).

ZAMAN →



Şekil 2. LFS ile stabilize edilen killi zeminlerde gerçekleşen zamana bağlı reaksiyon mekanizmalarının şematik gösterimi.

Tablo 3. LFS katkısının killi zeminlerin plastisite ve sıkışma parametrelerine etkisi (Brand vd., 2020; İslam vd., 2024)

Zemin Tipi ve LFS Oranı	LL	PI	OMC	MDD
Kontrol Kili (İşlenmemiş)	%51,32	%29,52	%16,50	17,36 kN/m ³
Kil + %5 LFS	%52,17	%30,34	%17,30	17,56 kN/m ³
Kil + %15 LFS	%44,81	%22,80	%19,80	19,03 kN/m ³
Kil + %20 LFS	%42,58	%20,52	%20,10	18,84 kN/m ³
Kil + %35 LFS	%36,53	%13,47	%23,60	18,25 kN/m ³
Kontrol Kili (Brand vd.)	-	-	%13,70	17,82 kN/m ³
Kil + %15 LFS (Brand vd.)	-	-	%15,00	18,10 kN/m ³

5.2. Dayanım ve Taşıma Kapasitesi

LFS'nin zemin içerisindeki puzolanik reaksiyon potansiyelini (C-S-H ve C-A-H jel oluşumu) makroskobik boyutta gösteren en net parametreler UCS ve CBR değerlerindeki değişimlerdir. Literatür, optimum LFS oranının (genellikle ağırlıkça %5 ila %20 aralığında) kullanımıyla dayanımda artışlar sağlandığını nicel olarak doğrulamaktadır.

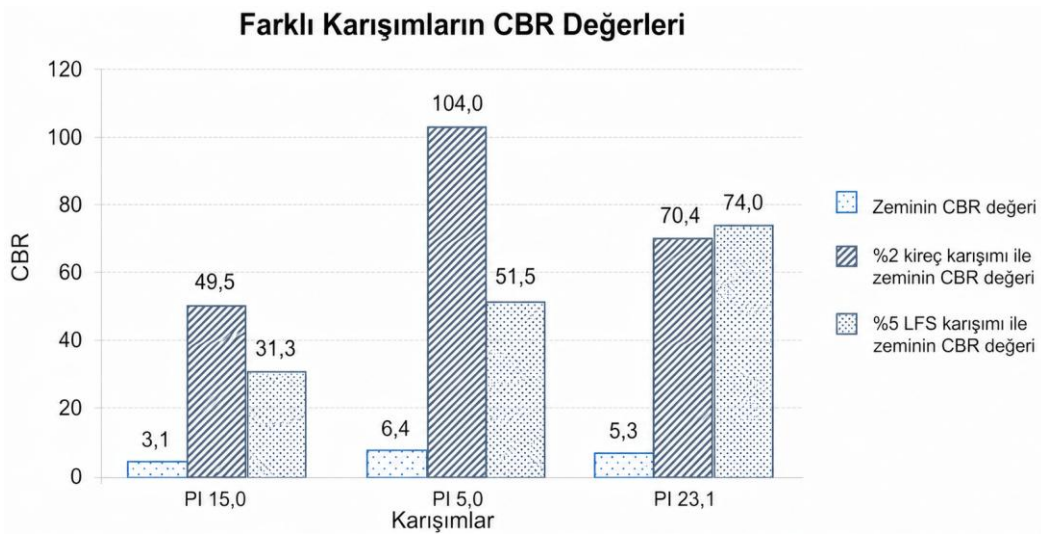
İslam vd. (2024) tarafından yapılan deneylerde, orijinal zeminin UCS değeri 742,76 kPa iken, %20 LFS ilavesi ve kürlenme sonrasında numunenin UCS değeri 2368,51 kPa'ya çıkmış ve %219 oranında bir artış kaydetmiştir. LFS miktarının %20'yi aşması (örneğin %25-%35 aralığı) durumunda ise UCS değerlerinin 1334-1450 kPa bandına gerilediği ve "optimum dozaj" kavramının aşılmaması gerektiği vurgulanmıştır. Espinosa vd. (2023) ise %5 LFS ilavesinin bile, 90 günlük kürlenme sonucunda SB tipi kilde UCS değerini 559 kPa'dan 1612 kPa'ya çıkararak %188 oranında net bir iyileşme sağladığını göstermiştir. Yol altyapısı ve temel dolgularının tasarımında en kritik belirleyici olan CBR indeksinde de benzer kazanımlar mevcuttur. Espinosa vd. (2023), %5,3 CBR değerine sahip zayıf kilin, %5 LFS ilavesiyle %74 CBR seviyesine ulaştığını gözlemlemiştir (Şekil 3). Bu artış, LFS-kil matrisinin taşıma kapasitesi bakımından yol alttemel

tabakası seviyesine çıktığını göstermektedir. Lopes vd. (2023) ise %15 LFS ilavesiyle kumlu zeminlerde tanecikler arası puzolanik köprülerin yarattığı güçlü "mekanik kilitleme" sayesinde CBR'nin %7'den %140'a çıktığını gözlemlemiştir (Tablo 4).

Buna karşın derlenen çalışmalar arasında yöntemsel farklılıklar belirgindir: kürlenme süreleri 7 ile 90 gün arasında değişmekte (İslam vd., 2024; Espinosa vd., 2023), zemin tipleri yüksek plastisiteli kilden (CH) kumlu zemine (SC) kadar geniş bir yelpazeye yayılmakta (Lopes vd., 2023), LFS partikül boyutu ve mineralojisi tesisten tesise farklılık göstermekte (Setién vd., 2009; Manso vd., 2005) ve dozaj aralıkları %2,5 ile %35 arasında dağılmaktadır (Lopes vd., 2023; İslam vd., 2024). Bu yöntemsel heterojenlik, sayısal değerlerin doğrudan karşılaştırılmasını sınırlandırmakta ve genel bir "performans aralığı" tanımlamayı zorlaştırmaktadır; mevcut bulgular yalnızca eğilimsel referans olarak değerlendirilmelidir.

Tablo 4. LFS stabilizasyonunun farklı zemin türlerinde UCS ve CBR etkileri (Espinosa vd., 2023; Lopes vd., 2023; İslam vd., 2024)

Araştırmacı / Zemin Tipi	Optimum LFS Oranı ve Kür	Serbest Basınç Dayanımı (UCS) Artışı	CBR Artışı
İslam vd. (2024) Yüksek Plastisiteli Kil	%20 LFS	742 kPa'dan 2368 kPa'ya	%37,0'dan %54,4'e
Espinosa vd. (2023) SB Tipi Kil	%5 LFS (90 Gün)	559 kPa'dan 1612 kPa'ya	Belirgin artış (>%30)
Espinosa vd. (2023) Zayıf Kil	%5 LFS	>1000 kPa	%5,3'ten %74'e
Lopes vd. (2023) Killi Zemin	%15 LFS (56 Gün)	453 kPa	%8'den %44'e
Lopes vd. (2023) Kumlu Zemin	%15 LFS (56 Gün)	727 kPa	%7'den %140'a



Şekil 3. Farklı PI değerine sahip zeminlere uygulanan kireç ve LFS sonucu elde edilen CBR değerleri (Espinosa vd., 2023).

6. Durabilite, Hacimsel Kararlılık ve Konsolidasyon

LFS ile stabilize edilen zeminlerin mühendislik açısından değerlendirilmesinde, kısa vadeli mekanik performans kazanımları kadar, uzun vadeli durabilite ve hacimsel kararlılık da belirleyici rol oynamaktadır. Yol altyapılarında kullanılan zeminler, hizmet ömrü boyunca tekrarlı trafik yüklerinin yanı sıra çevresel faktörlere sürekli olarak maruz kaldıkları için, malzemenin konsolidasyon ve genleşme davranışının analiz edilmesi zorunludur.

6.1. Serbest Oksitler ve Gecikmiş Genleşme Problemi

LFS'nin zemin stabilizasyonunda kullanımını sınırlandıran en temel mühendislik problemi, yapısında barındırdığı serbest CaO ve MgO'nun (Bölüm 4.3'te tanımlanan periklas dahil) su ile girdiği yavaş hidrasyon reaksiyonlarıdır. Çelik rafinasyonu sırasında yüksek sıcaklıklarda oluşan periklas, atmosferik nem veya zemin suyu ile reaksiyona girerek aylar hatta yıllar sürebilen bir süreçte brüst (Mg(OH)₂) mineraline dönüşür (Montenegro vd., 2013). Brüst mineralinin oluşumu ve

ardından havadaki karbondioksit ile tepkimeye girerek hidromanyezit fazına geçmesi, katı faz hacminde mikro ölçekte %200 ila %800 arasında bir artışa neden olmaktadır.

ASTM D4792 potansiyel genleşme testleri (ASTM, 2019), bu hacimsel artışın saf (katkısız) LFS numunelerinde %38'e varan boyutlara ulaşabildiğini ortaya koymuştur (Ortega-López vd., 2014). Ancak, LFS'nin killi zeminlerle %5 ila %20 gibi optimize edilmiş oranlarda karıştırılarak kullanılması durumunda kontrol altına alınabilmektedir. Killi zeminlerin barındırdığı makro ve mikro boşluklar, genleşen magnezyum bileşiklerini kendi iç yapısında absorbe ederek dışarıya yansıyan hacimsel büyümeyi başarılı bir şekilde sönmlemektedir. Hatta bu boşlukların içeriden genleşme ürünleri tarafından doldurulması, zeminin dışarıdan su almasını fiziksel olarak bloke ederek stabilizasyonun durabilitesine dolaylı olarak olumlu katkı sağlamaktadır (Lopes vd., 2023).

Buna ek olarak, LFS'den açığa çıkan kalsiyum iyonlarının kil partiküllerini topaklaması (flokülasyon), yüksek plastisiteli killerin kendi doğal şişme (swelling)

potansiyellerini de nicel olarak baskılamaktadır (Parsaei vd., 2021). Alkali aktivatörlü LFS (geopolimer) katkısının, şişen killerin doğal kabarma eğilimini kalıcı biçimde düşürdüğü ve genleşme kaynaklı tahribatı büyük ölçüde ortadan kaldırdığı belirlenmiştir (Islam vd., 2025).

Bununla birlikte Parsaei vd. (2021), kil-LFS-çimento üçlü sisteminde matris tamponlama etkisinin gözlenmediğini, aksine LFS dozajındaki artışın gecikmeli etrenjit ve serbest CaO reaksiyonları sebebiyle şişme potansiyelini yükselttiğini raporlamıştır. Bu çelişkili bulgu, "kil her durumda tamponlar" yaklaşımının yalnızca LFS-kil ikili sisteminde geçerli olabileceğine; çimento ya da sülfat içeren ortamlarda tamponlama mekanizmasının kaybolabileceğine işaret etmekte ve mevcut literatürdeki tamponlama varsayımlarının değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

6.2. Konsolidasyon Karakteristikleri ve Sıkışabilirlik İndeksi

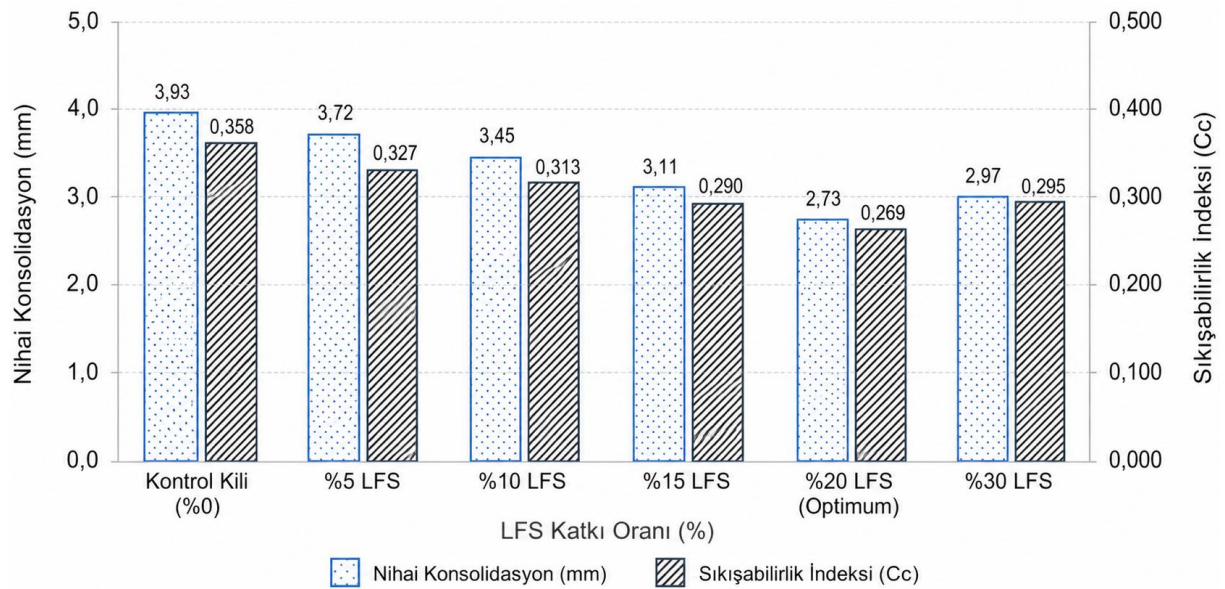
Zayıf killerin üzerine inşa edilecek yol dolguları ve

temeller için uzun vadeli oturma miktarı kritik bir tasarım parametresidir. LFS ile gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar ve C-S-H jel oluşumu, zemin iskeletinin rijitliğini artırarak sıkışabilirliği azaltmaktadır (Islam vd., 2024).

Islam vd. (2024) tarafından yüksek plastisiteli kil üzerinde yapılan tek boyutlu konsolidasyon testleri, LFS'nin oturma üzerindeki etkisini açık biçimde göstermektedir. İşlenmemiş kilin 3,93 mm olan konsolidasyon oturması, optimum oran olan %20 LFS ilavesiyle 2,73 mm'ye inmiş ve oturma miktarında %30,5 oranında net bir azalma sağlanmıştır. Benzer şekilde, zeminin yük altında ne kadar sıkışacağını ifade eden Sıkışabilirlik İndeksi (C_c) de 0,358'den 0,269'a gerilemiştir (Tablo 5, Şekil 4). Düşüşler, LFS kullanımının killi zeminlerdeki konsolidasyon kaynaklı farklı oturma risklerini bertaraf edebilecek yapısal rijitlik sunduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 5. LFS katkısının zemin konsolidasyon parametrelerine etkisi (Islam vd., 2024).

LFS Katkı Oranı (%)	Nihai Konsolidasyon (mm)	Sıkışabilirlik İndeksi (C_c)
Kontrol Kili (%0)	3,93	0,358
%5 LFS	3,72	0,327
%10 LFS	3,45	0,313
%15 LFS	3,11	0,290
%20 LFS (Optimum)	2,73	0,269
%30 LFS	2,97	0,295



Şekil 4. LFS katkı oranına bağlı olarak nihai konsolidasyon ve sıkışabilirlik indeksi değişimi (Islam vd., 2024).

7. Uygulamaya Yönelik Tasarım Kriterleri ve Optimizasyon

LFS'nin killi zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmedeki başarıları laboratuvar ölçeğinde gözlemlenmiş olsa da, malzemenin barındırdığı mineralojik değişkenlik ve gecikmiş genleşme riskleri,

saha uygulamaları için kesin ve ölçülebilir tasarım sınırlarının belirlenmesini zorunlu kılmaktadır (Wu vd., 2023). Literatürdeki bulgular ışığında, LFS'nin yol altyapı zeminlerinde güvenle kullanılabilmesi için aşağıdaki tasarım kriterleri ve optimizasyon sınırları tanımlanmıştır (Tablo 6).

7.1. Optimum Katkı Oranı (Dozaj) Sınırları

LFS'nin zemin içerisindeki bağlayıcı performansı dozajın artması ile doğru orantılı değildir. Aşırı cüruf kullanımı zemin matrisinde ince tane oranını gereksiz yere artırarak işlenebilirliği zorlaştırmakta ve dayanımı düşürmektedir (Lopes vd., 2023). Bu sınırlar yorumlanırken çalışmalar arasındaki dozaj-performans ilişkisindeki tutarsızlıklara dikkat edilmelidir: İslam vd. (2024) %20 LFS'yi zirve UCS olarak raporlarken, Espinosa vd. (2023) %5 LFS'nin bile zayıf killerde 14 kat CBR artışı sağladığını göstermiş; Lopes vd. (2023) ise kumlu zeminlerde %15 LFS optimumunu önermiştir. Bu farklılıklar, optimum dozajın zemin mineralojisi, başlangıç plastisitesi ve kürlenme süresine bağlı bir değişken olduğuna ve genel bir tasarım yaklaşımı geliştirilemeyeceğine işaret etmektedir; saha uygulamasında zemin-spesifik dozaj kalibrasyonu zorunludur.

- Optimum Kullanım Aralığı: Mevcut analizler, LFS'nin killi zeminlerdeki optimum stabilizasyon oranının ağırlıkça %5 ile %20 aralığında sınırlandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır (İslam vd., 2024; Espinosa vd., 2025).
- Dayanım Düşüş Sınırı: Tablo 4'te özetlendiği üzere yüksek plastisiteli (CH) killerde optimum doza (%20) karşılık UCS zirve yapmakta, %25-35 bandına çıktığında dayanım belirgin biçimde gerilemektedir (İslam vd., 2024). Bu bulgu, en azından yüksek plastisiteli killerde %20 dozajının pratik bir üst eşik olarak değerlendirilebileceğini göstermekle birlikte; farklı mineraloji ve plastisite seviyelerinde optimum dozun değişebileceği (Bölüm 7.1) dikkate alınarak bu sınır genel bir kural olarak değil, zemin tipine göre kalibre edilmesi gereken bir referans olarak benimsenmelidir.
- Düşük Plastisiteli Killerde Sınır: Daha düşük taşıma kapasitesine sahip zayıf killerde ise %5 LFS ilavesi dahi CBR'yi %5,3'ten %74'e çıkarmaya yetmekte olup, bu tür zeminlerde %5-%10 aralığı ekonomik ve teknik açıdan optimal tasarım sınırı olarak hedeflenmelidir (Espinosa vd., 2023).

7.2. Hacimsel Kararlılık: Serbest CaO/MgO ve Genleşme Limitleri

LFS kullanımındaki en kritik risk faktörü olan serbest CaO ve MgO, "gecikmiş genleşme" yaratarak üstyapıya zarar verebilmektedir (Ortega-López vd., 2014). Uygulamaya yönelik hacimsel tasarım kriterleri şu şekilde belirlenmelidir:

- Genleşme Toleransı: Bölüm 6.1'de detaylandırıldığı üzere saf LFS'nin %38,6-%40,8 bandındaki ASTM D4792 potansiyel genleşmesi (Montenegro-Cooper vd., 2019), kil matrisinde %5-%20 dozajlarında %1'in altına inebilmektedir (Montenegro vd., 2013). Mühendislik tasarımlarında nihai karışımın genleşme limiti standart yol toleranslarını (<%1-2) aşmamalıdır.
- Kimyasal Müdahale Sınırları: Serbest MgO içeriği

yüksek olan (ve genleşme riski kil matrisi ile sönümlenemeyen) aşırı reaktif LFS partileri için ek tasarım önlemleri alınmalıdır. Literatür, genleşme limitlerini baskılamak için LFS-zemin karışımına ağırlıkça %5 ile %10 oranında C Sınıfı Uçucu Kül (Class C Fly Ash) eklenmesini (Yıldırım ve Prezzi, 2017) veya malzemenin basınçlı CO₂ altında (örneğin 100 kPa basınçta 56 saat) karbonatlaşma işlemine tabi tutularak MgO'nun hacimsel olarak kararlı kalsit ve magnezyum karbonata dönüştürülmesini güçlü bir tasarım kriteri olarak önermektedir (Bo, 2021).

7.3. Çevresel Uygunluk ve Sızıntı Sınırları

LFS'nin yüksek alkalitesi ve içerdiği iz elementler, malzemenin çevresel EPA/TCLP (Environmental Protection Agency/Toxicity Characteristic Leaching Procedure) standartlarına göre optimize edilmesini gerektirmektedir (Wu vd., 2023).

- pH ve Elektriksel İletkenlik Kriteri: Saf LFS sızıntı suyunun pH değeri 12,6, Elektriksel İletkenlik (Electrical Conductivity-EC) değeri ise 7,22 mS/cm gibi çok yüksek bir seviyededir (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024). Tasarım kriteri olarak, malzemenin sadece doğal kil ile karıştırılması şart koşulmalıdır; zira kilin doğal tamponlama özelliği sayesinde EC değeri %81 düşüşle 1,37 mS/cm'ye, pH ise 9,8 seviyelerine inerek çevresel olarak güvenli (aşırı alkalileşme tehdidi olmayan) limitlere yerleşmektedir (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024).
- Toksikite İmmobilizasyon Sınırı: Uygulama sahasında karışımın sızıntı suundaki Alüminyum (Al) konsantrasyonu <0,5 mg/L sınırının altında kalmalı (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024), diğer toksik ağır metaller (Pb, Cd) ise "Tespit Edilemedi (below detection limit-BDL)" seviyelerinde tutulmalıdır (İslam vd., 2024).

8. İleri Mühendislik Tasarımı, Ekonomik Fizibilite ve Sürdürülebilirlik

LFS'nin killi zeminlerde laboratuvar ölçeğinde sağladığı taşıma kapasitesi (CBR) ve dayanım artışlarının makroekonomik fizibilitesi, yol üstyapı tasarımlarında tabaka kalınlıklarından elde edilen tasarruflarla doğrudan ilişkilidir (Mostafa vd., 2024). Dolayısıyla LFS kullanımının sadece çevresel bir atık değerlendirme yöntemi olmadığı, aynı zamanda ileri mühendislik tasarımlarında ciddi maliyet avantajları sağlayan yapısal bir unsur olduğu görülmektedir (Wu vd., 2023).

8.1. Mekanik-Ampirik Kaplama Tasarımı ve Kalınlık Tasarrufları

Yol üstyapı tasarımında zeminlerin esneklik modülü (Mr), trafik yükleri altındaki performansı ve yorulma ömrünü belirleyen en kritik değişkendir (İslam vd., 2025). İslam vd. (2025), LFS tabanlı geopolimer katkısı ile şişen kilin CBR değerinin %50 seviyelerine çıkmasıyla esneklik modülünde artış elde edildiğini doğrulamış ve

KENPAVE yazılımı ile mekanik-empirik (M-E) bir kaplama tasarımı modellemiştir. Analiz sonuçları ekonomik açıdan çarpıcı bir tablo ortaya koymaktadır. Geleneksel yol tasarımında zayıf zemin üzerine 20 cm kalınlığında alttemel tabakası inşa edilmesi gerekirken, zemin LFS ile stabilize edildiğinde stabilizasyon tabakasının sağladığı yüksek rijitlik sayesinde 20 cm'lik alttemel ihtiyacı ortadan kalkmış ve tasarımdan çıkarılmıştır (Islam vd., 2025). Benzer şekilde

Mostafa vd. (2024), AASHTO yönergelerine dayalı modellemelerde zemin taşıma kapasitesinin artırılmasıyla yol temel kalınlığında %20 ila %52 oranında azalmalar sağlanabileceğini belirtmektedir. Elde edilen kalınlık tasarrufları, agrega tüketimini, nakliye maliyetlerini ve inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarını düşürerek LFS kullanımının yol projelerindeki ekonomik fizibilitesini desteklemektedir (Mostafa vd., 2024; Naik vd., 2024).

Tablo 6. LFS ile yol altyapı stabilizasyonu için önerilen ölçülebilir tasarım kriterleri ve optimizasyon sınırları.

Tasarım Parametresi	Önerilen Tasarım Sınırı (Kriter)	Gerekçe ve Mühendislik Etkisi
Optimum LFS Katkı Oranı	Ağırlıkça %5-%20 arası	%20'nin üzerindeki dozajlar ince tane oranını artırarak UCS ve CBR değerlerinde düşüşe yol açar (Islam vd., 2024; Lopes vd., 2023).
Serbest MgO (Periklas) Genleşme Kontrolü	Nihai Karışım Genleşmesi <%1-2	Saf cürufat %40'ı bulan genleşme riski, kil boşluklarında tamponlanmalı; gerekirse %5-10 Uçucu Kül veya Karbonatlaşma ile sınırlandırılmalıdır (Bo, 2021; Yıldırım ve Prezzi, 2017).
Esneklik Modülü (M-E Tasarım Sınırı)	CBR > %50 hedefi	Üstyapı tasarımında CBR'nin >%50'ye çıkarılması, 20 cm'lik alttemel tabakası ihtiyacını iptal ederek maliyet tasarrufu sağlar (Islam vd., 2025).
Çevresel Sızıntı ve pH	Sızıntı pH < 10, EC < 1,0 mS/cm	Kilin tamponlama etkisiyle ağır metaller hapsedilmeli ve yeraltı suyuna sızacak pH ile iletkenlik değerleri EPA standartlarına çekilmelidir (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024).

8.2. Çevresel Güvenlik ve Ağır Metal İmmobilizasyonu

LFS'nin endüstriyel bir atık olması sebebiyle, malzemenin yeraltı sularına sızabilecek ağır metaller ve yüksek alkalinite gibi çevresel riskleri mühendislik uygulamalarında temel bir endişe kaynağıdır (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024; Wu vd., 2023). Saf LFS'nin sızıntı testi sonuçlarına göre EC değeri 7,22 mS/cm ve pH değeri 12,6 gibi oldukça yüksek seviyelerde seyretmektedir (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024).

Ancak LFS doğal killi zeminlerle karıştırılarak kullanıldığında, kil minerallerinin katyon değişim kapasitesi ve kimyasal tamponlama özelliği sızıntı tehlikesini büyük ölçüde elimine etmektedir (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024). Korkmaz ve Dayıoğlu (2024)'nın Sıralı Su Sızıntı (Sequential Water Leakage Technique-SWLT) testleri, kil matrisi ile reaksiyona giren karışımda EC'nin %81 oranında azalarak 1,37 mS/cm'ye düştüğünü ve pH seviyesinin 9,8 seviyelerine inerek aşırı alkalileşme tehlikesini ortadan kaldırdığını doğrulamaktadır. Ayrıca, çevresel stabilizasyon matrisi içerisinde alüminyum (Al) sızıntısı <0,5 mg/L sınırına inerken, kurşun (Pb) ve kadmiyum (Cd) gibi toksik ağır metaller "Tespit Sınırının Altında" kalmıştır (Islam vd., 2024). Bu durum LFS'nin killi zeminlerde ağır metalleri hapsederek (immobilizasyon) güvenli bir şekilde bertaraf edilmesine imkân tanıdığını göstermektedir (Petrillo vd., 2025).

8.3. Sürdürülebilirlik, Karbonatlaşma ve Döngüsel Ekonomi

Küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olan Portland çimentosuna kıyasla LFS,

döngüsel ekonomi prensipleri için olası bir alternatiftir (Andrew, 2019; Wang vd., 2024; Chandel vd., 2023; Bo, 2021). LFS'nin sürdürülebilirlik performansını en üst düzeye çıkaran yaklaşım ise "karbonatlaşma" işlemidir. Bo (2021) tarafından gerçekleştirilen araştırmalarda, 100 kPa CO₂ basıncı altında uygulanan karbonatlaşma süreci sayesinde LFS'nin kendi kütesinin %9,6'sı kadar CO₂ emilimi yapabildiği gözlemlenmiştir. Süreç, LFS içerisindeki serbest kireç ve periklası, kalsit ve magnezyum karbonat trihidrat gibi hacimsel olarak kararlı bileşiklere dönüştürerek "gecikmiş genleşme" riskini çözmektedir. Ayrıca, ekstrem seviyede (10.000 mg/kg) kurşun ile kontamine olmuş bir toprak LFS ve CO₂ kombinasyonu ile stabilize edildiğinde, sızıntı suyundaki kurşun konsantrasyonu 4 ila 6 büyüklük sırası (orders of magnitude) azalarak çevresel olarak güvenli seviyelere inmiştir (Bo, 2021). Söz konusu %9,6 oranındaki CO₂ tutma değeri, kontrollü laboratuvar koşullarında (100 kPa basınçlı CO₂, 56 saat) elde edilmiş olup; saha koşullarındaki doğal atmosferik karbonatlaşma sürecinde ulaşılacak karbon tutma kapasitesi büyük olasılıkla bu değer altında kalacaktır. Sonuç olarak LFS, yalnızca geomekanik dayanımı artıran bir katkı malzemesi değil; doğru mühendislik tasarımı uygulandığında karbon ayak izini düşürebilen, tabaka kalınlıklarında ekonomik tasarruflar sağlayabilen ve zararlı kirleticileri zemin içerisinde hareketsiz kılabilen sürdürülebilir bir stabilizatör adaydır.

9. Uygulama Kısıtları ve Araştırma Boşlukları

LFS'nin zemin stabilizasyonunda kullanımına ilişkin mevcut nicel ve nitel veriler, LFS'nin döngüsel ekonomi bağlamında önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymakla birlikte, uygulamayı sınırlandıran ve mühendislik tasarımlarında dikkatle yönetilmesi gereken çeşitli belirsizliklere de işaret etmektedir. Bu belirsizlikler, LFS'nin stabilizasyon potansiyelini reddetmekten ziyade, malzemenin heterojen yapısı, zamana bağlı davranışı ve mevcut standartların eksikliği ile ilişkilidir (Wu vd., 2023).

9.1. Malzeme Değişkenliği ve Karakterizasyon Zorlukları

LFS kullanımına ilişkin en temel zorluk, malzemenin kimyasal ve mineralojik bileşimindeki yüksek değişkenliktir. Pota ocağı prosesinde kullanılan akı türleri, ikincil rafinasyon işlem süreleri ve ortam sıcaklığına yavaş soğuma koşulları, malzemedeki serbest CaO ve MgO içerikleri ile faz dağılımını doğrudan etkilemektedir (Manso vd., 2005; Setién vd., 2009). Bu durum, farklı tesislerden hatta aynı tesisin farklı üretim partilerinden elde edilen LFS numuneleri arasında önemli performans farklılıklarına yol açmaktadır (Serjun vd., 2013). Endüstriyel bir atığın barındırdığı bu içsel değişkenlik, laboratuvar sonuçlarının saha uygulamalarına doğrudan aktarılmasını zorlaştırmakta ve "standart bir reçete" oluşturulmasını engellemektedir. Bu nedenle, LFS içeren her projenin malzemeye özgü karakterizasyon testleriyle (XRF ve XRD) başlaması zorunlu bir mühendislik adımıdır.

9.2. Kısa Süreli Dayanım ile Uzun Vadeli Kararlılık Arasındaki Uyumsuzluk

Literatürde, LFS'nin tek başına kullanıldığı stabilizasyon uygulamalarında erken dönemde katyon değişimi ve flokülasyon sayesinde belirli fiziksel iyileşmeler elde edilebildiği rapor edilmekle birlikte, bu performansın çoğu zaman uzun vadeli bir durabiliteyi (hacimsel kararlılığı) garanti etmediği görülmektedir (Brand ve Fanijo, 2020; Lopes vd., 2023). Bölüm 6'da detaylandırıldığı üzere, serbest MgO'nun gecikmeli hidratasyonu, LFS içeren sistemlerde uzun vadeli genleşme riskinin temel kaynağıdır. Hacimsel değişimler, çoğu zaman kısa süreli laboratuvar deneylerinde gözlenememekte ve saha koşullarında daha geç aşamalarda (aylar veya yıllar sonra) ortaya çıkabilmektedir (Ortega-López vd., 2014; Montenegro-Cooper vd., 2019). Mekanik dayanım kazanımları (UCS artışı) ile hacimsel kararlılık arasında doğrudan doğrusal bir ilişki bulunmaması, sadece taşıma kapasitesine dayalı tasarım yapılmasını riskli kılmaktadır.

9.3. Mevzuat ve Standart Eksiklikleri

LFS'nin zemin stabilizasyonunda yaygın kullanımının önündeki en büyük engellerden biri, bu malzemeye özgü performans esaslı standartların ve uygulama rehberlerinin eksikliğidir. Şartnamelerdeki mevcut stabilizasyon yaklaşımlarının büyük bölümü Portland

çimentosu ve kireç için geliştirilmiş olup, LFS'nin zamana bağlı, heterojen ve puzolanik doğasını yeterince yansıtmamaktadır (Espinosa vd., 2023). Ayrıca, birçok çevre mevzuatında LFS'nin kimyasal bileşimine odaklanılarak doğrudan "endüstriyel atık" sınıfında değerlendirilmesi, zeminle harmanlandığında (sistem olarak) çevresel risklerin indirgenme durumunu (Xu ve Yi, 2020; Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024) göz ardı etmekte ve yenilikçi uygulamaları engellemektedir (Wu vd., 2023).

9.4. Gelecek Araştırma İhtiyaçları ve Boşluklar

Mevcut literatürün eleştirel bir değerlendirmesi sonucunda, LFS ile zemin stabilizasyonu alanında acil olarak odaklanılması gereken araştırma boşlukları şunlardır:

- Uzun Süreli Saha Gözlemleri: Mevcut laboratuvar bulgularını doğrulamak için gerçek trafik yükleri ve çevresel (ıslanma-kuruma, donma-çözülme) koşullar altında en az 1-2 yılı kapsayan uzun süreli yol deneme kesitleri inşa edilmeli; saha performans verileri nicel olarak izlenerek laboratuvar bulgularıyla karşılaştırılmalıdır.
- Sistem Bazlı Çevresel Analizler: Sızıntı testleri sadece saf cüruf üzerinde değil, farklı zemin türleri, yeraltı suyu pH dalgalanmaları ve LFS etkileşimini modelleyen dinamik sızıntı testleriyle genişletilmelidir.
- Makro-Mikro İlişisinin Sayısallaştırılması: Mikroyapısal evrimin (C-S-H jellerinin yoğunluğu ve etrenjit oluşumu) makroskobik mekanik davranışa ve çevresel sızıntıya olan etkisi sadece nitel olarak değil, nicel modellemelerle doğrulanmalıdır.
- Hibrit Optimizasyon Çalışmaları: LFS'nin tek başına yetersiz kaldığı koşullarda, çimento, kireç, uçucu kül veya geopolimer aktivatörleri ile birleştirildiği "hibrit stabilizasyon" matrislerinin ekonomik ve çevresel optimizasyonu üzerine daha fazla çok kriterli karar verme analizi yapılmalıdır.

10. Sonuçlar

Bu derleme çalışmasında, pota ocağı cürufunun (LFS) yol zeminlerinin stabilizasyonundaki kullanım potansiyeli; reaksiyon mekanizmaları, makroskobik mekanik performans, hacimsel kararlılık, çevresel güvenlik ve sürdürülebilirlik boyutlarıyla bütüncül ve nicel bir yaklaşımla incelenmiştir. Mevcut literatürün karşılaştırmalı ve nicel analizi, LFS'nin zemin stabilizasyonunda her koşulda geçerli olan bir stabilizatör olmadığını; performansının zamana, katkı dozajına ve zemin mineralojisine bağlı olarak şekillenen koşula bağlı bir mühendislik malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır (Wu vd., 2023). Gerçekleştirilen sistematik inceleme ve nicel sentez sonucunda elde edilen temel bulgular şunlardır:

1. Mekanik Performans ve Tasarım Sınırları: LFS'nin killi zeminlerde sağladığı makroskobik iyileşmeler, kısa vadeli fizikokimyasal modifikasyon (katyon

değişimi) ve orta vadeli puzolanik reaksiyonların (C-S-H jelleri) bir sonucudur. Literatür verileri, optimum stabilizasyon performansının ağırlıkça %5 ile %20 LFS dozaj aralığında elde edildiğini belirtmektedir (Islam vd., 2024; Espinosa vd., 2023). Yüksek plastisiteli killerde optimum %20 LFS ilavesi, UCS'yi %219 oranında artırarak 2368 kPa seviyelerine ulaştırırken, konsolidasyon oturmalarını %30,5 oranında azaltmaktadır (Islam vd., 2024). Benzer şekilde, düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerde %5 gibi düşük bir dozaj bile CBR'ın yaklaşık 14 kat artırarak (%5,3'ten %74'e) yol alttemel tabakası gereksinimlerini karşılayabilmektedir (Espinosa vd., 2025).

- Hacimsel Kararlılık ve Durabilite Riskleri: LFS stabilizasyonundaki en kritik mühendislik riski, serbest CaO ve MgO'nun gecikmeli hidrasyonundan kaynaklanan hacimsel genişlemedir (mekanizma için Bölüm 6.1). Saf LFS'de %40'lara varan potansiyel (Montenegro-Cooper vd., 2019), kil matrisinde %1'in altına inebilmektedir (Montenegro vd., 2013). Aşırı reaktif cürufalarda bu riski önemli ölçüde azaltmak için tasarıma ağırlıkça %5-%10 uçucu kül eklenmesi (Yıldırım ve Prezzi, 2017) veya malzemenin karbonatlaşma ön işlemine tabi tutulması önerilmektedir (Bo, 2021). Erken dönem dayanım artışları, uzun vadeli hacimsel kararlılığın bir garantisi olarak değerlendirilmemelidir.
- Çevresel Güvenlik ve Sızıntı (Leaching) Kontrolü: LFS'nin endüstriyel bir atık olması sebebiyle barındırdığı yüksek alkalinite ve toksisite riskleri, killi zeminlerin doğal tamponlama kapasitesi sayesinde güvenli standartlara (EPA sınırlarına) çekilmektedir. Saf sızıntı suyunda 12,6 olan pH ve 7,22 mS/cm olan elektriksel iletkenlik (EC), kil matrisinde reaksiyona girdiğinde EC değeri %81 düşüşle 1,37 mS/cm'ye, pH ise 9,8 seviyelerine inmektedir (Korkmaz ve Dayıoğlu, 2024). Ek olarak, kil ve LFS etkileşimi toksik ağır metalleri (Pb, Cd) hapsederek (immobilizasyon) zemin içinde kararlı hale getirmektedir.
- Ekonomik Fizibilite ve Döngüsel Ekonomi: İleri Mekanik-Ampirik (M-E) kaplama tasarımı analizleri, CBR'deki artışın esneklik modülünü yükselterek yol kesitlerindeki 20 cm'lik kırmataş alttemel tabakasını tamamen ortadan kaldırabildiğini ve maliyet tasarrufu sağladığını göstermektedir (Islam vd., 2025). Ayrıca karbonatlaşma işlemiyle kendi ağırlığının %9,6'sı kadar CO₂ hapsedebilen LFS (Bo, 2021), Portland çimentosuna kıyasla çok daha düşük karbon ayak izine sahip sürdürülebilir bir stabilizatör ve döngüsel ekonomi prensiplerine uygun bir aday olarak değerlendirilmektedir.

Bu bulguların güvenilirliği, çalışmalar arasındaki yöntemsel heterojenlik (kürleme süresi, zemin tipi, LFS mineralojisi farklılıkları), uzun süreli saha verilerinin yokluğu ve LFS-stabilize sistemlere özgü performans esaslı standartların eksikliği nedeniyle koşullu bir nitelik

taşımaktadır. Laboratuvar ölçeğinde elde edilen sayısal değerler, saha uygulamalarına aktarılırken malzemeye özgü karakterizasyon ve uzun süreli izleme protokolleriyle desteklenmelidir.

Tasarım ve Uygulama Önerileri: Bu derleme ışığında, LFS'nin altyapı projelerinde güvenli ve etkin kullanımını sağlamak amacıyla mühendislere ve karar vericilere şu adımlar önerilmektedir:

- Zorunlu Karakterizasyon:** Üretim partileri arasındaki kimyasal değişkenlik nedeniyle, her LFS uygulaması öncesinde XRF ve XRD testleriyle malzemenin "serbest CaO/MgO" limitleri tayin edilmelidir.
- Performans Esaslı Sınırlar:** Stabilizasyon tasarımları tek başına UCS sonuçlarına göre değil; uzun süreli genişleme testlerine ve sınırlandırılmış dozaj (maksimum %20) optimizasyonuna göre yapılmalıdır.
- Hibrit Sistemlere Yönelim:** Malzemenin sınırlı puzolanik reaktivitesini dengelemek ve performansı garanti altına almak için LFS; kireç, düşük oranlı çimento, uçucu kül veya geopolimer aktivatörlerle (NaOH) birlikte hibrit sistemler halinde değerlendirilmelidir.
- Standartların Güncellenmesi:** Yol şartnamelerinde geleneksel çimento/kireç için hazırlanmış limitlerin, LFS'nin zamana bağlı heterojen yapısına uygun, performans ve çevresel sızıntı esaslı yeni standartlarla güncellenmesi elzemdir.

Sonuç olarak, LFS, doğru laboratuvar analizleri, tasarım sınırları ve proaktif risk yönetimi ile uygulandığında, killi zeminlerin stabilizasyonunda yeterli mekanik performans ve yol tabakalarında ekonomik tasarruflar sunabilecek güçlü bir ikame malzemedir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	F.Y.
K	100
T	100
Y	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

- Abdolvand, Y., & Sadeghiamirshahidi, M. (2024). Soil stabilization with gypsum: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Çevrimiçi erken görünüm. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.02.007>
- Abhishek, A., GuhaRay, A., Hata, T., & Abuel-Naga, H. (2025). Microstructural characterization of expansive soil stabilized with coconut husk ash: A multi-technique investigation into mineralogy, pore architecture, and surface interactions. *Minerals*, 15(5), Makale 516. <https://doi.org/10.3390/min15050516>
- Almuaythir, S., Zaini, M., Hasan, M., & Hoque, M. (2024). Sustainable soil stabilization using industrial waste ash: Enhancing expansive clay properties. *Heliyon*, 10(20), Makale e39124. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39124>
- Andrew, R. M. (2019). Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*, 11(4), 1675–1710. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
- Aponte, D., Soto Martín, O., Valls del Barrio, S., & Barra Bizinotto, M. (2020). Ladle steel slag in activated systems for construction use. *Minerals*, 10(8), Makale 687. <https://doi.org/10.3390/min10080687>
- Araos, P., Aponte, D., & Barra, M. (2024). Ladle furnace slag as a new source of supplementary cementitious material: Evaluating long-term performance and environmental impact in Portland cement systems. *Journal of Building Engineering*, 95, Makale 109995. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109995>
- Arshad, A. K., Shaffie, E., Masri, K. A., Jaya, R. P., & Ismail, Y. (2021). Cement stabilisation of subgrade soil for sustainable pavement structure. S. S. Mohd Zuki, N. Mokhtar, S. Shahidan, & M. H. Bin Wan Ibrahim (Eds.), *Proceedings of the Sustainable Concrete Materials and Structures in Construction 2020* içinde (ss. 41–52). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2187-1_5
- ASTM International. (2019). *Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions* (ASTM D4792/D4792M-13). West Conshohocken, PA.
- Bo, X. (2021). *Utilization of ladle slag for soil stabilization* (Doktora tezi). Nanyang Technological University, School of Civil and Environmental Engineering, Singapur.
- Brand, A. S., Singhvi, P., Fanijo, E. O., & Tutumluer, E. (2020). Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines. *Materials*, 13(19), Makale 4251. <https://doi.org/10.3390/ma13194251>
- 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), Makale 8210. <https://doi.org/10.3390/app10228210>
- Chandel, S., Singh, P., Katiyar, P., & Randhawa, N. (2023). A review on environmental concerns and technological innovations for the valorization of steel industry slag. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 40, 2059–2086. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00886-z>
- Dhatrak, A. I., & Kolhe, P. V. (2022). Application of eco-friendly and smart materials in geotechnical engineering for subgrade stabilization: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1084(1), Makale 012035. IOP Publishing.
- Duan, Y., Chao, S., Zhang, X., Li, J., Zhang, Y., Gu, C., & He, J. (2024). The hydration activity enhancement method of mayenite in ladle slag: A review. *Steel Research International*, 95(11), Makale 2400355. <https://doi.org/10.1002/srin.202400355>
- Espinosa, A. B., Hernando-Revenga, M., Revilla-Cuesta, V., Chica, J. A., & Ortega-López, V. (2025). *Clayey soil improvement: Sustainable solutions with ladle furnace slag and recycled fibers from wind turbine blade waste* [Bildiri sunumu]. 4th International Online Conference on Materials, Basel, İsviçre. MDPI.
- Espinosa, A. B., Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Serrano-López, R., & Ortega-López, V. (2023). Strength performance of low-bearing-capacity clayey soils stabilized with ladle furnace slag. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(45), 101317–101342. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29375-y>
- Ghanizadeh, A. R., Salehi, M., Mamou, A., Koutras, E. I., Jalali, F., & Asteris, P. G. (2024). Investigation of subgrade stabilization life-extending benefits in flexible pavements using a non-linear mechanistic-empirical analysis. *Infrastructures*, 9(2), Makale 33. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9020033>
- Islam, M. R., Tanvir, A. S. M., Islam, N., Alam, M. K., Rahman, M. A., & Dey, R. (2025). Application of ladle furnace slag on strength development of expansive clay under variable moisture conditions. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(1), 66. <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00524-1>
- Islam, S., Ara, S., & Islam, J. (2024). An experimental investigation on utilization of ladle refined furnace (LRF) slag in stabilizing clayey soil. *Heliyon*, 10(4), Makale e26004. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26004>
- Jacob, L. (2023). Ladle furnace slag: Synthesis, properties, and applications. *ChemBioEng Reviews*, 11(1), 60–78. <https://doi.org/10.1002/cben.202300024>
- Jiang, Q., He, Y., Wu, Y., Dian, B., Zhang, J., Li, T., & Jiang, M. (2022). Solidification/stabilization of soil heavy metals by alkaline industrial wastes: A critical review. *Environmental Pollution*, 312, Makale 120094. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120094>
- Jiang, Y., Ling, T., Shi, C., & Pan, S. (2018). Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>
- Khan, H. A., Iqbal, S., Ullah, I., Hamza, A., & Mustafi, J. B. (2023). Enhancing the properties of subgrade soil: Investigation from the highway project. *Pakistan Journal of Scientific Research*, 3(2), 64–70.
- Korkmaz, B., & Dayioglu, A. Y. (2024). Utilization of natural soils as a remediation method for electric arc furnace and ladle slags. *Sustainability*, 16(12), Makale 5244. <https://doi.org/10.3390/su16125244>
- Lopes, E. C., da Silva, T. O., Pitanga, H. N., Pedrotti, L. G., Franco de Carvalho, J. M., Nalon, G. H., de Lima, G. E. S., & de Araújo, E. N. D. (2023). Stabilisation of clayey and sandy soils with ladle furnace slag fines for road construction. *Road Materials and Pavement Design*, 24(1), 247–266. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2017328>
- Mahoutian, M., & Shao, Y. (2016). Low temperature synthesis of cement from ladle slag and fly ash. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 5(4), 247–258. <https://doi.org/10.1080/21650373.2015.1047913>
- Manso, J. M., Losañez, M., Polanco, J. A., & Gonzalez, J. J. (2005). Ladle furnace slag in construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 513–518. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:5\(513\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:5(513))
- Montenegro, J. M., Celemín-Matachana, M., Cañizal, J., & Setién, J. (2013). Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 972–979. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000642](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000642)
- Montenegro-Cooper, J. M., Celemín-Matachana, M., Cañizal, J., & González, J. J. (2019). Study of the expansive behavior of ladle

- furnace slag and its mixture with low quality natural soils. *Construction and Building Materials*, 203, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.040>
- Mostafa, A. E. A., Eisa, M., & Ibrahim, M. F. (2024). Effect of stabilizing subgrade layer using various additives on the flexible pavement design. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9, Makale 147. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01430-8>
- Naik, R., Kumar, S., & Saha, G. (2024). Novel framework for assessing economic viability and environmental impacts: Use of waste products in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 411, Makale 134329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134329>
- Najm, O., El-Hassan, H., & El-Dieb, A. (2021). Ladle slag characteristics and use in mortar and concrete: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 288, Makale 125584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125584>
- Ortega-López, V., Manso, J. M., Cuesta, I. I., & González, J. J. (2014). The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. *Construction and Building Materials*, 68, 455–464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.023>
- Ouffa, N., Benzaazoua, M., Trauchessec, R., Belem, T., Taha, Y., & Diliberto, C. (2024). Potential reuse of ladle furnace slag as cementitious material: A literature review of generation, characterization, and processing methods. *Minerals*, 14(12), Makale 1204. <https://doi.org/10.3390/min14121204>
- Parsaei, M., Vakili, A. H., Salimi, M., Farhadi, M. S., & Falamaki, A. (2021). Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 6303–6320. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02316-0>
- Petrillo, A., Fraternali, F., Acampora, A., Di Chiara, G., Colangelo, F., & Farina, I. (2025). Innovative solidification and stabilization techniques using industrial by-products for soil remediation. *Applied Sciences*, 15(7), Makale 4002. <https://doi.org/10.3390/app15074002>
- Sáez-de-Guinoa Vilaplana, A., Ferreira, V. J., López-Sabirón, A. M., Aranda-Usón, A., Lausín-González, C., Berganza-Conde, C., & Ferreira, G. (2015). Utilization of ladle furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 94, 837–843. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.075>
- Sarti, O., Otal, E., El Mansouri, F., Ghannam, H., Elmoutez, S., El Hadri, M., Saidi, M., & Morillo, J. (2024). Valorization of ladle furnace slag and functional enhancement of post-adsorption materials. *Waste Management Bulletin*, 2(4), 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.08.004>
- Serjun, V. Z., Mirti, B., & Mladenović, A. (2013). Evaluation of ladle slag as a potential material for building and civil engineering. *Materiali in Tehnologije*, 47(5), 543–550.
- Setién, J., Hernández, D., & González, J. J. (2009). Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1788–1794. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.003>
- Shi, C. (2002). Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 459–462. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00707-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00707-4)
- Shinde, B., Sangale, A., Pranita, M., Sanagle, J., & Roham, C. (2024). Utilization of waste materials for soil stabilization: A comprehensive review. *Progress in Engineering Science*, 1(2-3), Makale 100009. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2024.100009>
- Vakili, A., Salimi, M., Keskin, I., & Jamalimoghadam, M. (2024). A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure. *Soil and Tillage Research*, 239, Makale 106036. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>
- Wang, D., Wang, Z., & Wang, H. (2024). Feasibility and performance assessment of novel framework for soil stabilization using multiple industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 449, Makale 138228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138228>
- Wang, X., Wang, X., Fu, P., & Shi, J. (2025). Mechanical properties and durability performance of low liquid limit soil stabilized by industrial solid waste. *Materials*, 18(2), Makale 469. <https://doi.org/10.3390/ma18020469>
- Wei, J., Wei, J., Huang, Q., Abidin, S., & Zou, Z. (2023). Mechanism and engineering characteristics of expansive soil reinforced by industrial solid waste: A review. *Buildings*, 13(4), Makale 1001. <https://doi.org/10.3390/buildings13041001>
- Wu, L., Li, H., Mei, H., Rao, L., Wang, H., & Lv, N. (2023). Generation, utilization, and environmental impact of ladle furnace slag: A minor review. *The Science of the Total Environment*, 895, Makale 165070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165070>
- Xu, B., & Yi, Y. (2019). Soft clay stabilization using ladle slag-ground granulated blastfurnace slag blend. *Applied Clay Science*, 178, Makale 105136. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105136>
- Xu, B., & Yi, Y. (2020). Use of ladle furnace slag containing heavy metals as a binding material in civil engineering. *The Science of the Total Environment*, 705, Makale 135854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135854>
- Yıldırım, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011, Makale 463638. <https://doi.org/10.1155/2011/463638>
- Yıldırım, I. Z., & Prezzi, M. (2017). Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: Mineralogical, physical & mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 154, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.149>