Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN GEOTEKNİK UYGULAMALARDA KULLANIMINA YÖNELİK DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMI

AN APPROACH FOR THE EVALUATION OF INDUSTRIAL WASTE IN GEOTECHNICAL APPLICATIONS

BİLAL KORKMAZ[1], ASLI YALÇIN DAYIOĞLU[2], MUSTAFA HATİPOĞLU[2], AHMET H. AYDİLEK[3]

ÖZET

Bu çalışmada, endüstriyel bir atığın geoteknik uygulamalarda kullanılıp kullanılamayacağını belirlemek için kademeli bir değerlendirme yaklaşımı önerilmektedir. İlgili malzeme sırasıyla karakterizasyon, mekanik performans, hacimsel kararlılık ve çevresel değerlendirme aşamalarından geçirilmekte ve mekanik, hacimsel ve çevresel etki gibi koşulların üçünü birden sağladığı takdirde uygun görülmektedir. Çevresel değerlendirme üç düzenekte yürütülmüştür. Su liçi ve sıralı liç deneyleri hızlı bir eleme sağlarken, sıkıştırılmış bir tabakadaki sızmayı kolon deneyleri temsil etmektedir. İlgili yaklaşım, elektrik ark ocağı çelik cürufuna uygulandığında, malzemenin mekanik bakımdan yeterli olduğu, buna karşılık suya maruz kaldığında şiştiği ve güçlü alkali bir sızıntı suyu ürettiği için doğrudan kullanıma uygun olmadığı görülmüştür. Cürufun doğal kil ile karıştırılması sızıntı suyunu sınır değerlerin dışında bırakmış, aynı kilin bariyer olarak yerleştirilmesi ise çıkış suyunu şartname sınırları içine çekmiştir. Örnek uygulama, değerlendirme temel yaklaşımını da doğrulamaktadır. Buna göre mekanik yeterlilik gerekli bir koşuldur, ancak tek başına yeterli değildir.

Anahtar Kelimeler: *Endüstriyel Atıklar, Elektrik Ark Ocağı Çelik Cürufu, Geoteknik Değerlendirme*

ABSTRACT

This study proposes a stepwise approach to evaluate whether an industrial waste can be employed in geotechnical applications. The material in question is subjected to characterization, mechanical performance, volumetric stability, and environmental assessment stages, and is deemed suitable if it meets all three conditions such as mechanical, volumetric, and environmental aspects. Environmental assessment was carried out in three setups. Water leaching and sequential leaching tests provided rapid evaluation, while column tests represented leachate in a compacted layer of column. When the framework was applied to electric arc furnace steel slag, it was found that the material was mechanically sufficient, but swelled when exposed to water and produced a strongly alkaline leachate, making it unsuitable for direct use in engineering applications. Mixing the slag with natural clay kept the pH of leachate outside the limit values, while placing the same clay as a barrier brought the pH within the specification limits. The evaluation of EAF also confirms the basic approach of the proposed framework. Accordingly, mechanical adequacy is a necessary condition, but not sufficient on its own.

Keywords: *Industrial Waste, Electric Arc Furnace Steel Slag, Geotechnical Assessment*

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, bilalkorkmaz@sirnak.edu.tr
[2] Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, yalcinas@itu.edu.tr
[2] Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, hatipoglu1@itu.edu.tr
[3] Prof. Dr., Maryland Üniversitesi, aydilek@umd.edu

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir kalkınma ekonomik, sosyal ve çevresel olmak üzere üç boyutta ele alınır. İlk iki bağlam arasındaki ilişki, uzun vadeli büyümenin doğal kaynak miktarına ve ekolojik dengeye bağımlı olmasından kaynaklanır. Ekonomik sürdürülebilirlik açısından sistemin, uzun vadeli ekonomik dengeyi koruyarak sürekli üretim artışını destekleyebilmesi gerekmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik ise üretimin doğal kaynakların kendini yenileme hızının üzerinde tüketmemesini şart koşmaktadır (Harris, 2003; UN, 2015; Butlin, 1989). Kaynakların verimli kullanılması bu nedenle yalnızca bir çevre politikası değil, ekonomik büyümenin de koşuludur. Verimlilik arayışı ise üretim sürecinde açığa çıkan atığın ne yapılacağı sorusunu doğrudan gündeme getirir.

Bu kapsamda Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDGs), özellikle temiz su ve sanitasyon, sürdürülebilir kentler ve iklim eylemi aracılığıyla kaynakların korunması, çevresel kirliliğin azaltılması ve iklim değişikliğinin etkileriyle mücadele edilmesini hedeflemektedir (Persaud and Dagher, 2021; Fritz et al., 2019; ISW, 2024). Bu hedeflere ulaşılmasında etkin atık yönetimi, geri dönüşüm ve yeniden kullanım uygulamaları; doğal kaynakların ve su kaynaklarının korunması, enerji tasarrufu ve döngüsel ekonominin geliştirilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Organik atıklar biyolojik bozunma ve enerji geri kazanımı gibi yöntemlerle yönetilebilirken (WHO, 2021), çoğunlukla inorganik nitelikteki endüstriyel atıkların depolanması ve bertarafı daha karmaşık olup çevresel etkilerin azaltılması için atık türüne özgü, gelişmiş yönetim, geri dönüşüm ve bertaraf yöntemlerinin uygulanmasını gerektirmektedir (Bharagava et al., 2020).

Ağır sanayi sektörleri, çevresel etkileri nedeniyle etkin şekilde yönetilmesi gereken çeşitli atıklar üretmektedir. Demir-çelik endüstrisinde cüruf, toz ve proses atıkları (Yearbook, 2025; Wang, 2016); petrokimya ve kimya sektörlerinde kimyasal çamur, solvent ve sıvı atıklar (U.S.-EPA, 1990); çimento ve termik santrallerde ise fırın tozu, uçucu kül ve taban külü oluşmaktadır (Siddique and Rajor, 2012; Rathnayake et al., 2018). Benzer şekilde madencilik ve metalurji (Matinde et al., 2018), kâğıt ve selüloz (Gupta et al., 2019), cam-seramik (Shang et al., 2021) ve gemi inşa sektörleri (Papamanolis et al. 2018) önemli miktarda endüstriyel atık üretmektedir. Bu atıkların mühendislik uygulamalarında doğal kaynaklara alternatif olarak kullanılması, bertaraf yükünü azaltırken döngüsel ekonomiye de katkı sağlamaktadır. Ancak böyle bir kullanım, atığın fiziksel ve kimyasal özellikleri, türü ve üretim miktarı belirlenerek uygulamaya uygunluğunun değerlendirilmesini gerektirmektedir.

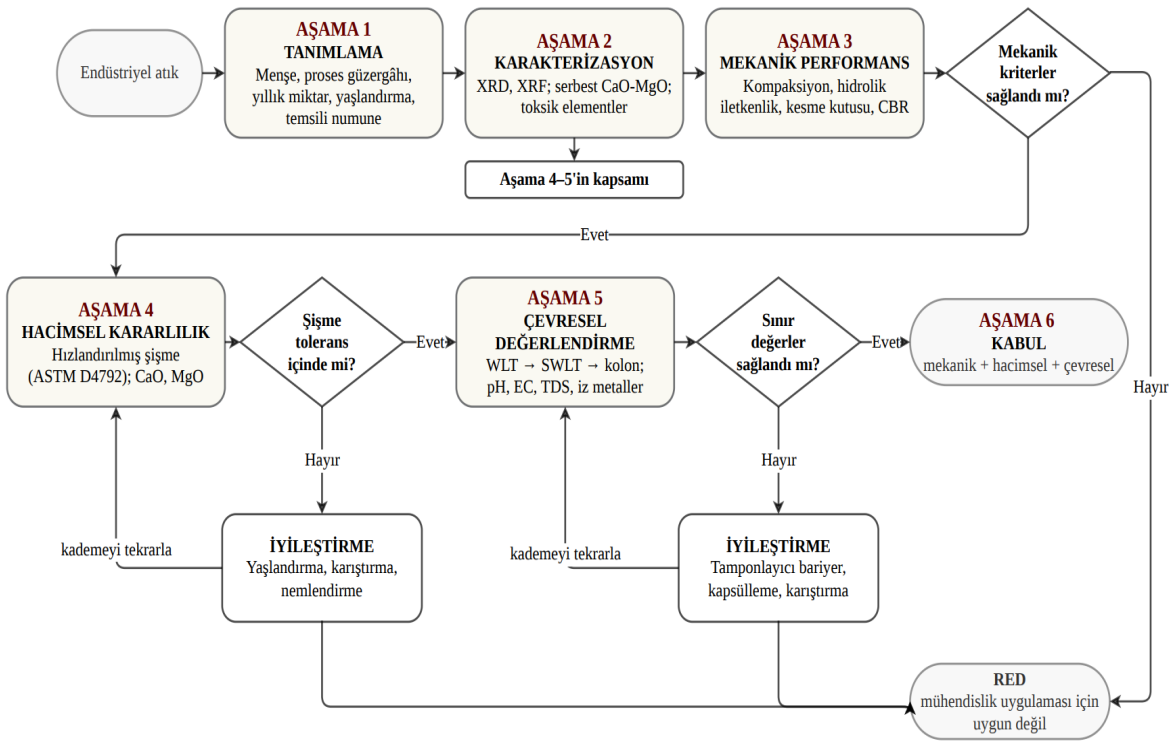
Söz konusu sektörler arasında, üretim hacmi ve buna bağlı atık miktarı nedeniyle demir-çelik endüstrisi öne çıkmaktadır. Dünya ham çelik üretimi 2024 yılında 1,9 milyar tona ulaşmış, Türkiye 38,1 milyon tonla yedinci sırada yer almıştır (Yearbook, 2025). Üretilen her ton çelik başına %15-20 oranında cüruf açığa çıkmakta, bu da depolanması ya da yeniden değerlendirilmesi gereken büyük bir atık yığını anlamına gelmektedir (Dayioglu et al. 2018). Elektrik ark ocağı (EAF) cürufu bu katı atıklardan biridir. Köşeli ve rijit daneleri sayesinde yüksek sürtünme direnci gösterdiğinden temel, alt temel ve dolgu uygulamalarında doğal agregaya alternatif olarak değerlendirilmektedir (Shi, 2004; Rohde et al., 2003; Maghool et al., 2019; Fırat et al., 2020; Gökalp et al., 2018). Ne var ki aynı malzeme güçlü alkali bir sızıntı suyu üretmekte ve iz metal salmaktadır; bu nedenle yeniden kullanım kararı, mekanik özelliklerin yanında çevresel davranışa da bakmayı gerektirir (Mayes et al., 2008; Riley and Mayes, 2015; Piatak et al., 2015).

Ancak EAF cürufuna ilişkin çalışmalarda mekanik ve çevresel performans çoğunlukla ayrı ayrı değerlendirilmekte; her iki yönün birlikte ele alındığı çalışmalarda ise sonuçlar ortak bir kabul kriteri altında birleştirilmemektedir. Ayrıca, çevresel değerlendirmede kullanılan liç (batch) testlerindeki katı/sıvı oranı ve çalkalama koşulları, sıkıştırılmış bir tabakadaki gerçek sızma koşullarını tam olarak temsil etmemektedir. Liç ve kolon deneyleri arasındaki farklılıklar da literatürde ortaya konmuştur (Bin-Shafique et al., 2006; De Windt et al., 2011; Yu et al., 2025). Bu nedenle su sızma testlerinden elde edilen sonuçlar tek başına tasarıma esas alınamaz.

Özetle, bu çalışma iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, endüstriyel bir atığın geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliğini mekanik, hacimsel ve çevresel ölçütleri birlikte gözeterek belirleyen kademeli bir değerlendirme yaklaşımı önerilmektedir; malzeme aşamaları sırayla geçmekte, ancak üç ölçütü birden sağladığında uygun kabul edilmektedir. İkinci bölümde ise değerlendirme yaklaşımı EAF çelik cürufuna uygulanmakta, deneysel sonuçlar bu düzen içinde yorumlanarak malzemenin kullanılabilirliği ortaya konulmaktadır.

2. ENDÜRTİYEL ATIKLAR İÇİN ÖNERİLEN METODOLOJİK DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMI

Önerilen yaklaşım, endüstriyel atıkların geoteknik açıdan sistematik ve aşamalı olarak değerlendirilmesine dayanan altı aşamadan oluşmaktadır. Her aşama belirli bir soruya yanıt vermekte, tanımlanmış deneyleri içermekte ve uygun, koşullu uygun veya uygun değil şeklinde bir sonuç ortaya koymaktadır. Koşullu uygunluk durumunda malzeme iyileştirme aşamasına yönlendirilerek ilgili kademe tekrarlanırken, uygun bulunmaması durumunda hedeflenen mühendislik uygulamasında kullanım için değerlendirme sonlandırılmaktadır. İlgili kademeler Şekil 1'de gösterilmektedir.



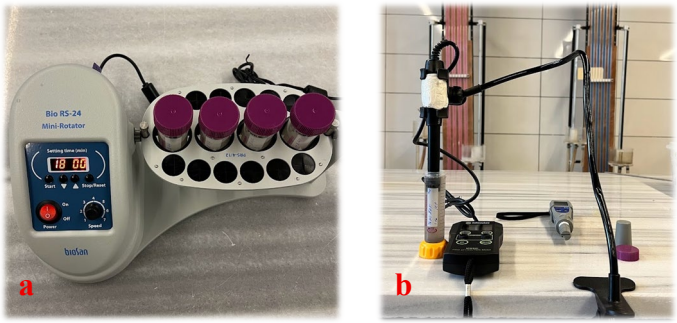
Şekil 1. Atıkların geoteknik değerlendirilmesinde bütünleşik kabul algoritması

İlk aşamada malzemenin kökeni, oluştuğu üretim süreci, yıllık üretim miktarı, heterojenliği ve özellikle çevresel maruziyet geçmişi belirlenmektedir. Atmosferik koşullara maruz kalma ve yaşlanma, serbest kireç içeriğini ve dolayısıyla cürufun hem şişme potansiyelini hem de sızıntı suyu kimyasını değiştirebilmektedir (Engström et al., 2014). Bu nedenle numune alma süreci, deneyler kadar ayrıntılı şekilde kayıt altına alınmalıdır. Üretim hattındaki numune alma noktası, katılaşmadan sonra geçen süre ve yağışa maruz kalma koşulları kaydedilmeli; heterojenliği temsil edebilmek amacıyla stok sahasının farklı noktalarından numuneler alınmalıdır. İkinci aşamada malzemenin bileşimi X-ray diffraction (XRD) ve X-ray fluorescence (XRF) analizleriyle belirlenmektedir. Bu aşama yalnızca malzemenin tanımlanmasını değil, sonraki değerlendirme aşamalarının kapsamının belirlenmesini de sağlayacaktır. Serbest CaO ve MgO varlığı, bu oksitlerin $Ca(OH)_2$ ve $Mg(OH)_2$'ye hidratasyonu sırasında hacim artışı meydana gelmesi nedeniyle hacimsel stabilite değerlendirmesini gerekli kılmaktadır (Ramonich and Barra, 2001; Yildirim and Prezzi, 2011). Ayrıca bu aşamada belirlenen elementler, çevresel değerlendirmede incelenecek iz metalleri belirlemekte; yüksek kireç içeriği ise alkali karakterde sızıntı suyu oluşabileceğine işaret etmektedir (O'Connor et al., 2021).

Üçüncü aşama malzemenin fiziksel ve mekanik performansını sınar. Burada sabit bir deney listesi yoktur; program, malzemenin temel tabakasında mı, dolguda mı yoksa drenaj tabakasında mı kullanılacağına göre kurulur. Dane boyu dağılımı, özgül ağırlık, Atterberg limitleri ve kompaksiyon özellikleri her durumda gerekir, çünkü sınıflandırmayı ve sıkıştırma parametrelerini bu temel deneyler verir. Geri kalan deneyler ise hangi soruya cevap arandığına bağlıdır. Drenaj tabakasında hidrolik iletkenlik, taşıyıcı tabakalarda CBR öne çıkar; kayma dayanımının belirleyici olduğu durumlarda doğrudan kesme deneyi yapılır.

Dördüncü aşamada, endüstriyel atığın hacimsel stabilitesi ve uzun dönemli davranışı, malzemenin özellikleri ve hedeflenen geoteknik uygulama dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Bu aşamada uygulanacak deneyler ve değerlendirme kriterleri, atığın mineralojik ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak belirlenmelidir. Örneğin çelik cüruflarında, serbest CaO ve MgO varlığı nedeniyle hızlandırılmış şişme deneyi (ASTM-D4792-13) uygulanabilmektedir. Serbest kireç erken dönemde, serbest magnezya ise daha yavaş gerçekleşen hidratasyon reaksiyonları sonucunda uzun dönemde genleşmeye neden olabilmektedir (Montenegro-Cooper et al., 2019; Liu et al., 2022). Benzer şekilde, diğer endüstriyel atıklarda da malzemeye özgü hacim değişimi ve uzun dönemli davranış mekanizmaları dikkate alınmalıdır. Gerekli durumlarda yaşlandırma, farklı malzemelerle karıştırma veya nemlendirme (Chen et al., 2019) gibi iyileştirme yöntemleri uygulanarak etkileri bu aşamada değerlendirilmelidir (Dayioglu et al., 2014).

Beşinci aşamada atığın çevresel uygunluğu ve kirletici salınım potansiyeli belirlenir. Deney programı, atığın kimyasal ve mineralojik bileşimine, taşıdığı kirlilik potansiyeline ve sahada karşılaşacağı koşullara göre kurulur. Sıralama, hızlı ve denetimli koşullar sunan su liçi deneylerinden başlayıp saha koşullarını daha iyi temsil eden kolon deneylerine doğru ilerler. Çelik cüruflarında ilk basamak su liçi deneyidir (WLT); pH, elektriksel iletkenlik (EC), toplam çözünmüş katı (TDS) ve iz metal derişimleri bu deneylerle elde edilir. Bariyer olarak düşünülen doğal zeminin kirleticileri tutma kapasitesi araştırılacaksa aynı çözelti ikinci bir zemin katmanından geçirilir; buna ardışık su liçi deneyi (SWLT) adı verilir (Şekil 2).



Şekil 2. Su sızma testlerine ait düzenekler : a) Rotatör b) pH ölçümü

Kolon (CLT) ve ardışık kolon (SCLT) deneyleri ise denetimli akış altında kirletici taşınımını ve uzun dönem davranışını ortaya koymaktadır. Kolon deneylerine ait görsel Şekil 3'te gösterilmiştir. Liç ve kolon deneylerinden elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar bulunabildiğinden, deney yönteminin saha koşullarını temsil etme düzeyi dikkate alınmalıdır (Bin-Shafique et al., 2006; Yu et al., 2025). Elde edilen sonuçlar, atığın türüne ve kullanım amacına bağlı olarak ilgili çevresel standart ve sınır değerlerle karşılaştırılarak değerlendirilmelidir (U.S.-EPA, 1990; MoE-MCL, 2004).



Şekil 3. Sıralı kolon deney düzeneği

Son kademede, önceki aşamalardan elde edilen bulgular birlikte değerlendirilerek malzemenin hedeflenen geoteknik uygulama için uygunluğuna karar verilmektedir. Gerekli kriterlerin sağlanmadığı durumlarda, atığın özelliklerine ve belirlenen soruna bağlı olarak farklı iyileştirme yöntemleri uygulanabilir. Bunlar; başka malzemelerle karıştırma, bariyer tabakalarının kullanılması veya atığın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin uygun yöntemlerle iyileştirilmesini içerebilir. Örneğin çevresel açıdan bariyer kullanılması durumunda, bariyer malzemesinin tamponlama kapasitesi, katyon değişim kapasitesi ve yüzey özellikleri dikkate alınmalıdır (Yong et al., 1990; Wang et al., 2015; Khatami and O'Kelly, 2013).
Değerlendirme esasları Tablo 1'de özetlenmiştir. Buna göre endüstriyel atığın geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliği, tek bir özelliğe göre değil; mekanik, hacimsel ve çevresel performansın birlikte değerlendirilmesiyle belirlenmektedir. Herhangi bir kriterin sağlanmaması durumunda uygun bir iyileştirme yöntemi uygulanarak ilgili değerlendirme aşaması tekrarlanabilir.

Tablo 1. Önerilen yaklaşımın akış matrisi

Aşama	Değerlendirilen koşul	Başlıca deneyler	Sağlanmazsa sonuç
1	Menşe ve temsil edilebilirlik	Numune alma protokolü, proses kayıtları	Yeniden numune al
2	Bileşim ve reaktiflik	XRD, XRF, serbest CaO / MgO	Aşama 4-5'in kapsamını belirler
3	Dayanım ve taşıma gücü	Kompaksiyon (ASTM-D698-12), hidrolik iletkenlik (ASTM-D2434-68), kesme kutusu (ASTM-D3080), CBR (ASTM-D1883) vb.	Yapısal dolgu için reddet
4	Hacimsel kararlılık	Hızlandırılmış şişme (ASTM-D4792)	Yaşlandırma, karıştırma veya reddet
5	Kirlilik potansiyeli	WLT, SWLT, CLT / SCLT, ICP	İyileştirmeye geç
6	Ortak kabul	Karıştırma, bariyer, atığı kapsülleme	Reddet

3. METODOLOJİK YAKLAŞIMIN EAF ÇELİK CÜRUFUNA UYGULANMASI

3.1. Aşama 1: Atığın Tanımlanması

Bu çalışmada, çelik üretiminin birincil ergitme aşamasında oluşan elektrik ark fırını (EAF) cürufu değerlendirilmiştir. Cüruf, 30 ton kapasiteli eksantrik taban dökümlü elektrik ark fırını kullanan bir tesisten temin edilmiş ve depolama sahasında atığın katılaşmasının hemen ardından yağışa maruz kalmadan laboratuvara getirilmiştir. Bu nedenle yaşlanma etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve malzemenin en reaktif durumunu temsil ettiği kabul edilmiştir. EAF cürufu farklı tane boyutlarına sahip, koyu gri-siyah renkli, pürüzlü, gözenekli ve oldukça sert bir yapıdadır (Şekil 4). Malzemenin heterojen yapısını temsil edebilmek amacıyla stok sahasının farklı noktalarından numuneler alınmış ve çevresel deneyler tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Elektrik ark ocağı çelik cürufu ve doğal agrega

3.2. Aşama 2 : Kimyasal ve Mineralojik Karakterizasyon

XRF sonuçları, EAF cürufu ile doğal kilin (NC) bileşimlerinin belirgin biçimde ayrıştığını göstermektedir. Cürufta baskın iki bileşen %34,54 ile Fe_2O_3 ve %33,34 ile CaO bileşiğidir (Tablo 2). CaO, cürufun alkali davranışının ve kısa dönemli hacim değişiminin nedenidir. Öte yandan %2,50 oranındaki MgO ise daha yavaş hidratasyonu nedeniyle uzun dönemli davranış açısından önem taşır. Bunların yanında %3,51 MnO, %1,10 Zn ve %0,82 Cr_2O_3

ölçülmüştür. Doğal kilde ise tablo tersine dönerek, %47,84 ile SiO_2 ve %15,71 ile Al_2O_3 öne çıkar. Bu alüminosilikat yapı, kilden bariyer olarak beklenen tutma kapasitesinin kaynağıdır.

Tablo 2. EAF cürufunun ve doğal kil (NC) bariyerinin XRF bileşimi (%)

Bileşen	EAF	NC	Değerlendirme açısından önemi
CaO	33,34	2,69	Alkalilik ve kısa vadeli şişme
SiO_2	5,26	47,84	Kil yapısının iskeleti
MnO	3,51	0,06	İz metal
Al_2O_3	2,18	15,71	Yüksek pH'ta çözünen Al kaynağı; NC'de kil minerali ve adsorpsiyon
MgO	2,50	2,75	Uzun vadeli şişme
Zn	1,10	133 ppm	İz metal
Cr_2O_3	0,82	0,03	İz metal
Kızdırma kaybı (LOI)	14,47	16,34	-

3.3. Aşama 3 : Fiziksel ve Mekanik Performans

Bu aşamada EAF cürufunun hedeflenen geoteknik uygulamalar için gereken fiziksel ve mekanik performansı karşılayıp karşılamadığı incelenmiştir (Tablo 3). Malzeme kötü derecelenmiş çakıl (GP), AASHTO sistemine göre ise A-1-a sınıfına girmektedir. Özgül ağırlığı 3,62, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 24,38 kN/m^3 olarak ölçülmüştür; her iki değer de referans doğal agreganın üzerindedir. Bu fark, cürufun yüksek demir oksit içeriğinden kaynaklanmaktadır. Hidrolik iletkenlik $1{,}11 \times 10^{-2}\ cm/s$ bulunmuş, yani malzeme serbest drenajlı olarak kabul edilebilir.

Kesme deneylerinde 37° içsel sürtünme açısı elde edilirken, CBR değeri kuru durumda %31, suya doygun durumda %36 olarak belirlenmiştir (McCulloch et al., 2017). Elde edilen sonuçlar genel olarak EAF cürufunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin dolgu ve alt-temel gibi geoteknik uygulamalar açısından uygun olabileceğini göstermekte ve literatürde bildirilen sonuçlarla uyum göstermektedir (Shi, 2004; Maghool et al., 2019; Şenol and Erol, 2009).

Tablo 3. EAF cürufunun indeks, mekanik ve hacimsel parametreleri

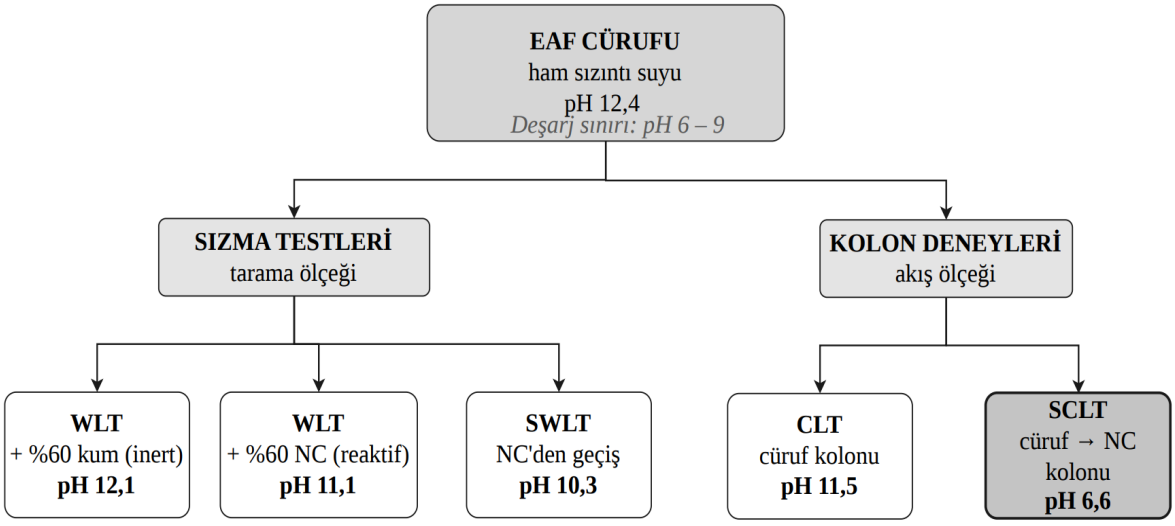
Parametre	EAF	Doğal Agrega
Özgül ağırlık, G_s	3,62	2,71
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	8,98	7,00
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m³)	24,38	21,75
Hidrolik iletkenlik, k (cm/s)	$1{,}11 \times 10^{-2}$	$2{,}08 \times 10^{-4}$
Kayma mukavemet açısı, φ (°)	37	39
CBR, kuru (%)	31	-
CBR, doygun (%)	36	
Hızlandırılmış şişme, 60 gün (%)	4,6	-
USCS / AASHTO	GP / A-1-a	GP / A-1-a

3.4. Aşama 4 : Hacimsel Stabilite

EAF cürufunun hacimsel kararlılığı, ASTM-D4792 standardına göre yürütülen hızlandırılmış şişme deneyleriyle sınanmıştır. Sıkıştırılmış numuneler $70 \pm 3\,°C$ sıcaklıkta 60 gün süreyle suda bekletilmiş, buharlaşma nedeniyle için su seviyesi günlük olarak tamamlanmıştır. Süre sonunda şişme yaklaşık %4,6 ölçülmüştür. Eğri deney boyunca yükselmeye devam etmiş, herhangi bir plato vermemiştir; dolayısıyla hacim değişimi 60 günde tamamlanmamıştır ve ölçülen değer bir alt sınır olarak okunmalıdır.
İlk aşamadaki genleşmenin serbest CaO'nun hidratasyonu, ilerleyen dönemdeki genleşmenin ise daha yavaş gerçekleşen MgO hidratasyonu ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir (Liu et al., 2022). Bu sonuçlar, EAF cürufunun hacimsel stabilite açısından doğrudan uygun kabul edilmemesi ve kullanım öncesinde gerekli iyileştirme yöntemlerinin değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.5. Aşama 5 : Çevresel Etki Değerlendirmesi

EAF cürufunun çevresel davranışı ilk olarak ASTM-D3987 standardına göre gerçekleştirilen su sızma deneyleri (WLTs) ile incelenmiştir. Ortalama pH değeri 12,4 olarak belirlenmiş ve bu değerin ilgili şartname sınırlarının üzerinde kaldığı görülmüştür (MoE-MCL, 2004; U.S.-EPA, 1990). Bu yüksek alkalinite cüruf bünyesindeki oksitlerin suda çözünmesi sonucunda çözeltiye OH^- salması ile ilişkilidir (Lim et al., 2016; Özkök et al., 2016). Bu etkilerin azaltılmasında doğal kil (NC) ve ince kumun kullanılabilirliği araştırılmıştır. %60 doğal kil ilavesi pH değerini 1,2 birim düşürürken, kum ilavesinde yalnızca 0,2 birimlik bir azalma elde edilmiştir. Doğal kilin daha belirgin etkisinin tamponlama, iyon değişimi ve adsorpsiyon özelliklerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Yong et al., 1990; Wang et al., 2015). Kum ise büyük ölçüde seyrelme etkisiyle sınırlı kalmıştır (Khatami and O'Kelly, 2013). Bununla birlikte, her iki karışımda da hedeflenen pH aralığına ulaşılamaması, karıştırma yönteminin tek başına yeterli olmadığını göstermiştir.
Doğal kilin bariyer olarak kullanıldığı sıralı sızma testlerinde (SWLTs) pH 2,0 birim azalmıştır. Kolon deneylerinde ise cüruf çıkışındaki pH yaklaşık 11,5 seviyesinde kalarak alkalinitenin uzun süre devam edebileceğini göstermiştir. Buna karşılık, sızıntı suyunun doğal kil bariyerinden geçirilmesiyle pH 6,6'ya düşmüş ve şartname sınırlarını sağlanmıştır. Deneylerden elde edilen pH sonuçlarının özeti Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu sonuç, doğal kil ile karıştırmaya kıyasla bariyer kullanımının EAF cürufunun çevresel etkilerinin azaltılmasında daha etkili olabileceğini göstermektedir.



Şekil 5. Sızıntı suyu pH değerlerinin deney konfigürasyonlarına göre değişimi

3.6. Aşama 6 : İyileştirme ve Karar

EAF cürufu, değerlendirme yaklaşımındaki mekanik ölçütlerini karşılamış, hacimsel ve çevresel ölçütlerde ise önlem gerektirmiştir. Cürufun doğal kille karıştırılması sızıntı suyu pH'ını şartname sınırlarına indirmeye yetmemiştir. Aynı kil kolonda bariyer olarak kullanıldığında ise çıkış suyu sınırların içine girmiştir. Ancak EAF cürufunun %4,6 olarak ölçülen şişme değeri hacimsel kararlılık kısıtlarını sağlamamıştır. Buradan hareket ile, EAF cürufunun, şişme potansiyeli azaltıldığında ve sızıntı sularının kirlilik potansiyeli kil bariyerler ile denetlenip kontrol edildiği takdirde yol dolgularında kullanıma uygun hale getirilebilir.
Bu sonuç önerilen yaklaşımın işleyişi hakkında da fikir vermektedir. Mekanik yeterlilik tek başına karar vermeye yetmemiş, kararı sonraki aşamalarda beliren şişme ve alkalinite belirlemiştir. Aynı kilin süspansiyon ve kolon deneylerinde farklı sonuç vermesi, saha koşullarına yakın düzeneklerin gerekliliğini göstermiştir. Kritik parametre atıktan atığa değişse de aynı aşamalı değerlendirme başka endüstriyel atıklar için de yürütülebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada endüstriyel atıkların geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliğini mekanik, hacimsel ve çevresel ölçütleri birlikte gözeterek belirleyen kademeli bir metodolojik değerlendirme yaklaşımı önerilmiş ve bu yaklaşım EAF çelik cürufuna uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. EAF cürufu fiziksel ve mekanik ölçütleri karşılamıştır. Buna karşılık %4,6 düzeyindeki şişme, malzemenin hacimsel kararlılık açısından iyileştirilmesini zorunlu kılmaktadır.
2. İşlenmemiş cüruf çevresel koşulu sağlamamıştır. Katkı malzemeleriyle karıştırma sızıntı suyunu sınır değerlerin içine çekmeye yetmemiş, doğal kilin bariyer olarak kullanılması ise bu sonucu vermiştir.

3. Aynı kilin su sızma testlerinde (süspansiyon) ve kolon deneylerinde farklı sonuç vermesi, çevresel değerlendirmenin süspansiyon deneyleriyle sınırlı tutulamayacağını, saha koşullarını daha iyi temsil eden kolon deneyleriyle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.
4. Mekanik yeterlilik geoteknik kullanım için gerekli, ancak tek başına yeterli bir koşul değildir. Bir atığın kullanılabilirliği, mekanik, hacimsel ve çevresel özelliklerin aşamalı ve birlikte değerlendirilmesiyle belirlenebilir.
5. Önerilen metodolojik değerlendirme yaklaşımı genel olarak endüstriyel atık değerlendirmesinde kullanılabilecek sistematik bir yol sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından 43769 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, sağlanan destek için BAP birimine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Harris, JM. (2003). Sustainability and sustainable development. *International Society for Ecological Economics*. 1: 1-12.

UN (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. 41. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs

Butlin, J (1989). Our common future. By World commission on environment and development.(London, Oxford University Press, 1987, pp. 383£ 5.95.). Wiley Online Library.

Persaud, N, Dagher, R. (2021) The united nations: 2030 sustainable development goals agenda. *The role of monitoring and evaluation in the UN 2030 SDGs agenda* (Springer).

Fritz, S, See, L, Carlson, T, Haklay, M, Oliver, JL, Fraisl, D, Mondardini, R, Brocklehurst, M, Shanley, LA, Schade, S. (2019). Citizen science and the United Nations sustainable development goals. *Nature Sustainability*. 2: 922-30.

ISW (2024). Global waste management outlook 2024: Beyond an age of waste, turning rubbish into a resource. International Solid Waste Association.

WHO (2021). World Health Organization : Solid waste management, air pollution and health.

Bharagava, RN, Saxena, G, Mulla, SI. (2020). Introduction to industrial wastes containing organic and inorganic pollutants and bioremediation approaches for environmental management. *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety: Volume I: Industrial Waste and Its Management*: 1-18.

Yearbook (2025). World Steel Association: Steel Statistical. Brussels. Belgium.

Wang, GC. (2016). The utilization of slag in civil infrastructure construction (Woodhead Publishing).

U.S.-EPA (1990). United States Environmental Protection Agency. Retrieved from Ground Water and Drinking Water: National Primary Drinking Water Regulations,1990.

Siddique, R, Rajor, A. (2012). Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*. 61: 59-68.

Rathnayake, M, Julnipitawong, P, Tangtermsirikul, S, Toochinda, P. (2018). Utilization of coal fly ash and bottom ash as solid sorbents for sulfur dioxide reduction from coal fired power plant: Life cycle assessment and applications. *Journal of Cleaner Production*. 202: 934-45.

Matinde, E, Simate, GS, Ndlovu, S. (2018). Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African institute of mining and metallurgy*. 118: 825-44.

Gupta, GK, Liu, H, Shukla, P. (2019). Pulp and paper industry–based pollutants, their health hazards and environmental risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 12: 48-56.

Shang, W, Peng, Z, Huang, Y, Gu, F, Zhang, J, Tang, H, Yang, L, Tian, W, Rao, M, Li, G. (2021). Production of glass-ceramics from metallurgical slags. *Journal of Cleaner Production*. 317: 128220.

Papamanolis, G, Giannakopoulos, E, Kalavrouziotis, IK. (2018). Shipyards waste and sustainable management in Greece: case study. *Desalination and Water Treatment*. 127: 90-96.

Dayioglu, AY, Aydilek, AH, Cimen, O, Cimen, M. (2018). Trace Metal Leaching from Steel Slag Used in Structural Fills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 144.

Shi, C. (2004). Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 16: 230-36.

Rohde, L, Peres Núñez, W, Augusto Pereira Ceratti, J. (2003). Electric arc furnace steel slag: base material for low-volume roads. *Transportation Research Record*. 1819: 201-07.

Maghool, F, Arulrajah, A, Suksiripattanapong, C, Horpibulsuk, S, Mohajerani, A. (2019). Geotechnical properties of steel slag aggregates: Shear strength and stiffness. *Soils and Foundations*. 59: 1591-601.

Fırat, S, Dikmen, S, Yılmaz, G, Khatib, JM. (2020). Characteristics of engineered waste materials used for road subbase layers. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 24: 2643-56.

Gökalp, İ, Uz, VE, Saltan, M, Tutumluer, E. (2018). Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. *Transportation Geotechnics*. 14: 61-69.

Mayes, W, Younger, P, Aumônier, J. (2008). Hydrogeochemistry of alkaline steel slag leachates in the UK. *Water, Air, and Soil Pollution*. 195: 35-50.

Riley, AL, Mayes, WM. (2015). Long-term evolution of highly alkaline steel slag drainage waters. *Environmental monitoring and assessment*. 187: 1-16.

Piatak, NM, Parsons, MB, Seal II, RR. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*. 57: 236-66.

Bin-Shafique, S, Benson, CH, Edil, TB, Hwang, K. (2006). Leachate concentrations from water leach and column leach tests on fly ash-stabilized soils. *Environmental Engineering Science*. 23: 53-67.

De Windt, L, Chaurand, P, Rose, J. (2011). Kinetics of steel slag leaching: batch tests and modeling. *Waste management*. 31: 225-35.

Yu, S, Garrabrants, AC, DeLapp, RC, Hubner, T, Thorneloe, SA, Kosson, DS. (2025). Evaluation of testing approaches for constituent leaching from electric arc furnace (EAF) slags. *Journal of Environmental Management*. 373: 123892.

Engström, F, Larsson, ML, Samuelsson, C, Sandström, Å, Robinson, R, Björkman, B. (2014). Leaching behavior of aged steel slags. *steel research international*. 85: 607-15.

Ramonich, EV, Barra, M. (2001). Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction. *Materiales de Construcción*. 51: 137-48.

Yildirim, IZ, Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in civil engineering*. 2011.

O'Connor, J, Nguyen, TBT, Honeyands, T, Monaghan, B, O'Dea, D, Rinklebe, J, Vinu, A, Hoang, SA, Singh, G, Kirkham, M. (2021). Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: a review. *Journal of Hazardous Materials*. 419: 126478.

ASTM-D4792-13 Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. West Conshohocken, PA, ASTM International, 2024.

Montenegro-Cooper, J, Celemín-Matachana, M, Cañizal, J, González, J. (2019). Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. *Construction and Building Materials*. 203: 201-09.

Liu, J, Xu, J, Liu, Q, Wang, S, Yu, B. (2022). Steel slag for roadway construction: A review of material characteristics and application mechanisms. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 34: 03122001.

Chen, B, Yoon, S, Zhang, Y, Han, L, Choi, Y. (2019). Reduction of steel slag leachate pH via humidification using water and aqueous reagents. *Science of the Total Environment*. 671: 598-607.

Dayioglu, AY, Aydilek, AH, Cetin, B. (2014). Preventing swelling and decreasing alkalinity of steel slags used in highway infrastructures. *Transportation Research Record*. 2401: 52-57.

MoE-MCL (2004). Water pollution control regulation, purpose, scope, basis, definitions. Ministry of Environment, Issue, 25687, 2004.

Yong, RN, Warkentin, BP, Phadungchewit, Y, Galvez, R. (1990). Buffer capacity and lead retention in some clay materials. *Water, Air, and Soil Pollution*. 53: 53-67.

Wang, X, Tang, C, Mahony, S, Baldock, J, Butterly, C. (2015). Factors affecting the measurement of soil pH buffer capacity: approaches to optimize the methods. *european Journal of soil science*. 66: 53-64.

Khatami, HR, O'Kelly, BC. (2013). Improving mechanical properties of sand using biopolymers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 139: 1402-06.

ASTM-D698-12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). ASTM International, West Conshohocken, PA: 2021. In.

ASTM-D2434-68 Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

ASTM-D3080 Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International, 2011.

ASTM-D1883 Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils. ASTM International, 2016.

McCulloch, T, Kang, D, Shamet, R, Lee, SJ, Nam, BH. (2017). Long-term performance of recycled concrete aggregate for subsurface drainage. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 31: 04017015.

Şenol, A, Erol, B (2009). 2D Numerical Settlement Analysis of A Slag Aggregated Test Road on Weak Soils. In *Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference*, 119-24.

Lim, JW, Chew, L, Choong, T, Tezara, C, Yazdi, MH (2016). Utilizing steel slag in environmental application-An overview. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012067. IOP Publishing.

Özkök, E, Davis, AP, Aydilek, AH. (2016). Treatment methods for mitigation of high alkalinity in leachates of aged steel slag. *Journal of Environmental Engineering*. 142: 04015063.