

ELEKTRİK ARK VE POTA OCAĞI ÇELİK CÜRUFLARININ GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

**Bilal Korkmaz^{1*}, Şüheda Taştan², Aşlı Y. Dayıoğlu³, Aykut Şenol⁴, Mustafa
Hatipoğlu⁵**

ÖZET

Molekül yapısı oksitler, silikatlar ve boratlardan oluşan cüruf, demir ve çelik üretim zincirinde yan atık olarak elde edilen katı bir malzemedir. 2020 yılı verilerine göre dünya çapında çelik üretimi yıllık 1.880 milyar ton olarak rapor edilmiştir. Türkiye, bu üretimde, 35.81 milyon ton ham çelik ile 7. sırada yer almıştır. Üretim aşamalarından edinilen verilere göre genellikle 1 ton ham çelik üretimi için %15- %20 oranında cüruf atığı oluşmaktadır. Bu verilere göre büyük miktarlarda atık oluştuğu ve atıkların depolama veya bertaraf edilebilme noktasında sorunlara neden olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada, çelik cüruflarının, yol temel dolgusunda agrega olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Elektrik Ark (EAF) ve Pota ocağı çelik cürufları tedarik edilmiş, cürufların, dane dağılımı, özgül ağırlığı, kompaksiyon parametreleri, geçirimsizlik katsayısı, kuru – yaş CBR değerleri ve mukavemet parametrelerini belirlemek üzere deneyler yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, Elektrik Ark (EAF) cürufu, dolgu özellikleri bakımından daha yüksek performans özelliklerine sahiptir. Öte yandan, her iki cüruf malzemesinin de yol dolgularında kullanılabilecek geoteknik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Ark (EAF) cürufu, Pota cüruf, Yol inşaatı, Temel ve alttemel.

ABSTRACT

As a general term, the slag, which consists of light oxides, silicates, and borates, is a solid by-product of metal, iron, and steel-making industries as well as accumulates on the surface of the molten product as a result of low density. As of 2020, worldwide steel production was reported as 1.880 billion tons annually. Turkey ranked 7th with an annual crude steel production of 35.81 million tons. Another issue should be mentioned is that generally for 1 ton of crude steel production, 15%-20% slag waste is generated. According to this data, enormous amounts of waste are produced, and this waste presents challenges

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü., TÜRKİYE. (E-mail:korkmaz18@itu.edu.tr)

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü., TÜRKİYE. (E-mail:tastan20@itu.edu.tr)

³İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü., TÜRKİYE. (E-mail:yalcinas@itu.edu.tr)

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü., TÜRKİYE. (E-mail:senol@itu.edu.tr)

⁵İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü., TÜRKİYE. (E-mail:hatipoglu1@itu.edu.tr)

at the point of storage or disposal. In this study, the use of steel slag as aggregate in road base and subbase layer was investigated experimentally. To do this, Electric Arc (EAF) and Ladle (LF) furnace steel slags were supplied, and experiments were carried out to determine the grain – size distribution, specific gravity, compaction parameters, permeability coefficient, dry-wet CBR values and strength parameters of the slags. As a result, Electric Arc (EAF) slag has higher performance properties in terms of filling properties. Besides, it has been determined that both slag materials have sufficient geotechnical properties to be used as subbase aggregates.

Keywords: *Electric Arc (EAF) slag, Ladle (LF) slag, Road construction, Base and Subbase layer.*

1. GİRİŞ

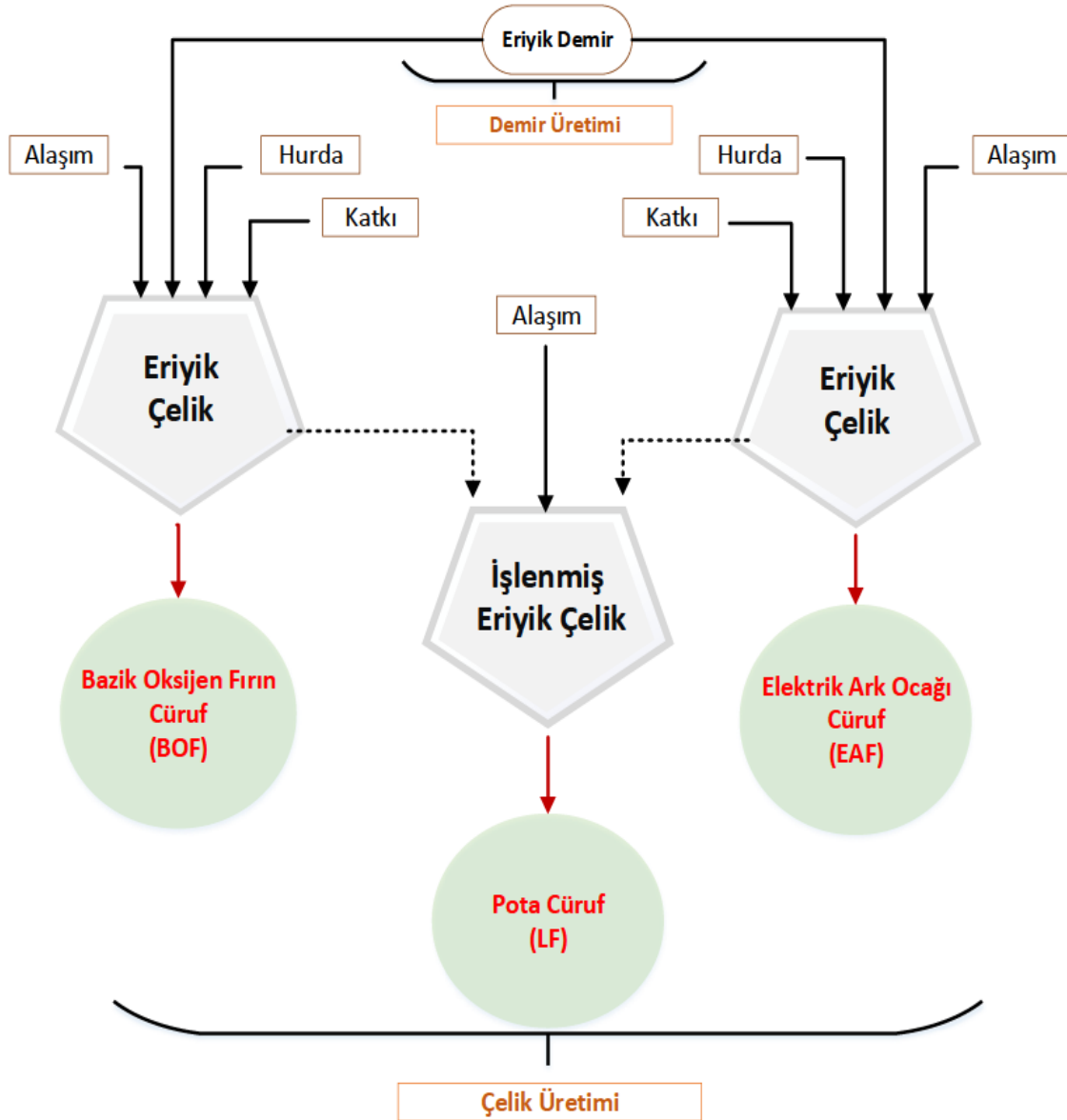
Hafif oksitler, silikatlar ve boratlardan oluşan cüruf; metal, demir ve çelik üretim süreçlerinde oluşan ve eriyik pik demire göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için yüzeyde biriken katı bir yan üründür (Uysal ve Bahar, 2018; Yi vd., 2012; Yildirim ve Prezzi, 2011). Ham demir cevherinden elde edilen pik demirin, bazik oksijen ve elektrik ark ocaklarında alaşımlar, hurdalar ve yabancı maddeleri gidermek için kullanılan katkıları ile birlikte işlenmesi ile eriyik çelik elde edilir (Wang, 2016). Böylece çelik cürufu, bazik oksijen fırınında (BOF) demirin çeliğe dönüştürülmesinden ve de elektrik ark ocağında (EAF) çelik imal etmek üzere hurdanın eritilmesi ile elde edilen bir atıktır. Bu iki fırından çıkan çelik cürufları çok benzerdir (Dayioglu, 2016; Shi, 2004). Ancak pota fırınlarında ikincil işleminden geçen eriyik çelik neticesinde oluşan cüruf ise BOF ve EAF cüruflarından kimyasal olarak farklılık göstermektedir (Shi, 2004; Yildirim ve Prezzi, 2011). Çelik cüruflarının çeşitli çalışmalardan derlenen kimyasal bileşimleri Tablo 1’de sunulmuştur. Yukarıda ifade edilen çelik üretim aşamalarının şeması ise Şekil 1.’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Çelik cüruflarının kimyasal bileşimleri (Wang, 2016)

Kimyasal Bileşim	Kompozisyon Aralıkları (%)		
	BOF Cüruf	EAF Cüruf	Pota Cüruf
Kireç (CaO)	35-45	40-60	30-60
Silikat (SiO ₂)	12-17	10-30	2-35
Alüminat (Al ₂ O ₃)	0.98-3.4	2-9	5-35
FeO	10-25	10-30	0-15
Magnezya (MgO)	3-15	3-8	1-12.6
Manganez (MnO)	5-15	2-5	0-5
SO ₃	0-0.3	0.1-0.6	0.1-1
P ₂ O ₅	0.2-4	0-1.2	0-0.4

2021 yılı verilerine göre dünya çapında çelik üretimi yıllık 1.951 milyar ton olarak rapor edilmiştir. Türkiye, bu üretimde, 40.36 milyon ton ham çelik ile 7. sırada yer almıştır. Üretim aşamalarından edinilen verilere göre genellikle 1 ton ham çelik üretimi için %15 - %20

oranında cüruf atığı oluşmaktadır (Association, 2022; Dayioglu vd., 2018). Belirtilen üretim kapasitesi ve oluşan cüruf atığının miktarı depolama sorununa ve buna bağlı olarak çevresel ve biyolojik zararlara neden olmaktadır. Genel bir terim olarak sürdürülebilirlik; faydalı doğal veya yapay kaynakların minimum tüketimi ve korunması ile endüstriyel süreçlerden kaynaklanan zararlı atıkların çevreye en az zarar verecek şekilde yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir (Sekharan vd., 2019; Václavík vd., 2020). Bu noktada cüruf atıklarının yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesinde geoteknik mühendisliği uygulamalarının büyük katkısı bulunmaktadır. Özellikle yol inşaatlarında kullanılan alt dolgu miktarı düşünüldüğünde, çelik cürufları, geoteknik uygulamalar ile büyük oranda bertaraf edilebilecektir. Bu amaçla yapılan çalışmalar ışığında, çelik cüruflarının yol dolgusunda kullanılan doğal agregalara alternatif sunabileceği belirtilmiştir (Dayioglu vd., 2014; Mina vd., 2019; Shi, 2004; Wang vd., 2020; Yildirim ve Prezzi, 2011, 2022). Cürufların agrega olarak değerlendirildiği saha uygulamalarında, dayanımın artması ile servis ömrünün uzadığı ve oturmaların azaldığı rapor edilmiştir (Senol ve Erol, 2009).

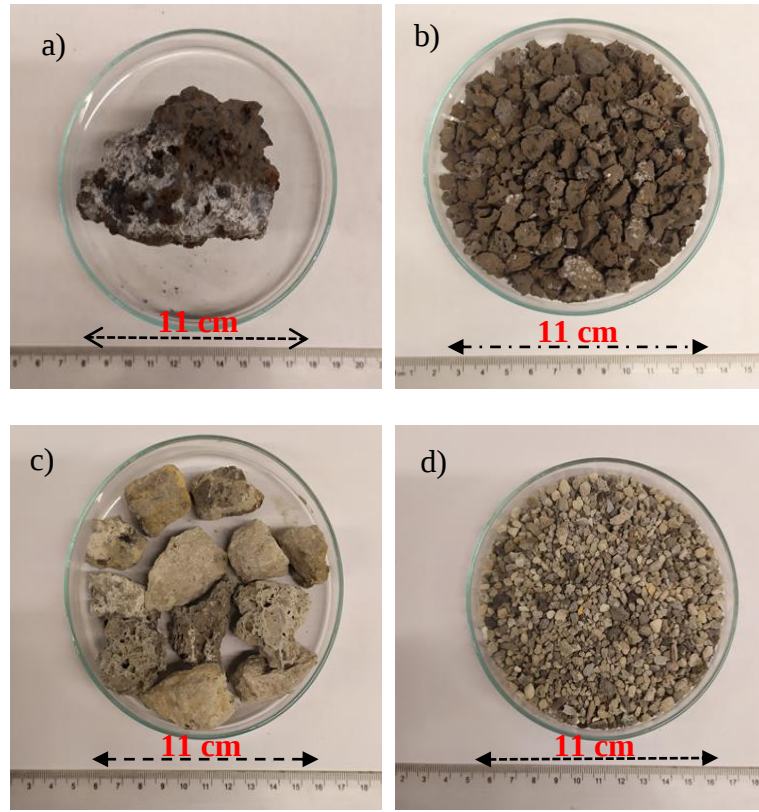


Şekil 1. Çelik üretim şeması (Wang, 2016; Yildirim ve Prezzi, 2011)

Bu çalışmada, çelik cüruflarının, yol temel dolgusunda agrega olarak kullanımı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Elektrik Ark (EAF) ve Pota ocağı çelik cürufları tedarik edilmiş, cürufların, dane dağılımı, özgül ağırlığı, kompaksiyon parametreleri, geçirimsizlik katsayısı, kuru – yaş CBR değerlerini ve mukavemet parametrelerini belirlemek üzere deneyler yapılmıştır. Çalışmada ayrıca, cüruf örneklerinin şişme potansiyelleri irdelenmiştir.

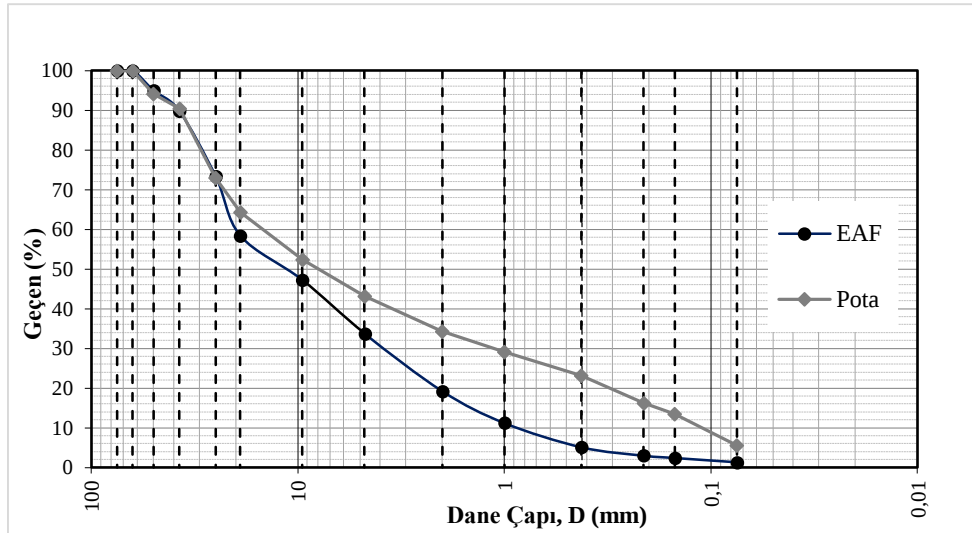
2. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan çelik cürufları, Bursa ilinde faaliyet gösteren "*Çemtaş Çelik Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş.*" firmasından temin edilmiştir. Şekil 2’de numunelerden örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2. Farklı çaplardaki cüruflar: a) 2'' elek üstü EAF b) 3/8'' çaptan geçen EAF c) Pota cürufu genel form d) #4 elek üstü Pota cürufu

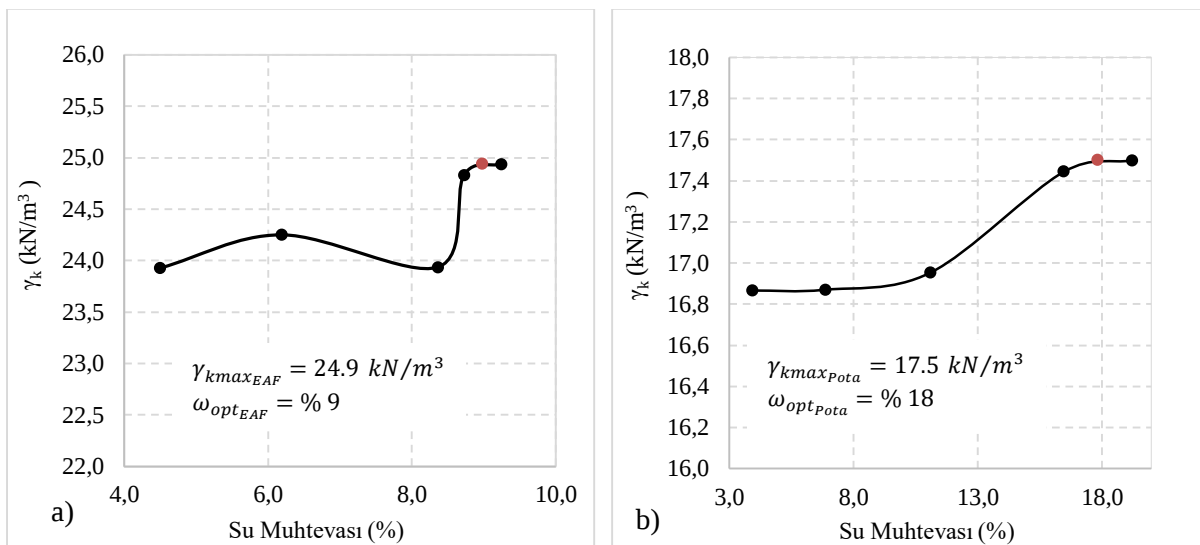
Yapılan piknometre (ASTM-D854, 2010) deneylerine göre elektrik ark (EAF) ve pota ocağı çelik cüruflarının özgül ağırlıkları sırası ile 3.60 ve 2.74 olarak belirlenmiştir. Önceki çalışmalarda belirtildiği gibi, EAF'ın özgül ağırlığı 3.01 ile 3.68 arasında değişmektedir (Abu-Eishah vd., 2012; Ameri vd., 2013; Arribas vd., 2015; Yildirim ve Prezzi, 2020). Elek analizi (ASTM-D422-63, 2007) sonuçları Şekil 3'te sunulmuş ve numuneler GP ve A-2-7 olarak sınıflandırılmıştır.



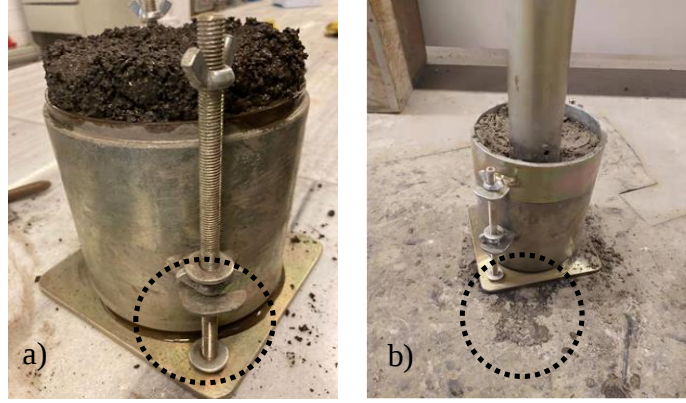
Şekil 3. Dane çapı dağılım eğrileri

2.1. Modifiye Proktor Deneyleri

Numunelerin dane dağılım eğrileri incelendiğinde, ağırlıkça %30'dan fazlasının 4 numaralı eleğin üzerinde olduğu görülmektedir. Buna göre, ASTM – D698'de belirtilen Metot – C kullanılarak sıkıştırma deneyleri, modifiye enerji altında gerçekleştirilmiş, moldun alt noktasında serbest su gözlemlendiğinde deneyler sonlandırılmıştır. Kompaksiyon parametreleri ise Maryland Standard Method of Test (MSMT) 321'e göre serbest suyun gözlemlendiği noktanın su içeriği ile bir önceki nokta arasındaki farkın yarısı alınarak belirlenmiştir. Şekil 4'te kompaksiyon eğrileri, Şekil 5'te ise serbest suyun çıkışı gösterilmiştir. Doğal zeminlerde gözlenen standart kompaksiyon eğrilerinden farklı olarak birkaç pik noktası içeren düzensiz sıkışma eğrileri de mevcuttur. Düzensiz eğrilikler üzerine yapılmış çalışmalara göre dane dağılımı, Atterberg limitleri, dane şekli, mineraloji ve yüzey gerilimi gibi etkilerin bu eğrileri oluşturduğu ve özellikle cüruf vb. atıklarda için de söz konusu olduğu belirtilmiştir (Rohde vd., 2003; Yildirim ve Prezzi, 2009).



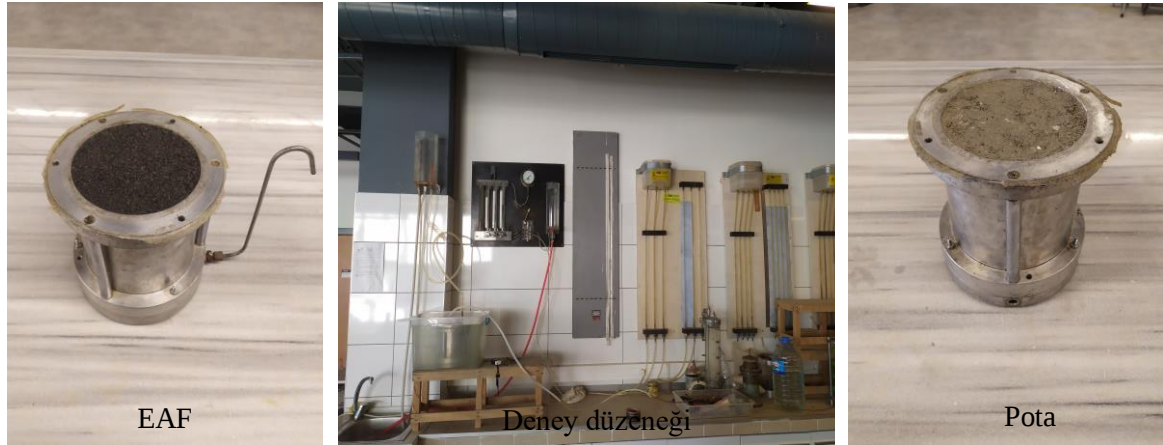
Şekil 4. Modifiye proktor eğrileri: a) EAF – b) Pota



Şekil 5. Serbest su: a) EAF – b) Pota

2.2. Geçirimlilik Deneyleri

Hidrolik iletkenlikleri belirlemek üzere sabit seviyeli permeabilite deneyleri ASTM - D2434-68 (2006) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ve örnekler Şekil 6'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre elektrik ark ocağı (EAF) ve pota cüruflarının permeabilite katsayıları sırası ile 1.11×10^{-2} cm/s ve 3.23×10^{-4} cm/s olarak belirlenmiştir. Pota cürufundaki ince dane miktarı EAF'a oranla fazla olduğu için daha düşük geçirimsizlik katsayısına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Sabit seviyeli permeabilite deney düzeneği ve silindirik numuneler

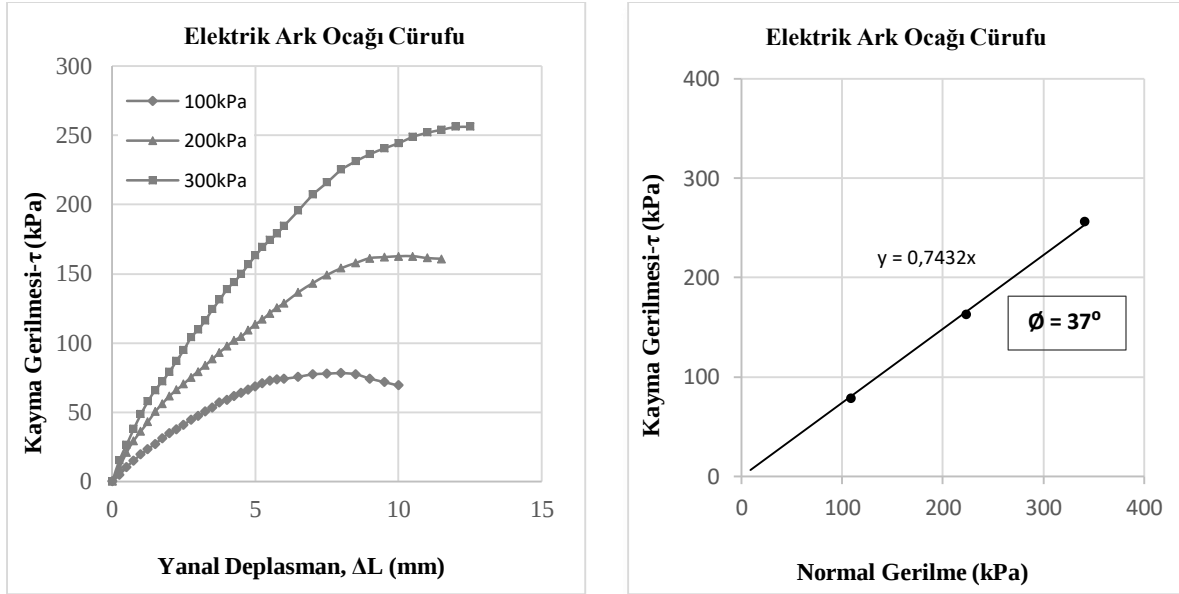
2.3. Kesme Kutusu Deneyleri

Çelik cüruflarının mukavemet özelliklerini belirlemek adına kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Numuneler #10 numaralı elekten elenerek, 100, 200 ve 300 kPa'lık gerilme seviyelerinde kuru şekilde kesmeye tabi tutulmuştur. Şekil 7 ve Şekil 8'de cüruflara ait kesme kutusu sonuçları gösterilmiştir.

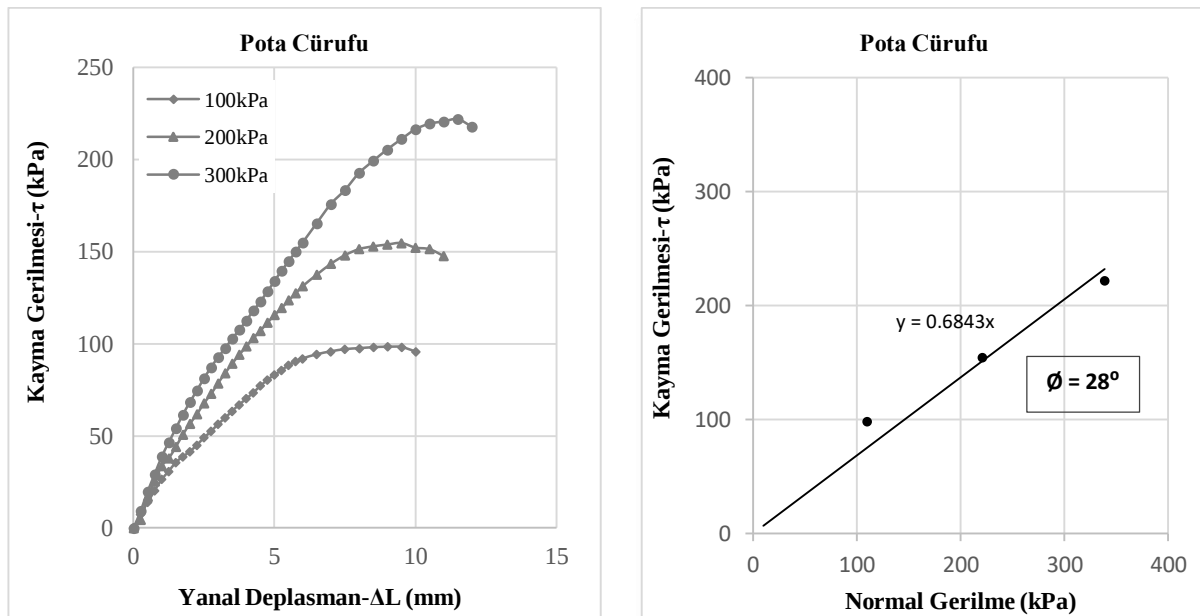
2.4. Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) Deneyleri

Kuru CBR Deneyleri

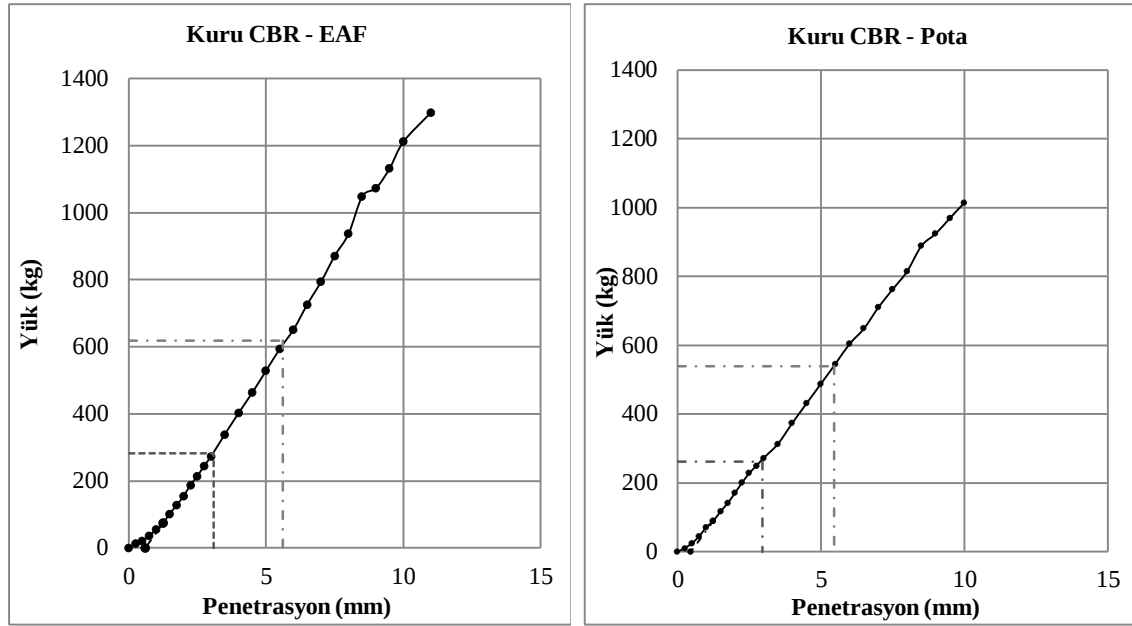
Elektrik Ark Ocağı (EAF) ve Pota cürufu 19 mm'lik elekten elenerek kuru CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler, optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (ASTM D1883-21). Numunelere ait CBR eğrileri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 7. EAF cürufuna ait kesme kutusu sonuçları



Şekil 8. Pota cürufuna ait kesme kutusu sonuçları



Şekil 9. Kuru CBR sonuçları

Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra CBR değerleri belirlenmiş ve Tablo 2’de gösterilmiştir.

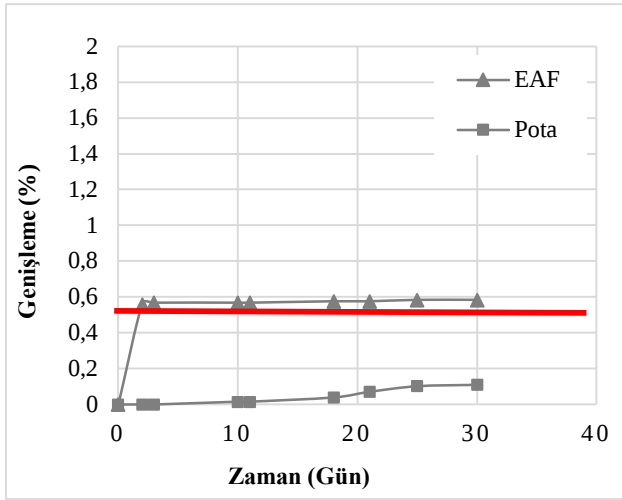
Tablo 2. Kuru CBR deney sonuçları

Düzeltilmiş Kuru CBR Yüzdeleri		
Penetrasyon (mm)	CBR _{EAF} (%)	CBR _{Pota} (%)
2.5	20.8	19.2
5	30.2	26.4

Elde edilen değerlere göre EAF cürufu, yol dolgusu açısından potaya oranla daha fazla performans göstermiştir. Bu durum, pota cürufunun ikincil işlemden sonra içeriğindeki demir oranının azalması ile açıklanabilir. Öte yandan doğal zemin CBR değeri (%18) dikkate alındığında çelik cürufları yol dolgularında kullanılabilir.

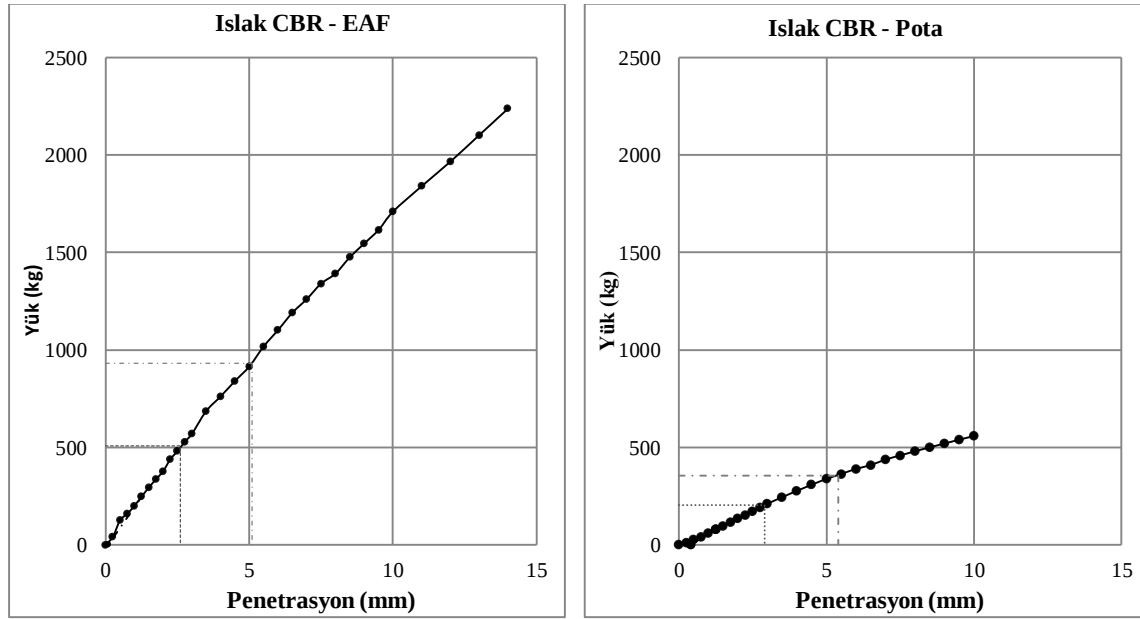
Islak CBR Deneyleri

Belirtildiği gibi, çelik cürufları silika, alümina, kireç, magnezyum ve demir gibi oksitler içerir. Uygun sıcaklık ve kür koşulları altında, serbest kireç ve serbest magnezyum oksitler su ile temas edip hidroksitler oluşturarak uzun vadeli genişlemeye veya şişmeye neden olmaktadır(Cikmit vd., 2019; Dayioglu, 2016; Feng vd., 2022; Ramonich ve Barra, 2001). Özellikle serbest kirecin büyük ölçüde hidratasyona uğrayacağı ve bunun servis ömrü boyunca şişmeye ve stabilite sorunlarına yol açacağı bilinmektedir. Bunun yanında, serbest magnezyum, kireçten daha yavaş bir hidratasyon hızına sahiptir, bu nedenle yukarıda belirtilen uzun vadeli şişmeye neden olur (Montenegro-Cooper vd., 2019). Mevcut EAF ve Pota cüruflarının şişme potansiyelini incelemek için, numuneler su tankında tutulmuş ve deplasman saatleri ile okumalar yapılmıştır. Genişleme yüzdeleri Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10. Cüruflara ait şişme – zaman grafiği ve numune doyurma kabı

Öte yandan kompaksiyon parametreleri kullanılarak kalıplara yerleştirilen ve su kabında bekletilen numunelere ait ıslak CBR eğrileri Şekil 11’de sunulmuştur.



Şekil 11. Islak CBR sonuçları

ASTM D-1883’de belirtilen eğri düzeltmeleri yapıldıktan sonra CBR değerleri belirlenmiş ve Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Islak CBR deney sonuçları		
Düzeltilmiş Kuru CBR Yüzdeleri		
Penetrasyon (mm)	CBR _{EAF} (%)	CBR _{Pota} (%)
2.5	37.4	15.1
5	45.6	17.4

Hesaplanan CBR yüzdeleri değerlendirildiğinde, pota cürufunda düşüş yaşandığı, EAF’ta ise

yükselme meydana geldiği gözlenmiştir. EAF'taki artış uygun kür koşulları ve sıcaklık altında meydana gelen hidratlaşmanın bir sonucu olarak yorumlanabilir.

3. SONUÇLAR

Çelik üretimi sonucu ortaya çıkan atık miktarları depolama sorunlarına ve buna bağlı olarak çevresel zararlara yol açmaktadır. Atıkların bertaraf edilebilmesi bakımından geoteknik uygulamalar elverişlidir. Özellikle yol inşaatlarında doğal agrega yerine kullanılabilmesi, büyük hacimlerdeki atığın bertaraf edilmesini sağlayacaktır. Bu bakımdan, çelik cüruflarının yol dolgusu olarak kullanımının araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Mukavemet parametreleri, geçirimsizlik katsayıları ve kimyasal yapıdan kaynaklı rijitlik değerleri dikkate alındığında, çelik cürufları yol dolgusu olarak kullanıma uygundur ($\phi'_{EAF} = 37^\circ$, $\phi'_{Pota} = 28^\circ$). Ancak cüruf kullanımı durumunda, servis ömrü boyunca oluşabilecek duraylılık sorunlarını azaltmak için uzun vadeli şişme potansiyellerinin irdelenmesi gerekmektedir.
- Sabit seviyeli permabilite deneylerine göre elektrik ark ocağı (EAF) ve pota cüruflarının geçirimsizlik katsayıları sırası ile 1.11×10^{-2} cm/s ve 3.23×10^{-4} cm/s olarak bulunmuştur.
- Literatürde cürufların uygun koşullarda hidratlaşma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada yapılan ıslak CBR ve permabilite deneylerinde de hidratlaşmanın etkileri gözlenmiştir. Buna göre, hidratlaşma reaksiyonları geçirimsizlik katsayısında azalmaya neden olurken, EAF cürufunun CBR değerlerini arttırmıştır.
- Kuru ve ıslak CBR sonuçlarına göre, çelik cürufu, doğal agregaya kıyasla yeterli performansa sahiptir. Ancak malzeme içeriğindeki serbest kalsiyum ve magnezyumun sebep olacağı şişmenin, kullanım öncesinde detaylı bir şekilde incelenmesi uygun olacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, malzeme temininde sağlamış oldukları katkılardan dolayı, "Çemtaş Çelik Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş." firmasına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Abu-Eishah, S. I., El-Dieb, A. S., & Bedir, M. S. (2012). Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*, 34, 249-256.
- Ameri, M., Hesami, S., & Goli, H. (2013). Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Construction and Building Materials*, 49, 611-617.
- Arribas, I., Santamaria, A., Ruiz, E., Ortega-Lopez, V., & Manso, J. M. (2015). Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials*, 90, 68-79.
- Association, W. S. (2022). World steel in figures. *World Steel Association: Brussels, Belgium*.
- ASTM-D422-63. (2007). D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA: 2007. In.
- ASTM-D2434-68 (2006) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant

- Head). ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/D2434-68R06.
- ASTM-D854, D. (2010). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. *D854*.
- Cikmit, A. A., Tsuchida, T., Hashimoto, R., Honda, H., Kang, G., & Sogawa, K. (2019). Expansion characteristic of steel slag mixed with soft clay. *Construction and Building Materials*, 227, 116799.
- Dayioglu, A. Y. (2016). *Geotechnical and environmental impacts of steel slag in highway embankments* University of Maryland, College Park].
- Dayioglu, A. Y., Aydilek, A. H., & Cetin, B. (2014). Preventing swelling and decreasing alkalinity of steel slags used in highway infrastructures. *Transportation Research Record*, 2401(1), 52-57.
- Dayioglu, A. Y., Aydilek, A. H., Cimen, O., & Cimen, M. (2018). Trace metal leaching from steel slag used in structural fills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(12), 04018089.
- Feng, P., Li, Z., Zhang, S., & Yang, J.-Q. (2022). Steel slag aggregate concrete filled-in FRP tubes: Volume expansion effect and axial compressive behaviour. *Construction and Building Materials*, 318, 125961.
- Mina, E., Kusuma, R., & Ulfah, N. (2019). Utilization of steel slag and fly ash in soil stabilization and their effect to california bearing ratio (CBR) value.(Case study: Kp. Kadusentar road Medong village Mekarjaya Subdistrict Pandeglang District). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
- 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, 201-209.
- Ramonich, E. V., & Barra, M. (2001). Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction. *Materiales de Construcción*, 51(263-264), 137-148.
- 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(1), 201-207.
- Sekharan, S., Gadi, V. K., Bordoloi, S., Saha, A., Kumar, H., Hazra, B., & Garg, A. (2019). Sustainable geotechnics: a bio-geotechnical perspective. In *Frontiers in Geotechnical Engineering* (pp. 313-331). Springer.
- Senol, A., & Erol, B. (2009). 2D Numerical Settlement Analysis of A Slag Aggregated Test Road on Weak Soils. Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference,
- Shi, C. (2004). Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236.
- Uysal, F. F., & Bahar, S. (2018). Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 37-52.
- Václavík, V., Ondová, M., Dvorský, T., Eštoková, A., Fabiánová, M., & Gola, L. (2020). Sustainability potential evaluation of concrete with steel slag aggregates by the LCA method. *Sustainability*, 12(23), 9873.
- Wang, G. C. (2016). *The utilization of slag in civil infrastructure construction*. Woodhead Publishing.
- Wang, S., Li, X., Ren, K., & Liu, C. (2020). Experimental Research on Steel slag Stabilized Soil and its Application in Subgrade Engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 4603-4615.

- Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791-801.
- Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011.
- Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2022). Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1754-1767.