



# Çelik Cüruflarının Potansiyel Kullanım Alanlarının Değerlendirilmesi

## Evaluation of Potential Uses of Steel Slags

Gülşen Tozsın<sup>1</sup>, Burak Kavasoglu<sup>2</sup>

### öz

Ülkelerin sahip olduğu doğal kaynakların yanı sıra atıkların değerlendirilmesi günümüzde ekonomik açıdan rekabet gücünü önemli derecede etkilemektedir. Özellikle endüstriyel üretim sonucu oluşan atıkların geri dönüştürülerek farklı sektörlerde kullanılması, hem ülkelerin birincil hammadde kullanım ihtiyacının azalması ile ekonomik fayda sağlamakta hem de bu atıkların çevresel olumsuz etkilerinin önlenmesine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışmada, çelik üretim tesislerinde yan ürün olarak ortaya çıkan çelik cüruflarının, geri dönüşüm yoluyla ulusal ekonomiye katkı sağlayacak şekilde farklı alanlarda kullanım potansiyelleri değerlendirilmiştir. Türkiye ekonomisinin önemli bir kaynağı olan çeliğin üretimi sırasında oluşan cüruflara ait karakteristik özellikler incelendiği zaman birçok alanda kullanıma uygunluğu gözlemlenmiştir. Yapılan araştırmalar, çelik üretimi sonucunda oluşan atıl durumundaki cürufların genellikle doğal agrega yerine kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Bu malzemenin özellikle karayolu yapımı, çimento ve beton üretimi, kıyı ve liman yapıları, demiryolu yapımı, gübre ve grit üretimi gibi pek çok alanda geleneksel malzemelere göre kabul edilebilir derecede kullanılabilir olduğu değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik cürufu, Endüstriyel atık, Atık yönetimi, Sıfır atık

### ABSTRACT

In addition to the natural resources of the countries, the evaluation of wastes has had a significant impact on the competitiveness of the economy in recent years. Especially the recycling of wastes generated because of industrial production and their use in different sectors both provide economic benefits by reducing the need for primary raw material use and contribute to the prevention of the negative environmental effects of these wastes. In this study, the potential of use of steel slag, which is produced as a by-product in steel production facilities, in different areas, which will contribute to the national economy through recycling, has been evaluated. When the characteristics of the slag formed during the production of steel, which is an important resource of the Turkish economy, are examined, it has been observed that it is suitable for use in many areas. Studies have shown that the slag formed because of steel production can generally be used instead of natural aggregate. It has been evaluated that this material can be used at an acceptable level in many areas such as road construction, cement and concrete production, coastal and port structures, railway construction, fertilizer, and grit production.

**Keywords:** Steel slag, Industrial waste, Waste management, Zero waste

<sup>1</sup> **Corresponding Author:** Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, [gulsentozsin@gmail.com](mailto:gulsentozsin@gmail.com), 0000-0001-5653-9919

<sup>2</sup> T.C. Milli Savunma Bakanlığı, Askeri Fabrikalar Genel Müdürlüğü, 55'inci Bakım Fabrika Müdürlüğü, Erzurum, Türkiye, [burakkavasoglu93@gmail.com](mailto:burakkavasoglu93@gmail.com), 0000-0003-1211-0613



## GİRİŞ:

Gelişen teknoloji ve nüfusun beraberinde getirdiği atık oranındaki artış, çevre için önemli boyutlarda problemlere sebebiyet verebilmektedir. İnsanların temiz ve sağlıklı bir doğada yaşamasına olanak sağlanması, yaşam kalitesinin artırılması ve gelecek nesiller için ekonomik, sosyal ve çevresel koşulların iyileştirilebilmesi gibi sebeplerden dolayı malzemelerin sürdürülebilir olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Malzemelerin sürdürülebilir değerlendirmesinin yapılabilmesi için hammadde çıkarılması, taşınması, dönüştürülmesi, işlenmesi, ürün kullanımı ve geri dönüşüm ihtimalinin analiz edilmesi gerekmektedir (Yüksel, 2017).

Dünya çapında çelik üretimi 2021 yılında, 2020 yılına kıyasla %3,7 oranında artışla, 1,95 milyar tona yükselmiştir. Türkiye’de ise çelik üretimi, bir önceki yıla kıyasla %12,7 oranında artarak 2021 yılında 40,4 milyon ton seviyelerine ulaşmıştır (ÇİB, 2023). Yüksek miktarlardaki çelik üretimi, beraberinde yüksek oranda cüruf oluşumuna yol açmaktadır. Genel olarak 1 ton sıvı ham çelik üretiminde %10 ile 15 oranında cüruf ortaya çıkmaktadır. 2018 yılı verilerine göre, Türkiye genelinde 37.311.733 ton ham çelik üretimi yapılmış ve 5.562.018 ton cüruf açığa çıkmıştır (Tozsın ve Öztaş, 2023). Çelik cüruflarının uygun bir şekilde bertaraf edilememesi, içeriğinden kaynaklanan alkali sızıntıların yüzey ve yeraltı sularına ulaşması sonucu tehdit oluşturabilmektedir. Çelik cürufu, içerdiği ağır metallere dolayı insan sağlığı ve çevre kirliliği açısından oldukça dikkat edilmesi gereken bir konudur (Yonar, 2017).

Çelik endüstrisinden elde edilen cürufların başka alanlarda kullanılabilmesi mümkündür. Çelik cürufları sahip oldukları yüksek mukavemet ve aşınma direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı yol, kavşak ve park alanları gibi çeşitli alanlarda katkı malzemesi olarak kullanım imkânına sahiptir. Yapılan bir çalışmada, çelik cüruf katkılı asfalt karışımının kayma direnci araştırılmış ve %30 cüruf içeren asfalt karışımının en iyi mekanik özellik gösterdiği ifade edilmiştir. Ayrıca elastisite modülü, yorulma ömrü, çekme mukavemeti gibi özellikler değerlendirilmiş ve kireç taşı yerine %75 oranında çelik cüruf kullanımının asfaltın özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir (Asi vd., 2007). Yapılan literatür araştırmaları, cürufların asfalt karışımında yüksek sıcaklık deformasyon direnci, aşınma direnci ve nem stabilitesi üzerinde oldukça etkili bir iyileşme sağladığını ortaya koymuştur (Chen vd., 2014; Chen vd., 2016). Sharba vd. (2021) yaptıkları bir çalışmada, bina yıkım atıklarından elde edilen kırma tuğlayı %0, %13, %26, %39 ve %52 oranlarında ve çelik cürufunu %0, %11, %22 ve %33 oranlarında beton karışımına ilave etmişlerdir. Çalışmada yapılan eğme testleri sonucunda, çelik cürufu (ince agregaya sahip) ilave edilmiş numunelerde mekanik özellikler açısından iyileşme gözlemlendiği belirlenmiştir. Başka bir çalışmada, çelik cüruflarının beton içerisinde agrega malzemesi olarak kullanımının yoğunluk ve basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Beton numunelerinde üç farklı oranda cüruf kullanılmıştır. İlk grup numunelerde %0 oranında, ikinci grup numunelerde %40 iri agrega yerine ve son grup numunelerde hem %40 iri agrega yerine hem de %100 ince agrega yerine cüruf kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre betondaki cürufun %40 iri agrega ve %100 ince agrega olarak değiştirilmesi sonucu geleneksel betonun yoğunluğunun  $2,38 \text{ g/cm}^3$  'ten  $2,85 \text{ g/cm}^3$  'e ulaştığı ve basınç dayanımının  $27,20 \text{ N/mm}^2$  'den  $29,38 \text{ N/mm}^2$  'ye arttığı belirlenmiştir (Baalamurugan vd., 2021).

Çelik cürufları ayrıca sahip oldukları Ca, Si, Mg, P, Mn ve Fe içeriklerinden dolayı toprağa gerekli besinleri sağlayarak hem toprak verimine hem de bitki büyümesine olumlu etki yapabilmektedir. Yapılan bir çalışmada, toprakta çelik cürufu kullanımı değerlendirilmiş ve buna bağlı olarak yetiştirilen ürün miktarında ve kalitesinde önemli derecede artış meydana geldiği gözlemlenmiştir (Branca vd., 2014). Kore, Japonya ve Çin gibi çeltik/pirinç üretiminin ciddi miktarda olduğu ülkelerde cürufların kullanımı oldukça önem taşımaktadır. Çelik cüruflarının, çeltik tarlalarında meydana gelen metan emisyonunu azaltması, toprak kalitesini iyileştirerek çeltik verimliliğini artırması ve toprak pH'sını düzenlemesi gibi pek çok faydası bulunmaktadır. Bu cürufların kullanımı özellikle topraktaki P ve Mg içeriğinde artış meydana getirerek çeltik kalitesini artırmaktadır (Wang vd., 2018).

Bu çalışmada hem doğal kaynakları korumak hem de çevresel olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla çelik üretim tesislerinde oluşan atıl durumdaki cürufların özellikleri değerlendirilmiş ve bu cürufların alternatif kullanım alanları araştırılmıştır.

## 1. Çelik Cüruflarının Oluşumu ve Karakteristik Özellikleri

Çoğunlukla demir cevheri kullanarak üretim yapan entegre demir çelik tesislerinde bazik oksijen fırını (BOF) ile, hurda çelik kullanarak üretim yapan tesislerde ise elektrik ark ocakları (EAO) ve indüksiyon ocakları (İO) ile çelik üretimi gerçekleştirilmektedir. Çelik cüruflarının kimyasal içerikleri, hammaddeye ön hazırlık işlemlerine ve fırın çeşidine göre değişiklik göstermektedir (Yonar, 2017; Bilen, 2020). Çelik üretim sektörüne bakıldığında, ağırlıklı olarak hurdadan faydalanılan bir üretim altyapısı görülmektedir. Türkiye’de 26 adet EAO, 11 adet İO ve 3 adet BOF olmak üzere toplamda 40 ham çelik üretim tesisi bulunmaktadır (TÇÜD, 2022). İO ile çelik üretimi yapan tesislerin sayılarının az ve kapasitelerinin düşük olması sebebi ile bu çalışma kapsamında İO’ları değerlendirmeye alınmamıştır.



**Şekil 1.** Türkiye’de faaliyet gösteren çelik üretim tesisleri (TÇÜD, 2022).

Yüksek stabilite ve aşınma direncine karşı dayanım gibi özellikler, çelik üretiminde oluşan cürufların farklı alanlarda kullanım için uygun ürünler olduğunu göstermektedir (Chaurand, 2007; Kumar, 2016). Çelik üretimi sırasında oluşan cüruflar, erimiş çelikteki safsızlıkların ayrıştırılması sırasında ortaya çıkan, oksit ve silikat bileşenlerinin meydana getirdiği karmaşık bir kimyasal içeriğe sahip olan, ergitme işlemi sırasında yoğunluk farkı nedeniyle sıvı metalin üst kısmında biriken bir yan ürün olarak tanımlanmaktadır (Yonar, 2017; Uysal ve Bahar, 2018). Metal üretimi esnasında bünyedeki safsızlıkların alınması ve ısı kaybının önlenmesi bakımından cüruf oluşumu önem arz etmektedir (Wang, 2016).

Çelik cürufları farklı birçok alanda kullanılmaya potansiyeline sahiptir. Avrupa Cüruf Birliği 2012 yılı verilerine göre, çelik cüruflarının Avrupa’da kullanım alanları ve oranları Tablo 1’de sunulmuştur. Bu verilere göre, cürufların %68’i değişik alanlarda kullanım alanı bulurken, %19’u tekrar kullanılmak amacıyla geçici depolanmış ve %13’ü nihai olarak depolanmıştır (TÇÜD, 2015).

**Tablo 1.** Çelik cüruflarının kullanım alanları ve oranları

Kullanım Alanları	Kullanım Oranları (%)
Yol inşaatı	43
İçsel depolama	19
Nihai depolama	13
Metalurjik amaçlarla içsel kullanım	11
Çimento üretimi	5
Gübre	3
Hidrolik yapılar	3
Diğer	3

Yapay agrega olarak çelik cüruflarının kullanılabilmesi için kırma, eleme, manyetik ayırma ve ihtiyaç halinde yaşlandırma süreçleri gibi belirli işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. (Fronek, 2011). Çelik üretimi sırasında sıvı halde bulunan cüruf soğutulduğunda, ince taneden çok iriye kadar farklı boyutlarda taneler oluşmaktadır. Tane boyutlarındaki bu değişkenlik sebebiyle cüruf, üretim tesislerinde genel anlamda 3 boyuta ayrılmaktadır. İnce taneler 5 mm, orta taneler 5 – 64 mm ve iri taneler 64 – 200 mm boyutlarında sınıflandırılmaktadır. İnce boyuttaki tanelerin cüruf içerisindeki oranı genellikle %10-15 civarındadır (Yıldırım ve Prezzi, 2011). Hacim ağırlığı çelik cürufunun elde edilme yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Fakat genel olarak çelik cürufları, içerisinde demir oksit bulunması sebebiyle doğal agregaya kıyasla daha yüksek birim hacmine sahiptirler (Fronek, 2011). Yapılan çalışmalarda çelik cürufunun hacim ağırlığının 1.6 ile 1.9 g/cm<sup>3</sup>, kireç taşının ise 1.4 ile 1.5 g/cm<sup>3</sup> arasında değiştiği görülmektedir (NSA, 2021).

Besleme malzemesine, ergitme koşullarına ve soğuma hızına bağlı olarak değişik aralıklarda kimyasal bileşime sahip çelik cürufları oluşmaktadır. Çelik cürufları genel olarak koyu/açık gri renkte, pürüzlü, köşeli ve gözenekli yapıya sahiptirler (Reuter vd., 2004) ve değişik oranlarda CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermektedirler (Tablo 2).

**Tablo 2.** BOF ve EAO cüruflarının genel kimyasal bileşimi (Yi vd., 2012)

BİLEŞİM (%)	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
BOF Cürufu	45-60	3-13	1-5	10-15	1-4	2-6	3-9
EAO Cürufu	30-50	8-13	10-18	11-20	2-5	5-10	5-6

## 2. Çelik Cüruflarının Çevresel Etkileri

İnşaat sektöründe çelik cüruflarının kullanılabilmesi için içerisinde bulunan ve genleşmeye sebep olan serbest CaO ve MgO bileşiklerinin yaşlandırılması yani hidrate edilmesi gerekmektedir. Cürufun yaşlandırılması sırasında, ilk aşamada CaO ve MgO hidrate olarak  $\text{Ca(OH)}_2$  ve  $\text{Mg(OH)}_2$ 'ye dönüşmektedir. Hidrate işleminin uzun tutulması durumunda  $\text{CO}_2$ 'nin etkisiyle  $\text{Ca(OH)}_2$  ve  $\text{Mg(OH)}_2$  sırasıyla çözünlükleri düşük  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{MgCO}_3$ 'e dönüşmektedir (Yonar, 2017).

Amerikan Ulusal Cüruf Birliği tarafından, çelik cüruflarının başka alanlarda kullanılmasından doğabilecek riskler değerlendirilmiş ve çelik cüruflarının canlı ve çevre sağlığı açısından risk taşımadığı belirtilmiştir. Dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda, su ile temas ettiğinde, cüruflar değişen renklerde sızıntı suyu oluşumuna sebep olabilmektedir. Yeterince yaşlandırılmamış çelik cüruflarında meydana gelen bu durumu engellemek için cürufların kullanılacağı ortamlarda gerekli drenaj ve yaşlandırma işlemlerinin yapılması gerekmektedir (Yonar, 2017).

Cüruf içerisinde bulunan bazı metaller toprak içerisinde bulunan metallerden daha yüksek konsantrasyona sahip olabilmektedirler. Yapılan bir araştırmada, cüruf tanelerinin suya veya toprağa karışması halinde ekolojik olarak zarar vermediği değerlendirilmiştir (Chaurand, 2007). Farklı çalışmalarda, çelik cürufu ile elde edilen eluatta As, Cd, Pb, Cr, Hg ve Ag gibi elementler araştırılmış ve bu çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar DIN 38414-S4 ve United States Environmental Protection Agency (USEPA) limitleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda çelik cüruflarının tehlikesiz bir yan ürün olduğu değerlendirilmiştir (Aiban, 2006; Sofilic vd., 2009).

## 3. Çelik Cüruflarının Kullanım Alanları

### 3.1. Çelik Cüruflarının Karayolu Yapımında Kullanımı

Çelik cürufları, yığın yoğunluklarının, dayanım ve mukavemetlerinin yüksek olmaları, aynı zamanda stabil malzeme olmaları sebebiyle yol yapımında kullanılabilir. Çelik cürufları birbirine daha kuvvetli bağlanabildiğinden yüksek sıcaklık altında deformasyon daha az gözlemlenmekte ve aşınma dayanımı ve sürtünme katsayılarının yüksek olması kaymayı azalttığından araçların yol tutuş performansını artırarak daha güvenli bir sürüş imkânı sağlayabilmektedir (Bilen, 2010). Fakat yapı ve yol malzemesinde kullanılacak çelik cürufları serbest CaO ve MgO içerebilmekte ve su ile temas durumunda hacimsel olarak genleşebilmektedir. Bu sebeple cürufun yol yapımında kullanılabilmesi için cüruf içerisindeki serbest CaO ve MgO'un önceden yaşlandırılması gerekmektedir (Barišić vd., 2010). Agreganın özellikleri, asfalt kaplamaların performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yapılan çalışmalarda, çelik cürufunun agrega malzemesi olarak kullanılarak fonksiyonel ve uygun maliyetli bir yapı elde edilebileceği değerlendirilmektedir (Wu vd., 2007; Kara vd., 2004). Çelik cürufunun sıcak asfalt karışımı içerisinde iri agrega olarak kullanımı üzerine yapılan bir çalışma sonucunda mekanik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir (Ahmedzade ve Sengoz, 2009). Morrison (1974) yaptığı bir çalışmada, ince asfalt kaplama üzerine yapılan cüruf katkılı karışımın (%50 cüruf, %39 dere kumu, %3 uçucu kül ve %8 asfalt çimentosu) 10 yıldan fazla ağır yük araç trafiğine maruz kalan bölgelerde kullanılabilirliğini ifade etmiştir. %73 çelik cürufu ve %27 doğal kumdan elde edilen karışımın agrega malzemesi olarak kullanıldığı başka bir çalışmada yüksek rijitlik ve Marshall stabilitesi elde edildiği belirtilmiştir. (Noureldin ve McDaniel, 1990). Japonya yıl içerisinde üretmiş olduğu çelik cürufunun ortalama %60'ını yol yapımında kullanmaktadır (Yi vd., 2012). Yapılan araştırmalar, dünyada çelik cürufunun yol yapım malzemesi olarak kullanımının uygun olduğunu göstermektedir.



### 3.2. Çelik Cüruflarının Çimento ve Betonda Kullanımı

Beton bünyesinde oluşabilecek yüksek sıcaklık betonun hacimsel kararlılığında ve çatlak oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir. Çimento malzemesine eklenen cürufun, uygun miktarda kullanıldığı takdirde kütle betonlarda sıcaklık kontrolü için önemli olduğu belirtilmektedir. Cürufun çimentoya ilavesinin, ilk başlarda çimentonun sebep olduğu erken ısı üretimini azalttığı tespit edilmiştir (Tokay, 2013). Monshi ve Asgarani (1999) tarafından yapılan bir çalışmada, %8 çelik cürufu, %49 demir cürufu, %43 sönmüş kireç kullanılarak yapılan çimentonun portland çimentosuna kıyasla daha iyi mukavemet gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, çelik cüruflarının katkı maddesi olarak kullanılmasının betonun basınç dayanımını doğrudan etkilediği görülmektedir. Özellikle yüksek su/bağlayıcı oranında çelik cürufunun miktarı arttıkça betonun mukavemetinin azaldığı görülmektedir. Bu nedenle, gerekli basınç dayanımını korumak için harmanlanmış çimentoda süper akışkanlaştırıcı kullanımının esas olduğu bildirilmiştir (Wang vd., 2013a; 2013b). Yapılan başka bir çalışmada çelik cürufunun çimento harcına ilavesiyle su ihtiyacı ve priz süresinin ve dayanım arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çelik cürufu ve yüksek fırın cürufu ile yapılan harcın sülfürik aside karşı dayanımının yüksek olduğu tespit edilmiştir (Palod vd., 2019). Çelik cüruflarının betonda ince agrega olarak kullanılması durumunda da basınç ve çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir (Qasrawi, 2012; Guo vd., 2018). Buna ek olarak, çelik cüruflarının, belirli şart ve oranlarda çimento ve betonda kullanımının maliyet oranları hesaplanmış, kırmataş yerine çelik cürufu kullanılması durumunda, beton karışım maliyetlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Çimento üretiminde, farin kompozisyonuna farklı oranlarda (%1,46, %5, %10, %16 ve %20) çelik cürufu eklenmesi durumunda kullanım oranına bağlı olarak %20'ye ulaşan maliyet avantajı sağlandığı tespit edilmiştir (Günay ve Kara, 2005).

### 3.3. Çelik Cüruflarının Kıyı ve Liman Yapılarında Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı

Çelik cüruflarının en önemli kullanım alanlarından biri kıyı ve liman yapılarında kullanımınıdır. Kıyılarda aşınmaya bağlı oluşan erozyona karşı, kıyı güçlendirme, deniz duvarı, su kanallarının yapımı ve benzeri uygulamalarda çelik cüruflarının dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi belirtilmektedir (Yonar, 2017). Pellegrino ve Gaddo (2009) tarafından İtalya'da yürütülen bir çalışmada, doğal agrega yerine çelik cüruflarının kullanılması durumunda dayanım özelliklerinin, doğal agregaya kıyasla daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Japonya'da 2009 yılında JFE Steel firması tarafından liman tadilatı ve inşaatında kullanılması için doğal agrega kullanılarak üretilen beton bloklar yerine cüruf bazlı beton bloklar üretilmiştir. Bu bloklarda agrega olarak çelik cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda cüruf bazlı yapıların konvansiyonellere kıyasla daha iyi mekanik özelliğe sahip olduğu aynı zamanda deniz habitatına da herhangi bir olumsuz etki yaratmadığı belirtilmiştir (Yılmaz, 2018).

### 3.4. Çelik Cüruflarının Demiryolu Balast Malzemesi Olarak Kullanımı

Balast, demiryolu inşasında ray altında kullanılan ve yüzey suyunu ortamdan uzaklaştıran önemli bir malzemedir. Demiryolunda raylara dik olarak konumlandırılan traversler vasıtasıyla iletilen yükü, kalıcı çökme meydana getirmeden zemine ileten, kırılmış, keskin köşeli, sert kayalara balast adı verilir. Balastlar demiryolu inşasında üç önemli görevi üstlenmektedir. Bunlardan ilki, üzerine gelen yükleri büyük alana yayarak deformasyon meydana getirmeden zemine iletmek, ikincisi, yolcu konforu ve vagon-yol arasındaki yıpranma etkisinden dolayı bir miktar elastiklik sağlamak, üçüncü ve son görevi, güzergâh içerisinde herhangi bir bitki yetişmesini engellemek ve yüzey suyunu ortamdan uzaklaştırmaktır (Koh vd., 2018). Balast malzemesi olarak genellikle bazalt, granit, porfir veya sert kalker gibi yüksek dayanıma sahip taşlar kullanılmaktadır. Çelik cüruflarının balast malzemesi olarak kullanılabilirliği Türk Standartları Enstitüsü ve Devlet Demir Yolları şartnamelerine göre değerlendirilmektedir. TS 7043 Standardına göre çelik cürufu ilavesi ile yapılan analizlerde, parçalanma

direnci, aşınma direnci ve dayanıklılık testleri sonuçlarına göre, cürufların belirtilen niteliklere sahip özellikler taşıdığı görülmektedir (Yonar, 2017).

Demiryolu hattında tehlike arz eden keskin virajların kaldırılması sonucu sürekli rayların kullanımı yaygınlaşmış ve bu durum dingil yükünün artmasına sebep olmuştur. Bu bağlamda, traverslerle balast tabakası etkileşimi, hat yanal stabilitesinin sağlanmasında çok önemli rol oynamaktadır. Esmaeili ve arkadaşlarının (2017) yaptığı bir çalışmada, balast malzemesi olarak çelik cüruflarının kullanılması sonucunda %27 oranında balast hattının yanal direncinde gelişme gözlemlendiği belirtilmiştir. Demiryolu balast malzemesi olarak çelik cüruflarının kullanımı ile ilgili yapılan başka bir çalışmada, doğal agregalara çelik cüruflarının eklenmesi sonucu balast tabakasının elastisite modülünün ve sürtünme açısının arttığı ve bunun sonucunda demiryolu hattının mekanik davranışının iyileştiği değerlendirilmiştir (Jing vd., 2020).

### 3.5. Çelik Cüruflarının Gübre Üretiminde Kullanımı

Yeterli miktarda CaO içeriğine sahip çelik cürufları, asitliği gidermek için toprak düzenleyici olarak kullanılabilir. Bitkiye ve toprağa yararlı mineraller içermelerinden dolayı çelik cüruflarını gübre olarak da kullanmak mümkündür. Çelik cüruflarının sahip oldukları element içerikleri sayesinde toprak verimliliği ve ürün kalitesini artırmalarının yanı sıra bitkilerin hastalık ve zararlı etmenlere karşı direncini artırmaya yönelik katkı sağladıkları belirtilmektedir (Branca ve Colla, 2012; Branca vd., 2014). Çelik cüruflarının içeriği incelendiği zaman Fe iyonuna ek olarak Ca, Mg, P, K, B, Mn ve Si gibi bitkiler için gerekli besin elementlerini içerdikleri görülmektedir (Yonar, 2017).

Dünyanın pek çok bölgesinde görülen Acidovorax citrulli'nin (Ac) sebep olduğu bakteriyel meyve lekesi, oldukça önemli maddi kayıplara sebebiyet vermektedir. Yapılan birçok çalışmada, silisyumun konakçı-patojen etkileşiminde hastalık gelişimini baskılama yeteneğine sahip olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmalardan yola çıkarak silikat açısından en bol kaynaklardan biri olan, toprağın asitliğini düzenleyebilen ve toprak-bitki sistemine ciddi ağır metal kontaminasyon riski olmadan besin sağlayabilen çelik cüruflarının gübre olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. (Ferreira vd., 2015). Bakteriyel meyve lekesinin bitkiler üzerindeki yıkıcı etkilerini gidermek amacıyla çelik cürufunu gübre olarak kavun üretiminde kullanmak suretiyle yapılan bir çalışmada, cürufun bakteri lekesi üzerine gelişimi, toprak özellikleri, bitki büyümesi ve kalitesi üzerine etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, cüruf gübrelemesi ile %10 oranında hastalık ilerlemesinin azaldığı ve yaklaşık %8 oranında kavun et kalınlığında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir (Preston vd., 2021). Çelik cürufunun besin salınımını yavaşlatması, su ötrofikasyonunu önlemesi ve bitki büyümesine katkı sağlaması gibi özelliklerinin yanı sıra anaerobik çürütme sisteminde aktivatör olarak da görev aldığı değerlendirilmiştir. Çelik cürufları kullanılarak, anaerobik çürüme performansının etkili bir şekilde hızlandırılmasının ve çevreye zararlı etkisinin minimum dereceye indirilmesinin mümkün olduğu bildirilmiştir (Han vd., 2019).

### 3.6. Çelik Cüruflarının Grit Üretiminde Kullanımı

Malzeme yüzeylerinin temizlenmesi işleminde, basınçlı hava ile aşındırma özellikli grit kullanılmakta ve bu işleme kum raspası adı verilmektedir. Kum raspası, malzeme üzerindeki eski boyanın temizlenmesi veya boya yapılmadan önce metalik malzemelerin yüzeylerinde oluşan oksit gibi tabakaların temizlenmesi amacıyla tercih edilmektedir. (Candan, 2001). Cüruf esaslı grit malzemesi, ekonomik ve hızlı bir yöntem olduğundan tamir bakım tersaneleri, gemi inşa alanları ve su altı tankı temizlenmesi gibi alanlarda oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır. Cüruf esaslı gritler, sert ve keskin köşeli ve yüzeyi hızlı bir şekilde kesmektedir (Ünal, 2017). Yüzey temizleme işlemi için kullanılması gereken cüruf esaslı gritlerin özellikleri (yoğunluk, sertlik, rutubet içeriği, tane boyutu ve suda çözünebilen klorlar) ISO 11126 ile belirlenmiştir. Yüzey temizleme işlemi yapılmadan önce, yüzeyin tamamen kuru olmasının yanı sıra raspalama işleminde kullanılacak gritin de kuru olması gerekmektedir. Yüzeyde ıslaklık

bulunması veya ortamda rutubet varlığı grit malzemesinin topaklaşmasına sebep olacağından istenilen performansı sergileyememektedir (Candan, 2001).

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER:

Çelik cüruflarının uygun şekilde bertaraf edilememesi, taşınması veya stoklanması zor olması, cüruf içeriğinden kaynaklanan alkali sızıntıların yüzey ve yeraltı sularına ulaşması sonucu, çelik cürufları doğada tehdit oluşturabilmektedir. Hem doğal kaynakların korunması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi amacıyla çelik üretimi sırasında oluşan cürufların farklı birçok alanda kullanılması yoluyla fayda yaratması mümkündür.

- Çelik cürufları, yetersiz agrega sorununu çözmek ve kaplamanın mekanik özelliklerini (yüksek taşıma kapasitesi, stabilite ve düşük deformasyon vb.) iyileştirmek amacıyla asfalt malzemesi olarak kullanılabilir. Çelik cüruflarının, sahip olduğu yüksek aşınma direncinden dolayı asfalt esaslı karayollarında doğal agrega yerine kullanılabilir olduğu ve yüksek sürtünme katsayısına sahip olması sebebi ile araçların yol tutuş performansını artırarak daha güvenli bir sürüş imkânı sağladığı kanıtlanmıştır. Ayrıca çelik cüruflarının bağlayıcılık özelliğinin iyi olması sebebiyle tanelerin tutunması daha kuvvetli olduğundan asfalt yüzeyinde meydana gelen teker izi oluşumu ve yüksek sıcaklık altında deformasyonu azalttığı görülmüştür.
- Çelik cüruflarının, agrega malzemesi olarak kullanılması sonucu elde edilen betona ait mukavemet, donma-çözünme direnci ve gözenek yapısı gibi pek çok özellikte gelişmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Yapı malzemesi olarak kullanılan betonun içeriğine eklenen cürufun, uygun miktarda kullanıldığı takdirde kütle betonlarda sıcaklığın kontrolü için önemli bir araç olduğu tespit edilmiştir.
- Çelik cüruflarının önemli kullanım alanlarından birinin erozyonu önlemek amacıyla dolgu malzemesi olarak deniz ve su akış yolu kenarlarında kullanımının olduğu gözlemlenmiştir.
- Çelik cüruflarının demiryolu balast malzemesi olarak kullanılması durumunda doğal balast malzemesinden daha üstün aşınma direnci ve sertlik gösterdiği deneysel çalışmalar ile ispatlanmıştır.
- Toprağın asitliğini düzenleyebilen, toprak ve bitki sistemine ağır metal kontaminasyon riski olmadan besin sağlayabilen çelik cürufunun gübre malzemesi olarak da kullanılabilmesi tespit edilmiştir.
- Malzemelerin yüzey temizleme işlemlerinde, aşındırma özelliğine sahip cüruf esaslı grit malzemesi kullanımının hem ekonomik hem de diğer işlemlere kıyasla daha hızlı bir yöntem olduğu, buna bağlı olarak da tamir bakım tersaneleri, gemi inşa alanları ve su altı tankı temizlenmesi gibi alanlarda oldukça yaygın şekilde kullanılabildiği değerlendirilmiştir.



**Etik Standart ile Uyumluluk**

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmasının olmadığını beyan eder.

**Etik Kurul İzni:** Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur.

**KAYNAKÇA:**

- Ahmedzade, P., Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 300-305.
- Aiban, S. A. (2006). Utilization of steel slag aggregate for road bases. *Journal of Testing and Evaluation*, 34(1), 1-12.
- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y., Shalabi, F. I. (2007). Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(8), 902-911.
- Baalamurugan, J., Kumar, V. G., Chandrasekaran, S., Balasundar, S., Venkatraman, B., Padmapriya, R., Raja, V. B. (2021). Recycling of steel slag aggregates for the development of high density concrete: Alternative & environment-friendly radiation shielding composite. *Composites Part B: Engineering*, 216, 108885.
- Barišić, I., Dimter, S., Netinger, I. (2010). Possibilities of application of slag in road Construction. *Technical Gazette*, 17(4), 523-528.
- Bilen, M., (2010). Çelikhane curuflarından liç-karbonatlaştırma prosesi ile kalsiyum karbonat kazanılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Bilen, M., (2020). Pota metalürjisinde oluşan pota cürufunun kolemanit ile islahı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 943-951.
- Branca, T. A., Colla, V. (2012). Possible uses of steelmaking slag in agriculture: an overview. *Material recycling–Trends and perspectives*, 335-356.
- Branca, T.A., Pistocchi, C., Colla, V., Ragolini, G., Amato, A., Tozzini, C., Mudersbach D., Morillon, A., Rex, M. and Romaniello, L. (2014). Investigation of (BOF) convertor slag use for agriculture in Europe. *Metallurgical Research and Technology*, 111(3), 155-167.
- Candan, E. (2001). Metalurjik cürufların yüzey temizleme işlemlerinde grit olarak kullanımı. *TMMOB Metalurji Mühendisliği Odası*, 126, 22-25.
- Chaurand, P. (2007). Environmental impacts of steel slag reused in road construction: A crystallographic and molecular (xanes) approach. *Journal of Hazardous Materials*, 139(3), 537-42.
- Chen, Z., Xie, J., Xiao, Y., Chen, J., Wu, S. (2014). Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 64, 60-66.
- Chen, Z., Wu, S., Xiao, Y., Zhao, M., Xie, J. (2016). Feasibility study of BOF slag containing honeycomb particles in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 124, 550-557.
- ÇİB, (2023). Çelik İhracatçıları Birliği, <https://www.cib.org.tr/tr/istatistikler.html> (06.03.2023).

- Esmaili, M., Nouri, R., & Yousefian, K. (2017). Experimental comparison of the lateral resistance of tracks with steel slag ballast and limestone ballast materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(2), 175-184.
- Ferreira, H. A., do Nascimento, C. W. A., Datnoff, L. E., de Sousa Nunes, G. H., Preston, W., de Souza, E. B., Mariano, R. D. L. R. (2015). Effects of silicon on resistance to bacterial fruit blotch and growth of melon. *Crop Protection*, 78, 277-283.
- Fronek, B. A. (2011). Feasibility of expanding the use of steel slag as a concrete pavement aggregate. Cleveland State University, Department of Civil and Environmental Engineering, MSci Thesis, USA.
- Guo, J., Bao, Y., Wang, M. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*, 78, 318-330.
- Günay, E., Kara, M. (2005). Erdemir çelikhane cüruflarının ekonomik ve ekolojik değerlendirilmesi. 3. Demir Çelik Kongresi, 22-24 Eylül, Zonguldak.
- Han, F., Yun, S., Zhang, C., Xu, H., Wang, Z. (2019). Steel slag as accelerant in anaerobic digestion for nonhazardous treatment and digestate fertilizer utilization. *Bioresource Technology*, 282, 331-338.
- Jing, G., Wang, J., Wang, H., Siahkouhi, M. (2020). Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel slag in ballasted railway track. *Construction and Building Materials*, 262, 120015.
- Kara, M., Günay, E., Kavakli, B., Tayfur, S., Eren, K., Karadag, G. (2004). The use of steel slag in asphaltic mixture. *Key Engineering Materials*, 264(268), 2493-2496.
- Koh, T., Moon, S. W., Jung, H., Jeong, Y., Pyo, S. (2018). A feasibility study on the application of basic oxygen furnace (BOF) steel slag for railway ballast material. *Sustainability*, 10(2), 284.
- Kumar, D. (2016). Latest developments in the iron and steel industry. *Management of Coking Coal Resources*, 9-60.
- Monshi, A., Asgarani, M. K. (1999). Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. *Cement and Concrete Research*, 29(9), 1373-1377.
- Morrison, Y. (1974). Applications of Boiler Slag. In *Regional Seminar on Ash Utilization*, St. Louis, Missouri, by the American Coal Ash Association, November.
- Noureldin, A. S., McDaniel, R. S. (1990). Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt. *Transportation Research Record*, 1269, 133-149.
- NSA, 2021. Guide for the use of steel slag in agriculture and for reclamation of acidic lands. National Slag Association, Utah, USA.
- Palod, R., Deo, S. V., Ramtekkar, G. D. (2019). Utilization of waste from steel and iron industry as replacement of cement in mortars. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(6), 1361-1375.
- Pellegrino, C., Gaddo, V. (2009). Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 663-671.

- Preston, H. A. F., de Sousa Nunes, G. H., Preston, W., de Souza, E. B., de Lima Ramos Mariano, R., Datnoff, L. E., do Nascimento, C. W. A. (2021). Slag-based silicon fertilizer improves the resistance to bacterial fruit blotch and fruit quality of melon grown under field conditions. *Crop Protection*, 147, 105460.
- Qasrawi, H. (2012). Use of relatively high Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> steel slag as coarse aggregate in concrete. *ACI Materials Journal*, 109(4), 471-478.
- Reuter, M., Xiao Y., Boin U. (2004). Recycling and environmental issues of metalurgical slags and salt fluxes. VII. International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, 349-356.
- Sharba, A. A. K., Altemen, A. A. G. A., Hason, M. M. (2021). Shear behavior of exploiting recycled brick waste and steel slag as an alternative aggregate for concrete production. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2621-2628.
- Sofilic, T., Mledanovic, A., Sofilic, U., (2009). Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 19(2), 148-157.
- TÇÜD, (2015). Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Demri çelik cüruf raporu, [https://celik.org.tr/wp-content/uploads/2016/12/4-TCUD-Curuf\\_Rapor.pdf](https://celik.org.tr/wp-content/uploads/2016/12/4-TCUD-Curuf_Rapor.pdf) (06.03.2023)
- TÇÜD, (2022). Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, <https://celik.org.tr/harita/> (20.07.2022).
- Tokyay M (2013). Betonda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının rolü. Beton 2013 Kongresi, İstanbul, 201-238.
- Tozsin, M., Öztaş, T. (2023). Çelik cüruflarının tarımsal amaçlı kullanılması. *Atatürk University Journal of Agricultural Faculty*, 54(1), 36-41.
- Uysal, F. F., Bahar, S. (2018). Cüruf çeşitleri ve kullanım alanları. *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 19(1), 37-52.
- Ünal, A. (2017). Atıktan ürüne demir-çelik cürufu. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Wang, Q., Yan, P., Yang, J., Zhang, B. (2013a). Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1414-1420.
- Wang, Q., Yang, J., Yan, P. (2013b). Cementitious properties of super-fine steel slag. *Powder Technology*, 245, 35-39.
- Wang, G. C. (2016). Slag Processing, The utilization of slag in civil infrastructure construction. Woodhead Publishing, 87-113.
- Wang, W., Sardans, J., Wang, C., Zeng, C., Tong, C., Bartrons, M. and Peñuelas, J. (2018). Steel slag amendment increases nutrient availability and rice yield in a subtropical paddy field in China. *Experimental Agriculture*, 54(6), 842-856.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., Chen, Y. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2580-2585.
- Yıldırım, I. Z., Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011, 463638.

- Yılmaz, M. 2018. Çelikhane cürufunun yol üst yapısının iyileştirilmesinde kullanımı. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- 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.
- Yonar, F., (2017). Elektrik ark ocağı çelikhane cürufunun karayolu esnek üstyapı tabakalarında kullanımının ve karışım performansının araştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Yüksel, İ. (2017). A review of steel slag usage in construction industry for sustainable development. *Environment, Development and Sustainability*, 19(2), 369-384.

## EXTENDED SUMMARY

The increase in the waste rate caused by developing technology and increasing population can lead to significant problems for the environment. Materials should be considered as sustainable for reasons such as enabling people to live in a clean and healthy nature, increasing the quality of life and improving economic, social, and environmental conditions for future generations. To make sustainable use of materials, extraction, transportation, processing, end use and recycling processes are important. High volume of steel production leads to large volumes of slag generation. In general, 100 to 150 kg of slag is produced for every ton of liquid crude steel. Failure in the proper disposal of steel slags is a serious threat to human health and the environment because of leaching of heavy metals.

In this study, the potential of use of steel slag, in different areas, which will contribute to the national economy through recycling, has been evaluated. Studies have revealed that slags provide a highly effective improvement in high temperature deformation resistance, abrasion resistance and moisture stability of the asphalt mixture (Chen et al., 2014; Chen et al., 2016). In a study by Monshi and Asgarani (1999), it was determined that cement made using 8% steel slag, 49% iron slag, 43% slaked lime showed better strength compared to portland cement. In a study conducted in Italy by Pellegrino and Gaddo (2009), it was determined that the strength properties are better when steel slag is used instead of natural aggregate in coastal and port structures compared to natural aggregate. In a study by Esmaeili et al. (2017), it was stated that the lateral resistance of the ballast line increased by 27% because of using steel slag as ballast material. It is stated that steel slags contribute to increasing soil fertility and product quality, as well as increasing the resistance of plants against diseases and harmful factors, because of their elemental content (Branca and Colla, 2012; Branca et al., 2014). Since slag-based grit material is an economical and fast method, it is widely used in areas such as repair and maintenance shipyards, shipbuilding areas and underwater tank cleaning (Ünal, 2017).

Studies have shown that the slag formed because of steel production can generally be used instead of natural aggregate. It has been evaluated that this material can be used at an acceptable level in many areas such as road construction, cement and concrete production, coastal and port structures, railway construction, fertilizer, and grit production.