



**ÇELİK CÜRUFLARININ ALTERNATİF KULLANIM
ALANLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Burak KAVASOĞLU

Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Gülşen TOZSİN
2022
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ÇELİK CÜRUFLARININ ALTERNATİF KULLANIM ALANLARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

(Evaluation of Alternative Uses of Steel Slag)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BURAK KAVASOĞLU

Danışman: Doç. Dr. Gülşen TOZSİN

Erzurum
Ocak, 2022



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**ÇELİK CÜRUFLLARININ ALTERNATİF KULLANIM ALANLARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Doç. Dr. Gülşen TOZSİN danışmanlığında, Burak KAVASOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma, 21/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji & Malzeme Anabilim Dalı Malzeme Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA <i>Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Danışman:	Doç. Dr. Gülşen TOZSİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Ü. Güzide Meltem LÜLE ŞENÖZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır.

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır.

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Gülşen TOZSİN danışmanlığında sunulan “**ÇELİK CÜRUFLARININ ALTERNATİF KULLANIM ALANLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	11	30
Materyal ve Yöntem	8	35
Bulgular	3	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	10	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Burak KAVASOĞLU	Doç. Dr. Gülşen TOZSİN
21.1.2022	21.1.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır.	İmza: Aslı Islak İmzalıdır.

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana daima yol gösteren, bilgisini ve desteğini esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Gülşen TOZSİN'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca gerek aydınlatıcı fikirlerini gerekse emeğini, ilgisini ve sabrını esirgemeyen, her türlü destek olan eşim Arş. Gör. Yeşim SEÇER KAVASOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan sevgili babam Halis KAVASOĞLU, sevgili annem Sevil KAVASOĞLU ve kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim.

Burak KAVASOĞLU



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ ÇELİK CÜRUFLARIN ALTERNATİF KULLANIM ALANLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Burak KAVASOĞLU

Danışman: Doç. Dr. Gülşen TOZSİN

Amaç: Günümüzde ülkelerin sahip olduğu doğal kaynakların yanı sıra atıkların değerlendirilmesi 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 sağlayacak hem de bu atıkların çevresel olumsuz etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunacaktır. Bu çalışma, dünyada alternatif bir malzeme olarak farklı alanlarda kullanım olanaklarına sahip olan ve geri dönüşüm yoluyla ulusal ekonomiye katkı sağlayan çelik üretim tesislerinde atık malzemesi olarak meydana gelen çelik cürufunun, Türkiye’de de uluslararası uygulamalara benzer şekilde, uygun alanlarda kullanım alanları araştırılarak ekonomiye kazandırılabilmesi değerlendirilmektedir. Yurt dışı örneklerinde görüldüğü üzere, alternatif bir malzeme olarak farklı kullanım olanaklarına sahip olan çelikhane cürufunun, Türkiye’de yer alan tesislerde yapılan üretim neticesinde ortaya çıkan cürufu benzer özelliklere sahip olduğu ve benzer şekilde alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Hem azalan doğal kaynaklar hem de bir atığın başka bir alanda tekrar kullanılabilme kapasitesine sahip olduğu göz önüne alındığında atık yönetiminin ve sıfır atık yaklaşımının tüm ülkelerde olduğu gibi Türkiye açısından da ne kadar önemi olduğu görülmektedir.

Yöntem: Çelik üretimi sırasında üretim yöntemlerine göre farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip cüruflar oluşmaktadır. Türkiye’de farklı tesislerde üretilen bu atıl durumdaki cüruf çeşitlerinin metalurjik, morfolojik ve yüzeysel özelliklerini XRF, XRD ve SEM analizleri incelenmiştir. Böylece ne tür uygulama alanlarında kullanılabileceği araştırılmış ve nasıl bir katkı sunacağı açıklanmıştır.

Bulgular: Türkiye ekonomisinin önemli bir kaynağı olan çeliğin üretimi sırasında oluşan cürufa ait karakteristik özellikler incelendiği zaman karayolu yapımında, çimento, beton üretiminde ve deniz dolgusu gibi uygulama alanlarında kullanıma uygunluğu gözlemlenmiştir. Cürufun tekrar kullanılması ile hem doğal kaynakların kullanımının azaltılması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi ve Türkiye ekonomisi açısından büyük kazanç sağlanması mümkün görülmektedir.

Sonuç: Yapılan araştırmalar sonucunda çelik üretimi sonucunda oluşan ve çevre açısından tehlike arz eden atık durumundaki cürufun genellikle doğal agrega yerine kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bu malzemenin özellikle çimento, beton, demiryolu balast malzemesi, gübre eldesi, grit yapımı gibi pek çok alanda geleneksel malzemelere göre kabul edilebilir derecede kullanılabilir olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik, Cüruf, Endüstriyel Atık, Atık Yönetimi, Sıfır Atık

Ocak 2022, 82 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

EVALUATION OF ALTERNATIVE USES OF STEEL SLAG

Burak KAVASOĞLU

Supervisor: Doç. Dr. Gülşen TOZSİN

Purpose: Nowadays, besides the natural resources of the countries, the evaluation of wastes significantly affects the competitiveness in term of the economy. In particular, the recycling of wastes generated as a result of industrial production and their use in different sectors will both provide economic benefits by reducing the need for raw materials and contribute to the reduction of the environmental negative effects of these wastes. This study aims to bring the steel slag, which is produced as a waste material in iron-steel production facilities, which has the opportunity to be used in different areas as an alternative material in the world and contributes to national economies through recycling, by using it in appropriate areas in our country, similar to international practices. It is to show that the steelwork slag, which has different usage possibilities as an alternative material in foreign examples, has similar properties to the slag that comes out as a result of the production in the facilities in our country and can be used as an alternative material in a similar way. Thus, the importance of waste management will be revealed when considering both the decreasing natural resources and the idea of zero waste for our country.

Method: During steel production, slags with different physical and chemical properties are formed according to the production methods. Metallurgical, morphological and surface properties of waste slag types produced in different facilities in Turkey were investigated by XRF, XRD and SEM analysis. Thus, what kind of application areas it can be used in has been researched and how it will contribute has been explained.

Findings: When the characteristics of the slag formed during the production of steel, which is an important resource of the Turkish economy, are examined, it is observed that it is suitable for use in application areas such as road construction, cement, concrete production and sea filling. With the re-use of slag, it is possible to reduce the use of natural resources, to prevent environmental pollution and to provide a great profit in terms of the country's economy.

Results: As a result of the researches, it was concluded that the slag, which is a waste produced as a result of steel production and poses a danger to the environment, can generally be used instead of natural aggregate. It has been evaluated that this material can be used at an acceptable level compared to traditional materials in many areas such as cement, concrete, railway ballast material, fertilizer production, grit production.

Keywords: Steel, Slag, Industrial Waste, Zero Waste, Waste Management

January 2022, 82 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Çelik.....	5
Çeliklerin Sınıflandırılması.....	5
Karbon İçeriğine Göre Çeliklerin Sınıflandırılması.....	6
Kullanım Alanlarına Göre Çeliklerin Sınıflandırılması.....	7
Çelik Üretim Yöntemleri.....	8
Yüksek Fırında Demir Üretimi	9
Bazık Oksijen Fırını (BOF) İle Çelik Üretimi	10
Elektrik Ark Ocakları (EAO) İle Çelik Üretimi.....	13
İndüksiyon Ocakları (İO) İle Çelik Üretimi.....	15
Demir-Çelik Ürün Çeşitleri.....	15
Dünyada Çelik Sektörü	16
Türkiye’de Çelik Sektörü.....	19
Türkiye’de Ham Çelik Üretimi ve Ürün Tüketimi	21
Çelik Üretimi ve Çevresel Etkileri.....	23
Cüruf Oluşumu ve Cüruf Özellikleri	23
Cüruf Oluşum Teorileri.....	24
Cüruf Çeşitleri.....	26
Çelik Cürufu.....	26
MATERYAL VE METOD	35
Çelik Cürufu.....	35
Türkiye’de Demir-Çelik Tesislerinden Elde Edilen Cüruf Özellikleri	36
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	38

Çelik Cüruflarının Karayolu Yapımında Kullanımı	43
Çelik Cüruflarının Çimento ve Betonda Kullanımı	45
Çelik Cüruflarının Liman İnşaatında ve Deniz Dolgusunda Kullanımı.....	48
Çelik Cüruflarının Demiryolu Balast Malzemesi Olarak Kullanımı	49
Çelik Cüruflarının Gübre Üretiminde Kullanımı	51
Çelik Cürufunun Grit Üretiminde Kullanımı	53
Çelik Cüruflarının Biyooksidasyon Prosesi için PH Dengeleyici Olarak Kullanımı	54
Çelik Cüruflarının Diğer Kullanım Alanları	55
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKÇA	59
ÖZGEÇMİŞ.....	70



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. EAO’da Çelik Üretimi Öncesi Girdiler ve Sonrası Çıktılar	15
Tablo 2. Demir Çelik Firmaları ve Kuruluş Yılları	19
Tablo 3. Çelik Firmalarının Kapasite Kullanımı ve Üretim Kapasitesi	20
Tablo 4. Türkiye’de Üretim Yöntemlerine ve Ürünlere Göre Çelik Üretimi (Milyon Ton) ...	22
Tablo 5. Çelik Cürufuna Ait Kimyasal Kompozisyon	26
Tablo 6. Çelik Cürufunun Karakteristik Özellikleri	27
Tablo 7. Doğal Agrega Yoğunlukları	29
Tablo 8. Farklı Tesislerin Çelik Cüruflarının Yoğunluk Değerleri	29
Tablo 9. Çelik Cüruflarının Los Angeles Aşınma Oranı (%)	30
Tablo 10. EAO Cürufu Ve BOF Cürufunun Kimyasal Bileşimlerinin Karşılaştırılması	36
Tablo 11. ERDEMİR, KARDEMİR ve İSDEMİR Demir-Çelik Fabrikalarında Üretim Esnasında Meydana Gelen BOF Cüruflarının Kimyasal Özellikleri.....	37
Tablo 12. Çelik Cürufunun Fiziksel Özellikleri	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Demir-Karbon denge diyagramı	6
Şekil 2. a) Ham çelik üretim yöntemlerinin akış prosesi b) Entegre demir-çelik tesisi prosesi.	9
Şekil 3. Yüksek fırın üretim şeması	10
Şekil 4. BOF ile çelik üretim şeması	11
Şekil 5. BOF sistemine oksijen üflenmesi sonucu oluşan reaksiyonların gösterimi.....	13
Şekil 6. EAO ile çelik üretim şeması	13
Şekil 7. EAO genel görünümü	14
Şekil 8. Dünyada çelik üretiminin yıllara göre değişimi.....	17
Şekil 9. Dünyada ham çelik üretimi	17
Şekil 10. Çelik üretiminin ülkelere göre oranı	18
Şekil 11. Türkiye’de faaliyet gösteren çelik firmalarının bölgesel kuruluşu	20
Şekil 12. Atıl çeliklerin değerlendirme prosesi	23
Şekil 13. Silikat yapısı.....	24
Şekil 14. Çelikhane cürufunun elde ediliş şeması	28
Şekil 15. Zırhlanmanın görüldüğü tane (sol) ve taze cüruf tanesi (sağ)	32
Şekil 16. Çelikhane cürufu örnekleri.....	35
Şekil 17. Çelikhane cürufu örnekleri.....	36
Şekil 18. BOF cürufuna ait a) çakıl boyutundaki parçacıklar, b) ve c) tane şeklini ve dokusunu gösteren SEM görüntüleri.	39
Şekil 19. BOF cürufuna ait XRD ve TEM-EDX analizleri.....	40
Şekil 20. EAO cürufuna ait a) çakıl boyutundaki parçacıklar, b) ve c) tane şeklini ve dokusunu gösteren SEM görüntüleri.	41
Şekil 21. EAO cürufuna ait XRD ve TEM-EDX analizleri	42
Şekil 22. a) W/B değeri 0,5 olan betonun basınç dayanımı ve b) W/B değeri 0,35 olan betonun basınç dayanımı	46
Şekil 23. Çelik cürufunun artan miktarı ile betonun basınç dayanımı	47
Şekil 25. Çelik cürufunun dolgu malzemesi olarak kullanımı	48
Şekil 26. Japonya’da ferroform kullanılarak yapılan deniz duvarı	49
Şekil 27. Kıyı erozyonuna karşı eao cürufunun kullanımı	49
Şekil 28. a) Kireçtaşı balast b) Çelik cüruf balastı	50
Şekil 29. Yığın biyooksidasyon prosesinin refrakter altın cevherlerine uygulanmasına ait akım şeması	55

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AISt	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
EAO	: Elektrik Ark Ocağı
BOF	: Bazık Oksijen Fırını
İO	: İndüksiyon Ocağı
YF	: Yüksek Fırın
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Kırınım Difraktrometresi

%	: Yüzde
Cr	: Krom
B	: Bor
Mn	: Mangan
P	: Fosfor
C	: Karbon
V	: Vanadyum
K	: Kalium
S	: Kükürt
Fe	: Demir
FeO	: Demir oksit
CaO	: Kalsiyum oksit
CO	: Karbon monoksit
Mo	: Molibden
CO₂	: Karbon dioksit
SiO₂	: Silisyum dioksit
MgO	: Magnezyum oksit
P₂O₅	: Difosfor pentaoksit

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, ürünün kullanımı ve geri dönüşüm ihtimalinin analiz edilmesi gerekmektedir. Esas olarak, malzemenin sürdürülebilirlik değerlendirilmesine o malzemeye ait yaşam döngüsü de denilebilir. Bu yaşam döngüsünde en önemli hedef, atık olarak ortaya çıkarılan malzeme miktarının azaltılması veya tekrar kullanılabilir hale getirilmesinin sağlanmasıdır (Yüksel 2017).

Yapılan istatistiksel analizlere göre 2021 yılı Ocak-Kasım döneminde çelik üretimi Dünya’da 1,8 milyar ton, Türkiye’de ise yaklaşık 36,7 milyon ton seviyelerine ulaşmaktadır (TÇÜD 2021a). Belirtilen bu muazzam miktardaki çelik üretimi, beraberinde yüksek oranda atıl durumda cüruf üretimine yol açmaktadır. Çelik cüruflarının uygun bir şekilde yok edilememesi, içeriğinden kaynaklanan alkali sızıntıların yüzey ve yeraltına ulaşması sonucu zararlı bir tehdit oluşturmaktadır. Çelik cürufu, içeriğinde sahip olduğu ağır metallerden dolayı insan sağlığı ve çevre kirliliği açısından oldukça dikkat edilmesi gereken bir konudur. Hem doğal kaynakların korunması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi amacıyla çelik endüstrisinden elde edilen çelikhane cürufu geri kazanım yoluyla faydalı hale getirilebilmektedir. Çelik cürufları; karayollarında yol inşasında (Pasetto and Baldo 2010a,b; Gao *et al.* 2017), yapı malzemesi olarak kullanılan betonda (Yi *et al.* 2012, Binici vd. 2013, Carvalho *et al.* 2017), deniz dolgu malzemesinde, demir yolu balast malzemesi ve gübre (Poh *et al.* 2006, Yi *et al.* 2012) gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır (Proctor *et al.* 2000; Jiang *et al.* 2018; Develioğlu and Pulat 2018).

Çelikhane cürufu sahip olduğu yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı yol, kavşak ve park alanları gibi çeşitli alanlarda katkı malzemesi olarak kullanım imkânına sahiptir. Yapılan deneysel bir çalışmada, çelik cüruf katkılı asfalt karışımının kayma direnci araştırılmış ve %30 cüruf içeren asfalt karışımının en iyi mekanik özellik gösterdiğini ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca elastisite modülü, yorulma ömrü, çekme mukavemeti gibi özellikler değerlendirilmiş ve kireçtaşı yerine %75 oranında çelik cüruf

kullanımının asfaltın mekanik özelliklerini iyileştirdiği bildirilmiştir (Asi *et al.* 2007). Yapılan literatür araştırmaları, cürufların asfalt karışımında yüksek sıcaklık deformasyon direnci, aşınma direnci ve nem stabilitesi gibi performansları üzerinde oldukça etkili bir iyileşmeye sebebiyet verdiğini ortaya koymuştur (Chen *et al.* 2014; Chen *et al.* 2016).

Taşıyıcı elemanların kesme dayanımı performansı, yapı inşaatında en önemli özelliklerden biri olarak kabul edilmektedir. Beton malzemesi kullanılarak oluşturulan elemanlardaki kesme dayanımı agreganın kenetlenmesi/ tutunması ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle agrega tipi, tane boyutu ve mekanik özellikleri kesme dayanımı üzerinde oldukça önem teşkil etmektedir. Agregada madenciliği ve atık bertarafı ile ilgili çevresel sorunları azaltmak amacıyla atık tuğla ve çelik cürufunun agrega malzemesi olarak kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bir çalışmada, bina yıkım atıklarından elde edilen kırma tuğla %0, %13, %26, %39 ve %52 oranlarında; çelik cürufu %0, %11, %22 ve %33 oranlarında beton karışımına ilave edilmiştir. Çalışmada yapılan eğme testleri sonucunda, çelik cürufu (ince agregaya sahip) ilave edilmiş numunelerde mekanik özellikler açısından iyileşme gözlemlendiği ve kırma tuğla (iri agrega) beton kirişlerin kesme davranışını kontrol numuneleriyle karşılaştırılabilir şekilde iyileştirdiği belirlenmiştir (Sharba *et al.* 2021).

Başka bir çalışmada, indüksiyon fırın (İÖ) cürufunun 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 yoğunluğu $2,38 \text{ g.cm}^{-3}$ 'ten $2,85 \text{ g.cm}^{-3}$ 'e ulaştığı ve basınç dayanımının $27,20 \text{ N. mm}^{-2}$ 'den $29,38 \text{ mm}^{-2}$ 'ye arttığı belirlenmiştir. Ayrıca diğer bir çalışmada da İÖ cürufunun, radyasyon koruma çalışmaları için uygun maliyetli bir kompozit malzeme olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Baalamurugan *et al.* 2021).

Bazik oksijen fırın (BOF) cürufunun agrega malzemesi olarak kullanılması sonucu elde edilen betona ait mukavemet, donma-çözünme direnci ve gözenek yapısı gibi pek çok özellikte iyileşmeler görülmüştür (Pang *et al.* 2016). Ayrıca, karbonatlı BOF cürufunun karbonasyonu ile çimento matrisi ile agrega ara yüzey geçiş bölgesinde basınç dayanımında olumlu gelişmeler gözlemlenmiştir. Fakat karbonatlı cürufun sahip olduğu kalsit tabakası nedeniyle betonun sülfürik asite karşı direncini oldukça düşürdüğü gözlemlenmiştir (Palankar *et al.* 2016).

BOF cürufunun %10-20 oranında beton katkısı olarak kullanılması durumunda normal betona göre mukavemet artışı, donma-çözünme, ıslanma-kuruma ve asitlere karşı koruma gibi

birçok faydalı özelliği olduğu belirlenmiştir (Sun 2003). İnce yapılı BOF cürufunun çimentoya katkı maddesi olarak eklenmesi ile işlenebilirlikte oldukça gelişim gözlemlenmiştir (Yi *et al.* 2012). Elektrik ark ocağı (EAO) cürufunun (ortalama tane boyutu 45µm olan) sahip olduğu yüksek yüzey pürüzlülüğü nedeniyle, eklendiği beton karışımının işlenebilirliğini azalttığı tespit edilmiştir (Roslan *et al.* 2016).

Çelik cürufların asfalt betonunda kullanım amacı yetersiz agrega sorununu çözmek ve kaplamanın mekanik özelliklerini iyileştirmektir. Çelik cürufu ilaveli asfalt ve kireçtaşı ilaveli asfalt karışımları, kıyaslandığı zaman çelik cürufu ilaveli asfalt bileşiminin daha yüksek sıcaklık stabilitesi, genleşme ve Marshall stabilitesi özelliği sergilediği gözlemlenmiştir (Liu *et al.* 2019). Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, çelik cürufunun asfalt karışımlarında agrega yerine kullanılması, hem doğal kaynakların korunması açısından düşük maliyetli hem de dayanım açısından daha iyi bir özellik sergilediği gözlemlenmiştir (Ali *et al.* 1992, Kara *et al.* 2004, Ziari and Khabiri 2007).

Gübre, günümüzde tarım ve mera alanlarında bitkinin beslenmesi için gerekli olan besinleri sağlamak ve toprağın kalitesini artırmak amacıyla etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Çelik cürufları sahip olduğu Ca, Si, Mg, P, Mn ve Fe içeriğinden dolayı toprağa gerekli besini sağlayabilmekte, besin salınımını yavaşlatıp sızmayı ve su ötrofikasyonunu önleyebilmekte ve böylece bitki büyümesine katkı sağlayabilmektedir. Bitki büyümesi için gerekli olan S, Mn ve Fe gibi element içeriğine sahip olan çelikhane cürufunun kullanılması durumunda toprak daha verimli bir hale gelebilmektedir. Yapılan bir çalışmada, BOF cürufu ve ticari gübre kullanımı karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada, BOF cürufu kullanılarak yetiştirilen ürün miktarında ve kalitesinde önemli derecede artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, toprağa herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığı ve topraktaki Cr, V miktarında artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir (Branca *et al.* 2014). Kore, Japonya ve Çin gibi çeltik/pirinç üretiminin önemli miktarda olduğu ülkelerde çelik cürufunun pirinç tarımında kullanımı oldukça önem taşımaktadır. Çelik cürufunun, çeltik tarlalarında meydana gelen metan emisyonunu azaltması, toprak kalitesini iyileştirerek çeltik verimliliğini artırması ve toprak pH'sını düzenlemesi gibi pek çok faydası bulunmaktadır. Çelik cüruf kullanımı özellikle topraktaki P ve Mg içeriğinde artış meydana getirerek çeltik kalitesini artırmaktadır (Wang *et al.* 2018b).

Çelik cürufları, çelik üretimi sonucu oluşan katı endüstriyel bir atık olarak bilinmektedir. Atıl durumda bulunan cüruf malzemesinin depolanması veya bertaraf edilmesi oldukça önemli bir sorun teşkil etmektedir. Gelişen nüfusun beraberinde getirmiş olduğu ihtiyaçlar doğrultusunda hem doğal kaynakları koruma hem de sıfır atık düşüncesini yaygınlaştırmak amacıyla atıl durumdaki cüruf malzemesinin geri dönüşümünü sağlama amacı

araştırmacıları yeni arayışlara yönlendirmiştir. Bu amaç doğrultusunda bualışmada,elik üretim tesislerinde oluşan cürufların kimyasal ve fiziksel özellikleri araştırılmış ve bu cüruflarının ulusal/uluslararası ekonomiye veevreye katkı sağlayacağı alternatif kullanım alanları değerlendirilmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Çelik

4000 yıllık bir geçmişe sahip olan çelik, günlük hayatta oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir. Geçmişte yaygın olarak kullanılan metalik malzeme bronzdur. Fakat demirin (Fe) bronzdan daha sert ve güçlü olduğu kanıtlandıktan sonra özellikle silah ve alet yapımında kullanılabilmesi için çeşitli teknikler geliştirilmeye çalışılmıştır (Stahleisen 2008).

Demirin 19. yüzyıldan itibaren demiryollarında kullanılmaya başlanmasıyla tüketimi oldukça artmış ve değişen ihtiyaçlarla birlikte ekonomik üretim yöntemleri üzerinde çalışmalara başlanmıştır. Aynı zamanda demirin içeriğindeki karbon (C) miktarını azaltarak sertliğini artırmak maksadıyla 1856 yılında Henry Bessemer tarafından kendi adı ile anılan bir metot geliştirilmiştir. Bessemer tarafından geliştirilen bu metodun temel olarak çalışma şekli; katı haldeki demir metalinin eritilmesiyle oluşan sıvı metale sistemin altından hava verilerek, safsızlıkların kolay bir şekilde oksitlenmesini sağlamaktır. Ayrıca bu proseste silisyum asidik astar vasıtasıyla düşük fosforlu (P) sıvı çelik üretilebilmesi sağlanmıştır. Daha sonra, Sidney Gilchrist Thomas tarafından 1879 yılında geliştirilen konverterde kullanılan bazik dolomit astar yüksek P sayesinde sıcak metal rafine edilebilecek hale getirilmiştir (Stahleisen 2008; Smil 2016).

Demir, düşük maliyet ve yüksek mukavemet gibi üstün özelliklerinden ötürü otomotiv, inşaat, gemicilik ve havacılık sektörlerinde vazgeçilmez bir malzemedir. Kullanım alanları ve özellikleri göz önüne alındığında demir metalinin, endüstride kullanımının oldukça geniş bir yelpazeye sahip olduğu görülmektedir. Modern endüstride kullanılan demirin, özellikle karbon ile yaptığı alaşım sonucunda oluşan yüksek mukavemete sahip çelik yapısı itibarıyla birçok sektörün temel girdisi olarak kullanılmaktadır (Öcal 2014).

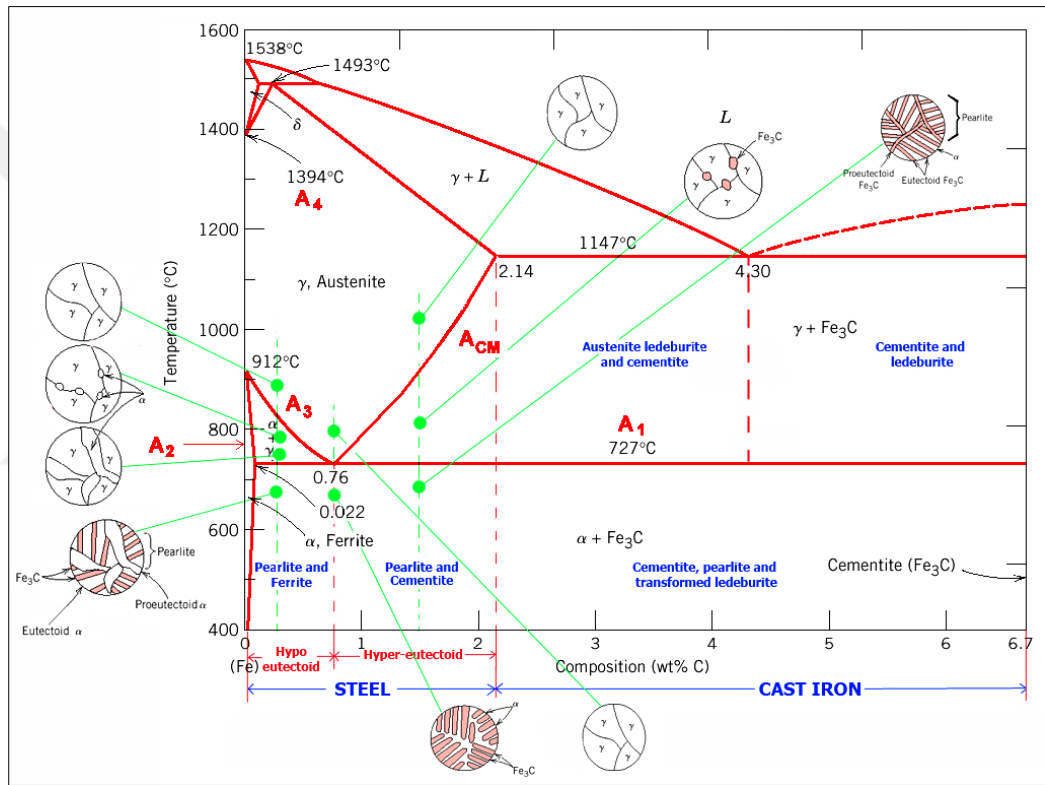
Çelik %1'den az manganez, %2'den az karbon ve az miktarda silikon, sülfür, fosfor ve oksijen içeren bir demir-karbon alaşımıdır. Çelik alaşımdaki karbon miktarının ayarlanması ile çeliğin kullanım alanına göre özelliğini değiştirmek mümkündür. Alaşımlarının esnekliği, geri dönüşüm kolaylığı, çevre dostu olması, sağlamlığı ve doğada diğer metallere göre demirin fazla miktarda bulunması ve buna bağlı olarak ucuz olması sebebiyle çelik en önemli mühendislik malzemesidir (Callister 1997).

Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelik malzemeler özelliklerine göre birçok farklı şekilde sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmalar aşağıda verilmiştir.

- Kompozisyonuna göre; düşük-orta-yüksek karbonlu çelikler
- Üretim yöntemlerine göre; elektrik ark ocağı prosesi veya yüksek fırın, bazik oksijen prosesi ve son yıllarda indüksiyon ocaklı üretim prosesi
- Sıcak veya soğuk haddeleme prosesine göre
- Çeliğin mikro yapısına göre; ferritik, perlitik veya martenzitik
- Çeliğe uygulanan sıcak işleme göre; tavlama, su verme veya temperleme (Singh 2016).

Karbon içeriği temel alınarak bir sınıflandırma yapıldığı zaman, demir-karbon denge diyagramı önemli bir referans noktası olarak kabul edilir. Demir-karbon denge diyagramı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Demir-Karbon denge diyagramı (Callister 1997)

Diyagram incelendiğinde %2,14 C içeriğine kadar çelik, %2.14 - % 6,67 C arası ise dökme demir olduğu görülmektedir.

Karbon İçeriğine Göre Çeliklerin Sınıflandırılması

İçeriğinde %2'den fazla alaşım elementi bulunduran bu tür çelikler alaşım oranlarına göre; düşük, orta, yüksek ve ultra yüksek karbonlu çelikler olarak 4 grupta incelenmektedir (Singh 2016).

Düşük karbonlu çeliklerin bünyesinde bulundurabileceği maksimum karbon oranı %0,30'dur. Bu sınıfta sac veya şerit gibi düz haddelenmiş ürünler bulunmaktadır. Düşük

karbonlu çelikler %0,10'dan az karbon ve %0,4 mangan (Mn) içeriği sayesinde şekillendirilebilirliği yüksek orandadır. Bu sınıftaki çelikler presleme, dikişsiz boru, dövme ve kazan tesisatı olarak kullanılırlar (Singh 2016).

Orta karbonlu çelikler %0,30 - 0,60 C ile %0,60 - 1,65 oranında Mn içeriğine sahiptirler. Çeliklerin su verme ve temperleme işlemi gerçekleştirebilmek için karbon içeriğini ve mangan içeriğini yaklaşık %0,5 artırmak gerekmektedir. Bu sınıftaki çelikler şaft, dişli, krank mili ve aks yapımında kullanılırlar. Karbon oranı %0,40 - %0,60 arasında olur ise, demiryolu ve ray aksları için kullanılabilirler.

Yüksek karbonlu çelikler %0,60 - %1,00 arasında C ve %0,30 - %0,90 arasında Mn içeriğine sahiptirler. İşlenebilirlik kabiliyetleri, sünekliği az olduğundan dolayı kötüdür. Bu sınıftaki çelikler el aletleri, yüksek-gerilim kabloları ve yay malzemelerinde kullanılmaktadır. (O'brien and Guzman 2011).

Ultra yüksek karbonlu çelikler %1,25 - %2,0 C içeren deneysel alaşımlardır. Termodinamik olarak işlenmesiyle proeutektoid karbür parçacıklı düzenli ve ince mikro yapıda üretilmektedirler (O'brien and Guzman 2011).

Kullanım Alanlarına Göre Çeliklerin Sınıflandırılması

Çeliklerde genel olarak kullanım alanlarına göre sınıflandırılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda genellikle yapı, yay, takım çelikleri ve paslanmaz çelik gibi çelik grupları kullanılmaktadır.

Yapı çelikleri kimyasal etkilere karşı dayanıklı ve üretim sırasında sertleştirme işlemine gerek duyulmayan karbon oranına göre alaşımlı ve alaşımsız olarak değişen malzeme grubudur. Bu çelik grubu özellikle endüstriyel ve yapısal uygulamalarda her türlü makine elemanı ve aksamalarda kullanılabilmektedir (Bahar 2007).

Yay çelik türlerinin karbon oranı takım çelikleri ile yapı çelikleri arasında yer alır. Bu tür çelikler yay imalatında kullanılır. Su alma yeteneğinin bulunması sebebiyle “çekme dayanımı/akma sınırı” oranı yüksektir (Gürü ve Yalçın 2012).

Takım çelik türleri alaşımlı ve alaşımsız olarak değişmektedir. Takım çelikleri içeriğindeki kobalt, molibden (Mo) ve tungsten içeriği sayesinde özellikle ısıya ve çizilmeye karşı dayanıklı malzeme olarak bilinmektedir. Yüksek tokluk ve sertlik değerlerine sahiptir. Mukavemeti yüksek malzemelerin işlenmesinde tercih edilirler (Bahar 2007).

Paslanmaz çelik türleri içeriğindeki krom sayesinde çevresel etkilere karşı oldukça dayanıklıdır. Kromun çelik yüzeyinde CrO (krom oksit) olarak birikmesi çeliğe paslanmazlık

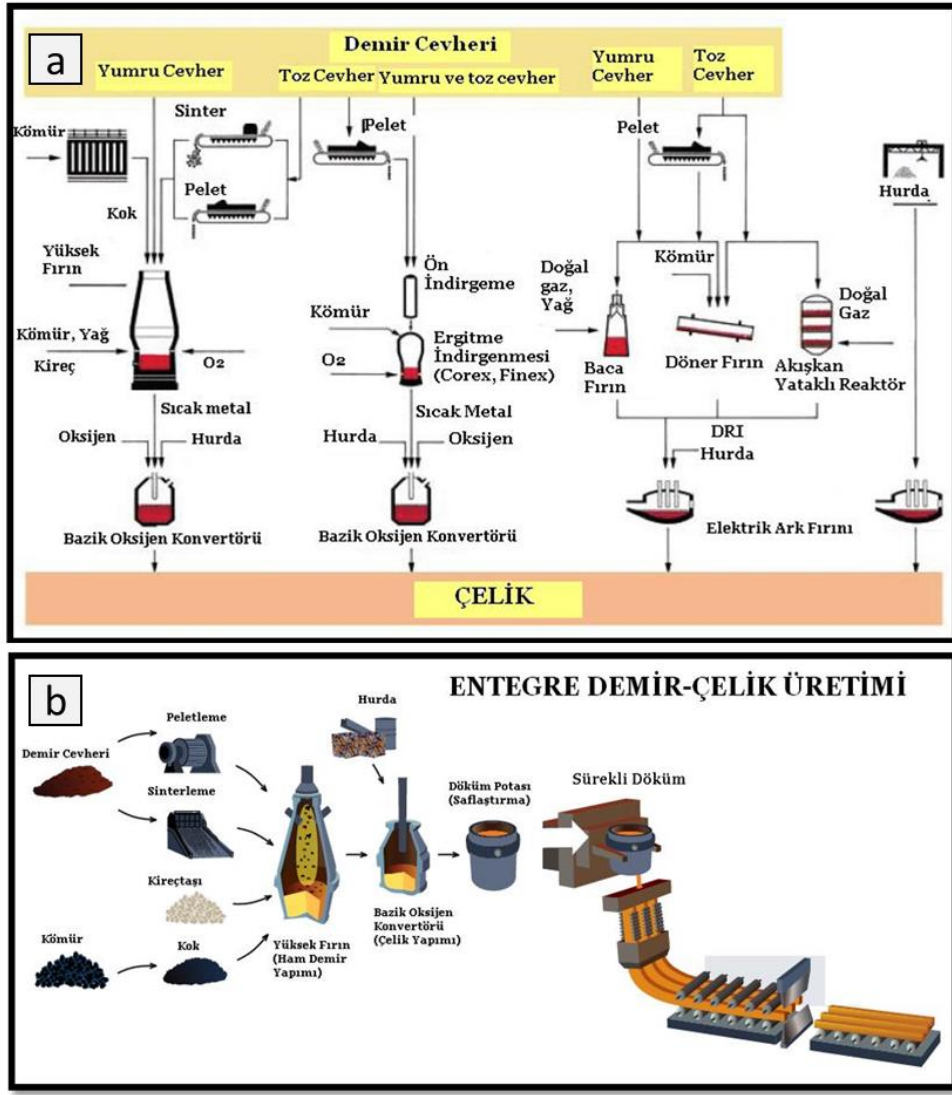
özelliğini vermektedir. Çelik yüzeyinde oluşan ince tabakalı CrO demiri dış etkilere karşı korumaktadır (Gürü ve Yalçın 2012).

Çelik Üretim Yöntemleri

Çelik sektöründe ana hammadde olarak demir cevheri kullanılmaktadır. Demir cevherinin kimyasal yapısı gereği doğada bulunan diğer elementlerle kolayca tepkimeye girmeye müsait olduğundan dolayı demir elementi doğada bileşik halde; mineraller şeklinde bulunmaktadır. Demir üretiminde kullanılacak olan bu minerallerin Fe içeriğinin en az %57 olması istenmektedir. Demir elementi yapmış olduğu kimyasal bileşiklere göre dört grupta toplanmaktadır. Bu gruplar; hidroksit maden filizi doğal hidratlı demir oksit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 - n\text{H}_2\text{O}$), maden filizi hematit (Fe_2O_3) ve magnetit (Fe_3O_4), karbonatlı maden 4 filizi siderit (FeCO_3), sülfatlı maden filizi pirit (FeS_2) ve pirotin (FeS)'dir (Devlet Planlama Teşkilatı 2001; Özügurlu 2015).

Çelik üretimi için birçok sistem kullanılabilmektedir. Kullanılan bu sistemlerden en yaygın olanlarından biri demir cevherinden ham demir ve ham demirden çelik üretimi, bir diğeri ise çelik hurdasından çelik üretimi yöntemleridir. Demir-çelik üretim süreci entegre tesislerde, parça cevherinin direkt olarak yüksek fırın şarjı ile veya demir cevheri kırılıp eleme işlemine tabi tutularak hazırlanması ile başlamaktadır. Kok kömürü yardımıyla yüksek fırında demir oksit haline gelen demir cevherinin indirgeme işlemi, içeriğindeki oksijen alınarak yapılmakta ve sıvı ham demir elde edilmektedir. Ham çelik üretim yöntemlerine ait akış şeması ve entegre demir-çelik tesisine ait üretim akışı Şekil 2'de verilmiştir. En çok kullanılan çelik üretim yöntemlerinden Bessemer-Thomas ve Siemens-Martin yanı sıra en çok kullanılan;

- YF ile demir – BOF ile cevher bazlı çelik üretimi
- EAO hurda bazlı çelik üretimidir (Erişir 2013; Hasançebioğlu 2014).



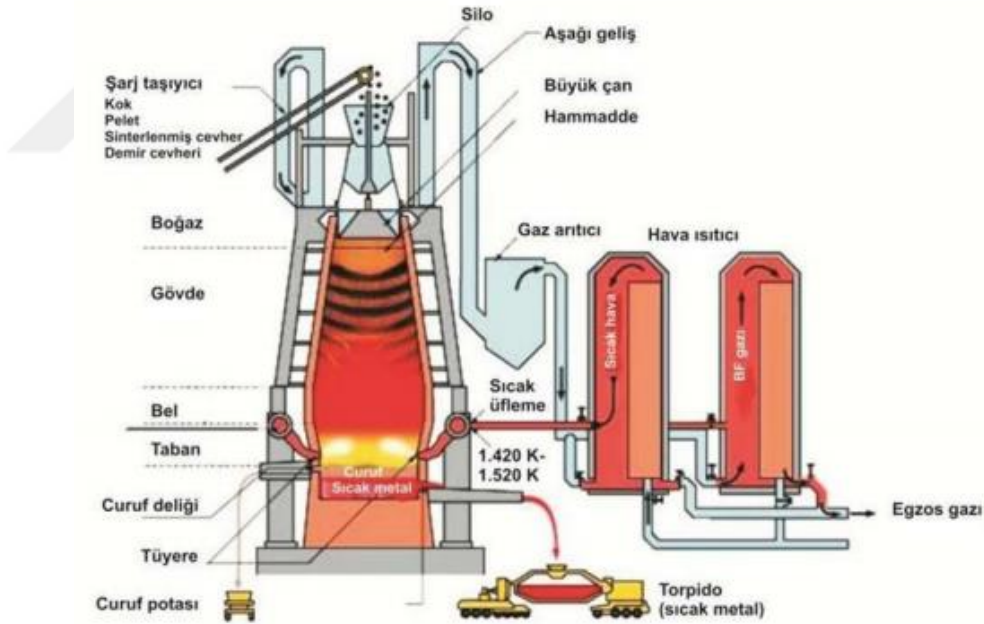
Şekil 2. a) Ham çelik üretim yöntemlerinin akış prosesi b) Entegre demir-çelik tesisi prosesi (Erişir 2013)

Yüksek Fırında Demir Üretimi

Yükseklikleri 30 – 90 m arasında değişen, içeriğinde demir olan hammaddelerin kireç taşı ve kok kömürü yardımıyla hammaddenin ergitilmesini sağlayan sisteme yüksek fırın denir. Pik demir üretiminde en önemli süreç yüksek fırındır (Yıldız 2013; Kaya 2014).

Yüksek fırında demir üretiminde kullanılan kireç taşı, demir içerisinde bulunan diğer elementlerle reaksiyona girerek cüruf meydana getirmekte ve bu sayede saf demir elde edilebilmektedir. Kok kömürü, yüksek oranda karbon içeren bir yakıt olup, yüksek fırın içerisindeki ısıyı ve indirgeyici gaz olan karbon monoksiti (CO) oluşturmaktadır. Yanma CO demir cevheri içerisinde bulunan safsızlıklar ile reaksiyona girerek cüruf oluşumunu sağlamaktadır. Kok kömürü ve kireç taşı karışımı ile sistem sürekli üstten beslenmektedir. Eriyen cevher, fırının üstünden altına doğru bir akış sağlayarak fırın içerisindeki indirgeyici gaz ile indirgeme süresini artırmaktadır. Yüksek fırının alt kısmında kalan karışıma 1-1,5 atmosfer

basıncında 600-1000°C arasında sıcak hava üflenerek yanma hızı artırılmakta ve alt kısımdaki indirgeyici gaz miktarı çoğaltılmaktadır. Bu safhada demir oksit (FeO) ile CO tepkimeye girmesi sonucu karbon dioksit (CO₂) ve demir (Fe) oluşmaktadır. Tepkime sonucu oluşan demir ve cüruf, sistemin alt kısmında toplanmaktadır. Yüksek fırında başka reaksiyonlar ile kısmi olarak demir oksit indirgenmektedir. Bunun sebebi, demirin içerisinde çok miktarda bulunan kükürt (S), karbon (C), Mn, P gibi elementlerdir. Cevherin içerisinde bulunan alüminyum oksit (Al₂O₃), silisyum oksit (SiO₄), magnezyum oksit (MgO) ve kalsiyum oksit (CaO) gibi safsızlıklar indirgenerek cüruf oluşumunu sağlamaktadır. Fırın haznesinin üst kısmında düşük yoğunluklu olan cüruf birikmekte ve bu biriken cüruf, fırının üst kısmına boşaltma deliği açılarak tahliye edilmektedir. Yüksek fırın haznesinin alt kısmında yüksek yoğunluğundan dolayı toplanan demir, kalıplara dökülerek döküm piki olarak alınmakta veya çelikhaneye sevk edilerek çelik üretimi gerçekleştirilmektedir. Yüksek fırın geliştirilmeden önce kok tüketimi 1 ton ham demir için 1 ton iken günümüzde, 1 ton ham demir için 650 kg kok kömürü tüketilmektedir (Özdabak 2004; Özuğurlu 2015; Seren 2015; Demir 2016). Yüksek fırın üretim şeması Şekil 3'te verilmiştir.



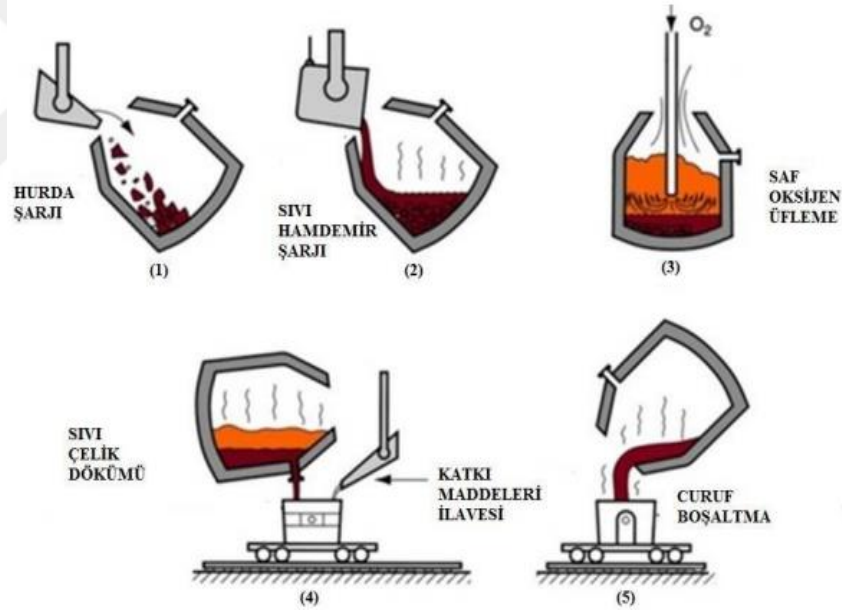
Şekil 3. Yüksek fırın üretim şeması (Yıldız 2013)

Bazik Oksijen Fırını (BOF) İle Çelik Üretimi

Çelik üretim proseslerinde ilk modern uygulamalar 1850'li yıllarda Bessemer tarafından yapılmıştır. Bu uygulamalarda ilk olarak BOF içerisinde silika refrakter tuğlalar kullanılmıştır. Thomas 1879 yılında dolomitik tuğlaları fırın içerisine astarlayarak bazik cüruf elde edilmesini sağlamıştır. BOF tabanında biriken sıvı ham demire 1970'li yıllarda oksijen üflenerek önemli bir yenilik kazandırılmıştır (Sezer 2007).

BOF prosesinde, %70-80 oranında yüksek fırından gelen sıvı metal kalan kısım da hurda ve cüruf yapıcı (kireç, dolomitik kireç) malzemeler olarak konvertöre şarj edilir. Konvertör içerisine daldırılan lans, sisteme yüksek basınçta oksijen üfleyerek, oksijenin şarjdaki empüritelerle birleşmesini sağlar. Bu safsızlıklar ise başlıca Si, P, Mn, CO ve bir miktar sıvı oksit halinde Fe'dir. Kimyasal reaksiyonlar ile meydana gelen oksitlerden sıvı halde bulunanlar ve dolomitik kireç birleşerek cüruf oluşturur. İşlemlerin sonunda sıvı çelik potaya boşaltılır ve oluşan cüruf ise sıvı halde, 1100 – 1500 °C de cüruf potalarına boşaltılarak stok sahalarında soğuması için bırakılır. Yaklaşık olarak 1 ton çelik üretiminde 100 – 150 kg cüruf meydana gelir (Erdemir 2005).

Çelik üretim sürecinde, yüksek fırında üretilen sıvı ham demir torpidolar (refrakter malzemeyle kaplanmış ve 300 ton sıvı ham demir taşıyabilen ray üzerinde giden lokomotifler) vasıtasıyla taşınır. Çelik üretim ünitesine gelen sıvı ham demir torpido çukurlarında bulunan potalara dökülür. Bu potalar tavan vinçleriyle kaldırılarak BOF'a şarj edilmek üzere boşaltılır. BOF ile çelik üretimi Şekil 4'te gösterilmiştir (Erdemir 2005).



Şekil 4. BOF ile çelik üretim şeması (Behiye 2019)

BOF çelik üretim şeması incelendiğinde; Birinci aşamada çelik hurdası, ikinci aşamada torpidolardan alınan sıvı ham demir potalar ile BOF' a şarj edilir. Üçüncü aşamada sıvı ham demirin içindeki S, Mn, P ve C gibi elementler fırın içerisine 15-20 dakika saf oksijen verilerek kireç, dolomitik kireç, kok kömürü gibi yardımcı malzemeler eklenerek istenilen değere düşürülür. Dördüncü aşamada sıvı çelik haline gelen ve içerisindeki P, S, C, Si değerleri üretimde istenilen değere geldikten sonra yaklaşık 1635 °C sıcaklıkta sıvı çelik potaya alınır.

Son aşama olan beşinci aşamada bazik oksijen fırını döküm pozisyonuna alınarak içerisindeki cüruf boşaltılır (Sezer 2007).

BOF sistemine oksijen üflenmesi sonucu oluşan reaksiyonların gösterimi Şekil 5’de verilmiştir. Su soğutma sistemine sahip olan lans borusunun zarar görmemesi ve aynı zamanda BOF’ da taşmaya sebebiyet vermemek için eriyik çelik yüzeyinin yaklaşık 1,5 metre üstünden saf oksijen üflemesi swichler yardımıyla bilgisayar ortamından otomatik olarak ayarlanmaktadır. Lans borusundan 20 bar basınç ve 300 m³.h⁻¹ debi ile saf oksijen üflenmektedir. Oluşan yüksek derecedeki ısı, sıvı çelikte bulunan karbonu yakarak uzaklaştırmaktadır. Bu sırada Si, S ve Mn gibi safsızlıklar da oksitlenmektedir. BOF da oluşan tepkimeler aşağıda verilmiştir (Gündoğan 2014):

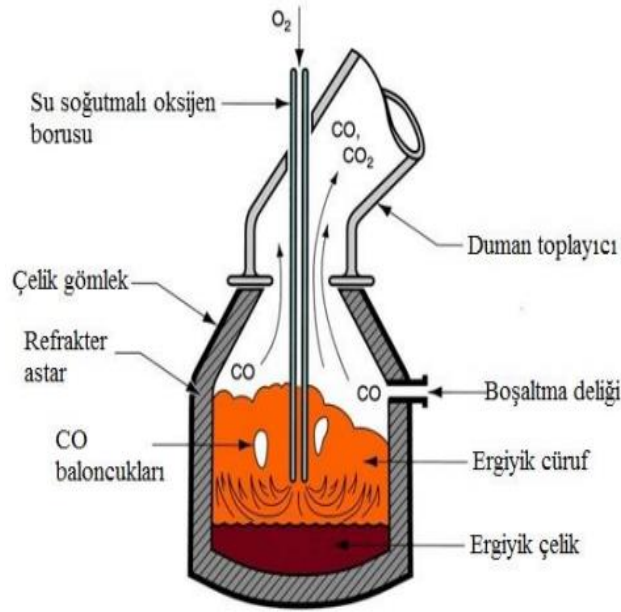


Çelikte bulunan karbon, oksijen ile birleşerek baca gazı olarak atılır.



şeklindedir (Kaya 2014).

İlk olarak üretilen CO ve az miktarda CO₂, BOF’un üst kısmındaki bacalar vasıtasıyla sistemden uzaklaştırılır. Kalan 3 tepkimenin sonucunda çıkan ürünler Silisyum dioksit (SiO₂), Mangan (II) oksit (MnO), Difosfor pentaoksit (P₂O₅) ürünleri cüruf olarak sıvı çeliğin üzerinde toplanır. Cürufun oluşması için kireç kullanılmaktadır. Sıvı çelikte temizleyici olarak kireç, safsızlıkların cürufta üzerinde birikmesini sağlar (Gündoğan 2014).

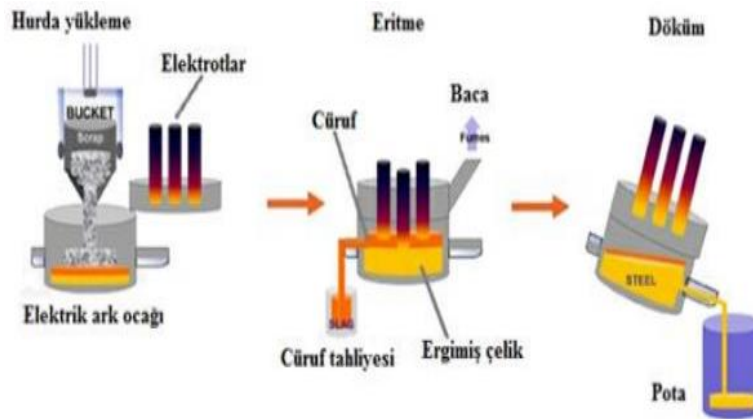


Şekil 5. BOF sistemine oksijen üflenmesi sonucu oluşan reaksiyonların gösterimi (Çetin 2016)

Elektrik Ark Ocakları (EAO) İle Çelik Üretimi

EAO'nın üretim esnekliği, daha hızlı devreye alma/durdurma ve yatırım maliyetleri göz önüne alındığında yüksek fırınlara kıyasla çok daha fazla tercih edildiği görülmektedir. EAO'larında bazik veya asidik olmak üzere iki çeşit ocak içi astarlama vardır. Bu yöntemlerden asidik astarlama yönteminin cüruf yapısının özelliği de asidiktir. Kısmi ve tam oksidasyon (yükseltgenme) yöntemi ile çelik üretimi yapılır. S ve P'nin giderimi cüruf yapısından dolayı yapılamadığından, hammadde seçiminde bu hususlar dikkate alınmalıdır. Bu yöntemde kolaylıkla potasyum ve P uzaklaştırılabilir (Behiye 2019).

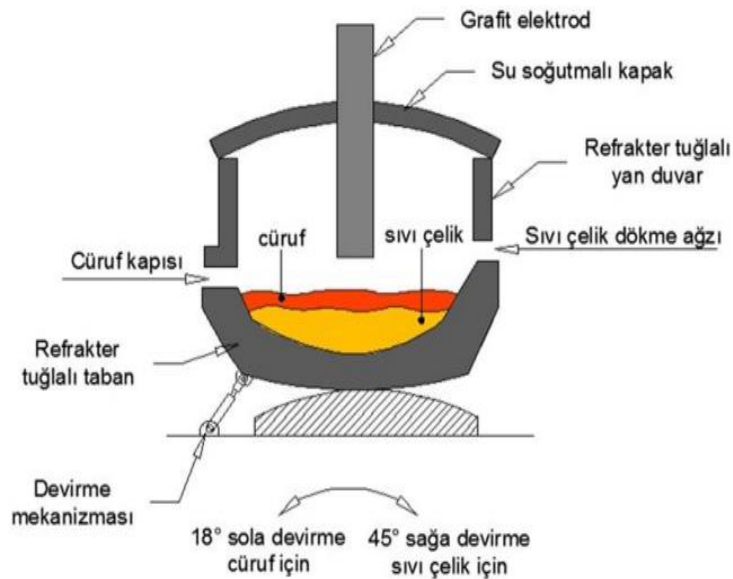
EAO'ları alternatif akım veya doğru akım prensibiyle çalışır. Alternatif prensibinde, kullanılan 3 elektrodun arasından akım geçmesiyle çelik eritilmektedir. Tek elektrod kullanılan doğru akım prensibinde, anot ve katot şeklinde üstte ve ocağın tabanında akım oluşturularak hurda çelik eritilir. EAO ile çelik üretimi Şekil 6'da gösterilmiştir (Çamdalı ve Murat 2004).



Şekil 6. EAO ile çelik üretim şeması (Behiye 2019)

EAO'larında üretim prosesi hurda şarjı, eritme, yükseltgenme, indirgeme, alaşımlama, deoksidasyon, döküm alma ve ocağın hazırlanması şeklinde gerçekleşir (Çamdalı ve Murat 2004).

Hurda demir ya bacadan açığa çıkan gaz tarafından ısıtılıp sıcak olarak ya da soğuk olarak EAO'na şarj edilir. Geri dönüşüm malzemesi olan hurda, şarj edildikten sonra fırın kapağı kapatılarak fırın içerisinde bulunan grafit elektrodla verilen akım ile şiddetli ark oluşturulur ve oluşan bu akımla hurda eritilir. Bu işlem için yüksek miktarda elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Ergitme sonrası güç düşürme işlemi yapılmaktadır. İndirgeme ve yükseltgenme periyotları arıtma kademesinde oluşmaktadır. İstenmeyen materyaller yükseltgenme periyodunda oksitlendirilerek cürufa katılır. Sıvı metal oluştuktan sonra cüruf alınarak sisteme P verilir. Baziklik oranının çalışma ortamına göre iyi ayarlanması gerekmektedir. Sürekli bir şekilde ocaktan numune alınıp sıcaklık ölçümü yapılarak bileşim kontrol altında tutulur. Alınan numunelere göre eksik görülen elementler eklenerek alaşımlama işlemi yapılır. Aynı zamanda içeriğinde fazladan bulunan elementlerin de tasfiye işlemi yapılır. Daha sonra sırasıyla P, S, Mn, Si ve son olarak C oranları ayarlanır. Bu işlemler sonrasında bünye içerisinde bulunan oksitler alınır ve oksijen miktarını en az seviyeye indirebilmek için karbon ve kireç ilave edilerek cüruf oluşturulur. Fırın içerisinde bulunan çeliğin üzerinde bulunan cürufu almak için fırın, 18° açı ile yatırılarak cüruf alınır (Şekil 7). Fırında kalan sıvı çelik ters istikamette 45° açı ile pota içeresine boşaltılır (Yıldız 2018). EAO'da çelik üretimi öncesi girdiler ve sonrası çıktılar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 7. EAO genel görünümü (Yıldız 2018)

Tablo 1. EAO’da Çelik Üretimi Öncesi Girdiler ve Sonrası Çıktılar (Kaya 2014)

GİRDİLER			ÇIKTILAR		
Malzeme	Birim	Miktar	Malzeme	Birim	Miktar
Hurda	kg/t	1080-1130	Sıvı Metal	kg/t	1000
Top. Enerji	KWh/t	650-750	Cüruf	kg/t	100-150
Elektrik	KWh/t	345-490	Taneler	kg/t	10-20
Oksijen	m ³ /t	24-47	Biricil	mg/m ³	3400-33900
			Tozlaşma		
Kireç	kg/t	30-80	İkincil	mg/m ³	150-275
			Tozlaşma		
Grafit Elektrod	kg/t	1,5-4,5	Atık Refrakter	kg/t	10
Astar	kg/t	ort. 8,1	İşl. Hurdası	kg/t	125-139
Su	Kısa devre döngü	-	Gürültü	dB(A)	<70

İndüksiyon Ocakları (İO) İle Çelik Üretimi

Son dönemlerde döküm sektöründe çelik imalatı için diğer ocakların yerini alan İO, bileşim ve sıcaklığın kontrollü bir şekilde gerçekleştiği temassız bir ısıtma yöntemidir. İO’larında, bobinden geçen alternatif akım kullanılarak metal içerisinde manyetik alan oluşturulur ve bobinden geçirilen alternatif akımda meydana gelen yön değişimi elektromanyetik değişken alanlar oluşturarak malzemede ısı enerjisine dönüştürülür. İO’larının diğer çelik üretim tesisleri ile karşılaştırıldığında yatırım maliyetleri ve ısı kaybı oldukça düşüktür. İO’larında oksijen kullanılmadığından dolayı toz ve gaz oluşumu gerçekleşmez. İO’nda ocağa en yakın noktada yaklaşık olarak 50-60 desibel civarında gürültü şiddeti vardır (MEGEP 2006).

Demir-Çelik Ürün Çeşitleri

Demir çelik ürünleri mutfak ekipmanlarından bir evin yapımı için ihtiyaç duyulan malzemelere kadar çok geniş kullanım alanına sahiptir. Değişen ve gelişen teknoloji şartları ve tüketici taleplerini karşılayabilmek için üretici firmaların girmiş olduğu rekabetler ile çelik ürün çeşitliliği gittikçe artmaktadır. Ağır sanayinin en önemlilerinden biri demir çelik sektörünün ürünleri; altyapı, beyaz eşya, inşaat, makine-sanayi ve otomotiv sektörü gibi pek çok alanda hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple demir çelik sektörü ülkelerin gelişmişlik ve refah seviyesiyle doğrudan ilişkilidir (Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı 2014).

Demir çelik sektöründe kullanılan ürünler uzun ve yassı olarak iki gruba ayrılır. Blum ve kütük uzun ürün üretiminde, slab ise yassı ürün üretiminde yarı mamul olarak kullanılır (Erdemir 2007c).

Uzun elik ürünleri; inşaat sektöründe kullanılan çubuk, dikdörtgen, kare, H, L, U kesitli profiller, tel üretimi, çivi üretimi, otomotiv yan sanayide kullanılan filmaşın ve demir yolu rayları olmak üzere birçok gruba ayrılabilir.

Yassı elik rnleri;

- Slabın sıcak haddehanede haddelenmesi ile üretilen levha ve sıcak haddelenmiş rulo ve saclar,
- Sıcak haddelenmiş yassı eliğın soğuk haddehanede haddelenmesi ile üretilen soğuk haddelenmiş rulo ve saclar,
- Soğuk haddelenmiş yassı çeliklerin sıcak daldırma yöntemiyle çeşitli ağırlıklarda çinko kaplanması ile üretilen ve kalınlıkları 0,30-2,00 mm aralığında değişen galvanizli rulo ve saclar,
- Soğuk haddelenmiş yassı eliğın elektroliz yöntemiyle çeşitli ağırlıklarda kalay ve krom kaplanması ile üretilen ve kalınlıkları 0,20-0,60 mm aralığında değişen kalay ve krom kaplı rulo ve saclar olmak üzere birçok gruba ayrılabilirler (Christmas 2006; Erdemir 2007c).

Dünyada elik Sektörü

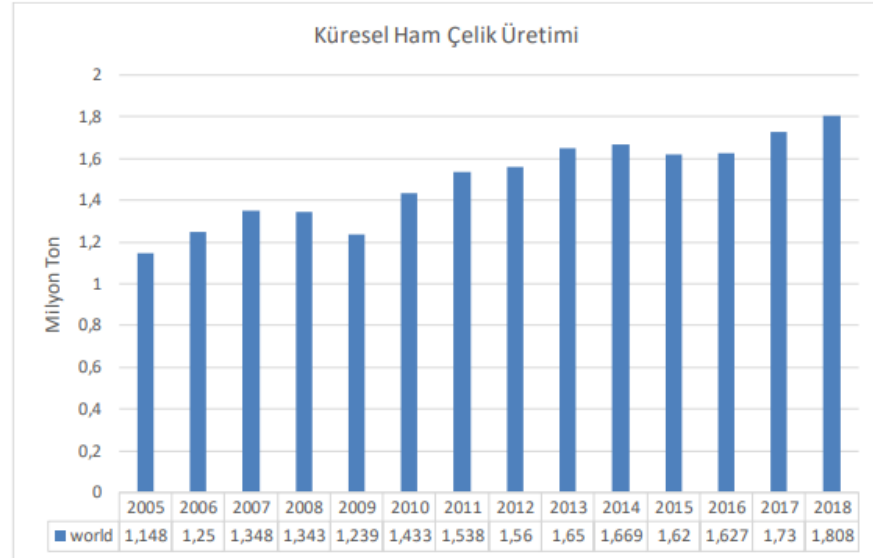
Dünyada elik sektörü, ülkelerin gelişiminde etkili olan en önemli göstergelerden biridir. elik, çeşitli sanayi kollarının eski zamandan bugüne kadar gelişiminde ve keşfedilmesinde önemli bir malzeme niteliği taşımaktadır (Ersöz vd. 2016).

Bir sanayi kolunun topluma ve ülke ekonomisine etkisi, ara girdiler ve çıktının değeri arasındaki fark yani Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla (GSYH) ile bu sanayi kolunda çalışan personel miktarıyla hem hammaddeyi tedarik eden firmalar hem de müşterilerin talep zincirine etkisiyle ölçülür. 6 milyondan fazla personeli ve brüt katma değeri 500 milyar dolar olan elik sektörü, küresel GSYH'nın %0,7'sini oluşturmaktadır (Askerov 2019). Ekonomiye etkisi göz önüne alındığında elik sektörünün ülkelerin gelişmişlik düzeyini göstermede önemli bir ölçüt olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Dünyada çelik üretiminin yıllara göre değişimi (International Trade Administration 2018).

Şekil 8’de dünya da çelik üretiminin 2006-2017 yılları arasında nasıl bir büyüme izlediği gösterilmiştir. Dünyada çelik sektörü, 2008-2009 yıllarında ekonomik krizin olduğu dönemde % -7,8 ve 2015 yılında ise çeliğe talebin azalmasından dolayı % -3,0 oranında negatif büyüme göstermiştir. 2015 yılından sonra çeliğin büyüme hızında artış gözlemlenmiştir. Çelik malzemesinde en yüksek artış oranı %15,7 ile 2010 yılında yaşamıştır (International Trade Administration 2018).

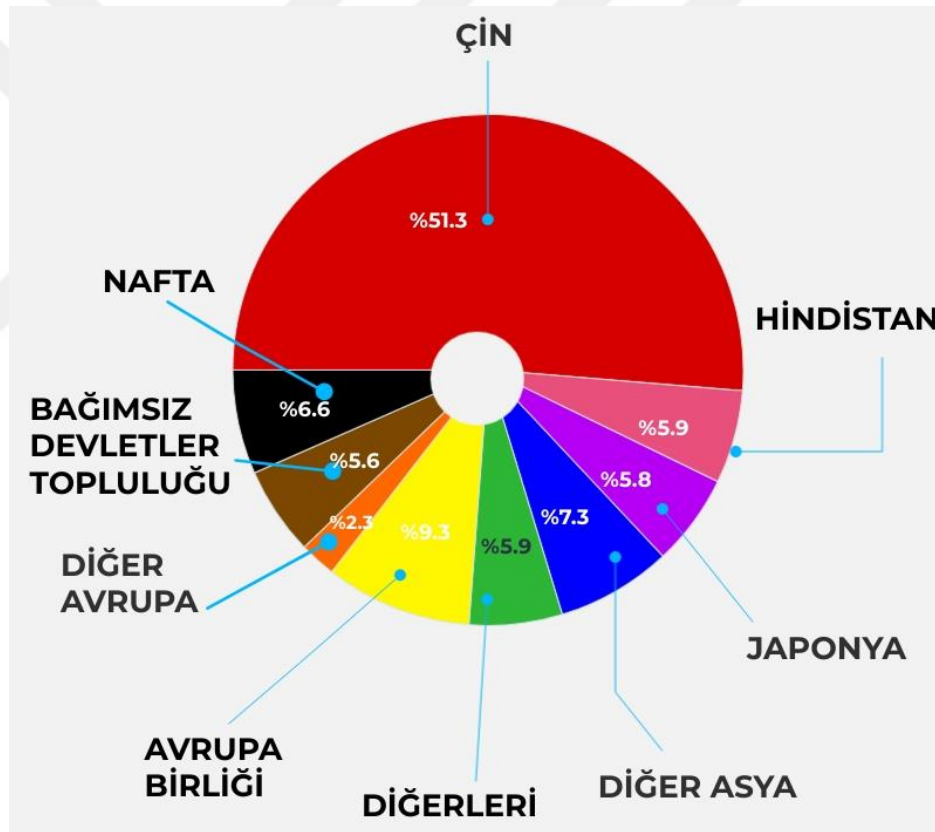


Şekil 9. Dünyada ham çelik üretimi (World Steel 2019)

Dünyada çelik sektöründeki büyümenin yıllara göre değişimi incelendiğinde (Şekil 9); 2005-2008 yılları arasında artan taleple doğru orantılı bir şekilde istikrarlı bir büyüme ile çelik sektörünün dünya ekonomisine katkı sağladığı görülmektedir. 2009 yılında küresel krizle çelik

üretimi düşüş göstermiştir. 2005 yılında, 1,15 milyar ton çelik üretilmişken, 2007 yılında üretim 1,35 milyar ton değerine ulaşmış, 2009 yılında ise 1,24 milyar ton seviyesine düşmüştür. Global ekonomik kriz ile düşen hammadde üretimi 2010 yılında tekrar yükseliş göstererek 1,43 milyar ton değerine ulaşmıştır. Genel olarak yükseliş gösteren çelik üretiminin 2018 yılında 1,80 milyar ton seviyesine ulaştığı görülmektedir (World Steel 2019).

Worldsteel verilerine göre (Şekil 10); 2018 yılında dünya genelinde üretilen toplam 1,80 milyar ton çeliğin 0,93 milyar tonu (%51,3) Çin tarafından üretilerek dünyada çelik üretiminde lider olmuştur. %9,3 oran ile Avrupa Birliği 0,17 milyar tonluk üretim ile ikinci sırayı almıştır. Ardından Asya ülkeleri %7,3 oran ile 0,13 milyar ton çelik üretimiyle üçüncü sıradadır. Japonya ve Bağımsız Devletler Topluluğunun çelik üretim oranları sırasıyla %5,8 ve %5,6'dır (Şekil 10). % 2,3'lük oran ile Diğer Avrupa ülkeleri çelik üretiminde en az paya sahiptirler (World Steel 2019).



Şekil 10. Çelik üretiminin ülkelere göre oranı (World Steel 2019)

2019 yılında (Kasım ayı verileri) dünya genelinde bir önceki yıla göre %1 azalma oranı ile 147,8 milyon ton ve yılın ilk 11 ayında ise %2,7 oranında artış ile 1,7 milyar ton çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Worldsteel yayınladığı verilere göre, Dünya’da 2020 yılında (Kasım ayı verileri) bir önceki yılın aynı ayına göre %6,6 oranındaki artış ile 158,2 milyon ton ve yılın ilk 11 ayında ise %1,3 oranında azama ile 1,67 milyar ton seviyelerinde çelik üretilmiştir. Çelik üretiminde egemen bir güce sahip olan Çin, 2020 yılında 2019 yılına göre %5,2 oranında bir

artış göstererek 152,9 milyon ton çelik üretimi gerçekleştirmiştir. ABD, 2020 yılında 72,7 milyon üretimde bir önceki yıla göre %17,2 azalma sağlamıştır. Rusya, %0,7 oranında düşüş ile 73,4 milyon ton çelik üretimi gerçekleştirmiştir. 2021 yılı Ocak verilerine göre Dünya’da ham çelik üretimi 2020 yılının Ocak verilerine göre %4,8 oranında artış ile 163 milyon 262 bin ton üretim gerçekleşmiştir (TÇÜD 2021a).

Türkiye’de Çelik Sektörü

Savunma sanayisi için çelik ihtiyacını karşılamak amacıyla Türk çelik sanayisi 1930’lu yıllarda Kırıkkale’de çelik üretim tesisinin temellerini atmıştır. Şimdi ki adıyla MKEK olan ve 16 tonluk iki adet Siemens-Martin çelikhanenin kurulmasıyla çelik üretimine başlanmıştır. Endüstrileşmenin ilk filizlerinin atılmasını sağlayan bu çelik sanayisi Türkiye ekonomisinin de gelişmesini sağlamıştır. 1930’lu yıllarda çelik sektörüne ilk yatırımlar birinci ve ikinci sanayi planları gerçekleştirilmiştir (TOBB 2016). Türkiye’deki demir çelik sektörü tesislerinin açılış ve faaliyete geçiş yılları Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Demir Çelik Firmaları ve Kuruluş Yılları (TOBB 2016)

FİRMA İSMİ	KURULUŞ YILI	FİRMA İSMİ	KURULUŞ YILI	FİRMA İSMİ	KURULUŞ YILI
MKEK	1928	Habaş	1987	Ede	2010
Kardemir	1937	İDÇ	1987	Platinum	2010
Erdemir	1965	Çebitaş	1989	Tosçelik	2010
Çolakoğlu	1969	Ekinciler	1989	Özkan	2010
Kroman	1969	Sidemir	1992	Batuğ Metalurji	2010
İçdaş	1970	Yazıcı	1994	MMK Metalurji	2011
Çemtaş	1972	Yeşilyurt	1997	Koç Metalurji	2013
İsdemir	1977	Kaptan	2002	Egemen Metalurji	2014
Asil Çelik	1979	Nursan	2005	Ege Demir	2015
Ege Çelik	1982	Sider	2006	Sıddık Kardeşler	2016
Diler	1984	Bilecik D.Ç	2009		

İlk olarak Karabük Demir Çelik Fabrikalarında (KARDEMİR) uzun çelik üretimi yapılmıştır. KARDEMİR 1937 yılında faaliyete geçmiştir. Asıl amacı yassı ürün üretmek olan, Ereğli Demir Çelik Fabrikası (ERDEMİR) ikinci entegre tesis olarak 1965 yılında faaliyete başlamıştır. Uzun ve yassı ürün taleplerini aynı çatı altında karşılamak amacıyla 1977 yılında iki tesisin yaptığı işi tek başına yapan İskenderun Demir Çelik Fabrikası (İSDEMİR) kurulmuştur (TOBB 2016).

Türkiye’de BOF ile üretim yapan entegre tesisler ERDEMİR, KARDEMİR ve İSDEMİR tesisleridir. Diğer çelik üretimi yapan tesisler EAO ve İÖ ile faaliyet göstermektedirler. Demir cevheri kullanarak üretim yapan Entegre Demir-Çelik tesislerinde BOF ile hurda çelik ergitmesiyle üretim yapan tesislerde ise EAO ve İÖ ile çelik üretimi gerçekleştirilmektedir. Çelik üretim sektörünün alt yapısına bakıldığında, ağırlıklı olarak hurda

elikten faydalanılan bir üretim altyapısı görülmektedir. Özellikle evre, enerji, hammadde gibi alanlarda çalışılması amacıyla demir-elik sektöründe ilk Ar-Ge merkezi Ereğli Demir-elik Fabrikası'nda faaliyete geçmiştir. Daha sonra 22 adet Ar-Ge, 3 adet Tasarı Merkezi kurulmuştur. 2021 yılı güncel veriler incelendiği zaman (şekil 11); 26 adet EAO, 8 adet İO ve 3 adet BOF olmak üzere toplamda 37 ham elik üretim tesisi bulunmaktadır (Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı 2014; TD 2021b).



şekil 11. Türkiye’de faaliyet gösteren elik firmalarının bölgesel kuruluşu (TD 2021b)

2019 yılına ait verilere göre bölgesel olarak elik üretim kapasitesi (Tablo 3); Karadeniz 8,3 milyon ton, İzmir 11,3 milyon ton, Marmara 15,2 milyon ton ve İskenderun 16,7 milyon ton elik üretim kapasitesine sahiptir (TD 2019).

Tablo 3. elik Firmalarının Kapasite Kullanımı ve retim Kapasitesi (TD 2019)

BÖLGE ADI	KAPASİTE (MİLYON TON)	ÜRETİM (MİLYON TON)	KAPASİTE KULLANIMI
Marmara	15,2	9,2	% 61,84
Karadeniz	8,3	6,6	% 79,51
İzmir	11,3	5,8	% 51,33
İskenderun	16,7	11,3	% 67,66

Türkiye’de bulunan demir-elik firmalarının 2021 yılı verilerine göre ham elik üretim kapasitesi; 11 tanesi 50-500 bin ton, 8 tanesi 500 – 1 milyon ton, 7 tanesi 1 – 2 milyon ton ve 11 tanesi 2 milyon ton ve üzeri ham elik üretim kapasitesine sahiptir (TD 2021a).

Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de entegre demir çelik tesisleri yüksek oranda kaynağa ihtiyaç duyduğundan kamu iktisadi teşebbüs olarak kurulmuştur. Türkiye’de bulunan entegre tesisler 1995 yılında özelleştirilmeye başlanmış ve ilk olarak 28 Şubat 2006 tarihinde demir çelik tesisleri hisse senetleri satışa çıkartılmıştır. Böylelikle demir çelik sanayisi özel sektör olarak üretimine devam etmiştir. Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu ile 1996 yılında imzalanan ‘Serbest Ticaret Antlaşması’ ile gümrük vergileri, antlaşmayı imzalayan devletlerle kaldırılmıştır. Bu antlaşma sayesinde Türkiye ile Avrupa Birliği arasında pozitif yönlü çelik ticareti gelişme göstermiştir (Deniz 2009).

Türkiye’de Ham Çelik Üretimi ve Ürün Tüketimi

İO’lardaki üretim miktarı çok düşük olduğu için çelik üretimi genel olarak EAO ve BOF’larda gerçekleşmektedir. BOF’da genellikle demir cevherinden çelik üretimi gerçekleşmektedir. BOF ’da çelik üretim süreci aşağıdaki gibidir;

- Demir cevherinin kırılması
- Eleme
- Sinterleme işlemleri sonucunda hazırlanması
- Yüksek fırına şarjı ile başlar.

Kok kömürünün eklenmesiyle demir oksit haline gelen demir cevherinin oksijeni alınarak indirgenir ve sıvı ham demir elde edilir (Çamdalı ve Murat 2004).

EAO’larında hurda kullanılarak çelik üretimi gerçekleşmektedir. EAO’da çelik üretim süreci aşağıdaki gibidir;

- Hurda, enerji, yakıt, gazlar vb. gibi girdilerin ve fırının hazırlanması
- Hurda şarjı
- Ergitme
- Oksitleme
- Döküm alma ve deoksidasyon
- Pota ve vakum işlemi
- Sürekli döküm sistemi şeklinde gerçekleşir (Çamdalı ve Murat 2004; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2009). EAO’ında hurdaya ulaşmak kolay ve maliyeti düşük olduğundan orta ölçekli firmalar tarafından kullanılır (America Iron and Steel Institute 2019).

Türkiye’de ham çelik üretimi 2018 yılının Mayıs ayına göre, 2019 yılının Mayıs ayında %8 oranında azalma ile 3,1 milyon ton üretim farkı göstermiş ve bu düşüş devam ederek Ocak ile Mayıs döneminde %10 oranındaki azalma 14,3 milyon seviyesinde bir farka sebep olmuştur.

Nihai çelik tüketimiyle 2019 yılının Mayıs ayı, 2018 yılının Mayıs ayına göre % 41,9 azalma göstererek 2,1 milyon ton, 2019 yılının ilk beş ayına bakıldığında % 35,2 oranında azalma ile 10 milyon ton seviyesine gerilemiştir. 2020 yılının Mayıs ayında bir önceki yıla göre %4,1 artış gözlenerek 3,1 milyon ton çelik üretimi, %34,9 artış ile 2,7 milyon ton çelik tüketimi gerçekleştirilmiştir. 2021 yılı Mayıs ayında bir önceki yıla göre %42,4 oranında artış gözlenerek 3,2 milyon ton çelik üretimi, %35,4 artış ile 14,9 milyon ton çelik tüketimi gerçekleştirilmiştir. 2021 yılı Ocak-Ekim döneminde önceki yılın aynı dönemine kıyasla çelik üretimi %14,2 artış ile 33,3 milyon ton iken çelik tüketimi %0,6 oranında azalma ile 27,6 ton seviyelerinde gerçekleşmiştir (TÇÜD 2021a).

Tablo 4. Türkiye’de Üretim Yöntemlerine ve Ürünlere Göre Çelik Üretimi (Milyon Ton) (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü 2019)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Uzun	26,294	24,612	23,231	23,015	25,839	24,669	20,944	23,234
Yassı	8,360	9,423	8,286	10,148	11,685	12,643	12,799	12,576
TOPLAM	34,654	34,035	31,517	33,163	37,524	37,312	33,743	35,810
EAO	24,723	23,752	20,482	21,846	25,963	25,799	22,884	24,782
BOF	9,931	10,283	11,035	11,317	11,561	11,513	10,859	11,028
TOPLAM	34,654	34,035	31,517	33,163	37,524	37,312	33,743	35,810

Demir-çelik sektöründe üretim kapasitesi Türkiye’de yassı ürünlerde 18,3 milyon ton, uzun ürünlerde 33,5 milyon ton üretimi ile toplamda 51,8 milyon tondur. 2018 yılında Türkiye % 72 kapasite kullanımı ile 37,3 milyon ton ham çelik üretmiştir (TÇÜD 2018). Çelik üretimi yapan 65 ülke arasında Türkiye; 2018 yılında 37,312 milyon tonla sıvı çelik üretiminde 8’inci sırada yer alırken 2020 yılında 7’nci sıraya yükselmiştir (TÇÜD 2020).

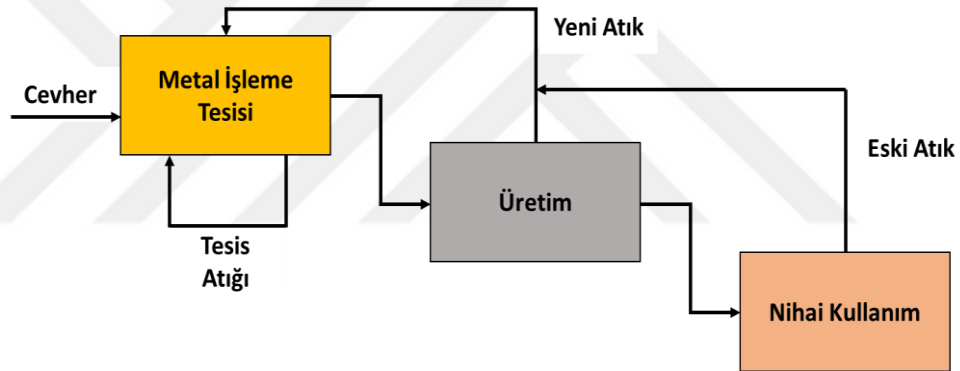
Ham çelik üretiminin Türkiye’de % 60 oranında EAO tesislerinden, % 40 oranında ise BOF tarafından üretilmektedir. BOF’ın temel hammaddesi demir cevheri, EAO’nın temel hammaddesi ise demir-çelik hurdasıdır. Sektörün özellikle EAO’larına yönelmesinin sebebi; hammadde yatırımının (hurda) entegre tesislere kıyasla daha düşük yatırım maliyeti gerektirmesinden dolayıdır. İç piyasadan karşılanabilen uzun ürünlerin yaklaşık % 51,7 oranı inşaat sektörü tarafından talep edilmektedir. Çeşitli sektörlerde girdi olarak kullanılan ve toplam tüketimin % 48’ini oluşturan yassı ürünler talep fazlası olmuştur ve bu talep iç piyasadan karşılanamamıştır. 2018 yılında 2014 – 2017 yılları arasına kıyasla tüketimde düşüş olmuştur ve tüketim alt seviyede yer almıştır. Uzun ürün tüketiminde çelik üretim ve tüketim rakamlarını

incelediğimizde Türkiye kendi talebini karşılayabilecek düzeyde üretim yapmaktadır. Fakat yassı ürün tüketiminde, Türkiye'nin üretmiş olduğu yassı ürün miktarı hiçbir dönem talep ihtiyacını karşılamamıştır (Behiye 2019).

Çelik Üretimi ve Çevresel Etkileri

Atık yönetimi birçok endüstri alanında olduğu gibi çelik endüstrisinde de oldukça önemlidir. Günümüzde sıfır atık yaklaşımı geri dönüşüm ve yeniden kullanım anlayışını oluşturmaktadır. Yüksek kapasiteli çelik tesislerinde cüruf oluşumunun yanında çeşitli çamur, tufal ve baca tozları gibi geri kazanımla değerlendirilebilecek yan ürünler ve atık malzemeler oluşmaktadır. Geri dönüşüm veya yeniden kullanım ile atık miktarını azalarak çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda ülke ekonomisine de katkı sağlamak mümkündür (Chaurand 2007).

Talebin yüksek olmasından dolayı çelik, geri dönüştürülebilir ürünler arasında yer almaktadır. Şekil 12'de, birçok kullanım alanına sahip olan çeliğin, atıl kısımlarının tekrar değerlendirilmesine ilişkin proses gösterilmektedir (Kumar 2016).



Şekil 12. Atıl çeliklerin değerlendirme prosesi (Kumar 2016)

Çelik üretimi sırasında meydana gelen cüruflar, sıfır atık konseptine uygun olarak yeniden kullanılabilir. Üretim sürecinde ürün girdisinin azalması ile maliyet azalmakta ve buna bağlı olarak kar marjında artış gözlemlenmektedir. Bu uygulamalar sayesinde çevreye duyarlı yeşil teknoloji insan hayatında kullanıma geçmiştir. Yüksek stabilite ve aşınma direncine karşı dayanım gibi özellikler çelik üretiminde oluşan cürufların, yeniden kullanım için uygun bir ürün olduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak çelik cürufları oldukça yaygın bir kullanım potansiyeline sahiptir (Chaurand 2007; Kumar 2016).

Cüruf Oluşumu ve Cüruf Özellikleri

Cüruf, demir çelik hammaddesinin veya hurda çeliğin çelik üretim yöntemlerinde kullanılan ergitme fırınlarında ergitilmesiyle oluşan; yoğunluk farkıyla sıvı metalin üst kısmında bulunan veya kömür gibi katı atıkların yakıt olarak kullanılması sonucu tesislerde

ortaya çıkan silikat, oksit veya borattan meydana gelen yan üründür. Metal üretiminde önemli bir atık olan cürufun pek çok işlevi vardır. Metalin üretim esnasında bünyesindeki S, P gibi safsızlıkların alınması; metalle arasına bir ara yüzey oluşturarak metalin bu atıklardan dolayı kirlenmesini ve ısı kaybetmesini önlemek gibi birden fazla işlevi vardır (Wang 2016).

Cüruf Oluşum Teorileri

Cüruf yapılarını tanımlayan 3 farklı teori vardır. Bu teoriler (Alan 2013);

- İyonik teori,
- Moleküler teori,
- Ortak teoridir.

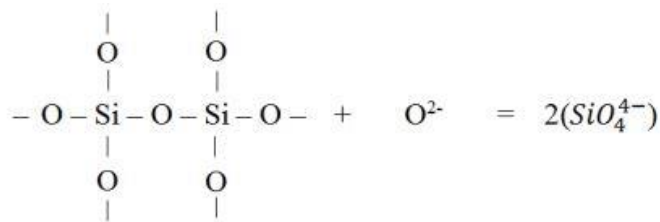
İyonik teori

Birçok araştırmaya konu olan ve farklı bilim dallarının çalışmalar yaptığı bir teoridir. Cüruf alanında termodinamik ve elektrokimyasal araştırmalar yapılan ve bu araştırmalara dayanarak cürufun tamamen ayrılmış iyonik yapıya sahip olduğunu savunan teoridir.

Bu teorinin temel savunması, cüruf bileşiminde bazik oksitlerin (CaO, MgO, FeO) disose olarak ortama oksijen iyonu vermesidir. Bazik oksitlerin ortama sağlamış olduğu serbest oksijen anyonları cüruf içerisindeki asidik oksitlerle birleşerek borat, silikat veya alüminat gibi kompleks yapılar meydana getirir (Alan 2013).



(5), (6), (7) bazik oksitlerin disose olma reaksiyonlarını ve (8) serbest oksijenle asidik oksitlerin bağlanması ile silikat yapının oluşması reaksiyonunu göstermektedir. Bu silikat yapısı Şekil 13'de gösterilmektedir.



Şekil 13. Silikat yapısı (Alan 2013)

Temkin tarafından 1945 yılında ortaya atılan teoriye göre cüruf, aynı yükün iyonları arasında herhangi bir etkileşim olmaksızın çözelti içinde tamamen iyonlarına ayrılmış halde bulunur (Coudurier *et al.* 1985).

Cürufun ideal katyon ve anyon çözeltisinden oluştuğu, cüruftaki tüm iyon türlerinin bilinmediği ve iyonların tamamen rasgele dağıldığı gibi başka teorilere ait varsayımlar vardır (Saridikmen 2011).

1953 yılında ortaya atılan Flood teorisi, kısmen Temkin'in teorisine benzer şekilde metalik fazda bulunan ergimiş elementlerin bileşikleri veya cüruf içerisinde bulunan iyonlar arasındaki denge ilişkisinden bahseder. Bu teoriye göre cüruf çözelti içerisinde ideal şekilde davranır ve metal ideal olmayan davranış gösterir. Bu yaklaşım, demir ve çelik üretiminde fosfor giderme, kükürt giderme reaksiyonları gibi metal cüruf reaksiyonlarında kullanılabilir (Coudurier *et al.* 1985; Saridikmen 2011).

Bir diğer teori ise Masson teorisidir. Bu teori, silikat cürufundaki bazik oksidin aktivitesini hesaplamak için kompleks iyonların iyon fraksiyonu türünden dağılımının değerlendirmesiyle hesaplanır. Polimerizasyon derecesi bulunan, bazik oksit karakteri ve miktarı ile kontrol edilen bu teoriye göre cüruf lar polimerik silikat anyonları bulunan kompleks çözeltilerdir. Bu bilgilere ek olarak, doğrusal veya dallanmış zincirleri hesaba katarken yüksek polimerlerle birlikte halkalı formları konu dışı bırakan Masson teorisi, Flood ve Temkin teorilerinde olduğu gibi katyonlar ve anyonlar için ayrı ayrı ideal bir davranış varsayımında bulunur (Coudurier *et al.* 1985). Aynı zamanda bu teorinin bazı kısıtları bulunmaktadır. Bunlar; ikili silikatlara uygulanabilen doğrusal zincirlerin oluşumunun dikkate alınması ve gerçek çözümlerdeki iyon etkileşimine yer verilmemesidir (Saridikmen 2011).

Moleküler teori

Moleküler teori, ergimiş cürufta birçok karmaşık bileşiğin bulunabileceği gibi katılmış cürufun içerisinde de birçok farklı bileşiğin bulunabileceğini varsaymaktadır. Bir başka deyişle, bu teori sıvı halde bulunan cüruf içerisindeki serbest florit, sülfite ve oksitin birleşerek kompleks molekülleri meydana getirdiğini savunulmaktadır.

Moleküler teorinin denklemleri aşağıdaki gibidir;



Aynı zamanda bu teori cürufta meydana gelebilecek bütün moleküler oluşumları dikkate almaktadır. CaO, MnO, SiO₂ gibi üçlü yapıda bulunan cürufta; CaSiO₃, MnO, Ca₂SiO₄, CaO, Mn₂SiO₄, MnSiO₃ gibi kompleks yapıda bulunabilen moleküller mevcuttur (Coudurier *et al.* 1985).

Bu teori demir içeren ve içermeyen metalürjik işlemler içerisinde bulunsa da bazı çelişkilere sahiptir. Örneğin bu teori sadece ideal durumda bulunan cüruf için geçerlidir. Elektrik iletkenliği, viskozite ve elektroliz ölçümleri gibi yapılan deneysel çalışmalar, cürufun anyon ve katyon formunda iyonlardan oluştuğunu göstermektedir (Saridikmen 2011).

Ortak (Coexistence) teori

Ortak teori, yukarıda bahsedilen iki teoriyi de kapsayarak cürufların iyon ve moleküllerin birlikte bulunmasıyla oluştuğunu savunmaktadır. Bu teori cürufların sahip olduğu birkaç özelliğe dayandırılarak kendini desteklemektedir. Ortak teoriyi destekleyen bir unsur, asidik ve bazik cürufların elektrik iletkenliklerinin farklı olmasıdır. Bu kanıtlar da cürufun içerisinde hem moleküllerin hem de iyonların bulunduğunu göstermektedir (Alan 2013).

Cüruf Çeşitleri

Demir-çelik üretimi esnasında yüksek fırın cürufu, pota cürufu ve ocak cürufu gibi pek çok farklı tipte cüruf meydana gelmektedir. Çelik üretiminin ilk aşaması ve yapay agregaların temel kaynağı çelik cürufu (ocak cürufu) dur. Eriyik halde bulunan çeliğe ihtiyaç duyulan minerallerin eklenmesi ve safsızlıkların ortadan kaldırılması için potaya aktarılır. Çelik üretiminin bu aşamasında arıtkanların eklenmesiyle yeniden cüruf oluşur ve oluşan bu cürufa pota cürufu denir (FHWA 2016).

Çelik Cürufu

Yüksek fırından gelen sıvı halde bulunan ham demire uygulanan çelikhane öncesi, yüksek fırın sonrası işlemlerinden sonra (P, S, Si ve benzeri elementleri giderme işlemleri), saf oksijen üfleme işlemi bazik oksijen fırınlarında da uygulanarak sıvı halde bulunan ham demirin bünyesindeki karbon uzaklaştırılır. Çelik üretim yöntemlerine göre sıvı pik demirden farklı oksitlerden oluşan çelikhane cürufu meydana gelir. Çelik cürufuna ait kimyasal analizler Tablo 5’de verilmiştir (Yıldırım and Prezzi 2009).

Tablo 5. Çelik Cürufuna Ait Kimyasal Kompozisyon (Erdemir 2005)

BİLEŞİM	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	S	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
%	26,04	13,30	2,70	5,02	46,57	5,25	0,02	0,32	0,14	0,17	0,47

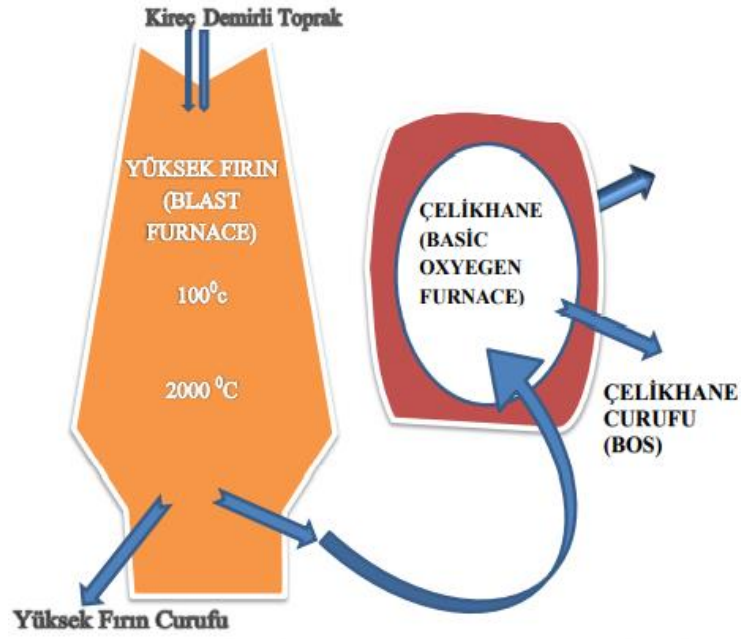
Çelik üretimi sırasında oluşan çelik cürufu, çelik içerisinde bulunan safsızlıkların yükseltgenmesi ile meydana gelen silikat ve oksitlerin meydana getirdiği karmaşık bir kimyasal içeriğe sahip olan, metalik olmayan yan ürün olarak tanımlanır. Erdemir tesislerinde kullanılan BOF ile ton başına yaklaşık olarak 125 kilogram çelik cürufu elde edilmektedir. Ereğli Demir ve Çelik Fabrikasında (ERDEMİR) çelik üretim sonucunda yılda 300.000 – 350.000 ton arasında cüruf meydana gelmektedir (Erdemir 2005).

Tablo 6’da çelik cürufuna ait karakteristik özellikler verilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda, çelik cürufunun Los Angeles aşınma direncinin %15,8 olduğu ve bu oranın normal agregalarla karşılaştırıldığında yüksek bir değere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, çelikhane cüruflarının aşınmaya karşı yükek bir direncinin olduğunun göstergesidir. Aynı zamanda, birim ağırlık değeri 3,19 olarak bulunmuştur ve bu değer geleneksel olarak kullanılan agregaların özgül ağırlığından daha büyüktür. Yüksek miktardaki birim ağırlık değerinden dolayı özellikle balast malzemesi olarak kullanım için uygundur (Chamling *et al.* 2018).

Tablo 6. Çelik Cürufunun Karakteristik Özellikleri (Chamling *et al.* 2018)

ÖZELLİKLER	ÇELİKHANE CÜRUFU
Los Angeles Aşınma Oranı (%)	15,8
Agrega Darbe Değeri (%)	17,6
Agrega Parçalanma Direnci	22,4
Birim Ağırlık (t/m ³)	3,19
Su Emme (%)	1,7
Donma-Çözünme (%)	5,4
Tane Şekli	Kübik-Köşeli

Çelik cürufunun doğal tane boyutu 4 cm civarındadır. BOF cürufunun %6’lık tane boyutu oranı ise 75 mikron altındadır. Bu boyutların kil zemin iyileştirilmesinde kullanımı uygun değildir. Çelik cürufunun elde edilişi Şekil 14’te verilmiştir. Ereğli Demir Çelik Fabrikası killi zemin iyileştirme işleminde katkı malzemesine yan ürün olarak çelik cürufu kullanmıştır (Erdemir 2005).



Şekil 14. Çelikhane cürufunun elde ediliş şeması (Erdemir 2005)

Çelik Cürufun Fiziksel Özellikleri

Çelik cürufunun farklı alanlarda kullanılabilmesi için fiziksel özellikleri önem taşımaktadır. Yapay agrega olarak çelik cürufunun kullanabilmesi için eleme, manyetik seperasyon, kırma ve ihtiyaç halinde yaşlandırma süreçleri gibi belirli işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. İri taneleri istenilen boyutlara getirebilmek için çeneli kırıcılar kullanılarak gerçekleştirilen geleneksel yöntemler yeterlidir. 0 – 5 mm boyutuna getirmek için tersiyer kırıcıların kullanılması gerekmektedir (Fronek 2011).

Çelik üretiminde yan ürün olarak çelik cürufu elde edildiğinden dolayı üretim tam kontrollü olarak yapılamamaktadır. Sıvı halde bulunan cüruf soğutulduğunda daha küçük taneler oluşturmaktadır. Bu süreçte oluşan taneler silt boyutundan çok iri tanelere kadar farklı boyutlarda oluşmaktadır. Tane boyutlarındaki bu değişkenlik sebebiyle cüruf, üretim tesislerinde genel anlamda 2 ile 3 boyuta ayrılır. Bu tane boyutlarından ince taneler 5 mm, orta taneler 5 – 64 mm ve iri taneler 64 – 200 mm boyutlarında sınıflandırılırlar. Silt boyutundaki tane boyutlarının cüruf içerisindeki oranı %10 - 15 civarındadır (Yıldırım and Prezzi 2009).

Birim hacim ağırlığı çelik cürufunun elde edilme yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle EAO çelik cürufunun birim hacim ağırlığı, uygulanan işlem ve içeriğiyle bağlantılı bir şekilde farklılık göstermektedir. EAO çelik cürufu, içerisinde demir oksit bulunması sebebiyle doğal agregaya kıyasla daha yüksek birim hacmine sahiptir (Fronek 2011).

Yapılan çalışmalarda dolomitik kireç taşının birim ağırlığı $2,540 \text{ g.cm}^{-3}$, kireçtaşı birim hacim ağırlığı $2,390 \text{ g.cm}^{-3}$ olarak belirlenmiştir. National Stone Association'ın doğal agrega örneklerinden elde etmiş olduğu yoğunlukları Tablo 7' de verilmiştir. Farklı tesislerin üretmiş

oldukları çelik cüruflarının Tablo 8’de farklı tesislerde bulunan cürufların yoğunluk değerleri verilmiştir (NSA 2011).

Tablo 7. Doğal Agrega Yoğunlukları (NSA 2011)

KAYAÇ TÜRÜ	GRANİT	KİREÇTAŞI	KUVERSİT	KUMTAŞI
Yoğunluk (g.cm ⁻³)	2,60-2,76	1,88-2,81	2,65-2,73	2,44-2,61

Tablo 8. Farklı Tesislerin Çelik Cüruflarının Yoğunluk Değerleri (NSA 2011)

REFERANS	CÜRUF TİPİ	YOĞUNLUK (g.cm ⁻³)
Altun ve Yılmaz (2002)	BOF	3,5-3,6
Ramonich <i>et al.</i> (2001)	EAO	3,5
Geiseler (1996)	BOF	3,1-3,7
Luxán <i>et al.</i> (2000)	EAO	3,1-3,4
Mahieux <i>et al.</i> (2009)	BOF	3,3
Manso <i>et al.</i> (2006)	EAO	3,3-3,7
Motz and Geiseler (2001)	BOF	3,3
Motz and Geiseler (2001)	EAO	3,5
Rohde <i>et al.</i> (2003)	EAO	3,4-3,5
Shen <i>et al.</i> (2004)	BOF	3,4-3,5
Wang (1992)	BOF	3,1-3,3
Xue <i>et al.</i> (2006)	BOF	3,3

Parçalanmaya karşı direnç agregaların bir diğer önemli özelliklerindendir. Bu parçalanmaya karşı direnci belirlemek için kullanılan Los Angeles deney metodu en önemli yöntemlerden biridir. Bu metot sonucu elde edilen değerler benzer veya farklı özelliğe sahip agregaların birbirlerine kıyasla dayanıklılıklarını da belirlemektedir. Genellikle kireç taşının parçalanma direnci %19 – 30 arasında, dolomitin ise % 18 – 30 arasındadır (NSA 2011). Çeşitli çalışmalar sonucunda elde edilen çelik cürufunun Los Angeles aşınma oranları Tablo 9’da belirtilmiştir. Aşınma oranının düşük olması parçalanmaya karşı direncin yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 9. Çelik Cüruflarının Los Angeles Aşınma Oranı (%)

CÜRUF TİPİ	REFERANS	AŞINMA ORANI (%)
EAO	Manso <i>et al.</i> (2004)	15-20
	Beshr <i>et al.</i> (2003)	11,6
	Moon <i>et al.</i> (2002)	25,9
BOF	Moon <i>et al.</i> (2002)	16,8
	Geiseler <i>et al.</i> (1996)	22

Çelik Cürufunun Kimyasal Özellikleri

Çelik cürufları, çelik üretiminde hammadde olarak bulunan ve içeriğinde bulunması istenmeyen demir dışı elementleri bünyesinde toparlayabilmesi için yüksek miktarda CaO içermektedir. Cürufun mekanik özellikleri ve bileşimi, cürufun işleme yöntemi ve kimyasal içeriğine bağlıdır. Bu sebeple çelik cürufunun minerolojik, mekanik ve kimyasal özellikleri YF cüruflarından farklıdır (Yıldırım and Prezzi 2011).

EAO cüruflarının ana mineral fazları manyetit, melanterit ve portlandittir. EAO, iri taneli keskin kenarlı ve ince taneli açılı/yuvarlak şekle sahiptir. EAO cüruflarında yüksek sürtünme karakteristiği ve kimyasal yapılarından dolayı yüksek ısı tutma kapasitesi gözlemlenmiştir. Su ile etkileşim sonucu CaO ve MgO bileşimlerinde genleşme meydana gelebilmektedir (Yıldırım and Prezzi 2011).

EAO ve BOF cürufu çelik üretimi sırasında meydana gelmektedir. Bu sebeple EAO ve BOF cüruflarının minerolojik ve kimyasal özellikleri benzerlik göstermektedir. BOF ve EAO cüruflarının iki ana bileşeni FeO ve CaO elementleridir (Yıldırım and Prezzi 2011).

Demir oksit içeriği BOF cürufunda %38 oranına kadar çıkabilmektedir. Demir oksitin sahip olduğu bu oran demirin çeliğe dönüştürülme esnasında ürüne katılamamaktadır. Demir cevherinde bulunan silika safsızlıklarının büyük bir kısmının BOF sürecinde CaO ile reaksiyona girmesi sebebiyle yüksek fırına oranla SiO₂ içeriği daha düşüktür. Silika içeriği BOF cürufunda % 7 – 18 arasındadır. MgO ile Al₂O₃ içeriği sırasıyla % 0.4 – 14 ile % 0.5 – 4 arasında değişiklik göstermektedir. Aynı zamanda serbest kireç içeriği % 12' ye kadar çıkabilmektedir (Tsakiridis *et al.* 2008).

Kimyasal içerik olarak birbirlerine benzerlik gösteren BOF ve EAO cüruflarının üretimi için EAO'da çelik üretiminde hurda çelik kullanılmaktadır. EAO cürufunun kimyasal içeriği ergitilen çeliğin özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Kimyasal içerik olarak EAO

cürüfları BOF cürüflarına kıyasla daha geniş bir içeriğe sahiptir. EAO cürufu genel olarak % 22-60 CaO, % 10-40 FeO, % 6-34 SiO₂, % 3-13 MgO ve % 3-14 Al₂O₃ içermektedir. EAO cürufunun içeriğinde bulunan FeO paslanmaz çelik üretiminde % 2'ye kadar düşebilmektedir (Shen *et al.* 2004).

Çelik cürufunun kristalizasyonu, soğuma hızı ve kimyasal içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterir. Yüksek fırın cürufunun silika içeriği yüksek olduğundan dolayı hızlı soğutulduğu takdirde camsı bir yapıya dönüşmektedir. Yapılan çalışmalarda, farklı miktarda kimyasal bileşenlere sahip BOF ve EAO cüruflarının soğutma hızının yapıya etkisi incelenmiş ve granüle EAO ve BOF cüruflarının yavaş soğutulan cüruflar ile benzer olarak karmaşık kristal yapı oluştuğu tespit edilmiştir (Manso *et al.* 2006; Tsakiridis *et al.* 2008).

Yapılan diğer çalışmalarda, tavlama değirmeninde soğutulan BOF cürufunun kristalize bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmalardan anlaşıldığı üzere çelik cürufu hızlı soğusa da kristalize olmaktadır. XRD deneylerinde çelik cüruflarında pek çok kristalize fazlar görülmektedir. Bu fazlar, çelikhane cürufunun yavaş soğuma süreci ve kimyasal içeriğinden kaynaklanmaktadır (Manso *et al.* 2006; Reddy *et al.* 2006; Tsakiridis *et al.* 2008).

Yapılan araştırmalarda bileşikler arasında, cürufun yapay kullanımına etki eden en önemli parametreler olarak MgO ve CaO gösterilmektedir. Serbest halde bulunan CaO hidrate olup Ca(OH)₂'ye dönüşerek genleşmeye neden olmaktadır. Genleşmeye sebep olan bir diğer elementte MgO'dur. Aynı şekilde MgO de hidrate olup Mg(OH)₂'ye dönüşmektedir. Cürufun inşaat sektöründe kullanılabilmesi için her iki bileşiğinde hidrate edilip genleşmenin kabul edilebilecek seviyeye getirilmesi gerekmektedir (Yonar 2017).

Çelik cürufunda SiO₂ önemli bir bileşiktir. Kuvars olarak adlandırılan SiO₂'nin doğal halinin sertliği, Mohs göstergesinde 7'dir. Çelik malzemenin sertliği ise 4- 4,5 arasında değişmektedir (Yonar 2017). Çok fazla sertliğe sahip olan bu bileşiğin cürufun stabilitesini büyük oranda artırabileceği düşünülmektedir.

Çelik Cürufunun Çevresel Etkileri

İnşaat sektöründe çelik cürufun kullanılabilmesi için içerisinde bulunan ve genleşmeye sebebiyet veren serbest MgO ve CaO bileşiklerinin yaşlandırılması yani hidrate edilmesi gerekir. Yaşlandırma sırasında CaO'nun büyük bir kısmı cüruftan uzaklaşır (Yonar 2017).

Cürufu yaşlandırma sırasında, ilk aşamada MgO ve CaO hidrate olarak Mg(OH)₂ ve Ca(OH)₂'ye dönüşmektedir. Hidrate işleminin uzun tutulması durumunda CO₂'nin etki etmesiyle Mg(OH)₂, MgCO₃'e ve Ca(OH)₂ de CaCO₃'e dönüşür. Bileşenlerin evrilme sırasına göre su ile etkileşimleri her tepkime ile azalmaktadır (Yonar 2017). Karbonatların oluşumu

esnasında çözünürlüğü düşük tabaka meydana gelmektedir (Exponent 2007). Oluşan bu tabaka sayesinde metallerin cüruf içerisinde süzülmesi yavaşlar ve zaman içerisinde oluşumunu devam ettirir. Bu sebeple cüruf hidratasyonun süresi, uygulamalarda Ca(OH)_2 'nin ve metallerin süzülme miktarını geçen süre kadar düşürmektedir (Fronek 2011). Bu doğrultuda cürufların hidrate edilmesi yani yaşlandırılması çevresel olarak da bir zorunluluktur. Cüruf taneleri çevresinde oluşan magnezyum karbonat ve kalsiyum karbonata zırhlanma denir (Exponent 2007). Zırhlanmanın görüldüğü tane ve taze cüruf tanesi Şekil 15'de görülmektedir.



Şekil 15. Zırhlanmanın görüldüğü tane (sol) ve taze cüruf tanesi (sağ) (Yonar 2017)

Çelik cüruflarının başka alanlarda kullanılmasından doğabilecek riskler, Amerikan Ulusal Cüruf Birliği (1998) tarafından hesaplanarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde çelikhane cüruflarının tekrar kullanımında çevre sağlığı ve halk açısından önemli bir risk taşımadığı belirlenmiştir.

Bu çalışmadan ortaya konulan sonuçlar aşağıda belirtildiği şekildedir (NSA 2011).

- Cüruf içerisinde bulunan metallerden önemsiz düzeyde sıvı ortama vermiş olduğu bileşikler, yüzeyde ve yer altında bulunan içme suları için hiçbir tehlike oluşturmamaktadır.
- Cüruf içerisindeki metaller besin zincirinde birikmemektedir. Cürufların fauna ve flora üzerinde belirlenen bir etkisi bulunmamaktadır.

Dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda, cüruflar su ile temas ettiği zaman sarı veya yeşil sızıntı suyu oluşumuna sebep olabilmektedir. Bu durum yüksek fırın cüruflarının oksitlenmesinden dolayı gerçekleşmekle beraber, oksitlenme olayı kısa bir zamanda son bulmaktadır. Bu olay yeterince yaşlandırılmamış, ince ve taze tanecikli çelik cüruflarında

meydana gelmektedir. Bu durumu engellemek için taze cürufların kullanılacağı ortamlarda gerekli drenaj ve yaşlandırılma işlemlerinin yapılması gerekmektedir (Exponent 2007).

Çelikhane cürufların stabilize yollarda kullanılması hakkında Newcastle Üniversitesinde yapılan araştırmalar sonucu, sızıntı suyunda sülfür kokusu oluşabileceği tespit edilmiştir. Fakat bu kokunun geçici bir süreliğine olacağı gözlemlenmiştir. Sülfür kokusunun yeterince yaşlandırılmış çelik cüruflarında olmadığı tespit edilmiştir (Exponent 2007).

Cüruf içerisinde bulunan bazı metaller toprak içerisinde bulunan metallere daha yüksek konsantrasyona sahip olabilmektedirler. Yüksek konsantreye sahip olabilecek metaller; berilyum, antimon, kadmiyum, krom, manganez, bakır, molibden, selenyum, nikel, talyum, gümüş, vanadyum, çinko ve kalaydır (Yıldırım and Prezzi 2009). Çelikhane cürufunda krom yüksek konsantrasyonda bulunabilecek bir bileşendir. Krom iyonlarının mineral fazlar ile bağları kuvvetli olduğundan sızıntı oranı düşüktür (Altun ve Yılmaz 2002). Fakat cüruf depolama alanı yeraltı suyundan alınan numunelerden ve cüruftan elde edilen eluatlarda, yüksek pH değeri tespit edilmiştir. Bunun sebebi cüruf içeriğindeki alkali maddelerin suya sızmasıdır. Bu nedenle kitle halinde bulunan çelikhane cürufları ve cüruf stok sahalarının bulunduğu bölgelerin pH değerinin ekosistem üzerine etkisi araştırılmalıdır (Das *et al.* 2007).

1998 yılında yapılan risk değerlendirme çalışmaları neticesinde çelikhane cüruflarının kullanıldığı bölgelerde insan sağlığı ve ekoloji üzerine herhangi bir olumsuz etkiye rastlanmamıştır. Yapılan bu çalışmalar çerçevesinde en az ve makul maksimum seviyede maruz kalma durumları, Environmental Pollution Agency (EPA) kıstaslarında incelenmiştir. Bu değerlendirmede belirlenen durumlara göre maruz kalınabilecek ortalama dozlar hesaplanmıştır (Chaurand 2007). Potansiyel kanserojen olarak, kadmiyum, nikel ve berilyumun farklı formları dikkate alınmıştır. Farklı kullanımlarda oluşabilecek sağlık sorunlarını tanımlayan risk karakterizasyonunu oluşturabilmek amacıyla toksisite ve maruz kalma miktarı beraber dikkate alınmıştır. Makul maksimum seviyede maruz kalma durumunda kanser riski teorik olarak, on milyarda 2-8 arasında hesaplanmıştır. Kanser riski çok düşük olduğundan EPA tarafından göz ardı edilebilir olarak kabul edilmiştir (Kneller *et al.* 1994).

Yapılan ekolojik risk değerlendirmesi araştırmaları sonucuna göre; uygulama senaryoları ve çevresel durumlar ele alındığında, cüruf çözeltisi ya da tanelerinin suya veya doğal toprağa karışması halinde, ekolojik olarak zarar teşkil etmediği tespit edilmiştir. Potansiyel olarak tek risk, alüminyum konsantrasyonuna sahip cürufu tatlı su kaynaklarına yakın bölgelerde uygulanmasıdır. Cüruf/su oranının yüksek olması halinde özel incelemeler yapılmalıdır (Chaurand 2007).Yapılan çeşitli araştırmalarda, çelik cürufu ile elde edilen eluatta arsenik, kadmiyum, kurşun, baryum, krom, civa, selenyum ve gümüş gibi element parametreleri

araştırılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar DIN 38414-S4 ve United States Environmental Protection Agency (USEPA) limitleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda EAO elike cürufunun tehlikesiz bir yan ürün olduğu tespit edilmiştir (Aiban 2006; Sofilic *et al.* 2009).



MATERYAL VE METOD

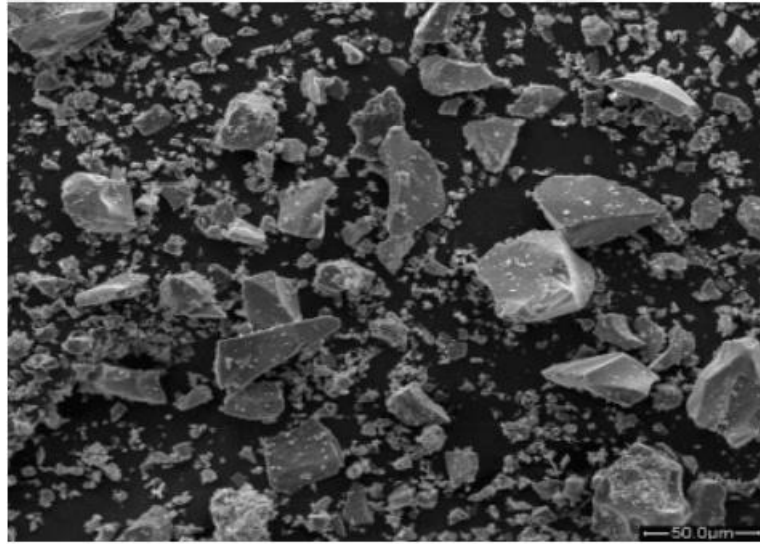
Bu bölümde, cüruf malzemelerin bölgesel olarak elde edildiği demir-çelik tesisleri ve bu tesislerden elde edilen cürufların kimyasal ve fiziksel özellikleri değerlendirilmiştir.

Çelik Cürufu

Çelik cürufları EAO cürufu ve BOF cürufu olarak gruplandırılmaktadır (TÇÜD 2015). İO ile çelik üretimi yapan tesislerin sayılarının az ve kapasitelerinin düşük olması sebebi ile bu bölümde değinilmeyecektir. Demirden çelik üretiminde yan ürün olarak meydana gelen çelik cürufu farklı ergitme koşulları ve besleme malzemesi sonucu, değişik aralıklarda mineral ve kimyasal bileşimi olan bir üründür. Ergimiş halde bulunan demiri safsızlıklardan arındırılması aşamasında oluşan cüruf, genellikle Şekil 16'da gösterildiği gibi koyu/açık gri renkte, pürüzlü, tane şekli köşeli ve gözenekli bir yapıya sahiptir (Şekil 17). BOF cürufu ve EAO cürufları YF cüruflarından farklı olarak yükseltgenme prosesi ile elde edilmekte ve bu sebeple birçok değerli madde içermektedir (Reuter *et al.* 2004).



Şekil 16. Çelikhane cürufu örnekleri (Yonar 2017)



Şekil 17. Çelikhane cürufu örnekleri (Gupta and Sachdeva 2020)

Çelik cürufu başlıca CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , FeO , MgO , P_2O_5 ve MnO 'den oluşmaktadır. Çelik cürufları ön işlem metotlarına ve fırın tipine göre değişiklik göstermektedir. EAO ve BOF cüruflarının kimyasal bileşimi Tablo 10'da özetlenmiştir (Yi *et al.* 2012)

Tablo 10. EAO Cürufu Ve BOF Cürufunun Kimyasal Bileşimlerinin Karşılaştırılması (Yi *et al.* 2012)

BİLEŞİM (%)	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	MnO	Fe_2O_3
EAO Cürufu	0-50	8-13	10-18	11-20	2-5	5-10	5-6
BOF Cürufu	45-60	3-13	1-5	10-15	1-4	2-6	3-9

Türkiye'de Demir-Çelik Tesislerinden Elde Edilen Cüruf Özellikleri

Türkiye'de demir-çelik sektöründe faaliyet gösteren tesislerin 3 tanesi BOF, 26 tanesi EAO ve 8 tanesi de İO ile üretim yapmaktadır. Entegre tesisler olan ERDEMİR, KARDEMİR ve İSDEMİR demir-çelik fabrikalarında üretim esnasında meydana gelen BOF cüruflarının kimyasal özellikleri Tablo 11'de verilmiştir. Çelik cüruflarına ait yapılan analizler sonucu elde edilen fiziksel özellikleri ise Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 11. ERDEMİR, KARDEMİR ve İSDEMİR Demir-Çelik Fabrikalarında Üretim Esnasında Meydana Gelen BOF Cüruflarının Kimyasal Özellikleri (Şentürk vd. 2004; Günay ve Kara 2005; Öngü 2017)

BİLEŞİM	ERDEMİR %	KARDEMİR %	İSDEMİR %
CaO	46,57	37,89	46,07
Fe ₂ O ₃	26,04	40,33	15,34
Al ₂ O ₃	5,02	1,12	2,86
SiO ₂	13,30	8,96	11,21
S	0,32	0,35	0,69
MnO	2,70	2,88	2,43

Çelik cürufunun içeriğindeki yüksek miktarda demir ve magnezyum sebebiyle koyu/açık gri renkte olan cürufların, fiziksel özellikleri ve yoğunlukları türlerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Cürufun, çözülmeye karşı gösterdiği yüksek mukavemet ayırt edici özelliklerindendir. Aynı zamanda cürufun yüksek yoğunluğu, iyi aşınma direnci ve düşük su emme yüzdesi gibi avantajları bitümlü karışımlarda kullanılabilirliği açısından önem arz etmektedir. Cürufun, işlenme kolaylığı ve ısı izolasyonu gibi özellikleri de bulunmaktadır (Bilgen vd. 2010).

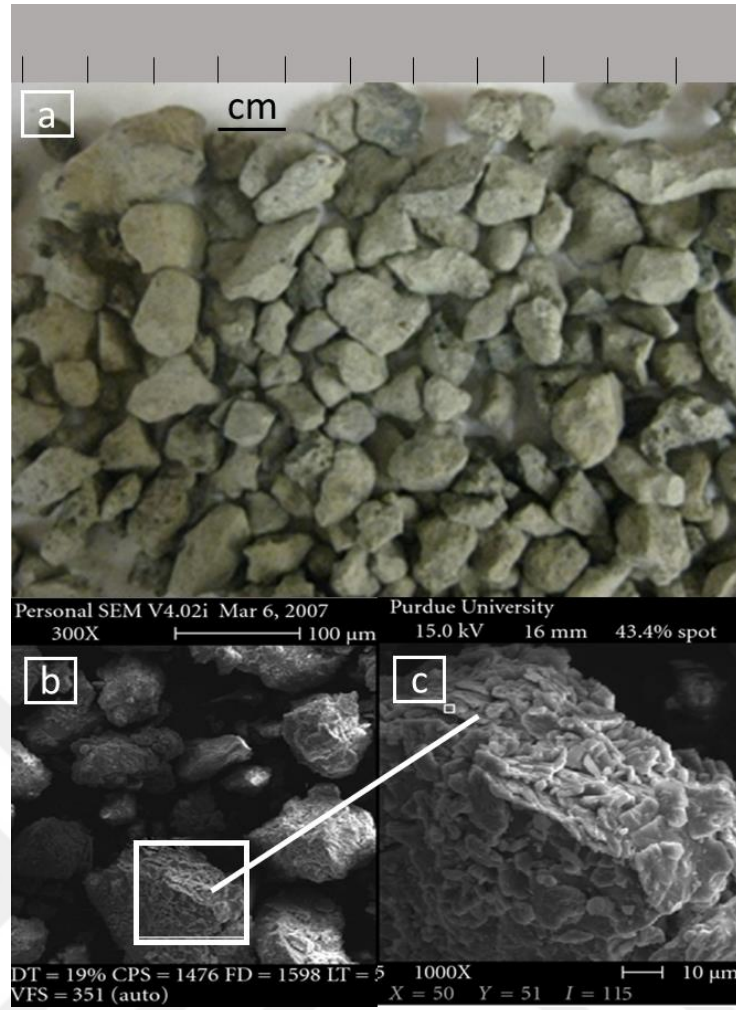
Tablo 12. Çelik Cürufunun Fiziksel Özellikleri (Yılmaz 2018)

ÖZELLİK	DEĞER
Los Angeles Aşınma Oranı (ASTM C131), %	20-25
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi (ASTM C88), %	<12
İç sürtünme açısı	40°-50°
Kalifornia taşıma oranı (CBR, yüzde en büyük boyut 19 mm)	300'e kadar
Sertlik (Moh skalası)	6-7
Yassılık İndeksi, %	15,5
Su emme (kaba ve ince agrega), %	0,95-0,83
Dolomit setliği	3-4
Öğütülmüş kireç taşı CBR, %	100

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

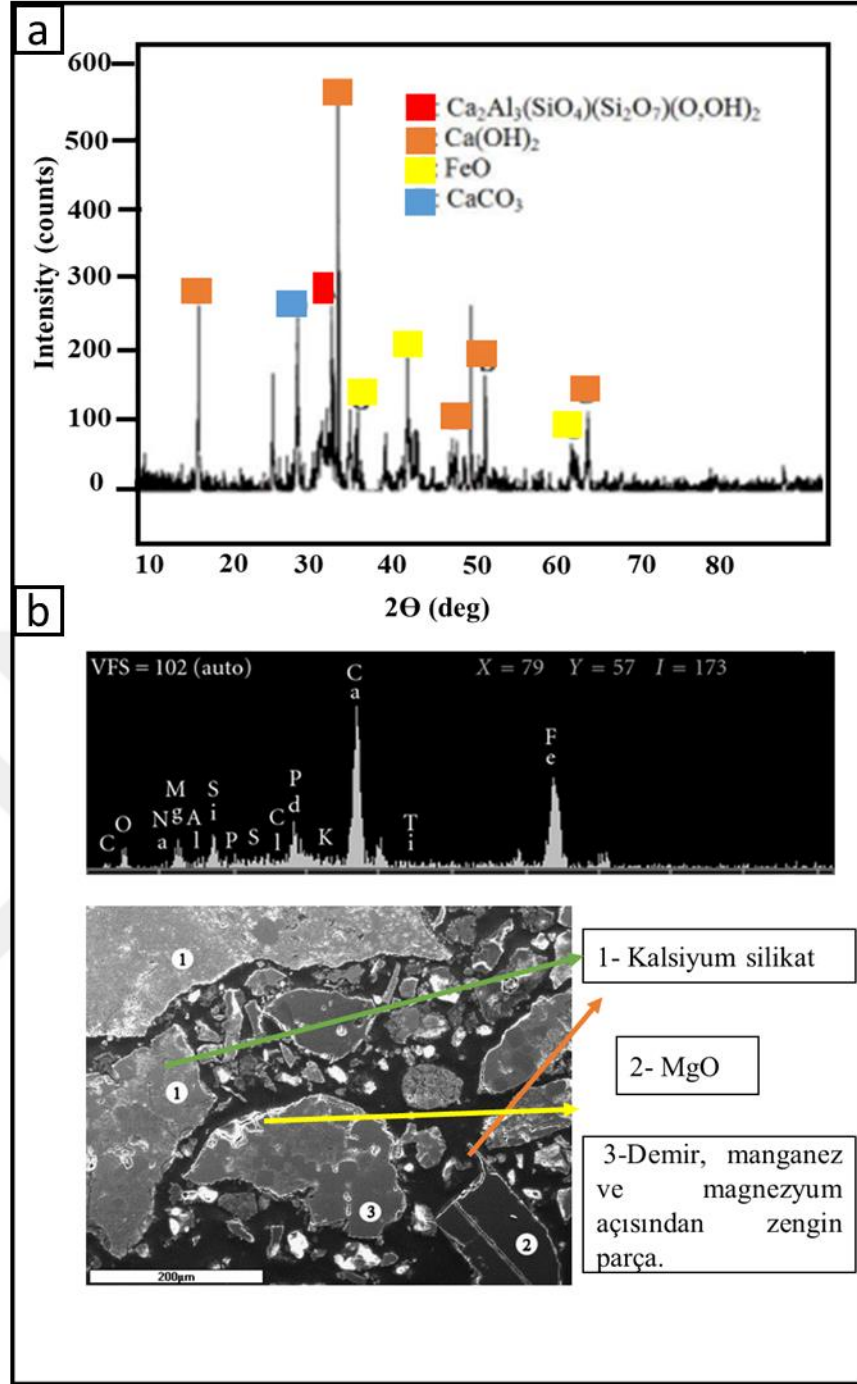
Demir-çelik sektörü, ülkelerin gelişmişlik derecesi üzerinde etkili olan çeşitli sanayi kollarının eski zamandan bugüne kadar gelişiminde ve keşfedilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. 1970 yılında dünya çelik üretiminin 595 milyon ton olduğu belirtilirken, 2019 yılındaki çelik üretiminin 50 yıl içinde %200'ün üzerinde büyük bir artış göstererek yaklaşık 1.87 milyar ton olduğu bildirilmiştir. Türkiye'nin, 2019 yılında yaklaşık 33,7 milyon ton küresel ham çelik üretimi ile dünyanın en yüksek 8. ham çelik üretimi olduğu bildirilmektedir (Yearbook 2014). Muazzam miktardaki bu çelik üretimi beraberinde yüksek oranda atıl durumda cüruf üretimine yol açmış ve kullanılabilirliği, depolama alanı, boşaltma ücretleri ve arazi kirliliği ile ilgili çeşitli sorunlara neden olmuştur (Lian *et al.* 2017; Siedlecka 2020). Demir-çelik endüstrisinden gelen yan ürün olan çelik cüruf, işleme sırasında iki farklı aşamada üretilir ve sonuç olarak BOF ve EAO cürufu olarak sınıflandırılır (Roslan *et al.* 2016).

BOF cürufu, demirin çeliğe dönüştürülmesi veya pik demir rafinasyon işlemi sırasında yan ürün olarak elde edilir. İşlem sırasında, pik demirdeki karbon içeriğini azaltmak için oksijen ve nötr gazın BOF'a nüfuz etmesiyle karbon miktarı azaltılır ve oksitlenir. Ayrıca, sırasıyla pik demirde bulunan istenmeyen bileşikler ayarlayan ve refrakter astarı koruyan dönüştürücüye kireç ve dolomit eklenir. BOF cürufu daha sonra densimetrik ayırma (yoğunluk farkı metodu) kullanılarak izole edilir ve daha sonra yavaşça soğuması için beklemeye alınır. Bir ton çelik üretimi sürecinde yaklaşık 100-200 kg BOF cürufu üretilir (Belhadj *et al.* 2014; Kabay *et al.* 2021). Şekil 18'de BOF'a ait cüruf parçacıkları ve SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 18a' da görüldüğü gibi pürüzlü ve değişken köşeli yapıya sahiptir. Şekil 18b-c dikkatli bir şekilde incelendiği zaman, parçacıkların yüksek oranda keskinliğe sahip olduğu ve yüzeyde hacimsel olarak tanelerin dağılımı göstererek pürüzlü bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir (Yıldırım and Prezzi 2011). BOF esas olarak CaO (%35.43), SiO₂ (%10.08), Al₂O₃ (%3.24), MnO (%2.52) ve MgO (%2.06) ve Fe (%43.14) bileşenlerinden oluştuğu ve yapılan XRD analizlerine (Şekil 19) göre çelik cürufun ana bileşenlerinin demir ve kalsiyum oksitleri olduğu görülmektedir (Reddy *et al.* 2006; Tossavainen *et al.* 2007; Nicolae *et al.* 2007).



Şekil 18. BOF cürufuna ait a) çakıl boyutundaki parçacıklar, b) ve c) tane şeklini ve dokusunu gösteren SEM görüntüleri (Yıldırım and Prezzi 2011).

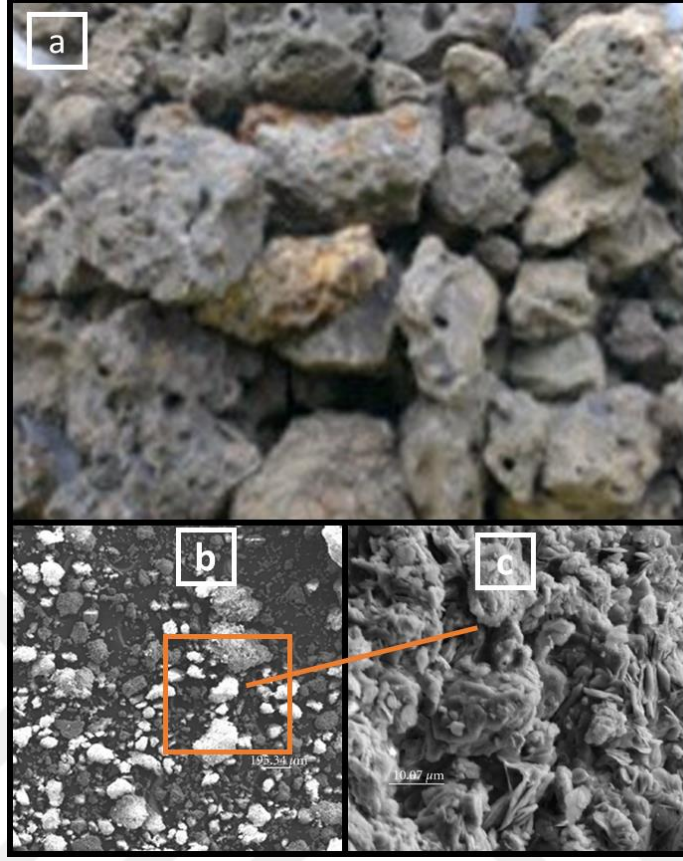
EAO cürufu, sıvı çeliğin eritilmesi ve asitle rafine edilmesinden sonra üretilen, çelik üretim endüstrisinin bir yan ürünüdür. EAO cürufu genel olarak %80 oranında demir, kalsiyum ve silikon oksit içeriği sergilerken eser miktarda magnezyum, alüminyum ve manganez oksit bileşimlerine sahiptir. Bu oksitlerin oranındaki farklılıklar çeliğin cinsine, fırının refrakter malzemelerine ve bazı teknolojik gelişmelere bağlıdır (Adegoloye *et al.* 2016).



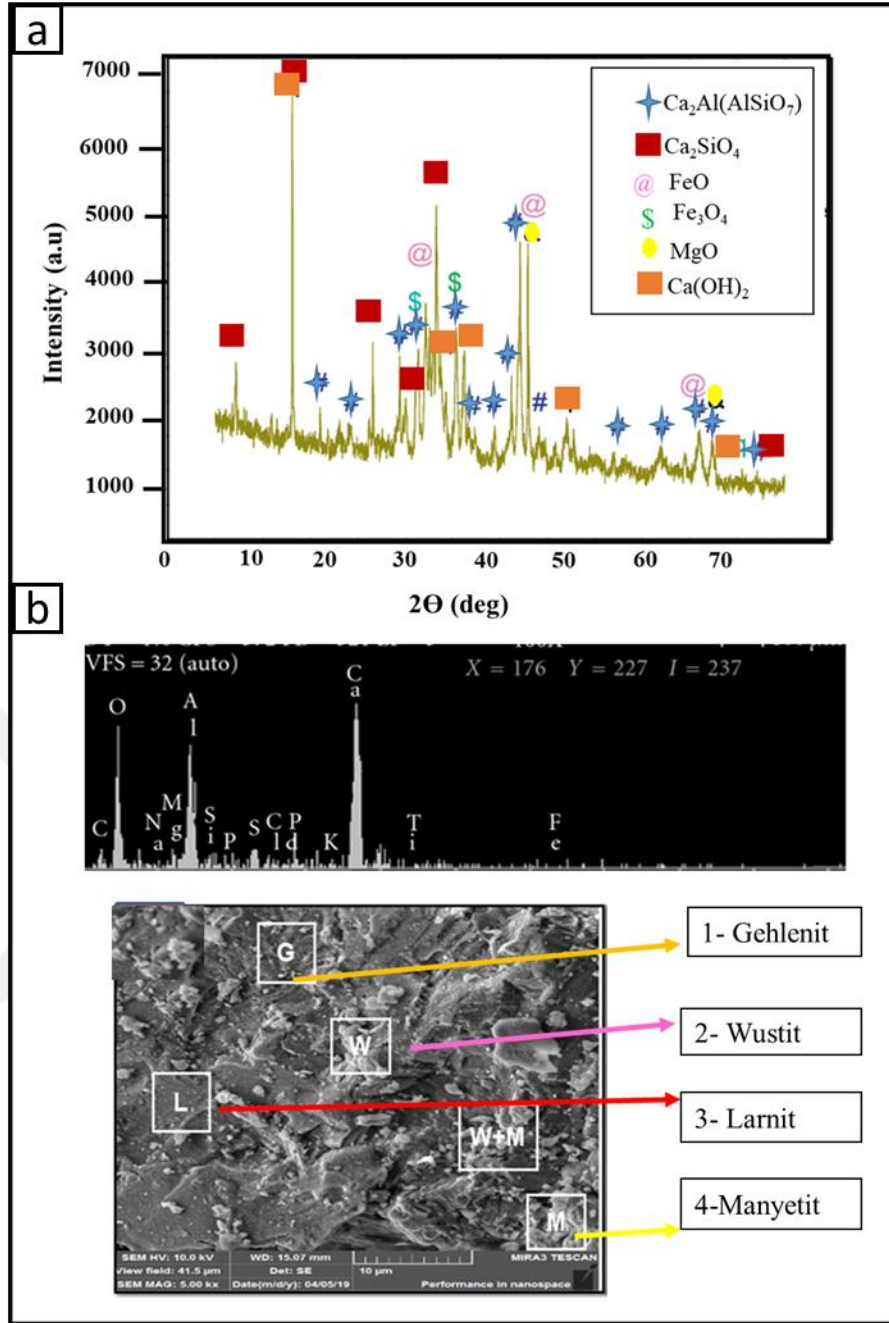
Şekil 19. BOF cürufuna ait a) XRD analizi (Tossavainen *et al.* 2007) ve b) TEM-EDX analizleri (Pettinato *et al.* 2015)

EAO cürufuna ait parçacıklar ve SEM görüntüleri Şekil 20’de verilmiştir. Cürufa ait görüntüler incelendiği zaman köşeli yapıdan yuvarlak yapıya değişen şekil ve geometriye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Belirgin pürüzlü yapı genel olarak yüksek keskin kenarlara sahip düzensiz şekillerde gözlemlenmiştir. EAO cürufuna ait XRD ve TEM-EDX analizi incelendiği zaman (Şekil 21) gehlenit, larnit, wustit ve manyetit gibi demir mineralleri tespit edilmiştir. EAO cürufunun pürüzlü yüzey dokusunun nedeninin larnit, gehlenit, wustit ve manyetit gibi

farklı mineral fazlarının dağılımından kaynaklı olduğunu ortaya koyulmuştur (Yıldırım and Prezzi 2011; Singh *et al.* 2021).



Şekil 20. EAO cürufuna ait a) çakıl boyutundaki parçacıklar, b) ve c) tane şeklini ve dokusunu gösteren SEM görüntüleri (Yıldırım and Prezzi 2011).



Şekil 21. EAO cürufuna ait a) XRD analizi ve b) TEM-EDX analizleri (Singh *et al.* 2021)

Demir-çelik endüstrisinin katı atık malzeme grubundan olan cüruf, artan çevre bilincinin bir sonucu olarak, kaynak koruma ve enerji tasarrufu etkileri nedeniyle çevre üzerindeki etkileri azaltılabilen, geri dönüştürülebilir bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Çelik cürufu zamanında ve etkin bir şekilde kullanılmadığında bertarafı toplum ve endüstri için ciddi bir sorun haline gelmektedir (Dippenaar 2005). Çelik cürufu sorununu çözmek için iki farklı yaklaşım mevcuttur. İlk yaklaşım, çelik cüruf miktarının azaltılması yönündedir. Pik demirin karbonsuzlaştırılmasından önce silikonu (Si), P ve S'yi çıkarmak için bir ön ısıt işlemi kullanılabilir. Japonya'da yapılan çalışmalar sonucu çelik üretimi ile elde edilen cüruf 138 kgt-çelik⁻¹ den 121 kgt-çelik⁻¹e düşürülmüştür (Kitagawa 2000). Ayrıca, dekarburizasyon ve

defosforizasyon dubleks işlemi kullanılarak cüruf miktarı azaltılabilmektedir. Dubleks işlem kullanılarak BOF prosesinde 130 kgt-çelik⁻¹ olan çelik cürufu miktarı 60 kgt-çelik⁻¹'e düşürülmüştür (Ogawa *et al.* 2001; Gao *et al.* 2015).

Çelik cürufu miktarını azaltmak için ikinci bir yaklaşım, çelik cüruf kullanımını teşvik etmektir. Özellikle sahip olduğu kimyasal bileşimi gereği çimento ve beton (Pasetto *et al.* 2017), gübre (Geiseler 1996), demiryolu balast malzemesi, atık su arıtımı (Ponsot and Bernardo 2013), deniz ve karayolu dolgu malzemesi (Mahieux *et al.* 2009) ve asfalt katkı maddesi (Li *et al.* 2020) gibi oldukça geniş bir kullanım alanında faydalı malzeme olabileceği araştırmalar sonucu ortaya konulmuştur (Goodarzi and Salimi 2015; Guo *et al.* 2018).

Çelik Cüruflarının Karayolu Yapımında Kullanımı

Çelik cürufları, dayanım, mukavemet ve yığın yoğunluklarının yüksek olması aynı zamanda stabil malzeme olması sebebiyle hidrolik proseslerde ve yol yapımında kullanılabilmektedir. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısının yüksek olmasından dolayı asfalt esaslı yüzeyde doğal agrega yerine kullanımı tercih edilebilmektedir. Bağlanma/ tutunma özelliğinin iyi olması sebebiyle taneler birbirine daha kuvvetli bağlanarak asfalt yüzeyinde meydana gelen teker izi oluşumunu ve yüksek sıcaklık altında deformasyonu azaltır. Çelik cüruflarının sürtünme katsayısının yüksek olması kaymayı azaltacağından araçların yol tutuş performansını artırarak daha güvenli bir sürüş imkânı sağlamaktadır (Bilen 2010).

Fakat yapı ve yol malzemesinde kullanılacak çelik cüruflarının MgO ve CaO içerikleri çok önemlidir. Çelik cürufların içeriğinde serbest MgO ve CaO olduğundan dolayı yapısal olarak poroz bir yapıya sahiptir. İçeriğindeki CaO, zamanla malzeme içerisinde genleşme ile boşluklar oluşturarak nihai kullanımda önemli bir sorun oluşturabilmektedir. Su ile temas durumunda hacimsel olarak %10 oranında genleşebilmektedir. Bu durumda, yol yapımı için kullanılmadan önce serbest halde bulunan oksitlerin meydana getirebileceği problemler ortadan kaldırılmalıdır (Barišić *et al.* 2010). Cüruf içerisinde bulunan CaO'in, su ile karışmasıyla kalsiyum hidroksit oluşumu gerçekleşmektedir.



Meydana gelen Ca(OH)₂ tekrar atmosferik koşullarda CO₂ ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturur (68).



Meydana gelen kalsiyum karbonat çökerek drenaj sistemlerinin tıkanmasına sebep olur. Bu sebeple cürufun yol yapımında kullanılabilmesi için cüruf içerisindeki kalsiyum karbonatın %1'den daha az olması gerekmektedir (Barišić *et al.* 2010).

Karadağ ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, çelik cürufunun alt temel ve yol temel malzemesi olarak kullanılabilmesi için aksisimetrik analiz ve sonlu elemanlar yöntemiyle dört farklı yol kesiti incelenmiştir. Bu incelemelerde alt temel ve kırmataş temelden oluşan yol üst yapısı (KK) kesiti ile çelik cürufunun alt temel ve yol temel tabakalarında kullanımıyla oluşturulan üç farklı yol (KC, CC, CK) kesitleri analiz edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde meydana gelen düşey deformasyonlar düşey ve yatay eksenindeki şekli alınan dört farklı kesitte de benzer çıkmıştır. Fakat deformasyon miktarlarında farklılıklar olmuştur. Oturmalar, asfalt yüzeyinde lastik orta noktasında ve yatay ekseninde kesite göre değişiklik göstermektedir. Bu incelemeler ile alınan dört farklı kesit tekrarlı yükleme altında karşılaştırıldığında en iyi performans kırmataş temel ve cüruf alt temelden (KC) alınan kesitte görüşmüştür. KC kesitinde kabarma nerede ise hiç oluşmazken oturma 22 mm seviyesinde olmuştur. Bu durumda çelik cürufunun yol yapımında en faydalı kullanımının alt temel tabakasında olduğu anlaşılmaktadır. Kırmataş temel ve alt temelden oluşan yol kesitinde (KK) maksimum 27 mm oturma seviyeleri gözlemlenmiştir. Kırmataş kullanımı ile cüruf kullanımı kıyaslandığında cüruf kullanımında %18 oranında daha az oturma gözlemlenmiştir. KC kesiti ile KK kesitinde oluşan bu orandaki oturma seviyelerinden anlaşılıyor ki çelik cürufu doğal agrega yerine yol üst yapısında da kullanılabilir (Karadağ vd. 2020).

Yol yapımında yapı içerisinde bulunan demir oranı, kireç dağılımı, genleşme miktarı ve gözenek gibi birçok parametre etkilidir. Sıcak karışım asfalt betonu, agrega ve asfalt çimentosunun bir kombinasyonudur. Bitümlü sıcak karışımlı esnek üstyapılar yüksek mukavemet davranışı sergilemekte ve yaklaşık olarak %90-95 oranında agrega içermektedirler. Agreganın özellikleri asfalt kaplamaların performansı üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahiptirler. Yapılan çalışmalarda, çelik cürufun agrega malzemesi olarak kullanılarak fonksiyonel ve uygun maliyetli bir yapı elde edilebileceği değerlendirilmiştir (Wu *et al.* 2007, Kara vd. 2004). Fakat cüruf içerisinde bulunan serbest kireç yüksek genleşmeye sebep olabilmektedir. Bu nedenle yol yapı katkısı olarak kullanılmadan önce uzun bir süre bekletilmesi gerekmektedir (Altan 2001). Çelik cürufunun sıcak asfalt karışımı içerisinde iri agrega olarak kullanımı üzerine yapılan çalışma sonucunda mekanik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir (Ahmedzade and Sengoz 2009).

Morison yaptığı bir çalışmada, ince asfalt kaplama üzerine yapılan cüruf katkılı karışımın (%50 cüruf, %39 dere kumu, %3 uçucu kül ve %8 asfalt çimentosu) nerede ise 10

yıldan fazla ağır kamyon trafiğine maruz kalan bölgede kullanılabileceğini ifade etmiştir (Morison 1974).

Toplam agrega miktarına göre %0-60 oranında doğal kum ve %100-40 oranında çelik cürufu kullanarak 6 farklı karışım hazırlanarak yapılan bir çalışmada, en düşük bitüm oranı %73 çelik cürufu ve %27 doğal kum karışımından elde edilmiştir. Bu karışım oranında en yüksek rijitlik, ekstraksiyon ve Marshall stabilitesi elde edilmiştir (Noureldin and McDaniel 1990).

Yapılan araştırmalar, dünyada çelik cürufunun yol yapım malzemesi olarak kullanımının uygun olduğunu göstermektedir. Japonya yıl içerisinde üretmiş olduğu çelik cürufunun ortalama %60'ını yol yapımında kullanmaktadır (Yi *et al.* 2012).

Çelik Cüruflarının Çimento ve Betonda Kullanımı

Çimento ve beton üretimine yönelik artan talep nedeniyle, ekonomi ve çevre etkisi göz önüne alındığında özellikle doğal kaynak kullanımının yerini alabilecek alternatif malzeme arayışı oldukça önem kazanmıştır. Bu nedenle, çelik cüruflarının beton ve çimento endüstrisinde kullanımı pek çok araştırmaya konu olmuştur (Geiseler 1996; Monshi and Asgarani 1999; Jiang *et al.* 2018).

Dünya çapında kaynak kullanımı ve maliyet düşünüldüğünde inşaat sektörü kuşkusuz en büyük paya sahiptir. Verimsiz kullanılan doğal kaynaklar, ekolojik sorunlara sebep olabilmektedir. Bu nedenle, sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi ve ekolojik dengenin korunabilmesi için doğal kaynakların etkin kullanılması oldukça büyük önem arz etmektedir. Yapılan bir çalışmada, enerji ve kaynak tüketimini azaltmak için çimento klinker üretiminde BOF cürufu kullanılmıştır. BOF cürufunun yapı içerisinde varlığı, pişirme işlem sıcaklığının düşmesine ve doğal kaynak korunmasına izin vermiştir (Geiseler 1996).

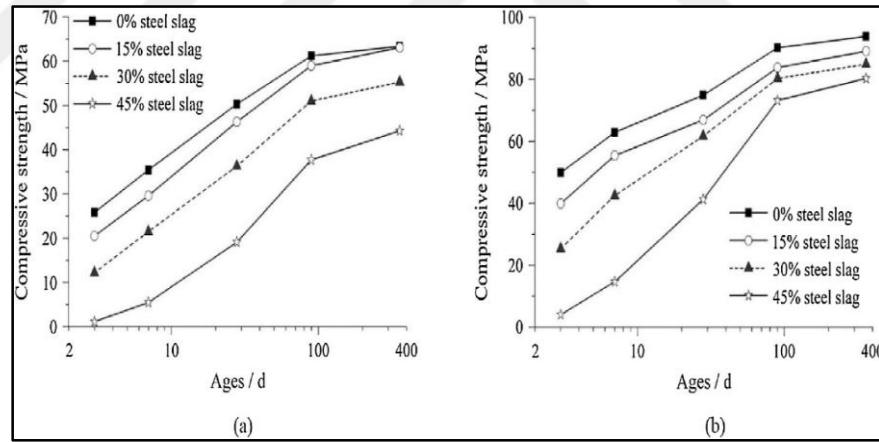
Beton bünyesinde oluşabilecek yüksek sıcaklık betonun hacimsel kararlılığında ve çatlak oluşmasında önemli bir etkiye sahiptir. Çimento malzemesine eklenen cürufun, uygun miktarda kullanıldığı takdirde kütle betonlarında, sıcaklığın kontrolü için önemli bir araç olduğu tespit edilmiştir. Cürufun çimentoya ilavesinin, ilk başlarda çimentonun sebep olduğu erken ısı üretimini azalttığı tespit edilmiştir (Tokyay 2013).

Beton özelliklerini iyileştirme yönünde etki sağlamak amacıyla cüruflar betona çoğunlukla puzolan olarak çimento ve beton üretim esnasında katılmaktadır. Cürufun çimento ile %30-40 gibi yüksek oranda yer değiştirebilmesi mümkündür. Bu yer değiştirme sonucunda özellikle erken dayanımlarda düşüşler görülmektedir. Puzolanik reaksiyon gerçekleşmesiyle birlikte, 28 günlük dayanımda oluşan bu fark kapanmaktadır. Daha fazla sürede ise dayanımlar

katkısız beton ile aynı veya daha yüksek olabilmektedir. Yüksek Fırın cürufu katılan betonlar sülfatta ve suda bekletildiği zaman genleşmenin azaldığı ve standart limitlerin oluştuğu tespit edilmiştir (Yazıcı 2006; Bilgen *et al.* 2010).

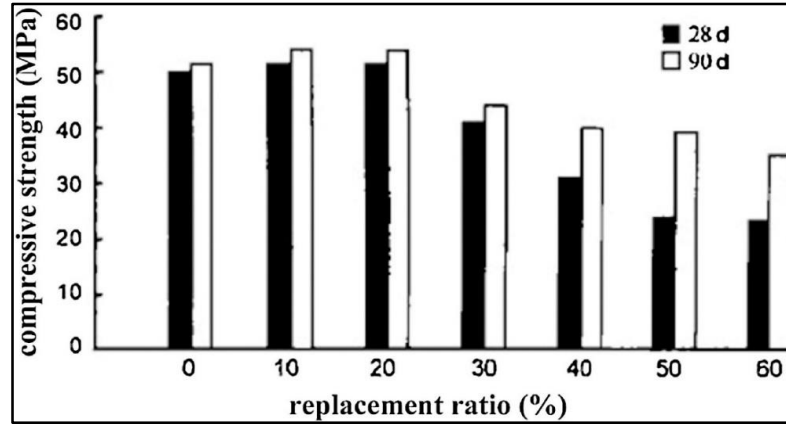
Monshi ve Asgarani tarafından yapılan bir çalışmada, düşük MgO ve alkali içeriğine sahip, manyetik olarak ayrılmış BOF cürufu klinker hammadresi olarak kullanılmıştır. %6 BOF cürufu, %27 demir cürufu, %3 alçıtaşı ve %57 kalker oranları kullanılarak yapılan çimentonun portlant çimentosuna kıyasla daha iyi mukavemet gösterdiği tespit edilmiştir (Monshi and Asgarani 1999).

Tsakiridis ve arkadaşları yaptığı çalışmada, Portland çimentosuna %10,5 oranında çelik cürufunun ilavesi ile çimento kalitesinin olumsuz etkilenmediği sonucunu ortaya koymuştur (Tsakiridis *et al.* 2008). BOF cüruf tozunun katkı maddesi olarak çimento malzeme olarak kullanılması, betonun basınç dayanımını doğrudan etkilemektedir. Şekil 22'de görüldüğü gibi, özellikle 0,5'lik yüksek bir su/bağlayıcı (W/B) oranında BOF cürufunun miktarı arttıkça betonun mukavemetinin azaldığı görülmektedir. Bu nedenle, gerekli basınç dayanımını korumak için harmanlanmış çimentoda süper akışkanlaştırıcı kullanımının esas olduğu bildirilmiştir (Wang *et al.* 2013a, 2013b).



Şekil 22. a) W/B değeri 0,5 olan betonun basınç dayanımı ve b) W/B değeri 0,35 olan betonun basınç dayanımı (Wang *et al.* 2013a)

Cüruf malzemesinin katkı oranının %0'dan %60'a artırılması ile betonun 3 günlük basınç dayanımının %100'den %28'e düştüğü tespit edilmiştir. Ancak, Şekil 23'de verilen 28 günden 90 güne kadar olan basınç dayanımı artışı, %50 çelik cürufli beton için yaklaşık %34 ve normal beton için sadece %6 olmuştur. Bu durum BOF cürufli betonun daha düşük erken yaşlanmaya sahip olabileceğinin bir göstergesidir. Ancak yaşlandıkça dayanımının da artması mümkündür (Sun 2003).



Şekil 23. Çelik cürufunun artan miktarı ile betonun basınç dayanımı (Sun 2003)

Demir-çelik endüstrisinden elde edilen BOF ve YF cüruflarının çimento harçlarında çimento yerine kullanabilirliği üzerine genel bir çalışma yapılmıştır. Çelik cürufunun (BOF) çimento harcına ilavesiyle su ihtiyacı ve priz süresinin ve dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, BOF ve YF cürufu ile yapılan harcın sülfürik aside karşı dayanımının yüksek olduğu tespit edilmiştir (Palod *et al.* 2019).

BOF cürufunun yanı sıra EAO cürufunun da betonda kullanımının uygun olduğuna dair yapılan birçok çalışma mevcuttur (San-José *et al.* 2014; Carvalho *et al.* 2017; Liu *et al.* 2019). EAO cürufunun güçlü tutunma özelliği nedeniyle çimento ile kullanımı sonucu mukavemet artışının yanı sıra, donma-çözülme, ıslanma-kuruma ve asitlere karşı koruma gibi birçok önemli faydalı özelliği gözlemlenmiştir (Maslehuddin *et al.* 2003; Manso *et al.* 2006; Pellegrino and Gaddo 2009; San-José *et al.* 2014; Grubeša *et al.* 2016; Yun *et al.* 2016).

BOF cürufunun reaktivitesini artırmak amacıyla çelik fabrikalarında boşaltma işlemi sırasında EAO cürufu yapı içerisine eklenmektedir. Böylece kristal boyutu ve C_6AF_2 oluşumunda sağlanarak çimento performansında gelişme meydana gelmektedir (Li *et al.* 2011).

Düşük ve yüksek dayanımlı mineral katkılı betonların rötre ve sünme deformasyonlarını incelemek amacıyla yapılan çalışmada, referans ve mineral katkılı betonlardan elde edilen deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada düşük dayanımlı mineral katkılı betonların zamana bağlı olarak deformasyonlarında belirgin bir etkisi olmadığı, normal dayanımlı betonlarda ise rötre ve sünme değerlerinde düşüşe sebep olduğu tespit edilmiştir (Bilgen *et al.* 2010).

Çelik cüruflarının betonda agrega olarak kullanımı üzerinde birçok çalışma sunulmuştur (Maslehuddin *et al.* 2003; Qasrawi 2012; Anastasiou *et al.* 2014). Çelik cüruflarının betonda ince agrega olarak kullanılması durumunda basınç ve çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir (Qasrawi 2012; Guo *et al.* 2018). Aynı zamanda, kireçtaşı ve kum

agregalarının yerine çelik cürufunun kullanılması durumunda CO₂ kürleme işleminde betonun basınç dayanımında artış meydana gelmiştir (Mo *et al.* 2017).

Çelik Cüruflarının Liman İnşaatında ve Deniz Dolgusunda Kullanımı

Çevre bilinci gelişmiş ülkelerde, doğal kaynakların ve yapıların kullanımının minimizasyonuna yönelik uygulamalar bulunmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda EAO cüruflarının en önemli kullanım alanlarından biri sahil şeritleri ıslahında ve denizde kullanımıdır. Örnek olarak Karadeniz oto yolunda bilindiği gibi sahil şeritleri ıslahı ve kıyı şeridi boyunca kurulan yapılaşmaların hidromekanik etkilerden korunmasını sağlamak için yapılacak olan tahkimat alanlarında büyük miktarda kaya veya beton bloklar kullanılması gerekmektedir. 2009 yılında İtalya’da Pellegrino ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada EAO cüruflarının doğal agrega olarak beton üretiminde kullanımında basma, çekme ve elastik mukavemetleriyle beraber dayanım özelliklerinin doğal agrega kullanılarak üretilen betonlara kıyasla kısmen daha iyi mukavemet özelliğine sahip olduğu tespit edilmiştir (Pellegrino and Gaddo 2009).

Japonya’da 2009 yılında JFE Steel firması tarafından liman tadilatı ve inşaatında kullanılması için doğal agrega kullanılarak üretilen beton bloklara kıyasla Ferroform olarak adlandırılan cüruf bazlı beton bloklar geliştirildiği belirtilmiştir. Bu bloklarda agrega olarak EAO cürufu, bağlayıcı olarak YF cürufu kullanılmıştır. Şekil 25’de EAO cürufu kullanılarak üretilen beton bloklarının kullanımı gösterilmektedir (Yılmaz 2018).



Şekil 24. Çelik cürufunun dolgu malzemesi olarak kullanımı (Yılmaz 2018)

Yapılan çalışmalar ve testler sonucunda Ferroform isimli cüruf bazlı betonun konvansiyonel betonlara kıyasla daha iyi mekanik özelliğe sahip olduğu aynı zamanda deniz habitatına da herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Şekil 26’de Japonya’da Ferroform kullanılarak yapılan deniz duvarı gösterilmektedir (TÇÜD 2015).



Şekil 25. Japonya’da ferroform kullanılarak yapılan deniz duvarı (TÇÜD 2015)

EAO cürufurlarının bir başka önemli kullanım alanı ise erozyonu önlemek amacıyla dolgu malzemesi olarak deniz ve su akış yolu kenarlarına kullanımıdır. Şekil 27’de erozyona karşı EAO cürufunun kullanımı örneği verilmiştir. Kıyı kenarlarında aşınmaya bağlı oluşan erozyona karşı, kıyı güçlendirme, deniz duvarı, su kanallarının yapımı ve benzeri uygulamalarda EAO cürufunun kullanımı yaygındır (NSA 2011).



Şekil 26. Kıyı erozyonuna karşı eao cürufunun kullanımı (NSA 2011)

Çelik Cürufurlarının 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 iletmektir. İkinci önemli görevi, yolcu konforu ve vagon-yol arasındaki yıpranma etkisinden dolayı bir miktar elastiklik sağlamaktadır. Üçüncü ve son görevi, güzergâh içerisinde herhangi bir bitki yetişmesini engellemek ve yüzey suyunu ortamdaki uzaklaştırmaktır (Yonar 2017).

Balast malzemesi genel olarak bazalt, granit, porfir veya sert kalker gibi yüksek dayanıma sahip taşların kırıldıktan sonra elekten geçirilmesi sonucu elde edilmektedir. Ayrıca, balast malzemesi olarak kullanılması gereken taşlar 10-65 mm boyutlarında olmalıdır. Cürufun balast malzemesi olarak kullanılabilmesi için, demir filizinin indirgenmesi sırasında oluşan atık madde açık havada kurutulmalıdır. Çelik cüruflarının balast malzemesi olarak kullanılabilirliği Türk Standardları Enstitüsü'nün ve Devlet Demir Yolları şartnamelerine göre belirtilen sınırlar ile uyumludur. TS 7043 standardına göre, laboratuvarında çelik cürufu ilavesi ile yapılan parçalanma direnci, aşınma direnci ve dayanıklılık testleri sonucuna göre, cürufların belirtilen özelliklere sahip balast özelliğini taşıdığı görülmüştür (Yonar 2017).



Şekil 27. a) Kireçtaşı balast b) Çelik cüruf balastı (Yonar 2017)

Genel olarak, trenden kaynaklı titreşimleri azaltması ve yastıklama etkisi gibi sebeplerden dolayı doğal kırmataş agregaları kullanılmaktadır. Fakat çevresel zararların en aza indirilmesi, doğal kaynakların daha etkin kullanılması amacıyla üstün aşınma özelliği gösteren ve drenaj kabiliyeti yüksek olan cüruf malzemesinin kullanılması alternatif bir yöntem olmuşturmaktadır. BOF çelik cüruflarının demiryolu balast malzemesi olarak kullanımı üzerine yapılan bir çalışmada, BOF cürufunun, kullanılan doğal balasttan daha fazla aşınma direnci ve tekrarlanan tren yüklemesi altında sertliği nedeniyle bir demiryolu balastının bakımı açısından faydalı olduğu tespit edilmiştir (Koh *et al.* 2018).

Demiryolu hattında tehlike arz eden keskin virajların kaldırılması sonucu sürekli rayların kullanımı yaygınlaşmış ve bu durum da dingil yükünün artmasına sebep olmuştur. Bu bağlamda, traverslerle balast tabakası etkileşimi, hat yanal stabilitesinin sağlanmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Esmaceli ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, balast malzemesi

olarak çelik cüruflarının kullanımının bir sonucu olarak %27 oranında balast hattının yanal direncinde gelişme gözlemlenmiştir (Esmaili *et al.* 2017).

Çelik cürufu ve taş balastın kombinasyon davranışını değerlendirmek için deneysel araştırma ile desteklenen sayısal modelleme yapılmıştır. Sayısal modelleme yöntemi, demiryolu raylarının davranışlarını değerlendirmek için güvenilir bir araç olabileceği yıl boyunca kanıtlanmıştır (Yıldız 2018). Modelleme doğruluğunu iyileştiren sayısal parametreler (Mohr-Coulomb girdileri), bir dizi kesme mukavemeti ve plaka yükleme testinden elde edilmektedir. Balast parçacıkları için kesme mukavemeti testleri araştırılmış ve balast parçacıklarının Mohr-Coulomb parametrelerinin elde edilmesi için uyumluluğu kanıtlanmıştır (European Commission 2001; Christmas 2006; Erdemir 2007; Öcal 2014; Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı 2014; Ersöz *et al.* 2016).

Demiryolu blast malzemesi olarak çelik cüruflarının kullanımı ile ilgili yapılan sayısal ve deneysel bir çalışmada, taş balastlara çelik cürufu tanelerinin eklenmesi sonucu balast tabakasının elastisite modülünün ve sürtünme açısının arttığı ve bunun sonucunda demiryolu hattının mekanik davranışının iyileştiği sonucuna varılmıştır (Jing *et al.* 2020). Ayrıca yapılan farklı pek çok çalışmada, balast parçacıklarının Mohr-Coulomb parametrelerinin elde edilmesi için uyumluluğu ispatlamıştır (Indraratna *et al.* 2014, Toloukian *et al.* 2018, Bian *et al.* 2019).

Çelik Cüruflarının Gübre Üretiminde Kullanımı

Yeterli miktarda CaO ve MgO içeriğine sahip çelik cürufları, toprağın asitliğini azalttığından dolayı toprak düzenleyicisi olarak kullanılabilir. Cüruf içeriğindeki P ve diğer mineraller sayesinde gübre gibi kullanışlı bir hal almakta ve toprak içerisine dağılabilmektedir. Genellikle BOF cürufu Avrupa ülkelerinde bu amaç için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Çelik cürufunun sahip olduğu element içeriği (P, Mn, Fe, Si, Mo, S vs.) sayesinde toprak verimliliği ve ürün kalitesini artırmasının yanı sıra bitkilerin hastalık ve zararlı etmenlere karşı direncini artırmaya yönelik katkı sağladığı ortaya konulmuştur (Branca and Colla 2012; Branca *et al.* 2014).

Cüruf ile oluşturulan çözeltilerin içeriği incelendiği zaman demir iyonuna ek olarak B, Mg, P, Ca, V, K gibi bitkiler için gerekli mineral maddeleri içerdiği gözlemlenmiştir. Yapılan bir çalışmada, Türkiye’de farklı bölgelerden edinilen toprak örneklerine göre demir eksikliği çinko oranından sonra gelen en büyük eksiklik olarak gözlemlenmiştir. Demir içeriği yüksek olan ızgara altı cürufları kullanılarak bir çözelti hazırlanmış ve mısır bitkisi ekilmiş araziye/toprağa uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, cüruf çözeltisi kullanıldığı zaman yetişmiş mısır bitkisinde Fe miktarında artış gözlemlenmiştir (Demir *et al.* 2014).

Tarımda kullanımı ile hem topraklardaki demir eksikliğinin giderilmesi hem de ekonomik olarak kayıp olarak görülen cüruf maddesinin ekonomiye kazandırılması mümkün olabilmektedir.

Brezilya’da en çok ihraç edilen meyve kavundur (*Cucumis melo*). Fakat kavun meyvesinin kalitesinin ve üretim miktarının üzerinde etkili olan çeşitli bitki hastalıkları vardır. Dünyanın pek çok bölgesinde görülen *Acidovorax citrulli*'nin (Ac) sebep olduğu bakteriyel meyve lekesi, oldukça önemli maddi kayıplara sebebiyet vermektedir. Bu durum için yapılan birçok çalışmada, Si konakçı-patojen etkileşiminde hastalık gelişimini baskılama yeteneğinin olduğu savunulmaktadır. Bu çalışmalardan yola çıkarak silikat açısından en bol kaynaklardan biri olan, toprağın asitliğini düzenleyebilen ve toprak-bitki sistemine ciddi ağır metal kontaminasyonu riski olmadan besin sağlayabilen cürufun gübre olarak kullanılabileceği fikir birliğine varılmıştır (Chaves *et al.* 2008; Sobral *et al.* 2011, Ferreira *et al.* 2015).

Bakteriyel meyve lekesinin bitkiler üzerindeki yıkıcı etkilerini gidermek amacıyla cüruf ile gübreleme üzerine arazi çalışmaları yapılmıştır. Cürufun bakteri lekesi üzerine gelişimi, bitki büyümesi, kalitesi ve toprak kimyasal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, cüruf gübrelemesi ile %10 hastalık ilerlemesinin ve %12 hastalık insidansının hasatta önemli ölçüde azaldığı ve bunlara ek olarak yaklaşık olarak %8 kavun et kalınlığında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir (Preston *et al.* 2021).

Çin’de 2018 yılında yapılan istatistiksel analizlere göre 90,38 milyon inek yetiştirilirken oldukça yüksek miktarda inek gübresi meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Bu derece yüksek miktarda hayvan gübresi, yüzey ve yeraltı sularında kirlenmeye sebep olan besinler, patojenler, hormonlar, veteriner antimikrobiyalleri ve ağır metaller gibi çok sayıda kirletici içermektedir. Bu nedenle, ülkede oluşan inek gübresinin işlenmesi ve çevreye zararının en aza indirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır (Yun 2016; Yun *et al.* 2018b). Bu amaç doğrultusunda anaerobik çürütme tekniği ile bu tarz atıkların çevreye verdiği zararlarının azaltılması ve faydalı kaynağa dönüştürülmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Holm-Nielsen *et al.* 2009, Han *et al.* 2019). Çelik cürufunun besin salınımını yavaşlatması, su ötrofikasyonu önlemesi ve bitki büyümesini sağlaması gibi özelliklerinin yanı sıra anaerobik çürütme sisteminde hızlandırıcı olarak da görev aldığı tespit edilmiştir. Böylece çelik cürufları kullanılarak anaerobik çürütme performansının etkili bir şekilde hızlandırılması ve çevreye zararlı etkisinin minimum dereceye indirilmesi mümkün olmuştur (Han *et al.* 2019).

Çelik Cürufunun Grit Üretiminde Kullanımı

Malzemelerin yüzeylerinin temizlenmesi işleminde basınçlı hava ve aşındırma özellikli grit karışımı kullanılmaktadır. Bu işleme esas olarak kum raspası adı verilir. Malzeme üzerindeki mevcut eski boyanın temizlenmesi veya boya yapılmadan önce metalik malzemelerin yüzeylerinde oluşan oksit gibi tabakaların temizlenmesi amacıyla tercih edilmektedir. Kum raspalama işleminde kullanılan tozlar metal esaslı ve metal dışı aşındırıcı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Yüzey temizleme işlemi yapılırken kullanılması gereken aşındırıcının seçimi oldukça önemlidir. Yeni bir yüzeyi temizlemek için kaba taneli aşındırıcı seçilmesi durumunda yüzeyde kaba izler meydana gelmekte ve ince bir astar atıldığında bu kaba profil tam anlamıyla kapanmamaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak korozyon gibi istenmeyen bir durum meydana gelmektedir. Tam tersi durumda ise, ince bir aşındırıcı seçilirse malzeme yüzeyine kaplama yapılması durumunda adezyon sorunu meydana gelebilmektedir (Candan 2001).

Cüruf esaslı grit malzemesinin kullanımı ekonomik ve hızlı bir yöntem olduğundan dolayı; tamir bakım tersaneleri, gemi inşa alanları ve su altı tankı temizlenmesi gibi alanlarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Cüruf esaslı grit malzemeler demir, bakır, nikel gibi metal cürufları ve kömür cürufları olarak sınıflandırılmaktadır. Cüruf esaslı gritler sert ve keskin köşeli olmakta ve yüzeyi hızlı bir şekilde kesmektedir (Ünal 2017).

Yüzey temizleme işlemi için kullanılması gereken cüruf esaslı gritlerin özellikleri ISO 11126 ile belirlenmiştir. ISO 11126'ya göre yoğunluk, sertlik, rutubet içeriği, tane boyutu ve suda çözünebilir klorlar için değerler esas alınarak belirlenmektedir. 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. Cüruf esaslı gritler için ISO 11126'da belirlenen sertlik, Moh's değerine göre belirlenmektedir. Çizgi testi metodu ile belirlenen bu değer 7 Moh's olması durumunda normal grit, 3-4 Moh's değerini alması durumunda yumuşak grit olarak adlandırılmaktadır (Candan 2001).

Cüruf esaslı gritler için tane şekli ve boyutu oldukça büyük önem arz etmektedir. Tane şeklinin küresel olması durumunda daha düzgün bir profil oluştururken, keskin köşeli şekiller daha yüksek bir temizleme sağlamaktadır. Tane boyutları 0.2 mm ile 2.8 mm sınırları arasında üst ve alt elek toleransına göre sınıflandırılmaktadır. Cüruf esaslı gritler için yoğunluk değeri yüzeyin temizlenme miktarı için oldukça önemlidir. Temizleme hızı belirlenirken kütle hesaba

katıldığından dolayı yoğunluğu fazla olan tanelerde daha iyi ve hızlı bir temizlenmiş yüzey elde edilir ve yaklaşık olarak 30 ile 33 kg/m arasında bir değer alır (Candan 2001).

Çelik Cüruflarının Biyooksidasyon Prosesi için PH Dengeleyici Olarak Kullanımı

Biyomadencilik; demir ya da sülfür içeriğine sahip cevherlerden mikroorganizma kullanılması ile gerçekleştirilen işleme verilen addır. Mikrobiyolojik olarak demir ve sülfür oksitlenir ve nikel, bakır ve sülfür gibi çözünmez olan mineraller bu kimyasallar sayesinde suda çözünür hale gelirler. Mikroorganizmalar yardımıyla meydana gelen metal çözünme işlemi, kimyasal ve mikrobiyolojik işlemin kombinasyonu şeklindedir. Bu metaller suda çözündüğünden ötürü biyoliç; altın mineral içerisinde kaldığından dolayı biyooksidasyon adını almaktadır (Sand *et al.* 1995; Rawlings 1997).

Sülfürlü refrakter cevherlerinde yapılan altın üretimi (Şekil 28), öğütme ile sertleşen altın cevherinin maden yataklarının gittikçe azalması nedeniyle giderek artış görülmektedir. Sülfür içeriğine sahip altın cevherlerinde, submikron altın tanelerinin tane sertleşmesi meydana gelebilmesi ve refrakter özelliğinin giderilmesi amacıyla kükürt içeriğinin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle oksitleyici kavurma, basınç altında yükseltgenme, kimyasal yükseltgenme ve biyooksidasyon gibi ön işleme tabii tutulması gerekmektedir. Bu metotlardan özellikle biyooksidasyon yöntemi kirlilik meydana getirmemesi, ilk yatırım maliyetinin düşük olması gibi etkin özelliklerinden ötürü dünya çapında oldukça fazla kullanılan bir prosestir. Fakat bu yöntem sonucu asit meydana gelir ve pH 1-2 arasında tutulması gerekir. Bu sebeple sönmüş kireç, dolomit gibi dengeleyicilerin yanında sisteme alternatif olarak çelik cürufu da eklenmelidir. Ayrıca, altın kazanımı yüksek pHlarda gerçekleşir ortam baziktir ya da bazik yapmak için kireç kullanılır. Böylece yeteri miktarda çelik cürufunun biyooksidasyon prosesinde kullanılması durumunda pH istenilen aralıkta kalabilir (Rawlings 2004; Çelik 2005). Çelik cürufları yüksek miktarda CaO içerdiğinden dolayı toprak asitliğini ve pH'ı düzeltmek için kullanılabilir (Chand *et al.* 2015).

Çelik Cüruflarının Diğer Kullanım Alanları

55

kullanılabilmektedir. Evsel atık suları, içeriğinde bulunan fosfat mineralinin giderilmesi amacıyla cüruf ile dolu bir tank içerisinde geçirilebilmektedir. Böylece fosfattan arındırılmış su elde edebilmek mümkündür. Bu duruma ek olarak, endüstriyel atıklardaki krom +3 ve +6 giderilmesi amacıyla aynı şekilde işlem gerçekleştirilebilmektedir. Su içerisinde bulunan katı maddelerin temizlenmesi amacıyla bazik oksijen fırın cürufu filtre niteliğinde kullanılabilmektedir (Andreas 2005). Sera gazı denilince akla ilk gelen CO₂ gazıdır ve özellikle iklim değişikliği üzerinde oldukça önemlidir. Çelik cürufları kullanılarak CO₂ gazının tutulması ve depolanması sağlanabilmektedir (Yi *et al.* 2012).

Cüruf malzemesinin; sediman kumlama işleminde, maden drenaj alanlarının iyileştirilmesi ve karbon tutma gibi daha birçok alanda kullanımı mümkündür. Böylece hem enerji tasarrufu sayesinde Türkiye ekonomisine hem de üretimin çevreye etkisi nedeniyle ekolojik denge açısından oldukça büyük öneme sahiptir (TÇÜD 2015).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çelik üretimi; demir cevherinden ham demir ve sonrasında çelik üretiminin olduğu entegre demir-çelik tesislerinde ve sadece hurda metal kullanılarak çelik üretilen elektrikli ark ocaklarında ve indüksiyon ocaklarında gerçekleştirilir. Çelik cüruflarının uygun bir şekilde bertaraf edilememesi, taşınması veya stoklanmasının zor olması, cüruf içeriğinden kaynaklanan alkali sızıntıların yüzey ve yeraltı sularına ulaşması sonucu zararlı bir tehdit oluşturmaktadır. Hem doğal kaynakların korunması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi amacıyla çelik üretimi sırasında oluşan cürufların başka alanlarda kullanılması yoluyla fayda yaratması amacıyla tez kapsamında geniş bir araştırma yapılmıştır. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Çelik cürufları; beton, çimento, yol kaplamalarında, deniz dolgu malzemesinde, demir yolu balast malzemesi ve toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirme gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır.
- 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 olacağından asfalt yüzeyinde meydana gelen teker izi oluşumunu ve yüksek sıcaklık altında deformasyonu azalttığı görülmüştür.
- BOF cürufunun 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 beton bünyesinde oluşabilecek yüksek sıcaklık hacimsel kararlılık ve çatlak oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir. Beton içeriğine eklenen cüruf, uygun miktarda kullanıldığı takdirde kütle betonlarında, sıcaklığın kontrolü için önemli bir araç olduğu tespit edilmiştir.
- EAO cüruflarının önemli kullanım alanlarından biri; erozyonu önlemek amacıyla dolgu malzemesi olarak deniz ve su akış yolu kenarlarına kullanımı olduğu gözlemlenmiştir.

- BOF cüruflarının demiryolu balast malzemesi olarak kullanılması durumunda doğal balast malzemesinden üstün aşınma direnci ve sertlik gösterdiği deneysel çalışmalar ile ispatlanmıştır.
- Silikat açısından en bol kaynaklardan biri olan, toprağın asitliğini düzenleyebilen ve toprak + bitki sistemine ciddi ağır metal kontaminasyonu riski olmadan besin sağlayabilen çelik cürufunun gübre malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Malzemelerde yüzey temizleme işleminde aşındırma özelliğine sahip grit karışımı kullanılmaktadır. Cüruf esaslı grit malzemesi hem ekonomik hem de diğer yöntemlere kıyasla daha hızlı bir metod olduğundan dolayı; tamir bakım tersaneleri, gemi inşa alanları ve su altı tankı temizlenmesi gibi alanlarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Cürufların farklı alanlarda kullanılması; hem doğal kaynakların tüketimini azaltmakta hem de çevre kirliliğinin önlenmesine katkı sunmaktadır. Bu amaç doğrultusunda ilerleyen çalışmalarda çelik cüruflarının fiziksel ve kimyasal kompozisyonu daha detaylı bir şekilde araştırılarak günlük hayatta farklı alanlarda kullanım imkânı araştırılmalıdır. Çelik cüruflarının başka alanlarda kullanılması, sürdürülebilir kalkınma doğrultusunda sıfır atık yaklaşımı ile bir atığın başka bir alanda faydalı bir şekilde kullanılmasını sağlayarak Türkiye ekonomisine de katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adegoloye, G., Beaucour, A. L., Ortola, S., & Noumowe, A. (2016). Mineralogical composition of EAF slag and stabilised AOD slag aggregates and dimensional stability of slag aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 115, 171-178.
- 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*, Vol.34, No 1, Paper ID: JTE 12683.
- Alan, E. (2013). Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı ile Cüruflarda Fosfor Kapasitelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Ali, N. A., Chan, J. S., Papagiannakis, T., Theriault, E. G., & Bergan, A. T. (1992). The use of steel slag in asphaltic concrete. In *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance*. ASTM International.
- Altan, E. (2001). Çelikhane curufu içerisindeki hurdaların değerlendirilmesi. *I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi*.
- Altun, I. A., Yılmaz, I. (2002). Study on steel furnace slags with MgO additive in Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No.8, pp. 1247-1249.
- America Iron and Steel Institute, America Iron and Steel Institute Profil., (2019). <https://www.steel.org/-/media/doc/steel/reports/2019-aisi-profile-book.ashx?la=en&hash=EADDC2FE9A6C7D21952C1E8288B925662A846D88> (01.06.2019).
- Anastasiou, E., Filikas, K. G., & Stefanidou, M. (2014). Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. *Construction and Building Materials*, 50, 154-161.
- Andreas, L., Herrmann I., Lıdström-Larsson M., Lagerkvıst A. (2005). Physical Properties of Steel Slag to be Reused in a Landfill Cover, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3-7 October 2005
- Arabi, N., & Jauberthie, R. (2012). Calcium silicate materials: Substitution of hydrated lime by ground granulated blast furnace slag in autoclaving conditions. *Journal of materials in civil engineering*, 24(9), 1230-1236.
- 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.
- Askerov, E. (2019). Economic Impact Of The Global Steel Industry. <https://www.worldsteel.org/media-centre/blog/2019/economic-impact-of-the-globalsteel-industry.html> (30.05.2019).
- 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.
- Bahar, H. (2007). Malzeme Bilimi, Çelik Sunumu. Manisa: Celal Bayar Üniversitesi.

- Barišić, I., Dimter, S., Netinger, I. (2010). Possibilities Of Application Of Slag In Road Construction. *Technical Gazette*, 17(4), 523-528.
- Behiye, Ö., (2019). Türkiye Demir-Çelik Sektöründe Ulaştırma Modeli İle Maliyet Optimizasyonu ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Karabük.
- Belhadj, E., Diliberto, C., & Lecomte, A. (2014). Properties of hydraulic paste of basic oxygen furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 45, 15-21.
- Beshr, H., Almusallam, A. A., & Maslehuddin, M. (2003). Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and building materials*, 17(2), 97-103.
- Bian, X., Li, W., Qian, Y., & Tutumluer, E. (2019). Micromechanical particle interactions in railway ballast through DEM simulations of direct shear tests. *International Journal of Geomechanics*, 19(5), 04019031.
- Bilen, M., (2010). Çelikhane Curuflarından Liç-Karbonatlaştırma Prosesi İle Kalsiyum Karbonat Kazanılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Bilgen, G., (2004). Yüksek Fırın Cürufu ile Zemin Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, ST., Çapar, ÖF. (2010). Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi, 2. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildirileri, Cilt 1: 506-513, Mersin.
- Binici, H., Mustafa, E., & DİNÇER, A. (2013). Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 11-21.
- Branca, T. A., & Colla, V. (2012). Possible uses of steelmaking slag in agriculture: an overview. *Material recycling–Trends and perspectives*.
- Branca, T.A., Pistocchi, C., Colla, V., Ragaglini, 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. *Metall. Res. Technol.* Vol. 111: 155-167.
- Butalia, T, Wolfe W, Dick W, Limes D, Stowell R (2000). Coal Combustion Products. Coal Combustion Products Extension Program, Ohio State University Sheet.
- Callister, William (1997). *Materials Science and Engineering*, John & Wiley Sons Inc., New York, USA.
- Candan, E. (2001). Metalurjik Cürufların Yüzey Temizleme İşlemlerinde Grit Olarak Kullanımı. *TMMOB Metalurji Mühendisliği Odası*, 126, 22-25..
- Carvalho, S. Z., Vernilli, F., Almeida, B., Demarco, M., & Silva, S. N. (2017). The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 216-220.
- Chamling, P. K., Haldar, S., & Patra, S. (2018). Physico-chemical Characterization of Steel Slag as Railway Ballast Material.
- Chand, S., Paul, B., and Kumar, M. (2015). An overview of use of Linz-Donawitz (LD) steel slag in agriculture. *Current World Environment*. Vol. 10(3):975-984.

- 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.
- Chaves, L. H. G., & de Azevedo Farias, C. H. (2008). Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo e na disponibilidade de cálcio, magnésio e fósforo. *Revista Caatinga*, 21(5), 75-82.
- 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.
- 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.
- Christmas, Ian (2006); "World Steel - A Common Future," Address of IISI Secretary General to the 4th China International Steel Congress Beijing, 17 April 2006.
- Coudurier, L., Hopkins, D.W., Wilkomirsky, I. (1985). Chapter 6 - Slags, *Fundamentals Of Metallurgical Processes*, Second Edition, Pergamon, 212-245.
- Çamdalı, Ünal; Murat, T. U. N. Ç. (2004) Elektrik Ark Fırınında Fiziksel Ekserji Potansiyelinin ve Veriminin Elde Edilmesi.
- Çelik, H. (2005). "Biyooksidasyon Prosesi". Cilt: 44, Sayı: 3, 35-46
- Çetin, Z., (2016). Sürekli Döküm Prosesinde Pota Nozulu Tıkanma Probleminin Analizi ve Azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2009). Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (20.05.2020)
- Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S.R. ve Misra, V. N., (2007). "An Overview of Utilization of Slag and Sludge from Steel Industries", *Resources, Conservation and Recycling* 50: 40-57.
- Demir, O., (2016). Elektrik Ark Fırını Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Aşınma Ve Binder Tabakalarında Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Demir, A., Yıldırım, D., Köleli, N. (2014). "Çelikhane Cürufundan ve Tufalından Bitki Besin Elementlerinin Geri Kazanımı ve Bu Elementlerin Bitki Büyümesine Etkisi". ISITES2014
- Deniz, E. (2009). Otomotiv Sektörü Raporu. Avrupa İşletmeler Ağı Karadeniz. Enterprise Network Commission Enterprision Industry.
- Develioğlu, İ., & Pulat, H. F. (2018). Yüksek fırın cürufunun geoteknik özellikleri ve taşıma kapasitesi performansının incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 433-438.
- Devlet Planlama Teşkilatı. (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu. ISBN: 975-19-2864 Ankara.-8,
- Dippenaar, R. (2005). Industrial uses of slag (the use and re-use of iron and steelmaking slags). *Ironmaking & steelmaking*, 32(1), 35-46.
- Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı. (2014). Demir Çelik Sektör Raporu. http://www.dogaka.gov.tr/Icerik/Dosya/www.dogaka.gov.tr_523_TN1D55SP_Demircelik-Sektor-Raporu-2014.pdf (12.10.2018)

- Erdemir, (2007c); <http://www.erdemir.com.tr/tr/urunler.asp> (05.04.2021).
- Erdemir, (2005). AR-GE Raporu, Çelik Üretim Cürufklarının Asfalt Üretiminde Kullanılması. Ereğli Demir Çelik Fabrikası, Zonguldak. (13.05.2019)
- Erişir, E. (2013). Çeliklerde Malzeme Bilimi ve Son Gelişmeler. (Ders Notları) Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Kocaeli Üniversitesi
- Ersöz, F. , Ersöz, T. , Erkmen, İ. (2016). Dünyada ve Türkiye’de Ham Çelik Üretimine Bakış. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Cilt 32, Sayı 2.
- 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.
- European Commission. (2001). Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel. Sevilla, Spain: Expo-WTC.
- Exponent. (2007). Human Health and Ecological Risk Assessment for the Environmental Applications of Steel-Making Slag: An Update. Prepared for Steel Slag Coalition Kelley Drye Collier Shannon 1050 K Street, NW Suite 400 Washington, DC 20007-5108. Prepared by Exponent 320 Goddard, Suite 200 Irvine, California 92618 August 2007.
- 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.
- FHWA, (2016). User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, FHWA-RD-97-148.
- Fronek, B. A. (2011). Feasability of Expanding the Use of Steel Slag as a Concrete Pavement Aggregate, MSci Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Cleveland State University, USA.
- Gao, J., Sha, A., Wang, Z., Tong, Z., & Liu, Z. (2017). Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. *Journal of Cleaner Production*, 152, 429-442.
- Gao, X., Okubo, M., Maruoka, N., Shibata, H., Ito, T., & Kitamura, S. Y. (2015). Production and utilisation of iron and steelmaking slag in Japan and the application of steelmaking slag for the recovery of paddy fields damaged by Tsunami. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 124(2), 116-124.
- Geiseler, J. (1996). Use of steelworks slag in Europe. *Waste management*, 16(1-3), 59-63.
- Goodarzi, A. R., & Salimi, M. (2015). Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. *Applied Clay Science*, 108, 61-69.
- Grubeša, I. N., Barisic, I., Fucic, A., & Bansode, S. S. (2016). Characteristics and uses of steel slag in building construction. Woodhead Publishing.
- Guo, J., Bao, Y., & Wang, M. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste management*, 78, 318-330.
- Guo, Y., Xie, J., Zheng, W., & Li, J. (2018). Effects of steel slag as fine aggregate on static and impact behaviours of concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 194-201.
- Gupta, T., & Sachdeva, S. N. (2020). Experimental study and modeling of concrete containing AOD steel slag for pavements. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 8111-8127.

- Günay, E., & Kara, M. (2005). Erdemir Çelikhane Cürüflarının Ekonomik ve Ekolojik Değerlendirilmesi
- Gündoğan, B., (2014). Slab Kalite Çeliklerin Üretim Sürecinde Deoksidasyon Malzemelerinin Kullanım Uygulamaları ve Maliyete Etkisi ,Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Gürü M., Yalçın H. Palme, (2012). Malzeme Bilgisi. Basım Tarihi: 2012; Yayınevi: Palme Yayınevi.
- 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.
- Hasaıcebioğlu, Ö. (2014). Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Yapay Agregası Olarak Karayolu İnşaatı Dolgu ve Granüler Tabakalarında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource technology*, 100(22), 5478-5484.
- Indraratna, B., Ngo, N. T., Rujikiatkamjorn, C., & Vinod, J. S. (2014). Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: discrete element simulation. *International Journal of Geomechanics*, 14(1), 34-44.
- International Iron And Steel Institute., (2021). <http://www.worldsteel.org> (24.03.2021)
- International Trade Administration., (2018). Global Steel Report. U.S. Department of Commerce, International Trade Administration. <https://www.trade.gov/https://www.trade.gov/steel/pdfs/07192016globalmonitor-report.pdf> (12.12.2018).
- Jiang, Y., Ling, T. C., Shi, C., & Pan, S. Y. (2018). Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 187-197.
- 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.
- Kabay, N., Miyan, N., & Özkan, H. (2021). Basic oxygen furnace and ground granulated blast furnace slag based alkali-activated pastes: Characterization and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 129483.
- Kara, M., Günay, E., Kavaklı, B., Tayfur, S., Eren, K., & Karadağ, G. (2004). The use of steel slag in asphaltic mixture. In *Key Engineering Materials* (Vol. 264, pp. 2493-2496).
- Karadağ, H., Fırat S. ve Işık N.S. (2020). “Çelikhane cürufunun yol temel ve alttımel malzemesi olarak kullanılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(3): 799- 812.
- Kaya, A.O., (2014). Esnek Üstyapıların Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kitagawa, N. (2000). Full recycle of converter slag to sinter by enhancing hot-metal dephosphorizing process capacity. In *ISIJ International, quoted by Emi, T., Towards future development, 6th. Int. Conf. On Molten Slags, Fluxes and Salts, Stockholm* (Vol. 1997, pp. 41-47).
- Kneller, A.W., Gupta, J., Borkowski, L.M., and Dollimore, D. (1994). Determination of original free lime content of weathered iron and steel slag by thermogravimetric

- analysis, Transportation Research Record 1434, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 17-22.
- 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., Kumar, D. (2016). Chapter 2 - Latest Developments In The Iron And Steel Industry, Management Of Coking Coal Resources, 9-60.
- Li, J., Yu, Q., Wei, J., & Zhang, T. (2011). Structural characteristics and hydration kinetics of modified steel slag. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 324-329.
- Li, S., Xiong, R., Zhai, J., Zhang, K., Jiang, W., Yang, F., ... & Zhao, H. (2020). Research progress on skid resistance of basic oxygen furnace (BOF) slag asphalt mixtures. *Materials*, 13(9), 2169.
- Li, Z., Zhao, S., Zhao, X., & He, T. (2013). Cementitious property modification of basic oxygen furnace steel slag. *Construction and Building Materials*, 48, 575-579.
- Lian, F., Ma, L., & Chou, K. (2017). Industrial research on the high-temperature modification of Basic Oxygen Furnace slag with solid waste compound. *Journal of Cleaner Production*, 143, 549-556.
- Liu, W., Li, H., Zhu, H., & Xu, P. (2019). Properties of a steel slag-permeable asphalt mixture and the reaction of the steel slag-asphalt interface. *Materials*, 12(21), 3603.
- Luxán, M. P. D., Sotolongo, R., Dorrego, F., & Herrero, E. (2000). Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. *Cement and concrete Research*, 30(4), 517-519.
- Mahieux, P. Y., Aubert, J. E., & Escadeillas, G. (2009). Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. *Construction and Building Materials*, 23(2), 742-747.
- Manso, J.M., Polanco, J.A., Losanez, M., and Gonzales, J.J. (2006). "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No.6, pp.528-534.
- Manso, J. M., Gonzalez, J. J., & Polanco, J. A. (2004). Electric arc furnace slag in concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 16(6), 639-645.
- Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M., Ibrahim, M., & Barry, M. S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and building materials*, 17(2), 105-112.
- MEGEP, -Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi. (2006). Metalurji Alanı, 'Endüksiyon Ocağı' Ankara.
- Mo, L., Zhang, F., Deng, M., Jin, F., Al-Tabbaa, A., & Wang, A. (2017). Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 83, 138-145.
- Moon, H. Y., Yoo, J. H., & Kim, S. S. (2002). A fundamental study on the steel slag aggregate for concrete. *Geosystem Engineering*, 5(2), 38-45.
- 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.

- Motz H., Geiseler J. (2001). Products of Steel Slags an Opportunity to Save Natural Resources. *Waste Management*, 21, 285-293.
- Nicolae, M., Vilciu, I., & Zaman, F. (2007). X-ray diffraction analysis of steel slag and blast furnace slag viewing their use for road construction. *UPB Sci. Bull.*, 69(2), 99-108.
- Noureldin, A. S., & McDaniel, R. S. (1990). Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt. *Transportation Research Record*, (1269).
- NSA, (2011). Steelmaking Slag: A Safe and Valuable Product, Washington: The Steel Slag Coalition-National Slag Association.
- O'brien, A., Guzman, E. C. (2011). Part 1, Welding Handbook. Materials And Applications, Vol. 4.
- Ogawa, Y., Yano, M., Kitamura, S., & Hirata, H. (2001). Development of the continuous dephosphorization and decarburization process using BOF. *Tetsu-to-Hagané*, 87(1), 21-28.
- Öcal, Y. (2014). Demir Çelik Sektöründe Atık Yönetimi. Uzmanlık Tezi, İktisadi Sektörler Ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Türkiye.
- Öngü K. T., (2017). İSDEMİR Çelikhane (BOF) Curufunun Zeminlerin Donma Çözünme Davranışına Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.
- Özdabak, A. (2004). Demir Çelik ve Enerji. Rengin Basımevi, İstanbul.
- Özüğurlu, B. (2015). Karayolu Esnek Üstyapı Binder Tabakasında Elektrik Ark Ocağı Curufunun Yapay Agregada Olarak Kullanımının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Palankar, N., Shankar, A. R., & Mithun, B. M. (2016). Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. *Journal of cleaner production*, 129, 437-448.
- 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.
- Pang, B., Zhou, Z., Hou, P., Du, P., Zhang, L., & Xu, H. (2016). Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 107, 191-202.
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2010a). Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of hazardous materials*, 181(1-3), 938-948.
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2010b). Recycling Of Steel Slags In Road Foundations. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 9(6).
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2017). Sustainable solutions for road pavements: A multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *Journal of Cleaner Production*, 166, 835-843.
- Pellegrino, C., & Gaddo, V. (2009). Cement & Composite Concretes. 663-671.
- Pettinato, M., Mukherjee, D., Andreoli, S., Minardi, E. R., Calabro, V., Curcio, S., & Chakraborty, S. (2015). Industrial waste-an economical approach for adsorption of heavy metals from ground water. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(1), 48.

- Poh, H. Y., Ghataora, G. S., & Ghazireh, N. (2006). Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. *Journal of materials in Civil Engineering*, 18(2), 229-240.
- Ponsot, I., & Bernardo, E. (2013). Self glazed glass ceramic foams from metallurgical slag and recycled glass. *Journal of Cleaner Production*, 59, 245-250.
- Preston, H. A. F., de Sousa Nunes, G. H., Preston, W., de Souza, E. B., Mariano, R. D. L. 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.
- Proctor, D. M., Fehling, K. A., Shay, E. C., Wittenborn, J. L., Green, J. J., et al. (2000). Physical and chemical characteristics of blast furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental Science and Technology*, 34(8), 1576–1582.
- Qasrawi, H. (2012). Use of Relatively High Fe₂O₃ Steel Slag as Coarse Aggregate in Concrete. *ACI Materials Journal*, 109(4).
- 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.
- Rawlings, D.E., (1997). “Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes”, Springer-Verlag, Berlin.
- Rawlings, D.E., (2004). “Microbially Assited Dissolution of Minerals and its Use in the Mining Industry”, *Pure Appl. Chem.*, V:76, 4:847-859.
- Reddy, A. S., Pradhan, R. K., & Chandra, S. (2006). Utilization of Basic Oxygen Furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder. *International journal of mineral processing*, 79(2), 98-105.
- 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 p. 2004
- Rohde, L., Nunez, W.P., and Ceratti, J.A.P. (2003). “Electric arc furnace steel slagbase material for low-volume roads.” *Transportation Research Record* 1819, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 201-207.
- Roslan, N. H., Ismail, M., Abdul-Majid, Z., Ghoreishiamiri, S., & Muhammad, B. (2016). Performance of steel slag and steel sludge in concrete. *Construction and building materials*, 104, 16-24.
- Sand, W., Gehrke, T., Hallmann, R. and Schippers, A., (1995). “Appl. Microbial. Biotechnol”, 43:961-966.
- San-José, J. T., Vegas, I., Arribas, I., & Marcos, I. (2014). The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. *Materials & Design*, 60, 612-619.
- Saran, A. G., (2007). Ögütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Saridikmen, H. (2011). Sulphide And Phosphide Capacities Of Ferroalloy Smelting Slags. PhD Thesis, University Of The Witwatersrand Faculty Of Engineering, Johannesburg, South Africa
- Seren, I.S. (2015). Elektrik Ark Fırını Cürufunun Yapay Agregası Olarak Esnek Üst Yapılarda Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel Tabakasında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Sezer, A., (2007). “BOF Çelik Üretim Prensipleri”, İsdemir Yayınları, İskenderun 10-25.

- 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.
- Shen, H., Forssberg, E., and Nordstrom, U. (2004). "Physicochemical and mineralogical properties of stainless-steel slags oriented to metal recovery." *Resources Conservation and Recycling*, Vol.40, No.3, pp.245-271.
- Siedlecka, E. (2020). Comprehensive use of products generated during acid leaching of basic oxygen furnace sludge. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121543.
- Singh, R. (2016). Chapter 6 - Classification Of Steels, *Applied Welding Engineering*, Second Edition, Boston, 57-64.
- Singh, S. K., Vashistha, P., Chandra, R., & Rai, A. K. (2021). Study on leaching of electric arc furnace (EAF) slag for its sustainable applications as construction material. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 1315-1326.
- Smil, V. (2016) Chapter 3 - Iron And Steel Before Ww I, 1850–1914: The Age Of Affordable Steel, *Still The Iron Age*, Boston, 35-64.
- Sobral, M. F., do Nascimento, C. W., da Cunha, K. P., Ferreira, H. A., Silva, A. J., & Silva, F. B. (2011). Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15, 867-872.
- 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.
- Stahleisen, V. (2008) *Steel Manuel*, 1.Baskı, Verlag Stahleisen GmbH, Duesseldorf, Almanya.
- Sun, J. (2003). Study of effects of ground steel slag on mechanical performance and soundness of concrete. *Coal Ash China*, 15(5), 7-9.
- Şentürk, İ., Keskin, İ., Totiç, E., & Ateş, A., 2004. KARDEMİR Yüksek Fırın Cürüflarının Şişebilen Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanılabilirliği.
- T.C. Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Ve Verimlilik Genel Müdürlüğü, (2019). *Demir Çelik Sektör Raporu*. (02.10.2020)
- TÇÜD, (2015). *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Demir Çelik Cüruf Raporu* (02.11.2020)
- TÇÜD, (2018). *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Demir Cüruf Raporu*. (02.01.2019).
- TÇÜD, (2019). *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Çelik Haritası*. <https://celik.org.tr/harita/> (02.01.2019).
- TÇÜD, (2020). *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Basın Bülteni* <https://celik.org.tr/turkiye-celik-ureticileri-dernegi-basin-bulteni-47/> (18.11.2021)
- TÇÜD, (2021a). *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Basın Bülteni* <https://celik.org.tr/turkiye-celik-ureticileri-dernegi-basin-bulteni-47/> (18.11.2021)
- TÇÜD, (2021b). *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Çelik Haritası*. <https://celik.org.tr/harita/> (20.12.2021)
- TOBB, (2016). *Türkiye Demir ve Demir dışı Metaller Meclisi Sektör Raporu*. Ankara. (21.05.2019).
- Tokuyay M (2013). *Betonda Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Silis Dumanının rolü*. Beton 2013 Kongresi Çağrılı Bildiriler, Cilt 2: 201-238, İstanbul.

- TolouKian, A. R., Sadeghi, J., & Zakeri, J. A. (2018). Large-scale direct shear tests on sand-contaminated ballast. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 171(5), 451-461.
- Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Larsson, M. L., & Bjorkman, B. (2007). Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Waste management*, 27(10), 1335-1344.
- Tsakiridis., P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S., and Koroneos, C. (2008). "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 152, No.2, pp. 805-811.
- Türkiye Çimento Mühtasilleri Birliği, (2001). Cüruflar ve Cürufllu Çimentolar, Ankara.
- Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, (2016). Türkiye Demir ve Demirdışı Metaller Meclisi Raporu. İstanbul.
- Ünal, A. (2017). Atık'tan Ürün'e Demir-Çelik Cürufu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- Wang, G. W. (1992). Properties and utilization of steel slag in engineering applications.
- Wang, G. C. (2016). Chapter 5 - Slag Processing, The Utilization Of Slag İn Civil Infrastructure Construction, Woodhead Publishing, 87-113.
- 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, W., Sardans, J., Wang, C., Zeng, C., Tong, C., Bartrons, M. and Peñuelas, J. (2018b). Steel slag amendment increases nutrient availability and rice yield in a subtropical paddy field in China. *Experimental Agriculture*. Vol.54 (6), pp. 842-856.
- World Steel., (2019). World Steel Association. https://www.worldsteel.org/steel_by_topic/statistics/steel-statistical-yearbook/WorldSteel-in-Figures.html (01.06.2019).
- 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.
- Xue, Y., Wu, S., Hou, H., & Zha, J. (2006). Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture. *Journal of hazardous materials*, 138(2), 261-268.
- Yazıcı, H (2006). Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8 (1), 51-58.
- Yearbook, S. S. (2014). World steel association. *Worldsteel Committee on Economic Studies—Brussels. Belgium*.
- Yıldırım, I. Z., Prezzi, M. (2011). Chemical, Mineralogical nad Morphological Properties of Steel Slag, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2011, Article ID: 463638.
- Yıldırım, İ. Z., Prezzi, M. (2009). Use of Steel Slag in Subgrade Applications, Joint Transportation Research Program, FHWA/IN/JTRP-2009/32, Final Report.
- Yıldız E.O. (2018). Demir Çelik Endüstrisindeki Elektrik Ark Ocaklarının Kimyasal Bileşimine Dayalı Kütle Ve Enerji Analizi (Yüksek Lisans Tezi). İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Yıldız, K. (2013). Ham Demirden Çelik Üretimi. Demir Çelik Metalürjisi (Ders Notları). Sakarya Üniversitesi.
- Yılmaz, M. 2018. Çelikhane Cürufunun Yol Üst Yapısının İyileştirilmesinde Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 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.
- Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011.
- Yonar, F., (2017). Elektrik Ark Ocağı Çelikhane Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Tabakalarında Kullanımının ve Karışım Performansının Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ.
- Yun, S. (2016). Use of transition metal compounds in solar and biomass energy. *Nano Energy Syst*, 30, 52-59.
- Yun, S., Fang, W., Du, T., Hu, X., Huang, X., Li, X., ... & Lund, P. D. (2018). Use of bio-based carbon materials for improving biogas yield and digestate stability. *Energy*, 164, 898-909.
- Yüksel, İ. (2017). A review of steel slag usage in construction industry for sustainable development. *Environment, Development and Sustainability*, 19(2), 369-384.
- Zawrah, M. F., Gado, R. A., Feltin, N., Ducourtieux, S., & Devuille, L. (2016). Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 237-251.
- Ziari, H., & Khabiri, M. M. (2007). Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag asphalt. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 15(3), 188-192.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Burak KAVASOĞLU
Doğum Tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Tel:	
E-mail:	
Çalıştığı Kurum/Kuruluş:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	