



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ATIK'TAN ÜRÜN'E DEMİR-ÇELİK CÜRUFU

ASLAN ÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği(Türkçe)
Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ

II. DANIŞMAN

Prof. Dr. Onuralp Yücel
İSTANBUL, 2017



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ATIK'TAN ÜRÜN'E DEMİR-ÇELİK CÜRUFU

ASLAN ÜNAL
(533313035)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği(Türkçe)
Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ

II. DANIŞMAN

Prof. Dr. Onuralp Yücel
İSTANBUL, 2017

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Aslan ÜNAL'ın “Atık’tan Ürün’e Demir-Çelik Cürufu” başlıklı tez çalışması, 17.05.2017 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Mustafa ÖKSÜZ (Danışman)

Yalova Üniversitesi (İMZA).....

Prof.Dr. Serdar SALMAN (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Prof.Dr. Mustafa KURT (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun **29.05.2017** tarih ve **2017/12-02** sayılı kararı ile Aslan Ünal’ın Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (Türkçe) Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Prof.Dr Uğur YAHŞİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖNSÖZ

“Atık’tan Ürün’e Demir-Çelik Cürufu” adlı bu çalışma Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde “Yüksek Lisans Tezi” olarak hazırlanmıştır.

İleri ülkelerde “Sıfır Atık – Zero Waste” anlayışı artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Çalışmamda, deneyimlerimden yararlanarak, bu kavramın ülkemizin üniversite-kamu-sektör üçgeninde de artık taraftar bulmasının, daha ileri düzeylere taşınması görüşü ile bunun kuramsal yönü ve uygulamaları incelenmiştir.

Çalışmalarım sırasında yakın desteklerini esirgemeyen, engin bilgi birikimlerinden her aşamada yararlandığım saygıdeğer tez danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ ve Sayın Prof. Dr. Onuralp YÜCEL hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Test çalışmaları sırasında laboratuvar imkanlarının kullanımı konusunda desteklerini esirgemeyen İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü çalışanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca, uzun yıllar boyu birlikte çalışma imkanımız olan ÇOLAKOĞLU METALURJİ A.Ş.’deki eski çalışma arkadaşlarıma da bu araştırmalarımın her aşamasında bana destek oldukları için teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak, her zaman yanımda olan sevgili Aileme şükranlarımı sunarım.

MAYIS 2017

Aslan ÜNAL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
SEMBOLLER LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ.....	3
2.1 Demir ve Özellikleri	3
2.2 Çelik Üretim Tarihçesi.....	6
2.3 Çeliklerin Sınıflandırılması.....	7
2.3.1 Karbon içeriğine göre sınıflandırma	8
2.3.2 Kullanım alanlarına göre sınıflandırma.....	9
2.3.3 Dökme demirler.....	10
2.4 Modern Çelik Üretim Metotları	13
2.4.1 Entegre Tesislerde Üretim.....	13
2.4.2 Elektrik ark fırınlarında (EAF) üretim	18
2.4.3 Pota fırınlarında (PF) çelik saflaştırma ve alaşımlandırma prosesi	19
2.5 Dünya ve Türkiye'deki Ekonomik Veriler	19
2.5.1 Dünyada Demir Çelik Sektörü	19
2.5.2 Türkiye'de Demir Çelik Sektörü.....	21

2.6 Çelik Üretimi ve Çevresel Etkiler.....	22
3. CÜRUFLAR VE ÖZELLİKLERİ.....	23
3.1 Cüruf Oluşum Teorileri.....	23
3.1.1 Moleküler teori.....	23
3.1.2 İyonik teori	24
3.1.3 Ortak (Coexistence) teori	26
3.2 Cüruf Türleri	26
3.2.1 Demir çelik üretim cürufları.....	26
3.2.2 Demir dışı metallerin üretim cürufları	32
4. EAF CÜRUFLARI ÖZELLİKLERİ VE DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ.....	35
4.1 EAF Cürufları Özellikleri	35
4.2 Değerlendirme Yöntemleri	38
4.2.1 Temel işlemler.....	39
4.2.2 Yol yapımında kullanımı.....	41
4.2.3 Çimento üretiminde kullanımı	42
5. ENDÜSTRİYEL ÇALIŞMALAR.....	42
5.1 Cüruf Tesisi Kurulumu	42
5.2 Grit Yapımı	44
5.3 PF Cürufunun Ark Ocaklarında Kireç Yerine Kullanılması	45
5.4 EAF Cürufunun Çimento Üretiminde Kullanımı	47
5.5 Cüruftaki Demir Oksit Değişimlerinin İncelenmesi	49
5.6 Serbest Kireç Japonya Uygulamaları.....	50
5.7 Magnetik Ayırma ile Ayırılan Çeliklerin Vasıflarının Değerlendirilmesi.....	52
5.8 Ekonomik Analiz ve Değerlendirme	54
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	54

6.1 EAF Cürufuna Uygulanan Kimyasal Deneyler	55
6.1.1 Kimyasal Analiz	55
6.2 EAF Cürufuna Uygulanan Fiziksel Deneyler	56
6.2.1 Elek Analizi	56
6.2.2 Los Angeles Deneyleri	57
6.2.3 Özgöl Ağırlık ve Su Emme Deneyleri	58
6.2.4 Filler Tane Yoğunluğu	59
6.2.5 Yassılık Deneyleri	59
6.3 EAF Cürufuna Uygulanan Fiziksel Deneyler	60
6.4 Doğal Agregaya Uygulanan Deneyler	63
6.5 Dizayn Çalışması	64
6.5.1 Bitümlü Temel Dizaynı	64
6.6 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	67
7. GENEL SONUÇLAR ve ÇÖZÜM ÖNERİLERİ	69
8. KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

ATIK'TAN ÜRÜN'E DEMİR-ÇELİK CÜRUFU

Dünyada her yıl üretilmekte olan yaklaşık 2 milyar ton Demir-Çelik başta olmak üzere çeşitli metal (Bakır, Alüminyum, Krom, Nikel, Molibden vb.) üretimlerinden Cüruf başta olmak üzere milyonlarca ton çeşitli atıklar çıkmaktadır. Demir-Çelik üretimi sırasında ortaya çıkan diğer önemli katı atıklar ise çeşitli çamurlar, baca tozu ve tufaldır.

Metal ana sanayileri geniş bir perspektifle incelendiğinde 1800'lü yıllardan, Sanayi Devrimi'nden, 1900'lü yıllara dek mühendislik disiplinlerinin üretim operasyonlarını ürün ve süreç odaklı sürdürdüğü görülür. Gerek çevresel, gerek ekonomik nedenler 1900'lü yılların başından itibaren kuruluşları atık minimizasyonlarına yönelik çalışmalar yapmaya zorladı.

Son yıllarda giderek yaygınlaşan Sıfır ATIK – Zero Waste uygulamaları, önceleri atıkların Yan Ürün olarak düşünülmesi görüşünden başlayarak, giderek Ürün olarak değerlendirilmeleri felsefesine dönüşmektedir. Gelişmiş ülkelerde şimdilerde bir zorunluluk olan bu uygulamalarla % 100'e yakın başarı elde edilebilmektedir. Bir endüstrinin atık çıktısının bir başka endüstride hammadde girdisi olmasına dayalı çalışmalar artık ülkemizde de paydaşlar bulabilmektedir.

Hiç şüphe yok ki demir çelik sektörü ülkelerin gelişmişlik düzeyini etkileyen en önemli parametrelerdendir. Özellikle üretim ve ihracat değerleri ülkelerin ilerlemesinde anahtar rol oynamaktadır. 2016 yılı verilerine göre, tüm dünyada çelik üretimi 1.6 milyar tondur. Bununla birlikte, Türkiye'de dünya sıralamasında hatırı sayılır bir noktada olup yıllık üretimi 33 milyon tondur.

Azalan kaynaklar göz önüne alındığında, üretim maliyetlerinin düşürülmesiyle birlikte kar marjını arttırmak tüm ülkeler için en önemli konu haline almıştır. Bu nedenle atık yönetimi, hem üretim maliyetlerini düşürmek hem de alternatif malzemeler oluşturmak adına adından sıkça söz ettirmektedir. Buna ek olarak çevresel bilincin artmasıyla birlikte atık yönetiminde yeni konseptler oluşmakta ola çıkarak, "sıfır atık" anlayışı gündeme gelmiştir. Özellikle Avrupa ülkelerinde, çok kısa bir süre içinde sektörlerin sıfır atık anlayışını benimseyerek üretimlerini bu yönde geliştireceği öngörülmektedir.

Tüm bu atıkların, atık hiyerarşisi göz önüne alınarak değerlendirmeleri ve ekonomiye kazandırılmaları gerekliliği doğmuştur. Bu konu ayrıca sürdürülebilirlik açısından da oldukça önemlidir. Üretilen bu cüruflara, kullanım alanı araştırarak atıl durumda kalmasının önlenmesi sıfır atık anlayışında incelenmesi gereken ilk ve en önemli konu haline gelmiştir.

Bu çalışmada elektrik ark fırınlarında oluşan cürufların kullanılması ve değerlendirilmesi araştırılmıştır.

MAYIS 2017

Aslan ÜNAL

Anahtar Kelimeler: Demir-çelik, sıfır atık, cüruf, agrega

ABSTRACT

FROM WASTE TO PRODUCT IRON-STEEL'S SLAG

Approximately 2 billions ton of metal production, major is Iron and steel (Copper, Aluminum, Chromium, Nickel, Molybdenum etc.), generates millions tons of different wastes like slag. The other solid wastes are various sludges, filter dust and mill scale.

When metal industries are examined with wide perspective, it can be seen that engineering disciplines had focused on product and process-oriented manufacturing operations from the 1800s from the Industrial Revolution to the 1900s. Both environmental and economic reasons have forced factories to work on waste minimization since the early 1900s.

The Zero ATIK - Zero Waste concept, which have become increasingly widespread in recent years, are increasingly turning into the philosophy of being evaluated as Product, starting from the view that wastes are considered as by-products. Nearly 100% success can be achieved with these applications which are now a necessity in developed countries. It is now possible for our country to find exporters based on the fact that the output of a waste of an industry can be raw material input to another.

There is no doubt that the iron and steel sector plays an important role in the determination of the development level for countries. Especially the production and export values of this sector has the key role of progress for countries. According to year of 2016 data, the annual production of iron and steel in the world is 1.6 billion tonnes. On the other hand, Turkey is a remarkable spot in the iron and steel industry in the world with an output of 33 million tons.

Raising profit margins by lowering production costs has become the most important issue all over the world, given the progress of the industry and the decline in available resources. For this reason, waste management will be one of the leading factors for both reducing manufacturing costs and bringing other new profit items. In addition, the developing environmental consciousness has brought new concepts and trends in waste management. In this context, "zero waste" is taken seriously in many countries and

many commercial or non-commercial institutions. Especially in Europe, it is predicted that these countries and institutions will switch to zero-waste production technologies after a certain period of time.

Attempts to restore these wastes to the economy must be made in accordance with the waste hierarchy. This is also important in terms of sustainable development. Reducing slag production, investigation to utilization in different application should be analysed considering to scope of zero waste.

This study is focused on utilisation and valorisation of EAF slags.

MAY 2017

Aslan ÜNAL

Key Words: Iron and steel, zero waste, slag, aggregate

SEMBOLLER LİSTESİ

g	: Gram
cm³	: Santimetreküp
µm	: Mikron
m	: Metre
K	: Kelvin
°C	: Santigrat derece
kJ	: Kilo.joule
Ωm	: Ohm.metre
W	: Watt
MPa	: Mega.pascal
kPa	: Kilo.pascal
J	: Joule
mm	: Milimetre
°	: Derece
dak	: Dakika
kg	: Kilogram
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy
LOG	:Logaritma
sn	: Saniye
dev	: Devir
F	: Yük
F_{max}	: Uygulanan en yüksek kuvvet
m³	: Metreküp
m²	: Metrekare

KISALTMALAR LİSTESİ

EAF	: Elektrik Ark Fırını
M.Ö.	: Milattan önce
BOF	: Bazik Oksijen Fırını
YF	: Yüksek Fırın
PF	: Pota Fırını
MURC	: Multi Refining Converte – Çoklu Arıtma Konvörteri
ORT	: Ortalama
SHD	: Sıvı Ham Demir
LA	: Los Angeles
DKY	: Doygun Kuru Yüzey
SEM	: Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	:Energy Dispersive X-Ray Analysis – Enerji Dağınımlı X- Işınları Analizi
KK	: Kızdırma Kaybı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 (a) hematit, (b) limonit, (c) manyetit, (d) götit.....	6
Şekil 2.2 Demir-Karbon Denge Diyagramı.....	8
Şekil 2.3 a) gri dökme demir b) beyaz dökme demir mikro yapı fotoğrafları.....	11
Şekil 2.4 a) küresel dökme demir b) temper dökme demir mikro yapı fotoğrafları.....	12
Şekil 2.5 Yüksek Fırın	14
Şekil 2.6 Bazik oksijen fırını	17
Şekil 2.7 Elektrik Ark Fırını	18
Şekil 2.8 Dünya çelik üretimi ve tüketiminin ilk 10 ülkeye göre dağılımı	20
Şekil 2.9 2015 yılı ihracat kalemleri dağılımı	20
Şekil 2.10 Çelik üretimi sırasında atıl çeliklerin değerlendirilme prosesi.....	21
Şekil 3.1 Silikat yapısı.....	25
Şekil 3.2 Yüksek fırın cüruflarının soğutulma yöntemleri	29
Şekil 3.3 CaO - AlO faz diyagramı	35
Şekil 4.1 : EAF ile ham çelik üretiminin yıllara göre dağılımı	36
Şekil 4.2 : MURC Prosesi Akım Şeması	40
Şekil 5.1 Tesislerde kullanılan makinalar.....	55
Şekil 5.2 Akım Şeması	44
Şekil 5.3 İşlenmiş ve işlenmemiş pota fırını cüruflarına ait görüntüler	46
Şekil 5.4 Buhar yaşlandırma uygulaması	51

Şekil 5.5 Endüstriyel ve pilot ölçekli uygulama örnekleri	52
Şekil 5.6 Magnetik seperasyonla ayrılmış çelikler	53
Şekil 6.1 Katı haldeki EAF cürufu	55
Şekil 6.2 Kümülatif parçacık boyutu dağılımı elek analizi eğrisi	57
Şekil 6.3 SEM görüntüleri ve EDS analizi sonuçları	61-62-63

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1	Demir elementinin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri	4
Tablo 2.2	Önemli demir cevherleri ve özellikleri	5
Tablo 2.3	Dökme demir türlerinin kompozisyonları	10
Tablo 2.4	Yüksek fırınlarda en sık kullanılan demir cevherleri ve % tenörleri	14
Tablo 2.5	Pik demir kimyasal kompozisyonu	16
Tablo 2.6	BOF sonrası ham sıvı çelik kompozisyonu	18
Tablo 2.7	EAF sonrası ham sıvı çelik kompozisyonu	19
Tablo 2.8	PF sonrası sıvı çelik kompozisyonu.....	19
Tablo 2.9	Dünya çelik üretiminin ilk 20 ülkeye göre dağılımı	22
Tablo 3.1	Flux yapıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri	27
Tablo 3.2	Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu	28
Tablo 3.3	Yüksek fırın cürufunun bazı seçilmiş fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 3.4	BOF cürufunun kimyasal kompozisyonu.....	31
Tablo 3.5	EAF cürufunun kimyasal kompozisyonu.....	32
Tablo 3.6	LF cürufunun kimyasal kompozisyonu.....	32
Tablo 3.7	Bakır cürufları kimyasal analizi	33
Tablo 3.8	Nikel cürufları kimyasal analizi	34
Tablo 4.1	Cürufun atık yönetmeliğindeki değerlerle karşılaştırılması	36
Tablo 4.2	EAF cüruflarının içerdikleri mineral grupları	37
Tablo 4.3	Çelik cüruflarının Avrupa’da kullanım alanları	37
Tablo 4.4	Cürufların özelliklerine göre kullanım alanları	39
Tablo 5.1	Cüruf kimyasal kompozisyonu.....	46
Tablo 5.2	Tesis değerleri	47
Tablo 5.3	Çimento üretiminde Fe ₂ O ₃ kaynakları kimyasal analizleri karşılaştırması	48

Tablo 5.4 Klinker kimyasal analizleri karşılaştırması	49
Tablo 5.5 Değişik kaynaklarda verilen cüruf kompozisyonları	59
Tablo 5.6 Bir güne ait EAF cüruf kimyasal kompozisyonları.....	50
Tablo 5.7 Bir aya ait ortalama EAF cüruf kimyasal kompozisyonları.....	50
Tablo 5.8 Parça büyüklüne göre metalik demir içerikleri	54
Tablo 6.1 Cürufun kimyasal analiz sonuçları	55
Tablo 6.2 Cürufun boyut küçültme sonrası elek analizi	56
Tablo 6.3 Deney koşulları	59
Tablo 6.4 Deney sonuçları.....	59
Tablo 6.5 Doğal agreganın fiziksel ve kimyasal özellikleri	64
Tablo 6.6 Cürufun elek analiz sonuçları.....	64
Tablo 6.7 Bitüm yüzdeleri	65
Tablo 6.8 Bitüm denemelerine ait özgül ağırlık sonuçları	66
Tablo 6.9 Bitüm Denemeleri Analiz Sonuçları	66
Tablo 6.10 Deney sonuçları.....	68

1. GİRİŞ

Cumhuriyetin kuruluşuyla birlikte modern olarak demir çelik üretimi ülkemizde de yaygın bir şekilde uygulamaya geçmiştir. 1930'lu yılların başlarında Kırıkkale'de kurulan ilk demir çelik tesisini takiben Karabük Demir-Çelik fabrikası da ilk entegre tesis olarak faaliyete geçmiştir. 1960'lı yıllarda ise özel tesislerin de faaliyete geçmesiyle demir çelik endüstrisi yükselen bir ivmeyle dünya sıralamasında yerini almıştır. Bugün Türkiye'de yıllık üretim kapasiteleri 100 bin ton ile 5 milyon ton arasında değişen, tamamı özel sektöre ait, 25 adet ark ocaklı tesis ile, 3 entegre tesis ve 5 adet de indüksiyon ocağı mevcuttur [1].

Özellikle yüksek dayanımı, geniş bir kullanım alanına sahip olması gibi üstün özellikleri sebebiyle demir çelik endüstrisi, çağdaş toplumların gelişmişlik seviyesinin ölçülmesinde önemli bir parametre haline gelmiştir. Ayrıca uygulanabilir atık yönetimi sayesinde oldukça çevre dostu bir malzeme olması, sanayileşmenin önündeki en önemli itici gücü oluşturmasında anahtar bir rol oynamıştır [2].

Sektörün büyüklüğü de göz önüne alındığında atık yönetimi ve “sıfır atık” anlayışı son yıllarda oldukça popüler bir konu haline gelmiştir. Hem cevherden çelik üretimi sırasında hem de ikincil üretim esnasında, 1 ton hammaddeden yaklaşık olarak %10-40 oranında cüruf olduğu gözlemlenmiştir. Bu cürufların hem içerdiği çelik miktarının fazla olması hem de, yüksek miktarlarda ortaya çıkması gibi etkenler göz önüne alındığında endüstrinin devamı ve güçlenebilmesi için değerlendirebilirliği bir gereklilik halini almıştır. Bu sebeple yalnızca Türkiye'de değil dünyanın pek çok ülkesinde, demir çelik cüruflarının değerlendirilmesi ve yeniden kullanımı söz konusudur [2].

Özellikle “sıfır atık” konusunun gündeme gelmesiyle birlikte çevre dostu teknolojiler geliştirilmeye çalışılmış ve atıkların geri dönüşüm ve yeniden kullanım alanları değerlendirilmeye başlanmıştır. Demir çelik endüstrisinin temel çıktılarından birini oluşturan cürufların da hem fiziksel hem kimyasal özellikleri göz önüne alınarak efektif kullanım alanları araştırılmıştır. Demir çelik endüstrisi, atık miktarının minimuma indirilme çalışmaları sayesinde hem üretim maliyetlerini düşürmüş olup hem de geliştirilen proses teknolojileri ile çevre dostu bir endüstri haline gelebilmektedir [3].

Bu çalışmada Ekinciler Demir ve Çelik Sanayi A. Ş (İskenderun) Firmasında EAF ile üretilen ve bir diğer adıyla çelikhane cürufu olarak adlandırılan EAF cürufunun geri kazanılabilirliği araştırılmıştır. Cürufun önce kimyasal analizlerini takiben fiziksel analizleri yapılmış olup, daha sonra agrega olarak kullanımına yönelik olarak çeşitli karakterizasyon işlemleri yapılmıştır.

Çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin önemli bir ekonomik kaynağı olan demir çelik endüstrisinin ekonomik verimini arttırmak ve atıl durumdaki cürufların yeniden işlenerek hem maliyet kalemlerini düşürmek hem de çevreci bir yaklaşımla ülke değerlerine sahip çıkmayı içermektedir.

Bugüne kadar dünyada çelikhane cüruflarının değerlendirilmesine yönelik çeşitli bilimsel araştırmalar yapılmış ve bu malzemenin kullanımının birçok alanda konvansiyonel malzemelere göre daha ekonomik, teknik açıdan uyumlu ve çevre açısından kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir.

Birçok ülkede çelik cüruflarının %75-80'i tekrar kullanılmaktadır. Dünyadan örneklerle işlenmiş cürufun kullanım alanları aşağıdaki gibidir.

Karayolları (Asfalt betonu agregası ve dolgu malzemesi olarak), örneğin Japonya

Çimento sanayisi, örneğin Çin,

Kara ve demir yolları (temel/temel altı malzemesi olarak), örneğin Avustralya,

Karayolları (Buzlanmada kaymayı önleyici kum olarak) ve örneğin Türkiye

Tarım (Gübre olarak ve arazi ıslahında), örneğin Avrupa ülkeleri,

Fayans üretimi, örneğin Hindistan,

Endüstriyel sinter prosesleri, örneğin Güney Kore.

2. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ

Düşük fiyatı ve yüksek mukavemet özellikleri olan demir, otomotiv, gemicilik ve binaların yapısal bileşeni olarak kullanımda vazgeçilmez bir bileşendir. Bu özellikleri göz önüne alındığında endüstride kendisine oldukça geniş bir yer ayırmıştır [3].

Modern endüstrinin temel hammaddesini oluşturmakta olan demir, özellikle karbon ile yaptığı alaşım sonucu oluşturduğu çelik yapısı ile inşaat, otomotiv, havacılık gibi pek çok sektörün temel girdisini oluşturmaktadır [3]. Bu bölümde genel olarak demir cevheri ve çelik üretim yöntemleri anlatılacaktır.

2.1 Demir ve Özellikleri

Demir, periyodik cetvelin VIII B grubunda yer alan geçiş metallerindedir. Parlak, sünek, yumuşatılabilir gümüş-gri bir metal olan demirin farklı kristalin formları mevcuttur [4].

Doğal demir dört farklı izotopun (^{54}Fe - % 5.82, ^{56}Fe - % 91.66, ^{57}Fe - % 2.19 ve ^{58}Fe - % 0.33) karışımıdır. Bunların yanı sıra kütle numaraları 52, 53, 55, 59, 61 olan yapay radyoaktif izotopları da bulunmaktadır. Saf demirin yoğunluğu 7.86 g/cm^3 iken çeliğin $7.6\text{-}7.78 \text{ g/cm}^3$ 'tür [5].

Demirin başlıca değerlikleri +2 ve +3'tür. Bunun yanında nadiren +1, +4 ve +6 değerliklerinde de bulunur. Kuru havada kararlı ancak nemli havada kolayca oksitlenebilen bir yapıya sahiptir. Tablo 2.1, demir elementinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini göstermektedir [5].

Oksijen, silisyum ve alüminyum takiben doğada en çok bulunan dördüncü element konumundadır. Yer kabuğunun % 5.1'ini demir metali oluştururken, tüm metaller içinde en çok kullanılanı olup tüm dünyada üretilen metallerin ağırlıkça %95'ini oluşturur [6].

Doğada meteor kaynakları dışında serbest halde bulunmayan demir cevheri, genellikle oksitli bileşikler halindedir [6]. Bileşiklerinin yanında daima gang olarak tanımlanan empüriteler içermektedir. Bu empüriteler cevherin sınıflandırılmasında da rol oynar. Cevher yüksek oranda CaCO_3 (kireç) içeriyorsa bazik, SiO_2 (silika) içeriyorsa asidik olarak tanımlanır. Bunların yanında alümina ve fosfat ganglarını da içermektedir [7].

Ekonomik olarak değerlendirilebilen demir cevherinin içeriği %72 iken, demir çelik endüstrisinde kullanılabilmesi için tenörünün %57 oranında olması gerekmektedir [5].

Tablo 2.1 Demir elementinin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri

Simgesi	Fe	Elektronegativite	1.83 Pauling
Atom Numarası	26	Buharlaştırma Isısı	340 kJ/mol
Isıl Genleşme	11.8 $\mu\text{m}/(\text{m.K})$ (25°C’de)	Elektrik Direnci	96.1 Ωm (20°C’de)
Atom Ağırlığı	55.845 g/mol	Isıl İletkenlik	80.4 W/(m.K)
Yoğunluk	7.86 g/cm ³	Elektron Dizilimi	Ar 3d ⁶ 4s ²
Ergime Noktası	1538°C	Mohs Sertliği	4
Kaynama Noktası	2861°C	Vickers Sertliği	608 MPa
Ergime Isısı	13.81 kJ/mol	Brinell Sertliği	490 MPa
İyonlaşma Enerjisi	762.5 kJ/mol	Isı Kapasitesi	25.10 J/(mol.K)

Farklı bileşik formları mevcut olan demir cevherinin ekonomik olarak üretimi, özellikle manyetit (Fe_3O_4) ve hematit (Fe_2O_3) cevherlerinden olmakla birlikte daha az oranda da limonit ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve götit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) cevherlerinden de mümkün olabilmektedir. Ancak günümüzde endüstrinin gelişimiyle demir cevherine duyulan ihtiyacın artması ve yüksek tenörlü cevherlerin miktarının azalması sebebiyle, düşük tenörlü sülfürlü, sülfatlı ve karbonatlı cevherlerin de zenginleştirilmesi söz konusudur. Bu bileşikler ön zenginleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra yüksek fırınlarda ve benzeri tesislerde kullanılırlar. Bunların başlıcaları; pirotin (FeS), pirit (FeS_2), melenterit (FeSO_4) ve siderit (FeCO_3) mineralleridir [4]. Tablo 2.2 en sık kullanılan demir cevherlerini göstermektedir.

Tablo 2.2 Önemli demir cevherleri ve özellikleri [5]

Adı	Manyetit	Hematit	Götit	Limonit	Siderit
Kimyasal Formülü	FeO. Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O	2Fe ₂ O ₃ .2H ₂ O	FeCO ₃
Tenör (%)	72.40	69.64	62.69	62.30	48.00
Sertlik	5.5	5-6	5-5.5	5-5.5	4-4.5
Yoğunluk (g/cm³)	4,9–5,2	4,6–5,3	4,37	3,6–4	3,7–3,9

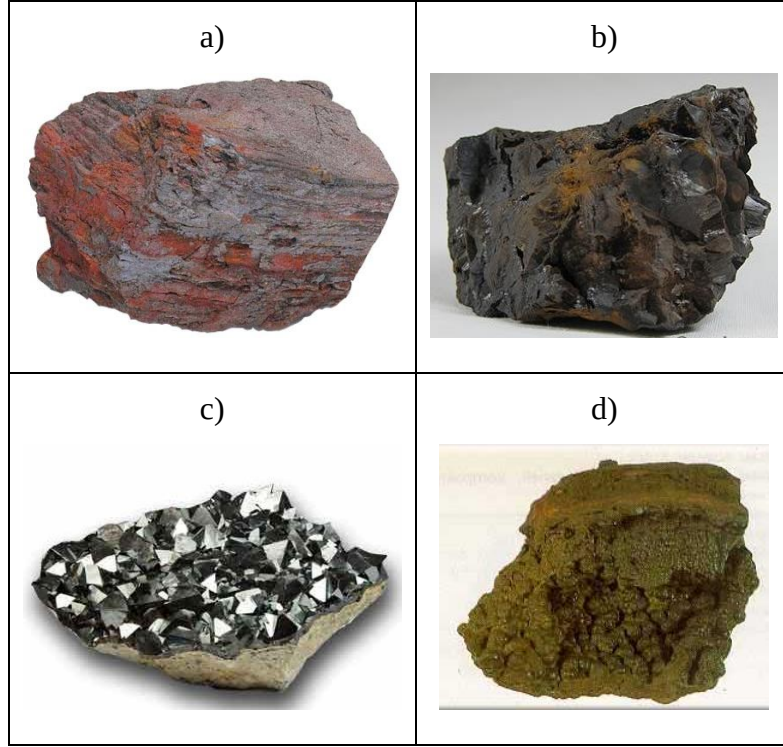
Manyetit (Fe₃O₄): Yüksek sıcaklıklarda oluşan tipik bir yüksek sıcaklık minerali olan manyetit, koyu siyah, parlak, gevrek yapılı ve güçlü manyetik özelliğe sahip, elektrik iletkenliği yüksek bir mineraldir. Gang minerali olarak bünyesinde çoğunlukla silisyum barındıran manyetit bu sebeple asidik özellik göstermektedir. Demir ve oksijen atomları kristal yapı içinde birbirine sıkıca bağlı olmasından dolayı kolay redüklenemez. Oksitleyici alevde manyetik özelliğini kaybederek spekülarite'e dönüşür. Magma kayalarında yaygın olarak bulunur [5,7].

Hematit (Fe₂O₃): Doğada en sık rastlanan demir minerali olan hematit kırmızı renkli ve mattır. Topraksı yapıda olan hematit gözenekli formlarında gevrek ya da sert biçimlerde olabilir. Çelik grisi ve parlak metalik bloklu ya da levhalı kristal formuna özel olarak "Spekülarit (Olijist)" adı verilir. Bünyesinde düşük oranda fosfor ve kükürt içeriğinin yanı sıra, kil ve silis gangını da barındıran hematit asidik özellikli bir mineraldir. Paramanyetik bir mineral olan hematit, demir oksijen bağları manyetite göre daha zayıf olduğu için, daha kolay redüklenabilmektedir [5,7].

Götit (Fe₂O₃.H₂O): Bileşiminde yaklaşık olarak % 10 H₂O barındıran götit, sarımsı kahverengiden koyu kahverengiye kadar değişen, parlak veya mat hallerde bulunabilen, yarı saydam bir mineraldir [5].

Limonit (2Fe₂O₃.2H₂O): Çoğu kez hematitle, kil mineralleri ve mangan oksitlerle birlikte bulunan limonit, koyu kahverengi ile siyah renkli ve camsı parlaklıktadır. Yarı saydam ve amorf bir mineraldir. Bünyesindeki su, demir oksitlerle kararlı bir bağ oluşturmuştur [5,7].

Siderit (FeCO_3): Bünyesinde çoğunlukla kireç, manganez ve düşük oranda fosfor içerir. Sarımsı beyaz rengine olan siderit mat bir mineraldir, gevrek yapıda olup mükemmel dilinime sahiptir [5,7]. Şekil 2.1’de önemli demir cevherlerinin görünümü mevcuttur.



Şekil 2.1 (a) hematit, (b) limonit, (c) manyetit, (d) götit

2.2 Çelik Üretim Tarihçesi

Çeliğin gelişimini inceleyebilmek için 4000 yıl kadar geriye gidilmelidir. Demirin, daha önce en çok kullanılan metal olan bronzdan, daha sert ve daha güçlü olduğunu kanıtlamasıyla özellikle silah ve alet yapımında tercih edilmeye başlanmış ve kullanılabilir hale getirilmesi için çeşitli teknikler geliştirilmeye çalışılmıştır [7].

Demirin ilk kullanımı Demir Çağı (M.Ö. 8000) olarak adlandırılan dönemde başlamış olup, ilk kullanılan demirin de dünyaya düşen bir meteordan olduğu sanılmaktadır. Tarih boyunca demir, önce demirci ocaklarında daha sonra demir fırınlarında, akışkan ocaklar ve odun kömürlü yüksek fırınlardan, kok kömürlü yüksek fırınlara ve doğrudan redüksiyon tesislerini takiben bugünkü modern izabe tesislerine giden bir serüveni takiben çeşitli metotlarla üretilmiştir [7].

10.yüzyıla kadar demirci ocaklarında ergitilen demir cevheri, su değirmenlerinin gelişmesi ve ısı kullanımının giderek daha fazla yaygınlaşmasıyla yüksek fırınlarda ergitilmeye başlanmıştır. 1709 yılına kadar bu fırınlarda yakıt olarak odun kömürü kullanırken, A. Darby tarafından ilk defa yakıt olarak kömür kullanılmıştır [7].

19. yüzyılda genişleyen demiryolları tarafından tüketilen demir miktarının artması ve ihtiyaçların değişmesiyle birlikte ekonomik üretim yöntemleri üzerinde çalışılmıştır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda demirin içerdiği karbon miktarını azaltarak sertliğini arttırmak amacıyla 1856 yılında Henry Bessemer tarafından kendi adıyla anılan ilk metot geliştirilmiştir. Bessemer tarafından geliştirilen ve daha sonra da adıyla anılacak olan bu metotta temel olarak, sıvı metale alttan hava yollanarak, empüritelerin kolayca oksitlenmesini sağlıyordu. Ayrıca bu proses konverter olarak bilinen bir başka fırın ile bağlantılıydı ve bu konverterde silisyum asidik astar sayesinde düşük fosforlu sıvı çelik üretimi mümkün kılındı. 1879 yılında Sidney Gilchrist Thomas tarafından üretilen konverterde ise bazik dolomit astar kullanılarak yüksek fosfor içerikli sıcak metal de rafine edilebilir hale gelmiştir [7-8].

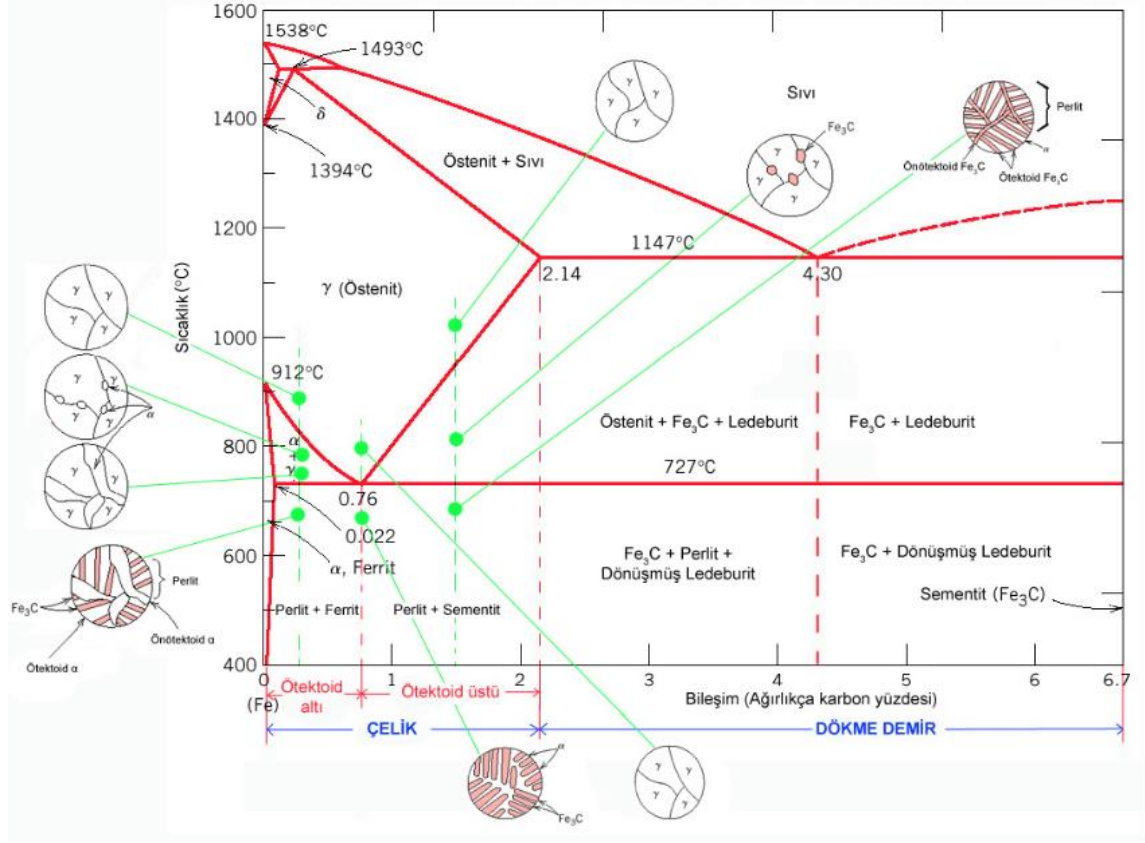
2.Dünya savaşından sonra Thomas ve Bessemer fırınlarındaki alttan üflemlili sistem, üstten üflemlili sistemle yer değiştirilerek günümüz Bazik Oksijen Fırınları (BOF) ile çelik üretimine geçildi. 19. Yüzyılda haddehaneler ve dövme teknolojisinin gelişmesiyle çelik üretimi de hız kazanarak modernleşmeye devam etmiştir [7].

2.3 Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler özelliklerine göre pek çok farklı şekilde sınıflandırılabilir. Örneğin,

- Kompozisyonuna göre; karbon içeriği, düşük alaşımlı veya paslanmaz çelik
- Üretim yöntemine göre; yüksek fırın ve bazik oksijen prosesi veya elektrik ark fırını prosesinin yanı sıra son yıllarda indüksiyon ocaklı üretim prosesi
- Sıcak veya soğuk haddeleme prosesine göre
- Mikro yapısına göre; ferritik, perlitik veya martenzitik
- Uygulanan sıcak işleme göre; tavlama, su verme veya temperleme [9].

Karbon içeriği göz önüne alınarak bir sınıflandırma yapılırsa, demir-karbon denge diyagramı en önemli referans noktası olarak kabul edilebilmektedir. Şekil 2.2 demir-karbon denge diyagramını göstermektedir.



Şekil 2.2 Demir-Karbon Denge Diyagramı

Diyagram incelendiğinde %2.14 C içeriğine kadar olan kısım çelik olarak sınıflandırılmaktadır. % 2.14-6.67 arası ise dökme demir olarak adlandırılmaktadır.

2.3.1 Karbon içeriğine göre sınıflandırma

Karbonlu çelikler toplamda bünyesinde %2'den fazla alaşım elementi barındırırlar ve içerdikleri bu alaşımların oranlarına göre; düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler, yüksek karbonlu çelikler ve ultra yüksek karbonlu çelikler [9].

Düşük karbon içerikli çelikler: Bünyesinde maksimum %0.30 oranında karbon bulundurur. Bu sınıfın en önemli özelliği soğuk haddeleme veya tavlama ile sac veya şerit gibi düz haddelenmiş ürünlerin bulunmasıdır. Bu tip çelikler düşük karbon içeriği (genelde $<0.10\%$) ve %0.4 Mn içeriği sayesinde yüksek oranda şekillendirilebilmektedir. Bu tarz malzemeler özellikle presleme, dövme, dikişsiz boru ve kazan tesisatı olarak kullanılmaktadır [9].

Orta karbon içerikli çelikler: Bu çeliklerde %0.30-0.60 C ile %0.60-1.65 Mn bulunur. Karbon içeriğini, mangan ile birlikte yaklaşık % 0,5'e arttırmak, orta karbonlu çeliklerin su verilmiş ve temperlenmiş durumlarda kullanılmasına izin verir. Bu çelikler çoğunlukla şaftlar, akslar, dişliler, krank mili, kaplin yapmak için kullanılır. Eğer karbon, % 0.40 -% 0.60 arasında ise, raylar, demiryolu tekerlekleri ve ray aksları için kullanılabilir [9].

Yüksek karbon içerikli çelikler: Karbon içeriği % 0.60-1.00 arasında, mangan içeriği ise %0.30-0.90 arasında değişmektedir. Süneklilikleri oldukça az bu sebeple işlenme kabiliyetleri kötüdür. Bu çelikler özellikle el aletleri, yay malzemesi ve yüksek-gerilim kablolarında kullanılmaktadır [10].

Ultra yüksek karbon içerikli çelikler: Bu çelik sınıfı, % 1.25-2.0 C içeren deneysel alaşımlardır. Bu çeliklerden çoğunlukla termomekanik olarak işlenmesi sonucu sürekli (kesintili olmayan) proeutektoid karbür parçacıkları veya eş eksenli küresel taneleri olan düzenli ve ultra ince mikro yapılar üretilmektedir [10].

2.3.2 Kullanım alanlarına göre sınıflandırma

Kullanım alanlarına göre sınıflandırma çelikler açısından çok tercih edilen bir sınıflandırma türüdür. Bu sınıf türüne; yapı, takım, yay, hız çelikleri gibi pek çok grup dahildir.

Yapı çelikleri: Karbon oranları alaşımlı ve alaşımsız olmasına göre değişen (alaşımlılar için ≤ 0.6 C, alaşımlı olanlarda ise ≤ 0.5 C) bu çelik grubu özellikle makine elemanları, aparatlar, sanayide kullanılan her türlü aksam ve inşaat işlerinde kullanılır [11].

Takım çelikleri: Mukavemeti yüksek malzemelerin işlenmesinde kullanılan çelik türüdür. Alaşımlı ve alaşımsız olabilir. Yüksek sertlik ve tokluk değerlerine sahiptir [11].

Yay çelikleri: Karbon oranı yapı çelikleri ile takım çelikleri arasında yer alan bu tür çelikler, yay imalatında kullanılır. Su alma yeteneği bulunan bu tür çeliklerde “Akma sınırı/Çekme dayanımı” oranı yüksektir [11].

Paslanmaz çelikler: İçerisinde krom bulunduran çeliklerdir ve bu sebeple çevresel etkilere karşı oldukça dayanıklıdırlar. Kromun çeliğe paslanmaz özellik katmasının temel nedeni, çelik yüzeyinde CrO (krom oksit) olarak birikmesi ve oluşan bu ince tabakanın da demiri dış etkilere koruyabilmesine dayanmaktadır. Sertleşebilen türlerinde %12-14 oranında krom bulunur [11].

2.3.3 Dökme demirler

% 2.14'den fazla karbon ve % 1-3 arasında silisyum içeren demir alaşımları dökme demir olarak tanımlanmaktadır. Tokluğu ve sünekliği çeliklere göre daha düşük olduğundan, mukavemet, sertlik ve korozyon gibi özelliklerinin dayanımını arttırmak amacıyla bir takım alaşım elementleriyle yapısı zenginleştirilmektedir. En çok krom, molibden, bakır ve nikel elementleri ile alaşımlandırılmaktadır [10,12].

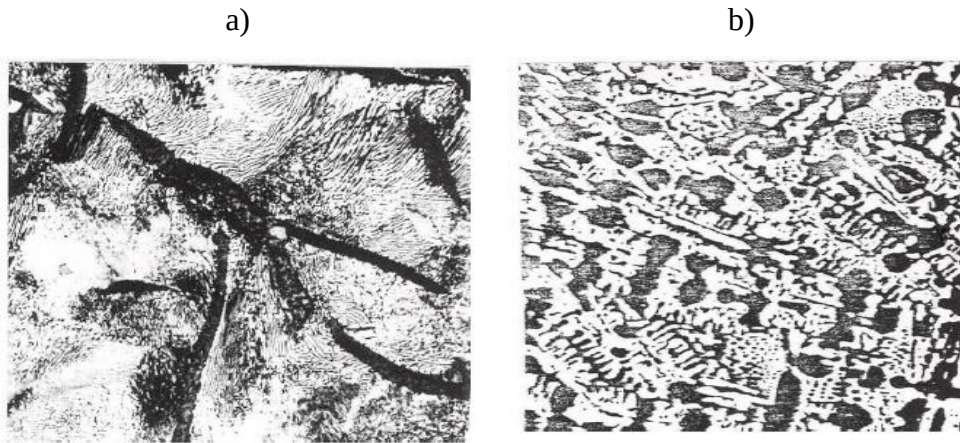
Dökme demirin en önemli özelliği, karbon içeriğinin östenitik bir katı çözelti içerisinde mikro yapıda tutulabilen miktarı aşmasıdır. Bu nedenle, katılaşma sırasında, karbonun bir kısmı demir karbür (Fe_3C) veya grafit olarak eriyikten ayrılır. Eğer soğutma hızı yeterince yavaş ise bünyesinde barındırdığı fazla karbon element karbon olarak çökecektir. Ancak soğutma hızı, hızlı ise, karbon açısından zengin faz demir karbür olacaktır. Dökme demirler içerisinde barındırdığı elementlerin stokiyometrisine ve oluşumunun türü ve şekline göre farklı özellikler kazanmaktadır [10]. Tablo 2.3'te kompozisyonlarına göre dökme demir türlerini göstermektedir.

Tablo 2.3 Dökme demir türlerinin kompozisyonları [10]

	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Fe
Beyaz Dökme Demir	2.5-4.0	0.4-1.6	0.15	0.4	0.3-0.8	93.05-96.25
Gri Dökme Demir	2.0-4.0	> 1.0	0.2	0.6	<1.0	93.2-96.2
Temper Dökme Demir	2.0-3.0	0.4-1.6	< 0.2	< 0.2	0.25-1.25	93.75-97.35
Küresel Dökme Demir	3.2-4.1	0.4-1.6	<0.03	< 0.1	< 0.8	93.37-96.4

Gri dökme demir: Dökme demirler arasında en yaygın olarak bulunan türdür. Aşırı karbon, ergiyik demirin döküm kalıbında yavaş soğutulmasıyla grafit yaprakları halinde katılaşır. Yapısında %0,8'den daha az bileşke halinde karbon bulunur. Grafitin yapraksı şekilde katılaşması sebebiyle, yapıda çatlak gibi davranan grafit sünekliği düşürür. İşlenebilirliği yüksek olan gri dökme demirin, mekanik mukavemetini arttırmak için ısıl temperleme ısıl işlemi uygulanır. Cu, Cr, Mo ve Ni gibi alaşım elementleri eklenerek gerilme mukavemeti 550 MPa (80 ksi) kadar yükseltilebilir. Gri dökme demir endüstride kendine oldukça fazla uygulama alanı bulmaktadır. Ergitme potalarından, otomotiv parçalarına, yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlardan, cam kalıplara kadar pek çok yerde kullanılmaktadır [13-14]. Yapısı, ferritten perlit ve iki fazın çeşitli kombinasyonlarına kadar değişebilir. Şekil 2.3-a'da gri dökme demirin mikro yapısı görünmektedir.

Beyaz dökme demir: Bu dökme demir türünde soğuma hızlı şekilde gerçekleştirildiği için, karbon, karbür olarak kararlı halde yapıda kalır. Dökme demirler arasında karbonun karbür şeklinde olduğu tek türdür. Beyaz dökme demirin mikro yapısı masif sementit (beyaz) ve perlit içerir. Şekil 2.3-b'de beyaz dökme demirin mikro yapısı görünmektedir. Yapıda demir karbür olması sebebiyle sertliği ve aşınma direnci yüksek, ancak çok fazla intermetalik bileşik içerdiğinden de sünekliği oldukça düşüktür. Çekme mukavemetleri 160 ila 620 MPa arasında değişebilir [13,15]. Şekil 2.3-b'de beyaz dökme demirin mikro yapısını göstermektedir.

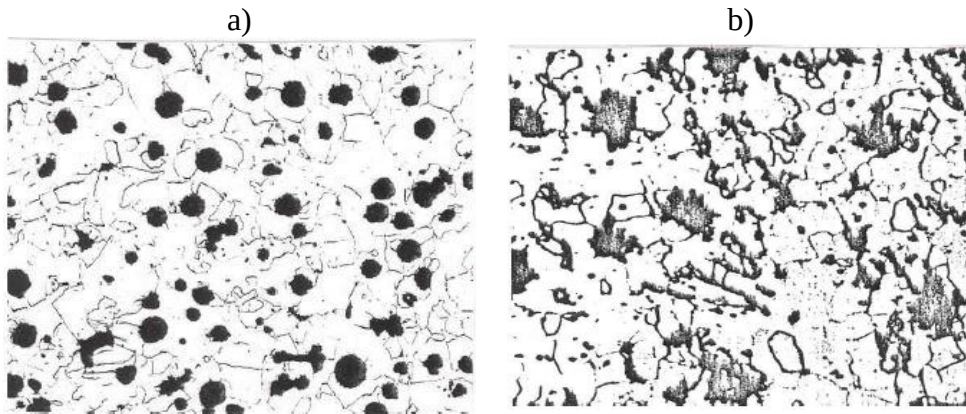


Şekil 2.3 a) gri dökme demir b) beyaz dökme demir mikro yapı fotoğrafları

Temper dökme demir: Beyaz dökme demirin ısıtılma işlem sonrası daha sünek halidir. Beyaz dökme demir içindeki mevcut demir karbürler, 60 saatten fazla süreyle 870°C'nin üstünde tavlama işlemine tabii tutulur. Bu işlem sırasında düzensiz şekilli grafit nodülleri çöker. Fırın atmosferi oksitleyici bir nitelik taşıyorsa, karbonun bir kısmı oksitlenecek ve kaynaklanabilir olarak kabul edilen beyaz kalplerle dövülebilir bir demir üretecektir. Eğer atmosfer azaltıcı bir nitelik taşıyorsa, karbonun tüm miktarı korunur ve malzeme, eriyebilir olarak kabul edilen kara dövülebilir bir demirdir [13].

Temper dökme demirin yapısında karbon küresel şekilde bulunduğu için gri dökme demirden daha yüksek mukavemet ve sünekliğe sahiptir. Ayrıca temper dökme demiri çevreleyen ferritik yapı da sünekliği artırıcı etki yapmaktadır. Çekme mukavemetleri 310-620 MPa arasındadır [13].

Küresel dökme demir: Nodüler dökme demir olarak da adlandırılan küresel dökme demir, kimyasal kompozisyon açısından gri dökme demirle aynıdır ancak grafit tanecikleri yapraksı yerine küresel formdadır. Magnezyum veya seryum gibi nadir toprak elementlerinin ergiyik metale katılmasıyla yapraksı grafit tanecikleri küreselleşir. Bu küreselleşmeyle birlikte yapı içinde, yaprak grafitlerin çatlak oluşturarak mekanik özellikleri düşük olan gri dökme demirin mukavemeti ve sünekliği artırılmış olur. Çekme mukavemeti 415-830 MPa arasında değişen küresel dökme demir, alaşım elementlerinin etkisiyle sıcaklık ve korozyon direnci de artmaktadır [13-15]. Şekil 2.4'te temper ve küresel dökme demirin mikro yapıları görülmektedir.



Şekil 2.4 a) küresel dökme demir b) temper dökme demir mikro yapı fotoğrafları

2.4 Modern Çelik Üretim Metotları

Çelik üretimi, demir cevherinin kömür ve diğer redüktantlarla sıvı demire indirgenmesi ve daha sonra üzerine oksijen üflenerek çeliğe dönüştürülmesi metoduna dayanan birincil üretimle ve hurdadan çelik üretimi yapılan ikincil üretimle sağlanmaktadır.

2.4.1 Entegre Tesislerde Üretim

Demir cevherinden başlanarak çelik üretimi entegre tesislerde yapılmaktadır. Bu tesislerde yüksek fırın ile bazik oksijen fırınları entegre şekilde kullanılmaktadır.

Bu tesislerde demir cevherinden çelik üretimi iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada demir oksit yüksek fırınlarda karbon monoksit ve karbon kullanılarak redüklenir ve nihai olarak içinde silikon, mangan ve fosfor içeren karbon içerikli metal sıvı elde edilir. Sıvı metal içindeki gang malzemeler kireçtaşı eklenerek büyük oranda sülfür ile birlikte cüruf halinde uzaklaştırılır. İkinci aşamada, kısmi olarak gangından uzaklaştırılan sıvı metal, bazik oksijen fırınlarında kalan silikon, sülfür ve fosforun da uzaklaştırılarak ve istenilen özelliklere ulaşmak için alaşım elementleri eklenerek çelik halini alır [17].

2.4.1.1 Yüksek fırında (YF) pik demir üretimi

Boyu 50 metreden, çapı ise 14 metreden yüksek içi yüksek sıcaklığa dayanabilen refrakter malzeme ile kaplı bu fırınlarda amaç, demir cevherinin eritilip indirgenerek sıvı metal haline getirilmesidir. Yüksek fırına üç ana şarj yapılır. Bunlar; demirli malzemeler, kok ve kireçtaşıdır [17].

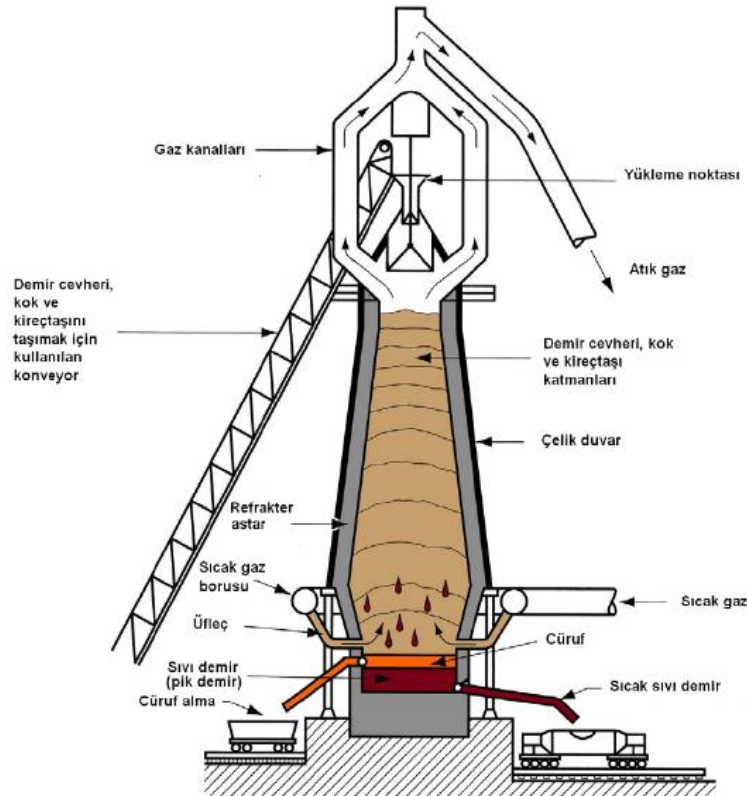
Demirli malzemeler; demir cevheri, sinter ve pelet demir olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Tüvenan cevher kırma, eleme ve zenginleştirme işlemlerinden sonra yaklaşık olarak %50-70 oranında demir içerikli 12,7-38 mm boyut aralıklı demir cevheri haline getirilerek fırına beslenmeye hazır hale getirilir. Yüksek fırınlarda en sık kullanılan demir cevherlerinin özellikleri tablo 2.4'te gösterilmiştir. Sinter malzemesi ise demir kaynağı olarak toz demir cevheri ve demir içeren atıklar ile kok tozu ve öğütülmüş kireçtaşının harmanlanmasıyla elde edilir. Oluşturulan bu harman önce sinter tesislerinde yakılır ve daha sonra ergiyen malzemeler bir araya gelerek 12.7-50 mm arasında sinter parçalarını meydana getirir. Pelet malzemesi ise çok ince boyuttaki toz

demir cevherinin bağlayıcı ve su kullanılarak, kireçle pişirilmesi sonucu oluşturulan çapı yaklaşık 12 mm olan küçük bilyelerdir [18].

Tablo 2.4 Yüksek fırınlarda en sık kullanılan demir cevherleri ve % tenörleri

Demir Cevheri	Hematit	Manyetit	Siderit	Pirit	Limonit	Takonit	Jasper
% Fe	70	72	61	46	60	>16	25-40

Kok, yüksek fırınlarının ikinci şarj malzemesidir. Yüksek fırınlar için kritik öneme sahip olan kok malzemesinin üretimi, genelde yüksek fırının hemen yanında konumlandırılan kok fırınları ile gerçekleştirilir. Bu fırınlarda kömürün, sınırlı oksijen varlığında ısıtılması ve üzerine su püskürtülmesi ile kok haline dönüşmesi sağlanır. Kokun, yüksek fırın için iki önemli işlevi vardır. Bunlar; fırın içinde gerçekleşen kimyasal tepkimeler için enerji ve demir cevherinin indirgenmesi için gerekli olan CO kaynağı olmasıdır [19]. Şekil 2.5 tipik bir yüksek fırın resmedilmiştir.

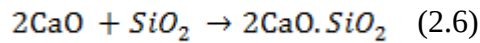
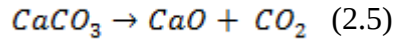
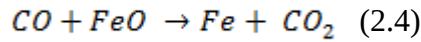
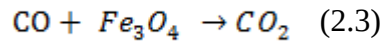
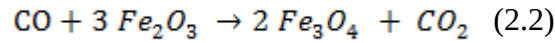
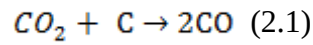


Şekil 2.5 Yüksek Fırın [19]

Fırın içine üst bölmeden demirli malzemeler, kok ve kireçtaşı ilave edilir ve bu hammaddeler alttan gelen sıcak havayla temas ederek bir dizi reaksiyon zinciri gerçekleşir. Bu sebeple fırın içerisini 4 farklı bölmeye ayırarak her bir bölmede meydana gelen reaksiyonları ayrı ayrı incelemek mümkündür.

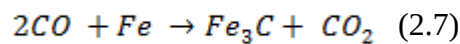
İlk bölme ısınma bölgesi olarak tanımlanır ve bu bölgede hammaddeler alttan gelen sıcak hava etkisiyle ısınır. Sıcaklık yaklaşık 200-500° C arasındadır [5].

Isınan cevher redüksiyon bölgesine doğru hareket eder. Burada sıcaklık 500-900° C arasındadır.



Bu bölgede demir oksit artık, demir (Fe) halindedir. Demirli cevherle birlikte beslenen kireçtaşı da bu bölgede ayrışır [5].

Üçüncü kısım karbon alma bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede metalik hale geçen demirin bir kısmı karbon monoksit ile reaksiyon vererek karbür yapısı oluşturur. Bu bölgede sıcaklık 1200° C civarındadır [5].



Son kısım ise ergime sahası olarak adlandırılır. Bu bölge fırının en sıcak bölgesi olup yaklaşık olarak 1700° C civarındadır. Bu kısımda tüm malzemeler ergiyik hale geçer [5]. Tablo 2.5 pik demirin kimyasal kompozisyonunu göstermektedir.

Tablo 2.5 Pik demir kimyasal kompozisyonu

Bileşen	C	Fe	Si	S	Mn	P	Ti
Miktar (%)	4.1-4.4	93.5-95.0	0.3-0.9	0.025-0.05	0.55-0.75	0.03-0.09	0.02-0.06

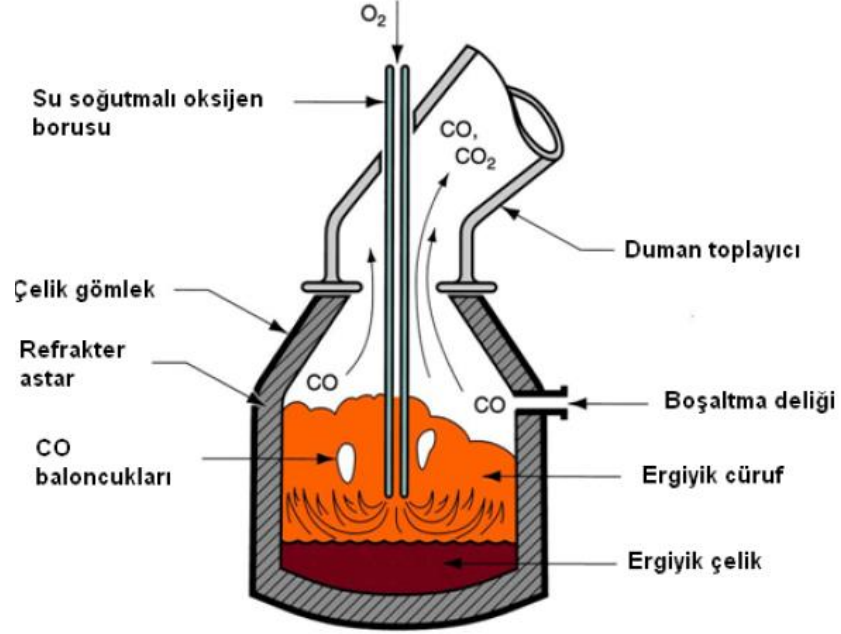
Yüksek fırınlarda 1 ton pik demir üretmek için; 2 ton demir cevheri, 1 ton kok, 0.5 ton kireçtaşı ve 3.5 ton sıcak gaz gereklidir [19].

2.4.1.2 Bazik oksijen fırınında (BOF) çelik üretimi

Entegre sistemlerde yüksek fırınlardan sonra kullanılan fırın tipidir. Fırına beslenen temel girdiler, pik demir (%70-80), hurda demir (<%30) ve flux yapıcı olarak kireçtir. Kapasitelerine göre boyutları değişir. 250 tonluk bir kapasite için yaklaşık olarak 10 metre yüksekliğinde ve 8 m dış çap uzunluğunda bir fırın gereklidir [16,19].

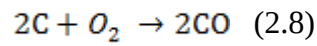
Bir diğer adıyla konvertör, 45°'lik açıyla yatırılarak önce hurda şarj edilir. Fırına hurda şarj edilmesinin temel sebebi, sıvı çeliğin dökülebilir makul sıcaklıklarda tutulmak istenmesidir. Çünkü sadece pik demir beslendiğinde sıvı metal içindeki karbon ve diğer elementler, oksijen varlığında egzotermik reaksiyonlar vermektedir. Bu reaksiyonlar sonucu sıvı çeliğin sıcaklığı çok yükselir. Bu fazla sıcaklığın önüne geçebilmek için fırına hurda şarj edilir. Egzotermik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı da bu hurdaların ertitilmesinde kullanılmış olur. Daha sonra sıvı pik demir üzerine boşaltılır. Tüm bu şarj işlemi 5-6 dak içerisinde tamamlanır. Şarj işlemi bittikten sonra fırın dik konuma getirilir ve içine O₂ (%99.5 oranında saf) üfleyen borular batırılır. Borunun alt ucu ertimiş demir yüzeyinden 1.5 metre üstte olacak şekilde daldırılır. Başlangıç sıcaklığı 1400-1500° C arasındadır ve O₂ üflenmesi neticesinde gerçekleşen bir dizi egzotermik reaksiyon neticesinde 1600° C'yi geçen sıcaklıklara ulaşılır. 16-18 dak arası süren O₂ üfleme işlemi sonrasında hurda, ergiyik hale geçer. Bu sırada cürufu yoğunluk farkından dolayı sıvı çeliğin üzerinde toplanır. Bazik oksijen fırınlarında toplam işlem

ortalama 40 dak'da tamamlanmaktadır [18-19]. Bazik oksijen fırını şeması Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

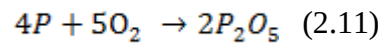
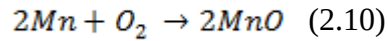
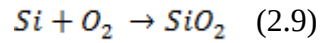


Şekil 2.6 Bazik oksijen fırını [19]

Borudan hızla üflenen O₂ ergimiş metalin üzerinde ısınmaya yol açar, gerçekleşen reaksiyonlar neticesinde fazla karbon sıvı çelikten uzaklaşırken empüriteler de oksitlenerek sıvı çelikten ayrılır [19].



Çelik bünyesindeki fazla karbon, O₂ ile birleşerek fırını baca gazı olarak terk eder [19].



Empüriteler ise oksitlendikten sonra kireçle birleşerek cüruf halinde sıvı çeliğin üzerinde kalır. Daha sonra fırın yine eğim verilerek önce sıvı çelik alınır daha sonra da cüruf uzaklaştırılır. Tablo 2.6 ham sıvı çeliğin kompozisyonu göstermektedir.

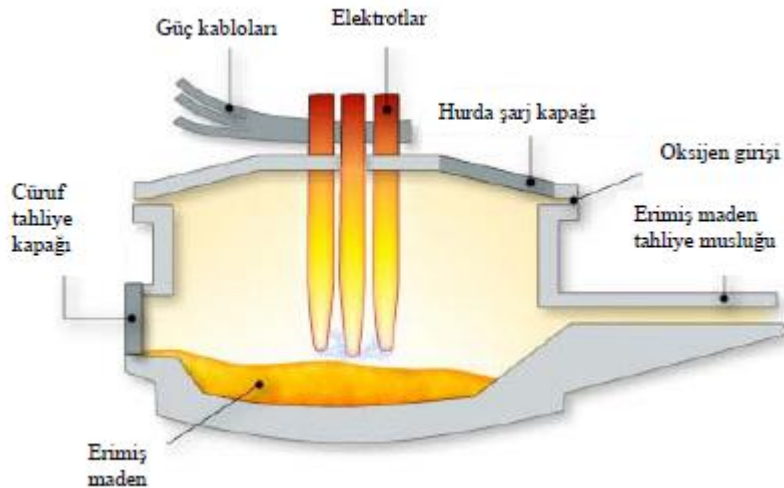
Tablo 2.6 BOF sonrası ham sıvı çelik kompozisyonu

Bileşen	C	O	Si	S	Mn	P
Miktar (%)	0.05	0.06	0.0	0.01-0.05	0.1	0.01-0.02

2.4.2 Elektrik Ark Fırınlarında (EAF) Üretim

BOF prosesinin aksine, EAF’de hurda çelik kullanılır. Fırının içine daldırılan elektrotlardan elektrik geçirilerek ark oluşturulur ve böylece hurdayı eritebilecek ısı sağlanmış olur. Ferroalaşımlar ergitme prosesi boyunca eklenir ve oksijen çeliği saflaştırmak için sürekli olarak üflenir [16].

Çeliğin istenilen son kompozisyona gelebilmesi için gerekli metal alaşım elementleri ve yine cüruflaştırıcı olarak kireç eklemesi yapılır. Az yoğun olan cüruf, sıvı çelik yüzeyine çıkar ve tıpkı BOF sisteminde olduğu gibi fırına eğim verilerek uzaklaştırılır daha sonra da sıvı çelik ters yönde eğim verilerek alınır [18]. Şekil 2.7’de elektrik ark fırını şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Elektrik Ark Fırını [18]

Modern bir ark ocağında 150 ton hurda 7.4 GJ enerji ile 90 dak’da ergitilebilmektedir [18]. Tablo 2.7 ham sıvı çeliğin kompozisyonunu göstermektedir.

Tablo 2.7 EAF sonrası ham sıvı çelik kompozisyonu

Element	C	O	Si	Mn	S	P
(%)	0.01-0.10	0.06-0.08	0.08-0.10	0.03-0.10	0.030-0.060	0.020-0.050

Entegre sistemlere göre oldukça az yer kaplayan EAF’ler bu sebeple daha ekonomik bir yöntemdir. Hem yerden hem de ilk yatırım maliyeti açısından avantaj sağlayan bu fırınlar ayrıca hurdaların geri dönüşümü de sağlandığı için çevreci üretim olarak kabul görmektedir [16].

2.4.3 Pota Fırınlarında (PF) Çelik Saflaştırma ve Alaşımlandırma Prosesi

Bu fırınlar hem entegre sistemlerden hem de elektrik ark ocaklarından sonra çeliğin saflaştırılması için kullanılmaktadır [17]. Tablo 2.7 nihai sıvı çelik kompozisyonunu göstermektedir.

Tablo 2.8 PF sonrası sıvı çelik kompozisyonu

Element	C	O	Si	Mn	S	P
(%)	0.01-0.10	0.06-0.08	0.040-0.80	0.10-1.0	0.030-0.060	0.020-0.050

2.5 Dünya ve Türkiye’deki Ekonomik Veriler

2.5.1 Dünyada Demir Çelik Sektörü

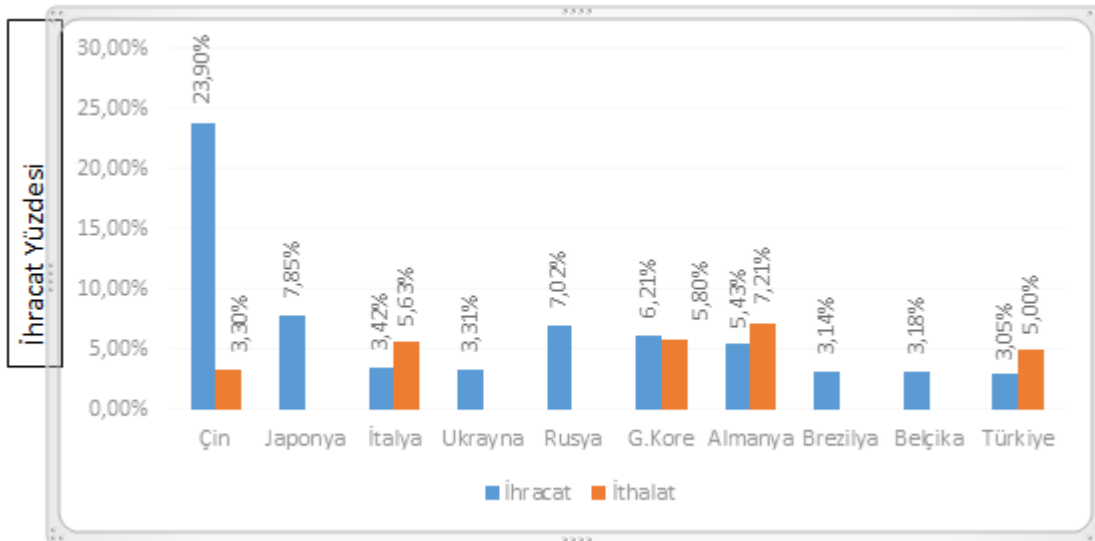
Dünya demir çelik üretimi daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi oldukça gerilere gitmektedir. Bugün revize edilerek kullanılan metotların temelleri 1800’lü yılların sonlarına dayanmaktadır. Bu sebeple dünya ham çelik üretimi 2009 yılı buhranına hariç sürekli artış göstererek devam etmiştir. 20. yüzyılın başında, dünya demir çelik tüketimi 28 milyon ton iken aynı yüzyılın sonlarında büyük bir sıçrama yaparak 780 milyon tona ulaşmıştır. Özellikle bu artışı sağlayan Çin, demir çelik sektöründe başı

eken lke konumuna ulaşmıştır [3,20]. Tablo 2.9’da Dünya elik üretiminin ilk 20 ülkeye göre dağılımı görülmektedir.

2015-2016 Dünya Ham elik retimi (1000 Ton)			
	2016	2015	% deėiřim16/15
1. Çin	808.370	798.785	1.2
2. Japonya	104.772	105.134	-0.3
3. Hindistan	95.618	89.027	7.4
4. ABD	78.619	78.845	-0.3
5. Rusya	70.800	70.900	-0.1
6. Güney Kore	68.567	69.670	-1.6
7. Almanya	42.082	42.676	-1.4
8. Türkiye	33.163	31.517	5.2
9. Brezilya	30.212	33.256	-9.2
10. Ukrayna	24.221	22.968	5.5
11. İtalya	23.341	22.018	6.0
12. Tayvan	21.570	21.370	0.8
13. Meksika	19.002	18.225	4.3
14. İran	17.895	16.146	10.8
15. Fransa	14.633	14.984	-2.3
16. İspanya	13.654	14.845	-8.0
17. Kanada	12.672	12.473	1.6
18. Polonya	8.939	9.198	-2.8
19. Belçika	7.686	7.257	5.9
20. Birleşik Krallık	7.581	10.964	-30.5
Toplam	1.628.5	1.615.4	0.8

Tablo 2.9 Dünya elik üretiminin ilk 20 ülkeye göre dağılımı [1]

İhracat ve ithalat verileri göz önüne alındığında yine Çin’in çok büyük bir yüzdeyle başı çektiği görülmektedir. Tablo 2.9 dünya elik ihracat dağılımlarını göstermektedir.



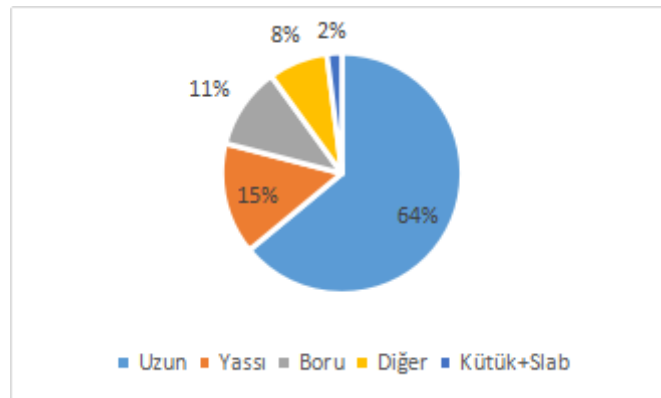
şekil 2.8 Dünya elik ihracat ve ithalat dağılımı [21]

2.5.2 Türkiye’de Demir Çelik Sektörü

Dünyanın aksine Türkiye’de ancak 1930 yılında modern demir çelik üretimi için çalışmalar başlatılmıştır. 1937’de ilk entegre demir çelik fabrikası olan Karabük Demir Çelik Fabrikaları yıllık 150.000 ton ham çelik üretimiyle sektöre girmiştir. 1965 yılında ise 470.000 ton yıllık üretim kapasitesiyle Ereğli Demir Çelik Fabrikaları rekabete katılmıştır. 1950’li yılların sonlarında özel sektör de piyasaya girerek elektrik ark ocağı ile çelik üretimine girmiştir. Bu gelişmeleri takiben günümüz verileri değerlendirildiğinde Türkiye’deki ham çelik üretiminin, 2015 yılı verilerine göre % 5.3 oranında artış göstererek, 33.19 milyon tona çıktığı görülmektedir. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği verilerine göre, bu üretimin % 65.86’sının elektrik ark ocaklı tesislerde, kalan 11.32 milyon tonluk kısmının ise entegre tesislerde üretildiği görülmektedir [18,22].

İhracat anlamında da dünyadan geri kalmayan Türkiye, 2015 yılı verilerine göre ilk 10 ihracatçı ülke arasına girerek yıllık 16.1 milyon ton çelik ihracatı gerçekleştirmiştir. Farklı türlerde gerçekleştirilen bu ihracat kalemlerinin yıllık miktarlarını Şekil 2.9’da gösterilmiştir [21].

İthalat verileri değerlendirildiğinde ise dünya sıralamasında 5.sırada yer alan Türkiye 2015 yılında 20.6 milyon çelik ihraç ederek, dünya tüketim sıralamasında da 8. Sıraya yerleşmiştir [21].



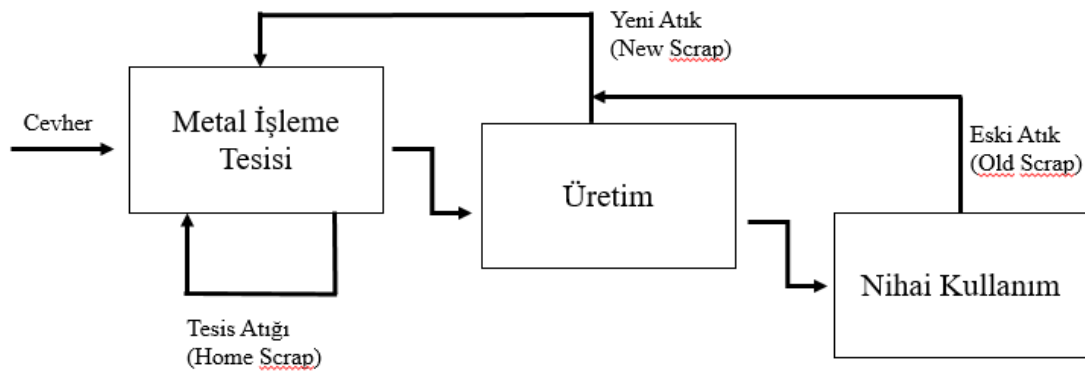
Şekil 2.9 2015 yılı ihracat kalemleri dağılımı [21]

2.6 Çelik Üretimi ve Çevresel Etkiler

Diğer tüm endüstrilerde olduğu gibi demir çelik endüstrisinde de atık yönetimi oldukça önemli ve güncel bir konudur. Özellikle yeniden kullanım ve geri dönüşüm günümüz sıfır atık anlayışının temelini oluşturmaktadır. Büyük ölçekli bir çelik üretim tesisinde, cürufun yanında, baca tozları, tufal, çeşitli çamurlar geri dönüştürülebilir konumdadır. Böylece atık miktarı azaltılarak hem çevre kirliliği önlenabilir hem de ekonomik yarar sağlanabilir [16].

Özellikle çelik yüksek talep görmesi sebebiyle geri dönüştürülebilir ürünler arasına girmektedir. Farklı alanlardan elde edilen çelik artıkları yeniden üretimde değerlendirilebilmektedir. Tablo 2.9’da farklı çelik atığı türlerinin değerlendirilebilirliğini göstermektedir [16].

Şekil 2.10 Çelik üretimi sırasında atıl çeliklerin değerlendirilme prosesi [16]



Sıfır atık konseptine uygun olarak, herhangi bir üretim sürecinde oluşan ürün atığı, aslında potansiyel bir yeniden kullanım materyali olarak değerlendirilmektedir. Böylece hem üretim maliyetleri düşürülerek kar marjı yükseltilebilir hem de çevreye duyarlı yeşil teknoloji kullanımına geçilebilir. Ayrıca özellikle çelik üretimi esnasında çıkan cüruflar aşınmaya karşı dayanımı ve yüksek stabilite gibi özellikleri sebebiyle yeniden kullanımı da oldukça yaygındır [16,23]. Farklı kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak kullanılabileceği yerler Bölüm 4’te detaylı olarak anlatılmaktadır.

3. CÜRUFLAR VE ÖZELLİKLERİ

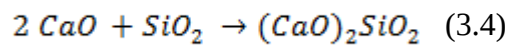
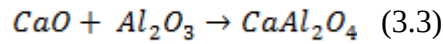
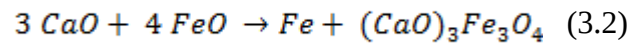
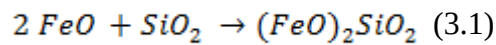
Cüruf, metallerin veya elementlerin ergitme fırınlarında işlenmesi sonucu ergiyik üründen yoğunluk farkı ile ayrılan veya kömür/katı atıkları yakıt olarak kullanan tesislerde ortaya çıkan oksit, silikat veya boratlardan oluşan bir yan üründür. Metal üretimi için oldukça önemli olan cürufların pek çok görevi vardır. Üretim esnasında metal bünyesindeki fosfor, kükürt gibi safsızlıkları bünyesine almak, sıvı metalle bir ara yüzey oluşturarak hem metalin kirlenmesini önlemek hem de ısı kaybını önlemek gibi birçok görevi vardır [24].

3.1 Cüruf Oluşum Teorileri

Cürufların yapılarını açıklayan 3 farklı teori mevcuttur. Bunlar iyonik teori, moleküler teori ve ikisinin karışımı olarak bilinen ortak teoridir.

3.1.1. Moleküler teori

Bu teori, pek çok karmaşık bileşiğin erimiş cürufta olabileceğini ve bununla birlikte de katılmış cüruf içinde pek çok farklı bileşiğin barınabileceğini varsaymaktadır. Bir başka ifadeyle, sıvı cüruf içinde serbest halde bulunan oksit, florit ve sülfidlerin iyon şeklinde bulunmaktan ziyade kompleks moleküller oluşturarak kombine şekilde bulunduğunu iddia etmektedir [25]. Teoriyi destekleyen denklemler;



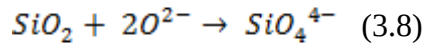
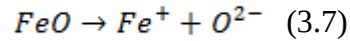
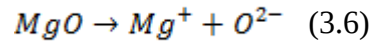
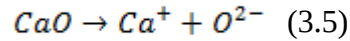
Ayrıca bu teori cürufta oluşabilecek tüm moleküler oluşumları dikkate alır. MnO – CaO – SiO₂ bileşenlerine sahip üçlü yapıdaki bir cürufta; MnO, CaO, CaSiO₃, Ca₂SiO₄, MnSiO₃, Mn₂SiO₄ gibi kompleks yapıdaki moleküller bulunabilmektedir [25].

Ancak bu teori demirli ve demir içermeyen metalürjik uygulamalarda kendine yer bulsa da bazı çelişkileri içinde barındırır. Örneğin bu teori cürufun sadece ideal durumda olduğu koşullarda geçerlidir. Ayrıca, elektrik iletkenliği, cüruf elektrolizi ve viskozite ölçümleri üzerine yapılan deneysel çalışmalar, cürufların katyon ve anyon formundaki iyonlardan oluştuğunu ortaya koymuştur [25].

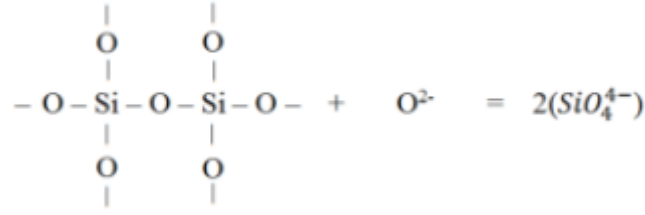
3.1.2 İyonik teori

Pek çok farklı bilim adamının çalıştığı ve cüruflar üzerine yapılan elektrokimyasal ve termodinamik araştırmalara dayanarak, cürufların tamamen ayrılmış iyonik yapılar olduğunu kabul eden bir teoridir [26].

İyonik teori temelinde, cüruf bileşiminde bulunan tüm bazik oksitlerin disosiyasyon olarak ortama oksijen iyonu sağladıklarını savunur. Bazik oksitlerin sağladığı bu serbest oksijen anyonları cüruf içerisinde bulunan asidik yapıdaki oksitlerle birleşerek alüminat, silikat veya borat gibi kompleks yapıları oluşturur [26].



(5), (6), (7) bazik oksitlerin disosiyasyon olma reaksiyonları ve (8) asidik oksitlerin serbest oksijen ile bağlanması ile silikat yapısının oluşturulması reaksiyonlarını göstermektedir. Şekil 3.1 bu silikat yapısını göstermektedir.



Şekil 3.1 Silikat yapısı

1945 yılında Temkin tarafından ortaya atılan teoriye göre cüruf, aynı yükün iyonları arasında herhangi bir etkileşim olmaksızın çözelti içinde tamamen iyonlarına ayrılmış haldedir [27].

Bu teorinin diğer varsayımları şöyledir:

- Cüruf ideal katyon ve anyon çözeltisinden oluşur.
- Cüruftaki tüm iyon türleri bilinmektedir.
- İyonlar tamamen rasgele dağılmıştır [25].

Flood Teorisi, 1953, kısmen Temkin'in teorisine dayanır ve metalik fazdaki ergimiş elementlerle bu elementlerin bileşikleri veya cüruf içindeki iyon halleri arasındaki denge ilişkisini tarifler. Bu teoriye çözelti içinde cüruf ideal bir şekilde davranırken, metal ideal olmayan bir şekilde davranış gösterir. Bu yaklaşım, demir ve çelik üretiminde kükürt giderme ve fosfor giderme reaksiyonları gibi metal cüruf reaksiyonlarına uygulanabilir [25,27].

Bir diğer teori olan Masson teorisi, kompleks iyonların iyon fraksiyonu cinsinden dağılımını değerlendirir ve silikat cürufundaki bazik oksidin aktivitesini hesaplamak için kullanılabilir. Bu teoriye göre cüruflar polimerik silikat anyonları içeren kompleks çözeltilerdir, ve polimerizasyon derecesi mevcut olan bazik oksit karakteri ve miktarı ile kontrol edilebilir. Buna ek olarak, Masson teorisi, Temkin ve Flood teorileri gibi, anyonlar ve katyonlar için ayrı ayrı ideal bir davranışı varsayar ancak yalnızca doğrusal veya dallanmış zincirleri hesaba katarken yüksek polimerlerle birlikte halkalı formları konu dışı bırakır [27].

Ancak bu teorinin bazı kısıtları söz konusudur:

- İkili silikat yapılarına uygulanabilen doğrusal zincirlerin oluşumu dikkate alınmıştır.
- Bu yaklaşımda gerçek çözümlerdeki iyon etkileşimi düşünülmemiştir [25].

3.1.2 Ortak (Coexistence) teori

Bu teorinin her iki teoriyi de içinde barındırarak cürufların iyon ve moleküllerin bir arada bulunmasıyla oluştuğunu söyler. Cürufların sahip olduğu bir takım özelliklerle teori kendini desteklemektedir. Örneğin, silikat grubunun ergitme enerjisi ile latis enerjisinin farklılık göstermesi, ergitme işlemi sırasında latis yapısının tamamen parçalanamadığını göstermektedir. Ayrıca bazik ve asidik cürufların elektrik iletkenliğinin farklı olması da bu teoriyi desteklemektedir. Bu kanıtlar cüruf bünyesinde hem iyonların hem de moleküllerin bulunduğunu göstermektedir [26].

3.2 Cüruf Türleri

Cüruf, bünyesinde barındırdığı bileşenlerin değişmesiyle değişik özellikler kazansa da genel olarak düşük yoğunluk ve ergime sıcaklığı gibi ortak özelliklere sahiptir. Cüruf türleri, üretilmek istenen nihai ürüne ve üretim yöntemine göre farklı özellikler gösterse de demir çelik üretim cürufları ve metal üretimi sırasında oluşan cüruflar olarak iki ana başlık altında incelenebilmektedir.

3.2.1 Demir çelik üretim cürufları

Ferrous tanımı kimyadaki ferrik tanımından biraz daha farklı olarak özellikle (FeO) demir oksit bileşiğinin Fe^{2+} değerlikli hali olup demir çelik üretim cürufları için özel bir tanımlamadır. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi modern çelik üretimi, yüksek fırın ve bazik oksijen fırınından oluşan entegre bir sistem veya elektrik ark ocağından oluşan bir prosestir. Demir cevherinin kullanıldığı yüksek fırınlarda cevher, kok ve flux yapıcılar ergitildiğinde, pik demirin yanı sıra BF cürufu oluşur. Bazik oksijen fırınlarında, pik demir sıvı çelik haline getirilirken yan ürün olarak ortaya BOF cürufu çıkmaktadır. Elektrik ark fırınlarında, hurda çelik işlenirken yine flux yapıcılar sayesinde EAF cürufu alınmaktadır. Erimiş cüruf boşaldıktan sonra, hava ile veya farklı soğutma rejimleri altında işlenip soğutulduktan sonra çeşitli uygulamalar için kullanılabilir [28].

Flux yapıcı malzemelerin, demir çelik üretiminde iki önemli rolü vardır. Bunlar, hammaddelerdeki safsızlıkları daha kolay ergiyebilir hale getirmek ve safsızlıkların metaller yerine kendileriyle birleşmesini sağlayarak yeni kimyasal forma dönüştürmektir. Flux malzemesinin boyutu, kimyasal içeriği, eklenme yöntemi gibi parametreler direkt olarak cüruf yapısını etkileyen etmenlerdir. Tablo 3.1’de temel Flux yapıcı malzemelerin kimyasal özellikleri verilmiştir [28].

Tablo 3.1 Flux yapıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri [28]

Mineral	Kristal Özellikleri	Mohrs sertliği	Spesifik Yoğunluğu (g/cm ³)
Kalsit (CaCO ₃)	Hekzagonal kristal sistem, çok iyi rombohedral dilimlenme	3	2.72
Dolomit (CaCO ₃ .MgCO ₃)	Hekzagonal kristal sistem, çok iyi rombohedral dilimlenme	3.5-4	2.87
Aragonit (CaCO ₃)	Ortorombik kristal sistem	3.5-4	2.93-2.95

Çelik üretiminde, BF-BOF entegre sistemlerinde 1000 kg ham çelik üretmek için yaklaşık olarak 2000 kg demir cevheri, 1000 kg kömür, 500 kg kireçtaşı ve 180 kg hurda çelik kullanılmaktadır. EAF’de ise 1000 kg ham çelik üretmek için, 1250 kg hurda çelik, 16 kg kömür ve 64 kg flaks kullanılmaktadır [28].

Yoğunluğu 3.3-3.6 g/cm³ arasında değişen ham çeliğin elde edildiği proseslerde ortaya çıkan cürufun içerdiği yüksek Fe oranı nedeniyle oldukça sert ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Bünyesinde genel olarak SiO₂, CaO, Fe₂O₃, FeO, Al₂O₃, MgO, MnO, P₂O₅ bileşiklerini barındırmaktadır [28].

3.2.1.1 Yüksek Fırın (YF) cürufu

Yüksek fırınlarda demir cevheri, hurda demir, kok ve flux yapıcılar ergitilerek ham demir üretilirken, maden dışı yan ürün olarak BF cürufu ortaya çıkmaktadır. Amerikan Test ve Malzeme Birliğine (ASTM) göre yüksek fırın cürufu, demir ile aynı anda

ergiyen kalsiyumun ve diğer bazların silikatlarından ve alüminosilikatlarından oluşan metalik olmayan ürün olarak tanımlanır [19,28].

Yüksek fırınlarda hammadde olarak kullanılan demir cevherinin kalitesine bağlı olarak farklı miktarda cüruf oluşmaktadır. Örneğin %60-66 Fe içerikli yüksek kaliteli demir cevherinden yaklaşık olarak ton başına 0.25-0.30 ton cüruf üretilirken, düşük tenörlü demir cevheri kullanıldığında ton başına 1.0-1.2 ton cüruf üretilmektedir [28].

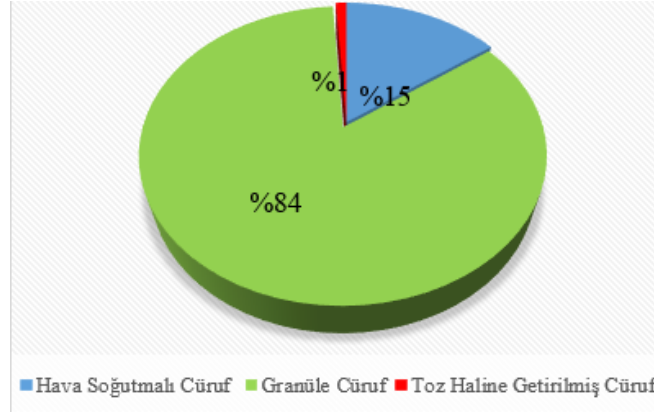
Özellikle yüksek fırınlarda demir ergitme işlemi için CaO ve MgO kaynağı olarak kireçtaşı ve dolomit kullanılır. Demir cevheri doğada genellikle oksitli veya başka metallerin silikatlarıyla birleşmiş halde bulunur. Ergitme esnasında, cevher yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, safsızlıklar erimiş metalden ayrılır ve Flux yapıcı malzemelerdeki bazik oksitlerle birleşerek CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ bileşikleri oluşturur. Birçok ergitme prosesinde, cüruf kimyasını kontrol etmek, yabancı maddelerin uzaklaştırılmasına yardımcı olmak ve fırın refrakter astarını aşınmadan korumak için bu flaks yapıcı oksitler eklenmiştir [28].

Yüksek fırın cüruflarının, kullanılan cevherin türüne, flaks yapıcıların kompozisyonuna, kok tüketimine bağlı olarak kimyasal bileşen oranları değişmektedir. Bu özellikler 4 ana bileşeni (kireçtaşı, silikat, alümina ve magnezyum) ve eser miktardaki diğer bileşenlerin (sülfür, demir ve mangan oksit) oranını etkilemektedir. Ancak genel itibarıyla yüksek fırın cüruflarının Tablo 3.2’de verildiği şekliyle olduğu söylenebilir [28].

Tablo 3.2 Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu [19]

Kimyasal Bileşikler	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S	P ₂ O ₅	Serbest Kireç
% Miktar	30-50	30-40	8-18	0-15	0-1	0-2	0-2	-	-

Ayrıca bu cüruflar soğutulma yöntemlerine göre de 4 farklı gruba ayrılmaktadır. 2008 yılı verilerine göre Avrupa’da ortaya çıkan yüksek fırın cürufunun miktarı yaklaşık 28 milyon tondur. Sekil 3.2’de bu cürufların dağılım oranları görülmektedir.



Şekil 3.2 Yüksek fırın cürüflarının soğutulma yöntemleri [19]

Genleşmiş (Köpüklendirilmiş) Cüruf: Bu metotta sıvı cüruf çukura dökülür ve üzerine kontrollü olarak su, hava ve buhar yollanarak soğutulur. Soğutma esnasında kullanılan yardımcı kaynaklar sayesinde yüksek porozite ve düşük birim hacim ağırlığına sahip olur. Hafif agrega malzemesi olarak kullanılabilir [19].

Hava Soğutmalı Yüksek Fırın Cürufu: Diğer yöntemlere göre uygulaması daha basit olan bu metotta, sıvı cüruf çukurlara dökülerek soğumaya bırakılır. Soğuma neticesinde sert, kristal yapıda ve büyük kütleli katı partiküller elde edilir. Kırma ve eleme ile boyutu küçültülen cüruf, pürüzlü yüzeyi sayesinde yüksek adezyon ve sürtünme özelliklerine sahip, su emme yüzdesi ve dona karşı direnci yüksek bir forma dönüşür [19].

Toz Haline Getirilmiş Cüruf: Sıvı cürufun, santrifüjün merkezkaç kuvvetinden yararlanarak su hava ile soğutulup, parçalanmasıyla elde edilir [19].

Granüle Cüruf: Bu metotta sıvı cüruf üzerine basınçlı su püskürtülür. Bu şekilde hızla soğuması sağlanan cüruf, kristalleşmeye fırsatı kalmadan camsı bir şekilde katılaşır. Öğütme ile çok ince boyutta camsı, puzzolanik tanecikler oluşturulabilir. Bu haliyle kimyasal özellikler bakımından portland çimentosuna oldukça benzer bir yapıya sahip olur [19].

Soğuma koşullarının değiştirilmesiyle, hem kristal yapının büyümesi hem de yapı içinde hapsolmuş gaz partiküllerinin büyüklüğü ve miktarı kontrol edilebilmektedir. Böylece, kullanılan hammaddelerin kimyasal bileşimi göz önüne alınarak, soğutma koşulları cürufun kristal yapısını, yoğunluğunu ve gözenekliliğini belirler. Yüksek fırın cürufu

ağırlıklı olarak CaO, SiO₂, MgO ve Al₂O₃ içerse de, bu kompleks etkileşimler üçlü sistem faz denge diyagramlarıyla temsil edilmektedir [28].

BF cürufunu oluşturan kristalin mineraller, silika ve alümin içeren kalsiyum ve magnezyum oksitlerinin bileşikleridir. Kükürt, sülfatlar ve tiosülfatlar gibi sülfidler ve polisülfidler olarak ve eser miktarda da elemental kükürt halinde bulunur. Demir ve mangan bileşikleri, mangan, titanyum ve flor izleri de eser miktarda bulunur [28].

Soğuma koşulları aynı zamanda fiziksel özellikleri de etkilemektedir. Havada soğutulmuş cüruf, kristalin yapıda olmasına karşın granüle cüruf camsı bir form gösterir. Soğuma koşulları yığın yoğunluğunu da doğrudan etkilemektedir. Yığın yoğunluğu parçacık boyutuna ve sınıflandırmaya bağlıdır; havada soğutma veya genleşmiş cüruflar daha büyük partiküller şeklinde katılaştığı için daha fazla iç hücreye sahiptir ve bu da daha düşük bir yığın yoğunluğuna sahip olmasını sağlar. Kaba boyutlar, aynı dereceli doğal agregalara kıyasla % 20 daha düşük hacim yoğunluğuna sahipken, ince malzeme doğal kumun yoğunluğuna neredeyse eşittir [28]. Tablo 3.3'te BF cürufunun bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.3 Yüksek fırın cürufunun bazı seçilmiş fiziksel özellikleri [19]

Özellikler	Hava Soğutmalı	Genleşmiş	Toz Haline Getirilmiş
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.0-2.5	-	-
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	11.2-13.6	8.0	8.4
Su Emme Yüzdesi	1-6	-	-

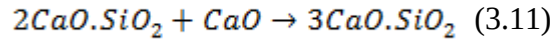
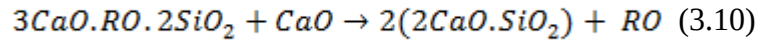
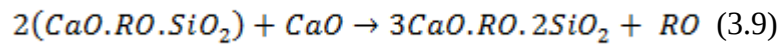
3.2.1.2 BOF cürufu

Bazik oksijen fırının ana girdileri, yüksek fırından gelen sıcak ergimiş demir ham metali, Flux yapıcılar ve hurda çeliktir. BF'den gelen ergiyik metal %70-80 oranındayken, hurda çeliğin oranı silikon ve karbon içeriğine ve ergiyik ham demirin sıcaklığına bağlı olarak değişir. Ayrıca fırına %99.5 safiyetteki oksijen, hammedelerin kolay ergimesi için üflenmektedir [28]. Tablo 3.4'te bazik oksijen fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonunu göstermektedir.

Tablo 3.4 BOF cürufunun kimyasal kompozisyonu [29]

Kimyasal Bileşikler	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S	P	Cr	TiO ₂
% Miktar	30-55	8-20	1-6	5-15	10-35	2-8	0.05-0.15	0.2-2	0.1-0.5	0.4-2

Bazik oksijen fırınında sürekli olarak kireçtaşı eklenmesi sebebiyle ortam pH'sı yüksektir. pH'nın yüksek olması cürufun mineral kompozisyonu değiştirmektedir [28].



Sağ taraftaki ürünler katı cüruf içerisinde bulunur. Değiştirme tepkimelerinin oluşmasının nedeni, CaO'nun bazlık derecesinin bu MgO, FeO ve MnO'dan daha güçlü olmasıdır. Bu nedenle, asit oksitlerin (SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, FeO, Fe₂O₃) ihtiyacını karşılayacak yeterli miktarda CaO varsa, MgO · FeO · MnO (RO fazı) katı çözeltisi kristalleşecektir. BOF çelik cürufları asidik ve bazik olarak iki türe ayrılır. BOF cürufun özgül ağırlığı, sıvı çelik cürufunun yüzey gerilimi ve içerdiği dioksit miktarı ile demirli malzemeler ve poroziteye bağlıdır [28].

3.2.1.3 EAF cürufu

EAF'lerde sıcak metal yerine soğuk hurda çelik ve flaks ana girdi olarak kullanılmaktadır. 1 ton ham çelik üretirken, yaklaşık 40 kg indirgeyici cüruf (reducing slag) ve 70 kg oksitleyici cüruf (oxidizing slag) ortaya çıkmaktadır [28]. Tablo 3.5'te elektrik ark fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonunu göstermektedir.

Tablo 3.5 EAF cürufunun kimyasal kompozisyonu [29]

Kimyasal Bileşikler	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S	P	Cr
Karbonlu Çelikler	35-60	9-20	2-9	5-15	15-30	3-8	0.08-0.2	0.01-0.25	0.1-1
Paslanmaz Çelikler	39-45	24-32	3.0-7.5	8-15	1-6	0.4-2	0.1-0.3	0.01-0.07	0.1-20

EAF cürufları, oksitleyici ve indirgeyici olarak iki türe ayrılmaktadır. BF cürufları ile kıyaslandığında BOF ve EAF cürufları; daha ağır, daha sert, daha yoğundur. Ayrıca parlatma ve aşınmaya karşı dayanımları oldukça yüksektir. Katı çelik cürufu hem blok şeklinde hem de petek şeklinde olabilmektedir [28].

3.2.1.4 PF cürufu

Pota fırınları son kademe sülfür giderme, gaz giderme oksijen, nitrojen ve hidrojen, nihai dekarbürizasyon ve son kademe safsızlıkların giderilmesi işlemlerini içerir. Fırın içine BOF ve EAF'den gelen sıcak ergiyik ham çelik beslenir. Argon gazı, sülfür giderme ajanları (Ca, Mg, CaSi, CaC₂), deoksidizasyon için silikon ve alüminyum eklenir [29]. Tablo 3.6 pota fırın cüruflarının kimyasal kompozisyonunu göstermektedir.

Tablo 3.6 LF cürufunun kimyasal kompozisyonu [29]

Kimyasal Bileşikler	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S	P	Cr
% Miktar	30-60	2-35	5-35	1-10	0.1-15	0-5	0.1-1	0.1-0.4	0-0.5

3.2.2 Demir dışı metallerin üretim cürufları

Bu gruba demir dışında üretimi yapılan metallerin cürufları ile birlikte metalürjik olmayan cüruflar girmektedir. Demir dışı metal cürufları genellikle, demir ve çelikten daha pahalı olup, daha kullanılabilir malzeme grubudur. Çünkü pek çok eşsiz özelliğe

sahiptir. Örneğin, yüksek iletkenlik ve dövülebilme yeteneği olan bakır, korozyona karşı direnci yüksek nikel ve çinko bu gruba girmektedir. Demir dışı üretimi yapılan metallerin, üretim prosesleri genellikle birkaç kademe içermektedir ve bu sebeple farklı kimyasal ve fiziksel özellikte cüruflar oluşabilmektedir [30-31].

3.2.2.1 Bakır üretim cürufları

Bakır metali, dünya üzerinde en sık kullanılan metallerden biri olup, demir ve alüminyum takiben en çok bulunan 3 metal konumundadır. Cevherden metale geçişinde hem pirometalurjik hem de hidrometalurjik yöntemler kullanılabilir. Pirometalurjik işlemlerde, ergitme esnasında cüruf oluşarak sistemden uzaklaştırılmaktadır. Ergitme esnasında demir oksit ve silisyum oksit bileşimli ergiyik sıvı cüruf, konsantreden ayrılır. Tablo 3.7 bakır cürufunun kimyasal içeriğini göstermektedir [30].

Tablo 3.7 Bakır cürufları kimyasal analizi [30]

Bileşik	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Miktar, %	30-45	30-40	5-10	2-6	2-4

Soğutma yöntemlerine göre farklı özellik kazanan bakır cürufları, granüle edildiğinde daha gözenekli bir yapı haline gelirler böylece daha düşük özgül ağırlık ve yüksek su emme yeteneği kazanırlar [30].

3.2.2.2 Nikel üretim cürufları

Nikel, çelik endüstrisinde korozyona karşı dirençli olması, yüksek sıcaklıkta oksidasyona uğraması ve kimyasal olarak güçlü bir stabiliteye sahip olması sebebiyle kendine oldukça geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Genelde cevherinden zenginleştirilir ancak, azalan kaynaklar sebebiyle ikincil üretimi de yaygınlaşmıştır. Tıpkı bakır gibi, pirometalurjik süreçte zenginleştirilirken, ergitme işlemi esnasında, cürufunu uzaklaştırır [30].

Kimyasal kompozisyonu göz önüne alındığında oldukça fazla silikat içeriği göze çarpar. Tablo 3.8 nikel cürufunun kimyasal kompozisyonunu göstermektedir [30].

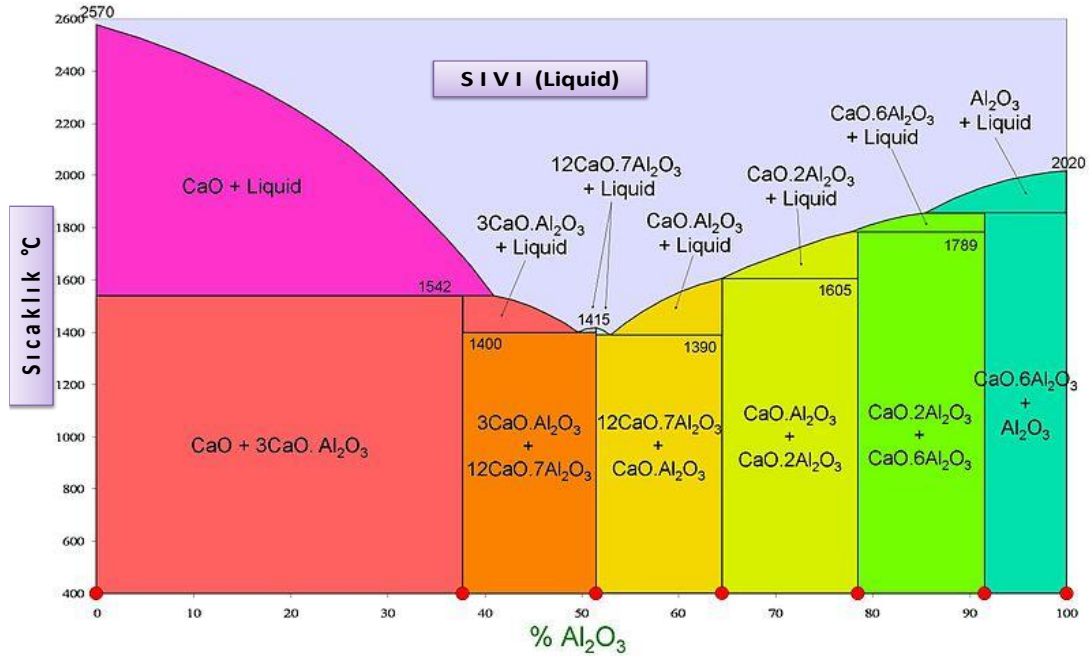
Tablo 3.8 Nikel cürufları kimyasal analizi

Bileşik	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Miktar, %	29-50,5	29-50,5	<0,10	1,8-3,96	1,56-26,7

3.2.2.3 Alüminyum üretim cürufları

Aluminyumun cevherden veya hurdadan elde edilmesine ve kullanılan flakslara bağlı olarak içerdiği tuzlar nedeniyle Beyaz ve Siyah gibi sıfatlarla tanımlanan Aluminyum Cüruflarında %30-60 oranında Al₂O₃ bulunur. Ayrıca % 10-20 oranında Metalik Aluminyum, Demir Oksit, SiO₂, CaO ve diğer oksitler de içerir. Elde etme metoduna bağlı olarak Klor (Cl) ve Flor (F) bulunabilen Aluminyum Cürufları dikkatli kullanılmalıdır. Günümüzde, bu cüruflar yıkama işlemine tabi tutularak Tuz Giderme yapılmaktadır [30].

Gerek % 50-60'ı bulan Al₂O₃, gerek zengin (% 10-20) Metalik Aluminyum barındırması dolayısıyla Aluminyum Cürufları Demir Çelik Üretiminin ikincil metalurjik işlemleri sırasında deoksidan ve cüruf inceltici olarak kullanılmakta ve kükürt gidermede kullanılmaktadır. Pota fırınlarında rafinasyon işlemleri sırasında Kireç (CaO) ile birlikte kullanılan Aluminyum Cürufu, çelik cürufunun erime sıcaklığını düşürerek cürufun sıvılaşmasını sağlar, akışkanlığını artırır. Tek başına erime sıcaklığı 2570° C olan CaO ve tek başına erime sıcaklığı 2020° C olan Al₂O₃ %50-50 olarak çelik cürufunda bulunduğunda cürufun erime sıcaklığı 1415° C'ye düşer. Böylelikle sıvı faza geçen ve akışkanlığı artan, dolayısıyla kıvamı azalarak hareket kabiliyeti artan cüruf, hem temiz çelik yapımında hem kükürt (S) giderme kinetiğinde aktif rol oynar [30]. Şekil 3.3 CaO- Al₂O₃ faz diyagramını göstermektedir.



Şekil 3.3 CaO - Al₂O₃ faz diyagramı

4. EAF CURUFLARI ÖZELLİKLERİ VE DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Bu bölümde EAF cüruflarının çelik üretimindeki payından ve değerlendirme yöntemlerinden bahsedilecektir.

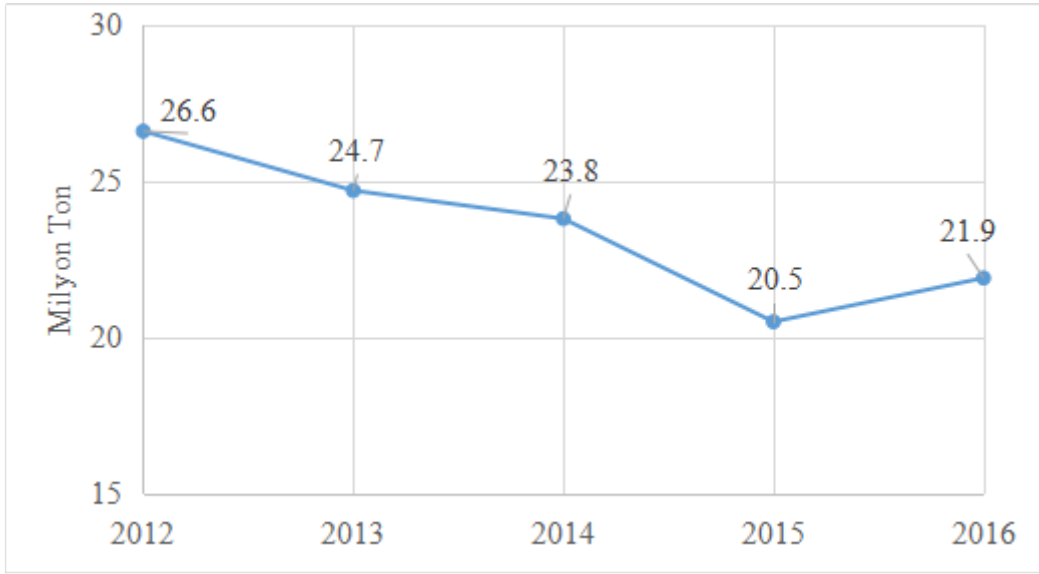
4.1 EAF Cürufları Özellikleri

Çelikhane cürufu, çelik üretimi esnasında çelik içerisindeki empüritelerin oksidasyonu sonucu oluşan oksit ve silikatların oluşturduğu kompleks bir kimyasal yapıya sahip, büyük çoğunluğu metalik olmayan bileşiklerden oluşan, bir atık veya yan üründür. Fiziksel olarak koyu gri renkte, tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptir [33].

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi Türkiye'nin ham çelik üretimi, 2016 yılında bir büyüme gerçekleştirerek 33.2 milyon tona yükselmiştir. Bu üretimin yaklaşık olarak %66'sı, 21.9 milyon ton, EAF tesislerinde üretilirken geri kalan %34'lük kısmı BOF tesislerinde üretilmektedir [1].

Yıllara göre EAF ile çelik üretim değerleri çeşitli dalgalanmalar yaşamıştır. Tablo 4.1'de yıllara göre üretim dağılımları görülmektedir.

Şekil 4.1 EAF ile ham çelik üretiminin yıllara göre dağılımı [1]



Elektrik ark fırınlarında 1 ton ham çelik üretimi sırasında yaklaşık olarak %10-20 arasında atık oluşmaktadır [33]. Türkiye’de bulunan 33 tesisten 25’i EAF ile üretimlerini sağlamaktadır. 2016 yılı verilerine dayanarak Türkiye’deki EAF tesislerinden yaklaşık olarak 5 milyon ton cüruf olduğu görülmektedir. Prosesler boyunca kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan oksitlerden gaz halinde olanlar, sıvı çelik banyodan uzaklaştırılarak yanma odalarında toplanır. Sıvı halde olanlar ise ilave edilen katkı malzemeleri (kireç, dolomit, vs.) ile birleşerek cürufu oluştururlar [33].

Yapılan çalışmalar neticesinde EAF cürufları, BOF ve BF cüruflarına göre içerdiği metaller bakımından Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğinde belirtilen değerler ile kıyaslanmış ve değerlendirme sonucu cürufun ayrışmayan ve inert olarak muamele görecektir atıklar sınıfına girdiği görülmüştür (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 Cürufun atık yönetmeliğindeki değerlerle karşılaştırılması

Eluat Kriterleri, L/S = 10 Lt/kg	İnert atık olarak muamele görececek atıklar, mg/l	Tehlikesiz atık olarak muamele görececek atıklar, mg/l	Tehlikeli atık olarak muamele görececek atıklar, mg/l	Cüruf
Arsenik	≤ 0.05	0.05-0.2	$< 0.2-2.5$	-
Baryum	≤ 2	2-10	$< 10-30$	-
Kadmiyum	≤ 0.004	0.004-0.1	$< 0.1-0.5$	-
Krom	≤ 0.05	0.05-1	$< 1-7$	0.04
Bakır	≤ 0.2	0.2-5	$< 5-10$	0.059
Cıva	≤ 0.001	0.001-0.02	$< 0.02-0.2$	0.001
Molibden	≤ 0.05	0.05-1	$< 1-3$	-
Nikel	≤ 0.04	0.04-1	$< 1-4$	0.036
Kurşun	≤ 0.05	0.05-1	$< 1-5$	0.049
Kalay	≤ 0.006	0.006-0.07	$< 0.07-0.5$	-
Selenyum	≤ 0.01	0.01-0.05	$< 0.05-0.7$	-
Çinko	≤ 0.4	0.4-5	$< 5-20$	0.006
Klörür	≤ 80	80-1500	$< 1500-2500$	16
Florür	≤ 1	1-15	$< 15-50$	0.82
Sülfat	≤ 100	100-2000	2000-5000	74.47
Toplam Çözülmüş Katı	≤ 400	400-6000	6000-10000	128

Tane boyutu genellikle mikron mertebesinde olan bu cürufların, ortalama tane boyutu 1.0-4.3 μm boyutundadır. İçerdiği fazlar tablo 4.3'te verilmiştir [33].

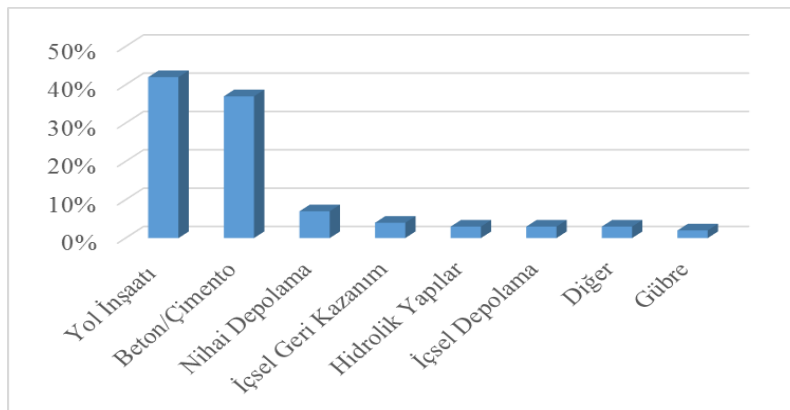
Tablo 4.2 EAF cüruflarının içerdikleri mineral grupları [33]

Tanımlanmış faz	Kimyasal kompozisyon	Tanımlanmış faz	Kimyasal kompozisyon
Dikalsiyum silikat-kalsiyum fosfat	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Magnezovüstit	$(\text{Mg,Fe,Mn,Ca})\text{O}$
Dikalsiyum silikat	Ca_2SiO_4	Dikalsiyum ferrit	$\text{Ca}_2(\text{Fe,Al})_2\text{O}_5\text{-Ca}(\text{Ti,Si})\text{O}_3$
Trikalsiyum silikat	$(\text{Ca,Mg,Mn,Fe})_3\text{SiO}_5$	Magnetit	Fe_3O_4
Vüstit	$(\text{Fe,Mg,Ca,Mn})\text{O}$	Kalsiyum ferrit	CaFe_2O_4
Mervenit	3CaO.MgO.2SiO_2	Kireç (Lime)	$(\text{Ca,Mg,Mn})\text{O}$
Brownmillerit	$2\text{CaO.Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{FeO}$	Florospar	CaF_2
Larnit	2CaO.SiO_2	Hatrurite	3CaO.SiO_2
Spinel	$(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$		

4.2 Değerlendirme Yöntemleri

Bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi çelik cürufları kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bu bölümde bu alanların detaylandırılması yapılacaktır. Tablo 4.4 Avrupa’da cüruf değerlendirme alanlarının yüzde dağılımlarını göstermektedir.

Tablo 4.3 Çelik cüruflarının Avrupa’da kullanım alanları [33]



Çelik cürufunun içerdiği minerallere göre farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan çelik cürufları çeşitli alanlarda değerlendirilebilmektedir. Tablo 4.5, özelliklerine göre çelik cüruflarının nerelerde kullanılabileceğini göstermektedir [33].

Tablo 4.4 Cürufların özelliklerine göre kullanım alanları

Çelik cürufunun özellikleri	Kullanım alanları
Sert, aşınmaya dayanıklı, adhezif ve pürüzlü	Hidrolik yapılarda ve yol inşaatlarında agrega olarak
Poroz ve alkali	Su arıtma işlemlerinde
Yapısında FeO_x ve Fe bileşenlerini içermesi	Demir ıslah çalışmalarında
Yapısında CaO, FeO, MgO, MnO bileşenlerini içermesi	Flux yapıcı olarak
Yapısında çimentomsu bileşenler (C_2S , C_3S ve C_4AF) içermesi	Çimento ve beton yapımında
Yapısında CaO, MgO bileşenlerini içermesi	CO_2 yakalama ve baca gazı desülfürizasyonunda
Yapısında FeO, CaO ve SiO_2 bileşenlerini içermesi	Çimento klinkeri yapı malzemesi olarak
Yapısında gübre bileşenlerini (CaO, MgO, FeO ve SiO_2) içermesi	Gübre olarak ve toprak iyileştirmesinde

2010 yılı verilerine göre Çin, 626.7 milyon ton çelik üretirken bunun yanı sıra 90 milyon ton da cüruf üretmektedir. Ancak bu cürufların yalnızca %22'sini değerlendirmektedir. USA, Japonya, Almanya ve Fransa gibi gelişmiş ülkelerde cürufların yeniden kullanım oranı neredeyse %100'lere ulaşmaktadır. Bu gelişmiş ülkelerde, oluşan cürufların yarısı yol yapım projelerinde değerlendirilirken, geri kalan %50'lik kısmı ise entegre tesislerde sinter malzemesi olarak ve demir çelik tesislerinde geri dönüşüm malzemesi olarak değerlendirilir [33].

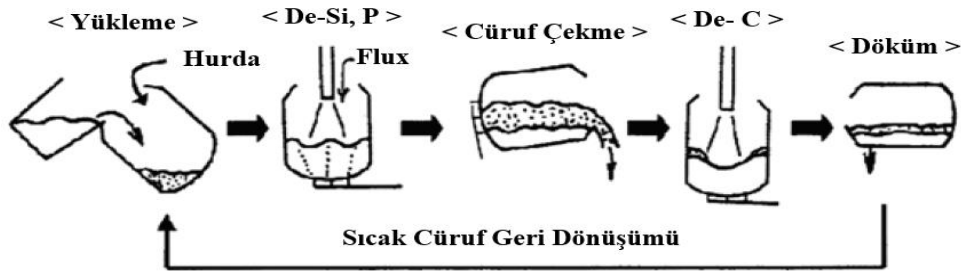
4.2.1 Temel işlemler

Çelik cürufları içerisinde % 10-15 oranında atık çelik barındırmaktadır. Bu sebeple atık çelik ıslah çalışmaları cürufların değerlendirilmesi açısından oldukça önemli bir

metottur. Çelik cürufları içerisindeki bu atık çelik, kırma, sınıflandırma, manyetik seperasyon ve ayırma işlemlerini takiben geri kazanılabilmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde bu konuda çalışmalar oldukça yaygındır. Amerika Birleşik Devletleri 1970-1972 yılları arasında 3.5 milyon ton çelik geri kazanımı yaparken Japonya 2 milyon ton cürufun ıslah çalışmaları neticesinde %95 Fe içerikli 0.18 milyon ton demir parçacığı geri kazanmıştır. Çin ise sınıflandırma, manyetik ayırma ve gravite zenginleştirilmesi işlemleri ile yılda %60-65 Fe içerikli 0.28 milyon ton ve % 50 Fe içerikli 0.4 milyon ton demir konsantresi geri kazanmaktadır [33].

Öte yandan PF cürufları, %50'den daha fazla CaO içeriği sebebiyle özellikle sinterleme işlemleri sırasında flaks yapıcı olarak kireç yerine kullanılabilmektedir. Sinterleme sırasında cüruf ilavesi hem kaliteyi artırır gibi hem Fe ve FeO arasındaki oksidasyon reaksiyonu sırasında ortaya çıkan ısı sebebiyle yakıt tüketim oranını da azaltmaktadır. Bu avantajları ile sinterleme maliyetlerini de azaltmaktadır. Pek çok ülke çelik cüruflarını bu yönde değerlendirmektedir. Örneğin, USA %56'dan daha fazla bir oranda çelik cürufunu flaks yapıcı ajan olarak kullanırken, Çin 1996'dan bu yana 15.000 ton cürufu bu doğrultuda değerlendirmiştir [33].

Cürufların çeşitli arıtma işlemlerinde kullanılması da bir başka değerlendirme metodu olarak sayılabilmektedir. Nippon Çelik Corporation tarafından geliştirilen MURC (Multi Refining Convert - Çoklu Arıtma Konvörteri) prosesi ile aynı konvertörde hem defosforizasyon hem de dekarbürizasyon yapılmaktadır. Bu proseste dekarbürizasyon işleminden sonra %50 oranında cüruf konvertör içinde bırakılır ve bir sonraki şarj ile birlikte defosforizasyon ve desilikonizasyon işlemleri için sıcak geri kazanım yapılmaktadır. Bu yöntem ile hem defosforizasyon işleminin verimi artırılmaktadır hem de CaO tüketimi azalmaktadır. Şekil 4.1'de prosesin akım şeması görünmektedir [33].



Şekil 4.2 : MURC Prosesi Akım Şeması [33]

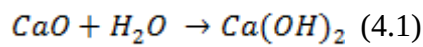
4.2.2 Yol yapımında kullanımı

Çelik cürufları, bulk yoğunluğunun yüksek olması, mukavemet ve dayanımının yüksek aynı zamanda stabil bir malzeme olduğu için yol yapımında yapı malzemesi olarak veya hidrolik proseslerde kullanılabilir. Ayrıca sürtünme ve abrazyon dayanımının yüksek olması sebebiyle asfaltik yüzey döşemelerinde doğal agrega yerine tercih edilebilir. İyi bağlanma özelliği sayesinde, tanelerin birbirine daha sıkı kenetlenmesine yardımcı olarak, asfalt yapımında tekerlek izi oluşum dirençlerini iyileştirmektedir. Kaymaya karşı gösterdiği direnç ile arabaların yola daha sıkı tutunmasını ve dolayısıyla daha güvenli bir sürüş sağlamaktadır. Ayrıca yine tanelerin birbirine sıkıca kenetlenebilme özelliği sebebiyle yüksek sıcaklık altında dahi, asfaltın kalıcı bir deformasyona uğramasını engellemektedir [34].

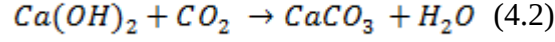
Ancak yol ve yapı malzemesi olarak kullanılacak çelik cüruflarının CaO ve MgO içerikleri oldukça kritik bir önemdedir. Çelik cürufları içerdikleri serbest CaO ve MgO sebebiyle poroz bir yapıya sahip olma özelliğine sahiptir. Özellikle serbest CaO, zamanla genişerek malzeme içinde boşluk yaratma gibi, nihai kullanımda büyük sorun yaratacak özelliktedir. Suyla teması ile hacimsel olarak %10 büyümeye gerçekleştirebilmektedir. Bu sebeple yol yapımında kullanılmadan önce, bu serbest oksitlerin yaratabileceği problemler elimine edilmelidir [35].

Bunun için yapılan ilk uygulama, cürufun nihai ürün olarak kullanımından önce, atmosferik koşullarda bekletilmesi ve ayrıca yapay yağmurlamaya maruz bırakılmasıdır. Bu bekletme süresi içinde, serbest oksitler havayla temas ederek genişlemelerini tamamlamaktadır. Böylece kullanımı sırasında genişmeye bağlı oluşabilecek problemlerin önüne geçilmektedir. Bu bekletilme süresi, cürufun içerdiği serbest CaO ve MgO miktarına ve nihai ürün olarak nerede ne şekilde bir proseste kullanılacağına bağlı olarak birkaç süresinde olabilmektedir [35].

Ayrıca cürufun bünyesinde CaO bulundurması, su ile karşılaşması esnasında kalsiyum hidroksit oluşturmasını sağlamaktadır [35].



Oluşan bu Ca(OH)_2 yine atmosferik koşullarda CO_2 ile reaksiyon vererek kalsiyum karbonat oluşturur [35].



Oluşan bu kalsiyum karbonat, beyaz bir katı olarak çöker ve drenaj sistemlerini tıkar. Bu katı çökelti, özellikle kaldırım taşlarında donarak büyük tehlike oluşturmaktadır. Kalsiyum karbonat oluşumunun önüne herhangi bir tedbirle (havada bekletme) geçilemediği için, cürufun yol yapımında kullanılabilmesi için, bünyesinde %1'den daha az olması şartı aranmaktadır [35].

Yapılan araştırmalar, çelik cürufunun yol ve hidrolik malzeme olarak kullanımının dünyada oldukça yaygın olduğunu göstermektedir. Almanya'da yılda 400.000 ton cürufun nehir yataklarında erozyonu önlemek için agrega malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yine ayrıca Japonya, yılda ürettiği çelik cürufun ortalama %60'ını yol yapım malzemesi olarak kullanmaktadır [33].

4.2.3 Çimento üretiminde kullanımı

C3S, C2S ve C4AF yapıları cürufun çimento yapımında kullanılmasını sağlayan en önemli unsurlardır. Ayrıca asitliğinin düşmesi, daha bazik bir yapıda olması da yine cürufun hem çimento üretiminde hem de tuğla yapımında kullanılabilirliğini arttırmaktadır. Çeşitli araştırmalar, uçucu kül, çelik cürufu ve çimento yapıcıların uygun oranda karıştırılmasıyla boşluk dağılımının kontrol edilebildiği ve porozitenin azaltılabildiği çimento birleşiminin yapılabilirliğini kanıtlamıştır [33]. Bu konuyla ilgili olarak, gerçekleştirmiş olduğum teknik çalışmalardan oluşan deneyimlerim bölüm 5.4'de detaylı olarak anlatılmıştır.

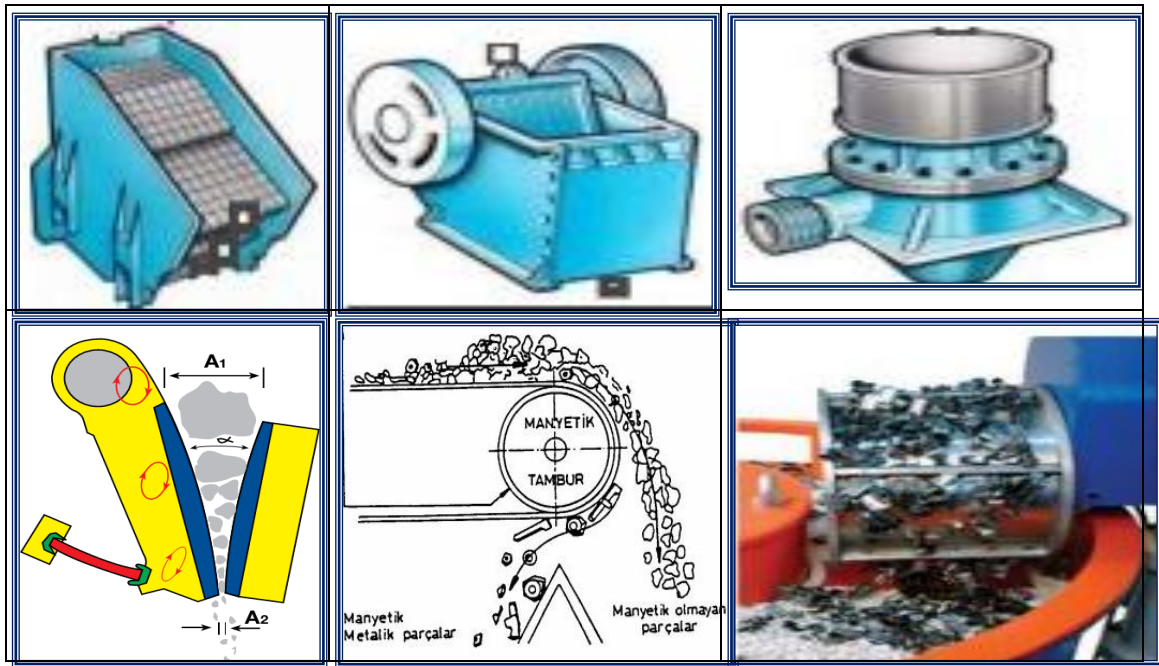
5. ENDÜSTRİYEL ÇALIŞMALAR

5.1 Cüruf Tesisi Kurulumu

Cüruf Tesisi ile Çelik Geri Kazanım ve Kıрма-Eleme Tesisi kurularak atık olarak bertaraf edilmekte olan cürufların atık bertaraf maliyetlerinden kurtulmak yanında,

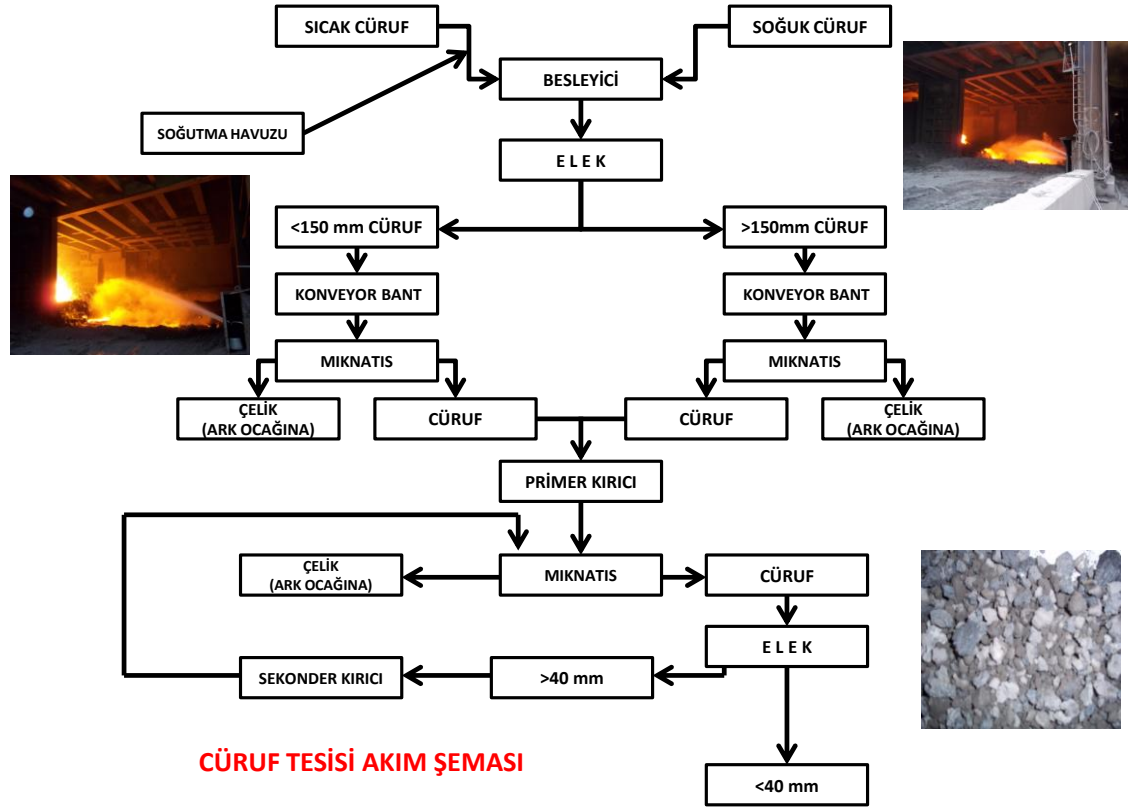
ayrıca cüruf içinde kaybedilen ağırlıkça yaklaşık % 10-15 olan çelikler magnetik ayırma yöntemi ile geri kazanılmıştır.

Cüruf Tesisleri, çelikhane üretim esnasında, EAF ve PF proseslerinde yan ürün/atık olarak oluşan çelikhane cürufunun; kırma, eleme, manyetik ayırma ve öğütme gibi çeşitli fiziksel işlemlerden geçirilerek, cürufun ihtiva ettiği çelik ve demirli bileşikler içeren parçaların çelikhane üretimine geri kazandırıldığı ve geriye kalan cürufun, mıcır gibi dolgu malzemesi olarak kullanıma uygun hale ve boyutlara getirildiği tesislerdir. Şekil 5.1’de kullanılan çeşitli makinalar görülmektedir.



Şekil 5.1 Tesislerde kullanılan makinalar

Tesisi oluşturan makine ve teçhizatlar; primer ve sekonder kırıcılar, değirmen, doğal ve/veya elektro-mıknatıslar, konveyör bantlar ve elektrik/elektronik kumanda ekipmanlarıdır. Tesislerde ayrıca depolama siloları, bunkerler, vibro-besleyiciler de bulunmaktadır. Bu tip tesislere ait genel akım şeması Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2 Akım şeması

- Çelikhane cürufunda bulunan kıymetli demir içeriklerin (çeliğin) atık olarak işlem görmesinin ve buna bağlı ekonomik kaybın engellenmesi ve çelik üretiminde EAF’de yeniden hammadde olarak kullanılabilmesi,
- Zor ve maliyetli olan bertaraf veya cüruf depolama işlemi yerine, cürufun ürün haline getirilerek tahliye edilebilmesi,
- Sınırlı doğal kaynakların hızlı tüketiminin önlenmesi ve enerji tasarrufu
- Atıkların neden olduğu çevre problemlerine bir ölçüde çözüm getirilmesi de böylelikle sağlanmış olmaktadır.

5.2 Grit Yapımı

Çevre Bakanlığı, Tersanelerde gemi yapımında çelik sac yüzeylerde aşındırıcı yüzey temizleme (raspa) malzemesi olarak kullanılmakta olan ve Yunanistan’dan ithal edilen olan Nikel Curuflarından elde edilmekte olan Grit adı altında tehlikeli atıkların ithalat yoluyla ülkemize girişinin engellenmesi amacıyla, Türkiye’de Çelik Cüruflarından Grit

elde edilmesinin araştırılmasını Demir-Çelik üreticisi kuruluşlardan talep etmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü ile yapılan ortak çalışma ile pilot ölçekli bir Kıрма-Eleme tesisi kurulmuş ve

- 0-500 mikron arası toz olması nedeniyle ayrılmış, kullanılmamıştır,
- 0,8 – 2,2 mm arası parçalar Grit olarak kullanılmıştır,
- 2,2 mm'den büyük parçalar tekrar Kıрма-Eleme'ye gönderilmiştir.

0,8 – 2,2 mm arası boyutlarda Gritler Tuzla/İstanbul'da Sedef Tersanesinde denenmiştir. Köşeli tane yapılarına sahip olmaları nedeniyle gemi saçlarının yüzey temizleme işleminde SA 2 ½ kalitesinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, saç yüzeyde;

- Elektrik Ark Ocağı'nda çelik üretimi sırasında ocak refrakterinin aşınmasını arttıran asidikliği azaltmak/bazikliği arttırmak ve Fosfor (P) gidermek amacıyla hurda şarjına ilave edilen Kireç'in (CaO) tam olarak erimemesi nedeniyle BEYAZ, ve
- Cürufıta bulunan FeO miktarını azaltarak Demir kaybını en aza indirmek ve kimyasal kompozisyonda Karbon (C) miktarını amaçlanan seviyeye getirmek için sıvı metal banyoya hava ile enjekte edilen Kömür'ün tam olarak erimemesi nedeniyle de SİYAH

Noktalar oluşmuştur. Toplam sayıları yaklaşık 3-5 adet/m²'yi geçmeyen bu Beyaz (CaO) ve Siyah (C) noktaların, raspalama işlemi sonrasında boyanın saç yüzeye yapışmasına olası olumsuz etkileri ve boya dayanım ömrünü azaltacak olması nedeniyle uygulanmasında sakınca görülmüştür. Çözüm olarak yıkayarak bu empüritelerden kurtulma ve kurutma konusu üzerinde çalışılmış, ancak maliyetin yüksek olduğu değerlendirilmiştir.

5.3 PF Cürufunun Ark Ocaklarında Kireç Yerine Kullanılması

Pota Fırını cürufılarının Elektrik Ark Ocaklarında Kireç ikamesi olarak kullanılması amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Pota fırını cürufılarında yüksek miktarda bulunan

(yaklaşık % 50) Kalsiyum Oksit'in (CaO) değerlendirilmesini amaçlayan bu çalışmada tablo 5.1'deki kimyasal kompozisyonlara haiz cürufklar kullanılmıştır:

Tablo 5.1 Cüruf kimyasal kompozisyonu

	%CaO	%FeO	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%MgO	%S	Baziklik
	52,82	1,67	19,61	13,64	6,88	0,84	2,69
	49,82	3,53	24,60	11,67	6,14	0,62	2,02
	50,97	2,32	10,32	15,89	6,76	0,92	4,94
	49,14	5,68	16,27	17,23	6,66	1,16	3,02
	52,55	2,93	11,97	22,35	7,46	1,09	4,39
	46,01	2,24	24,03	14,34	6,78	0,41	1,92
	48,37	1,54	18,28	12,80	6,29	1,25	2,65
	48,52	2,45	19,21	13,12	6,39	0,82	2,53
ORT.	50,06	2,75	18,10	14,99	6,62	0,89	3,00

Pota fırını cürufkları yüksek Kalsiyum Oksit (CaO) ihtiva ettiklerinden katılaşma sonrası toz olmakta, % 50'sinden fazlası 300-500 mikron tane büyüklüklerindeki bu tozların yüklenmesi, nakliyesi, boşaltılması ve depolanması işletmelerde problem olmaktadır. Özellikle ıslak ortamlarda ve yağışlı havalarda sorunlar artmaktadır. Şekil 5.3'te işlenmiş ve işlenmemiş pota fırını cürufklarına ait görüntüler yer almaktadır.



Şekil 5.3 İşlenmiş ve işlenmemiş pota fırını cürufklarına ait görüntüler

Bu soruna alternatif bir çözüm aramak için bağlayıcı olarak % 20 Melas kullanılarak elde edilen karışım döner preslerde soğuk briketlenmiştir. Elde edilen briketler ark ocağına şarj edilmiş ve o dökümde kireç kullanılmamıştır.

Kullanım sonunda elde edilen değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir. İzabe sırasında hurdanın erimesinde problem yaşanmış, köpüklü cüruf yapılamamıştır. Enerji, fosfor, kükürt, değerleri ve cüruftaki FeO değeri ortalamanın üzerine çıkmıştır. Tablo 5.2’de tesis değerleri görülmektedir.

Tablo 5.2 Tesis değerleri

	Normal Çalışma Ortalama Değerleri	Deneme Döküm Verileri
Şarj Sayısı	2	3
Kireç	0 kg	0 kg
Dolomitik Kireç	10.000 kg	3.000 kg
Briket PF Cürufu	0 kg	15.000 kg
%FeO	34,89 %	40,81 %
%CaO	21,49 %	19,82 %
%SiO₂	15,92 %	16,86 %
%Al₂O₃	7,18 %	7,83 %
%MgO	7,51 %	6,23 %
Çelikteki % S	0,051-0,070 %	0,076 %
Çelikteki % P	0,022 %	0,030 %
Oksijen Kullanımı(Nm³)	41,42	48,70
Enerji (kWh/t)	345,18	355,00

5.4 EAF Cürufunun Çimento Üretiminde Kullanımı

Çimento üretiminde % 10’a varan oranlarda Demir Cevheri kullanılmaktadır. Demir Oksit bileşiği için kullanımı zorunlu olan bu malzeme yurtdışı firmalardan ithal edilmekte ve döviz ödenmektedir. Çimento üretiminde kullanılan demir cevherinde

yaklaşık % 60-65 oranında FeO bulunmaktadır. Bunun EAF cürufu tarafından sağlanabileceği düşüncesinden hareketle çimento üreticileri ile ortak çalışmalar yapılmıştır. Burada iki önemli sorun ortaya çıkmıştır. Birincisi, % 35-55 civarında olan EAF cürufunun FeO oranları cevherin FeO oranlarına göre daha düşük olduğundan o oranda fazla kullanılması gerekmektedir, ancak EAF cürufunun ekonomik olması nedeniyle göz ardı edilmektedir. İkincisi, çimento üretiminde hammadde öğütme işlemlerinde kullanılan Farin değirmenlerde EAF cürufu içinde bulunabilen metalik demir ve çelikler fırın ekipmanlarında hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle EAF cürufunun magnetik ayıklama işlemlerinin çok iyi yapılması gerekmektedir.

Tablo 5.3’de bir çimento fabrikasının girdisi ile EAF cürufu kimyasal kompozisyonları karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 5.3 Çimento üretiminde Fe₂O₃ kaynakları kimyasal analizleri karşılaştırması

	Nem	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Cr ₂ O ₃	KK	Toplam
Demir Cevheri	12,48	22,45	3,92	64,17	0,45	0,10	0,60	0,04	0,22	0,012	0,00	5,89	97,85
Demir Cürufu	3,80	11,91	6,10	44,57	23,61	6,01	0,37	0,18	0,05	0,07	1,31	0,00	96,35

Çimento üreticisi kuruluştan alınan bilgiye göre; Cürufun, çimentonun dayanıklılığına ve performansına etki eden LSF, SM, TM, C3S ve C3A parametrelerine olumsuz etkisi olmamıştır.

Çimentonun donma süresini etkileyen C3A modülünü etkilemediği için donma başlangıç ve bitiş sürelerinde büyük dengesizlikler görülmemiştir.

Tablo 5.4’de Klinker analizindeki değerlerin karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 5.4 Klinker kimyasal analizleri karşılaştırması

	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	KST	SM	TM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Demir Cevheri	3,89	65,32	0,24	1,03	91,26	2,48	1,21	52,47	21,44	5,86	11,85
Demir Cürufu	3,84	65,44	0,33	0,83	93,82	2,48	1,22	58,86	15,99	5,87	11,69

Çimento mukavemetlerini etkileyen C₃S ve LSF modülleri de etkilenmemiştir.

Böylece, çimento üreticileri için cüruf kullanarak Fe₂O₃ temin edilmiş ve maliyet avantajı sağlanmış, çelik üreticileri içinse ürün olarak değerlendirilmiştir.

5.5 Cüruftaki Demir Oksit Değişimlerinin İncelenmesi

Literatür çalışması sonucunda değişik makale ve kaynaklar incelenmiş olup EAF cüruflarının kimyasal kompozisyonlarının Tablo 5.5 de yer aldığı şekilde olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 5.5 Değişik kaynaklarda verilen cüruf kompozisyonları

Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	Serbest CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	S
40		28	1	15	8		6	0,3	0,1	0,4			0,4	
30		33		10	2	6	13	0,02	0,06					
	25	42		12	1	4	5							0,5
10	14	41	4	15	4	5	8	0,05	0,4		0,72	1,2		
	30	26		14	6	6	3	0,3				0,6		
	30	35		20	6	7	6							
7	18	46		15	2	6	7					0,8		0,1
	24	42		15	3	5	8					0,8		
30		31		18	10	1	9				0,85	0,67		0,05

Bir demir çelik kuruluşumuzda bir güne ait EAF cüruf kimyasal kompozisyonları tablo 5.6'da görülmektedir.

Tablo 5.6 Bir güne ait EAF cüruf kimyasal kompozisyonları

%	CaO	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	S
1	25,0	34,2	17,0	7,8	6,0	4,5	1,8	0,050	0,013	0,59	0,5	0,005
2	25,7	33,5	17,7	8,0	6,3	4,5	1,8	0,051	0,016	0,60	0,5	0,002
3	22,0	39,0	16,7	8,0	6,5	4,3	1,8	0,050	0,012	0,58	0,5	0,006
4	23,0	34,9	17,4	7,5	7,0	2,6	1,7	0,050	0,014	0,63	0,5	0,003
5	19,0	37,0	14,8	6,5	5,8	4,5	1,6	0,050	0,017	0,56	0,4	0,006
6	22,3	35,6	16,6	6,8	6,5	4,3	1,5	0,050	0,018	0,63	0,4	0,003
7	27,2	28,8	17,8	7,2	7,6	4,4	1,2	0,040	0,003	0,75	0,5	0,004
8	27,0	32,2	17,0	6,3	7,2	3,9	1,2	0,040	0,004	0,65	0,5	0,003
9	23,0	38,8	16,4	7,2	6,5	4,7	1,6	0,050	0,011	0,58	0,4	0,00
10	21,2	35,4	18,1	7,3	7,2	4,7	1,6	0,060	0,048	0,60	0,4	0,005
11	21,0	37,8	19,1	7,0	6,4	4,5	1,5	0,080	0,039	0,62	0,4	0,010
ORT	23,3	35,2	17,1	7,2	6,6	4,3	1,6	0,052	0,018	0,62	0,5	0,005

Aynı tesiste yer alan 500 değişik dökümün EAF cüruf kimyasal kompozisyonlarının ortalamaları tablo 5.7’de görülmektedir.

Tablo 5.7 Bir aya ait ortalama EAF cüruf kimyasal kompozisyonları

CaO	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	S
24,7	32,8	17,1	7,2	6,8	5,3	0,762	0,054	0,031	0,61	0,508	0,030

Görüldüğü gibi bir günlük ve bir aylık değerler birbirlerine yakın gibi gözükse de küçük ama anlamlı değişiklikler olabilmektedir. Burada en önemli parametre kuşkusuz kullanılan hurdadır. Ancak özellikle Demir Oksit’i (FeO) etkileyen en önemli etken üretim hızı olarak karşımıza çıkmaktadır. Firma üretimlerinin arttığı dönemlerde FeO % 50’lere kadar çıkabilmektedir.

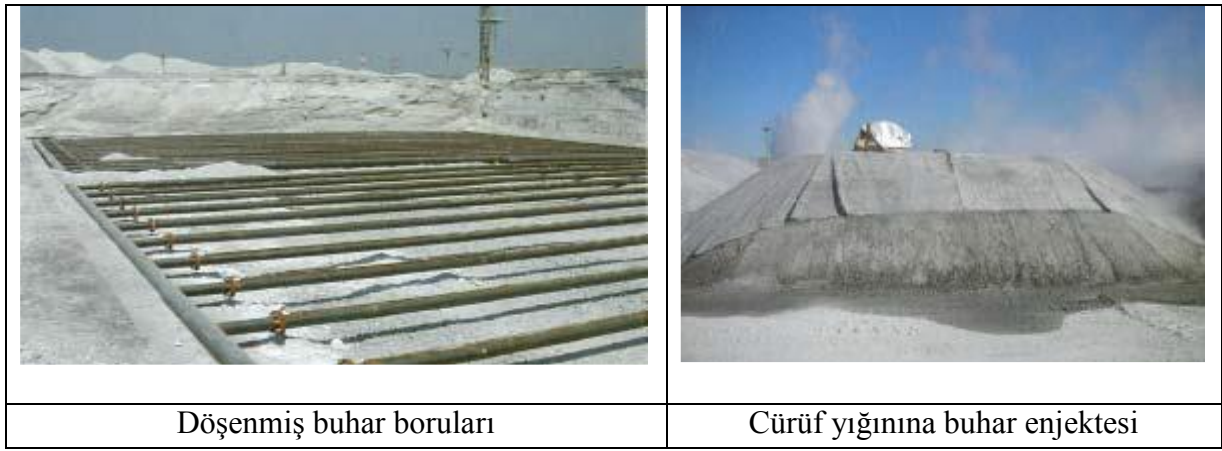
5.6 Serbest Kireç Japonya Uygulamaları

Japonya’da yaptığım incelemelerde, serbest CaO içeren cürufun ürün olarak kullanılmasından önce aşağıdaki uygulamalardan biri kullanılarak genleşmeden kaynaklanan sorunlar elimine edilmektedir:

Doğal Ortamda Yaşlandırma Prosesi (Aging Under Natural Atmosphere): Bu işlemde cüruf yığınları atmosferde en az 6 ay bekletilerek yağışlı dönemlerde yağmur suları,

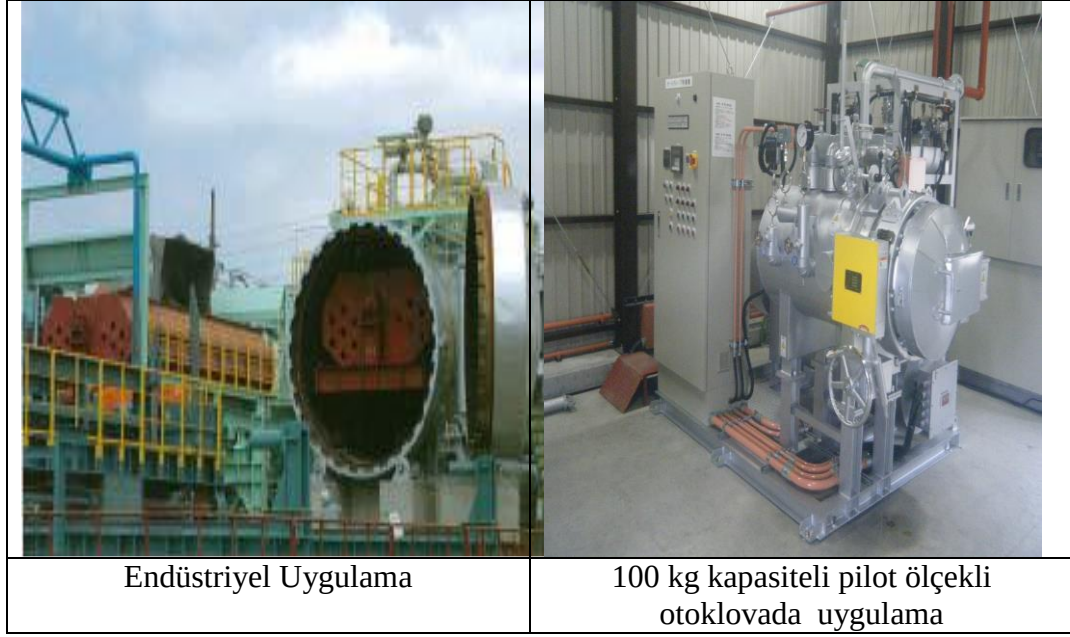
yağışsız dönemlerde sulama ile ıslanması sağlanarak Kalsiyum Oksit'in Kalsiyum Hidroksit'e ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dönüşerek stabilize olması sağlanmakta, cüruf bundan sonra ürün olarak kullanılmaktadır.

Buhar ile Yaşlandırma (Steam Aging): Bu işlemde Cüruf'a, yere gömülü olan borular vasıtasıyla buhar enjekte edilmekte, böylelikle Kalsiyum Oksit'in Kalsiyum Hidroksit'e ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dönüşü hızlandırılmaktadır. Burada işlem süresi 1-2 haftadır. Şekil 5.4'te Döşenmiş borular ve boruların üzerinde yığın yapımlı cüruf öbeğini buhar uygulanması görülmektedir.



Şekil 5.4 Buhar yaşlandırma uygulaması

Basınçlı Buhar Yaşlandırması (Pressurized Steam Aging): Bu metotta çelik cürufu bir basınçlı kap içerisinde basınçlı (10 atm-1000 Kpa) su buharına maruz bırakılmak suretiyle cürufta bulunan serbest Kalsiyum Oksit, Kalsiyum Hidroksit'e dönüşmesi ve stabilize olması sağlanır. Şekil 5.5'te endüstriyel ve pilot ölçekli uygulama örnekleri görülmektedir.



Şekil 5.5 Endüstriyel ve pilot ölçekli uygulama örnekleri

5.7 Magnetik Ayırma ile Ayırılan Çeliklerin Vasıflarının Değerlendirilmesi

Magnetik ayırmada endüstride iki metod kullanılmaktadır.

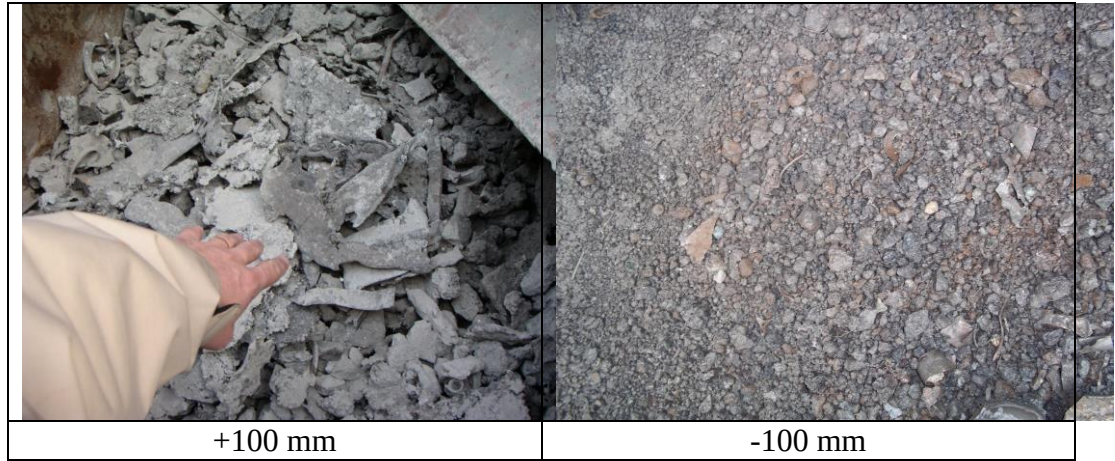
1. Mıknatısın, konveyör bant'ın çıkış tamburunun içine yerleştirilmiş olması, mıknatısla tutulmayan parçaların konveyör bantı erken, tutulmaların ise konveyörü geç terk ederek farklı yerlere dökülmesi yoluyla ayırma,
2. Mıknatısın, bir başka küçük döner konveyör bantın içinde olarak konveyör bantın üzerine asılması, konveyör bant üzerinde hareket halindeki metalik malzemelerin “çalınarak” sistemden uzaklaştırılması

Her iki modelde de ayrılan çeliklerin Metalik Demir içeriklerine etki eden faktörler şöyledir:

- i- Mıknatısın Gauss olarak gücü,
- ii- Mıknatıs tarafından çekilmesi arzu edilen parçaların fiziksel boyutları
- iii- Mıknatıs tarafından çekilmesi arzu edilen parçaların Demir (Fe) içerikleri
- iv- Mıknatıs tarafından çekilmesi arzu edilen parçaların kaynağa uzaklığı
- v- Ortamdaki nem miktarı

Mıknatısın çok güçlü olması durumunda az Fe içeren parçalar, hatta Demir Oksiti yüksek küçük parçalar da seçilebildiği gibi, zayıf olması durumunda kaynağa uzak, küçük ama % 100 çelik olan bir parça da mıknatıs tarafından seçilmesi gerektiği halde tutulmayabilmektedir. İşlem gören tanelerin tamamının Çelik ya da tamamının Cüruf olması durumu dışında da gerek demir içeriğinde farklılıklar, gerekse fiziksel ölçülerinde 10 katı bulan boyut farkları önemli oranda görülmekte olduğundan kaynağa yakınlık ve uzaklığı nedeniyle Magnetik Ayırmadan tam verim alınamamaktadır. Keza, sistemde soğutma ve toz giderme amaçlı su kullanıldığından ıslak küçük parçalar birbirlerine yapışabilmekte, kuru oldukları durumda 1 mm altı tozlar cüruf dahi olsa elektrostatik olarak yüklenebilmekte, metal içerikleri düşük bile olsa mıknatıs tarafından tutulabilmektedir. Soğutmada kullanılan suyun ek yapışma katkısı ile Magnetik Ayırıştırma verimi ciddi oranda azalmaktadır.

Şekil 5.6'da ayrılmış +100 mm büyük ve -100 mm küçük ebatlı çelikler görülmektedir.



Şekil 5.6 Magnetik seperasyonla ayrılmış çelikler

Magnetik Ayırma işleminde endüstriyel uygulamalarda 100 mm üzeri boyutlarda pratikte başarılı sonuçlar alınmakta, % 95 üzeri verim elde edilebilmektedir. Parça boyutu küçüldükçe bu başarı oranı düşmektedir. Tablo 5.8'de İTÜ'de yaptığımız bir araştırmada mıknatıs tarafından tutulmuş parçalardaki metalik demir içerikleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.8 Parça büyüklüne göre metalik demir içerikleri

Parça Büyüklüğü	% Fe (Metalik)
+4,75 mm	4,86
+2,36 mm	2,75
+1,0 mm	2,56
+ 0,5 mm	3,47
- 0,5 mm	2,34

Görüldüğü üzere metalik demir içerikleri yüksek olmadığı gibi parça büyüklüklerine göre anlamlı değişiklikler ortaya çıkmamaktadır.

5.8 Ekonomik Analiz ve Değerlendirme

Doğal agregaya göre daha ağır olan EAF cürufunun işlenmesi ve nakliyesi bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Sert ve yoğun olması nedeniyle işlemedeki ilave enerji, bakım-onarım ve amortisman maliyeti yaklaşık % 20'dir. Ancak, gerek doğal agregaya üreten taş ocakları ile karşılaştırıldığında nakliye güzergahlarının yakın coğrafi konumları, gerekse patlatma giderlerinin ve primer boyut küçültmeler için büyük konkasörlere ve büyük ölçekte iş makineleri parkına gereksinim olmaması avantajı nedeniyle konu bir bütün olarak ele alınmıştır. İnsan kaynağı ihtiyacı ve ilk yatırım maliyetlerinin görece düşük olması nedeniyle yukarıda bahsedilen kayıptan daha fazla bir kazançtan söz edilebilir.

Nakliye karşılaştırması için; doğal agregaya kuru birim ağırlığı 2,25 t/m³, cüruf kuru birim ağırlığı 2,55 t/m³ düşünülerek, eğer yakın coğrafyadan doğal agregaya temini mümkünse 90 km'den kısa mesafeler tedarikçi kuruluşlar için avantaj olmaktadır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu kısımda öncelikle kullanılan EAF cürufunun özellikleri incelenmiş daha sonra yapılan deneyler neticesinde elde edilen bulgular fiziksel ve kimyasal olarak ayrı ayrı ele alınmıştır.

6.1 EAF Cürufuna Uygulanan Kimyasal Deneyler

6.1.1 Kimyasal Analiz

Deneysel işlemlerde Ekinciler Demir ve Çelik Sanayi A. Ş (İskenderun) tesislerinden elde edilen EAF cürufu kullanılmıştır.



Şekil 6.1 Katı haldeki EAF cürufu

Şekil 6.1’de görülen cüruf, tesisteki atık sahasının değişik bölgelerinden homojen bir şekilde alınarak MATİL AŞ’nin, Cevher Hazırlama Laboratuvarında getirilmiştir. Burada 2500 g numune boyut küçültme ve klasifikasyon aşamalarından geçirilmiştir.

Boyut küçültme işlemini takibe numune kimyasal analize tabii tutulmuştur. Tablo 6.1 EAF cürufunun kimyasal analiz sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 6.1 Cürufun kimyasal analiz sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	ZnO	Fe ₂ O ₃	Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	C
-25 + 12	0,06	43,44	0,60	23,77	16,82	5,79	7,53	1,28
-12 + 9	0,12	36,82	0,86	24,75	17,38	4,84	7,79	0,26
- 9 + 5	0,06	39,95	1,22	26,48	17,20	5,01	7,57	0,26
- 5	0,13	39,26	0,84	25,42	16,82	5,79	7,53	1,28

6.2 EAF Cürufuna Uygulanan Fiziksel Deneyler

6.2.1 Elek Analizi

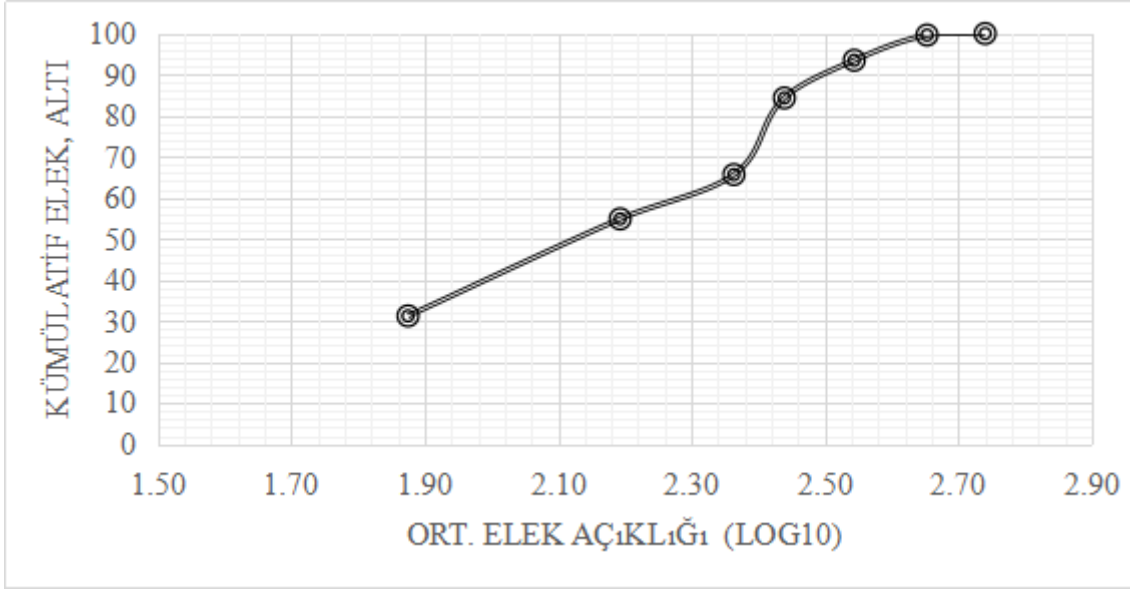
Elek analizi deneyleri, agreganın ve cürufun tane boyut dağılımının hesaplanması ve bundan hareketle granülometrinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Agreganın içerdiği her malzemeyi birbiri içinde doldurabilecek yetenekte olması istenmektedir. Bu amaçla granülometrin hesaplanması agrega açısından önemli bir unsur teşkil etmektedir.

Öncelikle çeneli kırıcıdan geçirilen cüruf, daha sonra kapalı devre çalıştırılarak diskli öğütücüde öğütülmüştür. Daha sonra tüm malzeme elek analizine tabii tutulmuştur. Tüm malzemeler deneylerin her aşamasında homojen dağılımı sağlayabilmek için konileme dörtleme yöntemi ile seçilmiştir. Tablo 6.2 numunenin elek analizini göstermektedir.

Tablo 6.2 Cürufun boyut küçültme sonrası elek analizi

Elek Açıklığı (μm)	Miktar		Kümülatif	
	Gr	%	Elek Üstü, %	Elek Altı, %
-600 + 500	1,1	0,37	0,37	100
-500 + 400	18,1	6,15	6,52	99,63
- 400 + 300	27	9,17	15,69	93,48
- 300 + 250	55	18,68	34,36	84,31
-250 + 212	31,8	10,80	45,16	65,64
-212 + 100	69,6	23,63	68,79	54,84
-100 + 50	65	22,07	90,87	31,21
-50	26,9	9,13	100,00	9,13
Toplam	294,5	100,00		

Elek analizi verilerine göre oluşturulmuş elek analizi eğrisi Şekil 6.2’de görülmektedir.



Şekil 6.2 Kümülatif parçacık boyutu dağılımı elek analizi eğrisi

6.2.2 Los Angeles Deneyleri

Bir diğer adıyla aşınma deneyleri özellikle, kaba agregaların parçalanma direncinin belirlenmesinden kullanılır. İki tarafı kapalı ve belli bir eksen etrafında dönebilen içi boş çelik bir silindir içine, kaba agrega ile birlikte ağırlık ve sayıları belirlenmiş olan bir miktar çelik bilye eklenir. Çelik silindir içine numune konmadan önce yıkanması ve etüv içinde kurutularak sabit tartıma getirilmesi gereklidir. Daha sonra çelik silindir belli bir dev/dk ile döndürülür. Daha sonra cihaz içindeki numune tepsiye boşaltılır. Silindirden çıkan numune eleme işlemine tabii tutulur ve elek üstünde kalan malzeme miktarı ile deney setine eklenen malzeme miktarının oranı, agregada meydana gelen aşınmayı göstermektedir. Beton ve karayolu yapımında kullanılan agregaların atmosferik ve mekanik etkilere yoğun olarak maruz kalması sebebiyle, zamanla aşınma ve yıpranma görülmektedir. Bu aşınma deneyi de bize doğal ortamda kullanıldığında ne kadar aşınma yaşanabileceğini simüle etmektedir. Tablo 6.3 uygulanan deney koşullarını göstermektedir.

Tablo 6.3 Deney koşulları

Parametreler		Deney Koşulları
Deneye giren numune miktarı, gr (M1)	-14+12,5 mm açıklıklı elekten, 1800 gr	5000
	-12,5+10 mm açıklıklı elekten, 3200 gr	
Silindir içine eklenen bilye miktarı, adet		11
Silindir dönüş hızı, dev/dak		31
Silindir devir miktarı		500
Kullanılan elek aralığı, mm		1,6
Deney sonrası elek üstü numune miktarı, gr (M2)		3756,2

Los Angeles aşınma oranı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$\frac{M1-M2}{M2} \times 100 = LA \quad (6.1)$$

Bu işlem sonucunda LA, % 24,88 olarak hesaplanmıştır.

6.2.3 Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyleri

Agrega yapısı gereği gözenekli bir formdadır. Bu gözeneklerin su ile dolu olduğu anca yüzeyinin kuru olduğu durumlara özel olarak doygun kuru yüzey (DKY) adı verilmektedir. DKY kullanılarak agreganın su emme yüzdesi hesaplanabilmektedir.

Deneyde önce agreganın numunesi, 24 saat su içinde bekletilir. Daha sonra tane yüzeyi kurutularak tartımı alınır. Ölçülen bu değer agreganın DKY değeridir.

Daha sonra numune, etüvde kurutularak sabit tartıma getirilir ve daha sonra tekrar tartılır. Bu iki ölçüm sonucunun birbirinden çıkarılmasıyla su emme yüzdesi bulunur. İnce ve kaba agregalar için ayrı ayrı hesaplanmalıdır.

Elek analizini takiben, özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri incelenmiştir. Tablo 6.4 deney sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 6.4 Deney sonuçları

Deneyler	Sonuçlar
İnce Agregada Birim Hacim Ağırlık, gr/cm ³	3,37
Kaba Agregada Birim Hacim Ağırlık, gr/cm ³	3,7
İnce Agregada Su Absorbsiyonu, %	2,18
Kaba Agregada Su Absorbsiyonu, %	3,69

6.2.4 Filler Tane Yoğunluğu

Bu deney boşluk doldurucu filler malzeme için yapılmıştır. 125 mikronluk elekten elenmiş numune bir süre desikatörde bekletilmiştir. Ardından, desikatöre konulan malzeme çıkarılıp, 10' ar gramlık iki numune alınarak 2 farklı piknometreye koyularak paralel çalışılmıştır. Piknometrelere, malzeme suya gömülecek kadar saf su ilavesi yapılmıştır. Daha sonra 30 dakika boyunca vakuma alınarak içinde kalan hava alınmıştır. Vakumdan alınan piknometreler su içine konulup, 25 °C' de 1 saat bekletilmiştir. 1 saat sonra çıkarılan piknometreler ağzına kadar saf su ile doldurulup kapakları kapatılmış ve tartılmıştır. Tartımlar sonucu, özgül ağırlık hesaplanmış ve ortalama yoğunluk 3,023 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. Bu değer akreditasyon kapsamı içerisinde.

6.2.5 Yassılık Deneyleri

Yassı madde oranını belirlemek için kullanılan bu testte, -80 + 4 mm aralığında kalan malzemeden, standartlarda belirtilen oranda örnek alınır.

Öncelikle numune, sabit tartıma gelinceye kadar etüvde kurutulur. Daha sonra tıpkı bir elek analizi gibi, tane büyüklüğüne göre çubuklu veya silindirik eleklerden geçirilerek sınıflandırılmaktadır. Bu ağırlığın ilk ağırlığa oranı agregada yassı malzeme oranını vermektedir.

6.3 EAF Cürüfunun Karakterizasyon Çalışmaları

Cürufun kimyasal ve fiziksel analizleri takiben MATİL A. Ş, Çelik Test ve Araştırma Merkezi Mikroyapı Görüntüleme Laboratuvarında ZEISS MA10 EDAX EDS marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Mikroyapı görüntülerinden, numunenin poroz bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Mikroyapı görüntülerinin çok net olmamasının nedeni curufların iyonik bileşikler olmasından dolayı elektriksel olarak iletken olmamalarından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.3 curufun SEM fotoğrafını göstermektedir. SEM analizinden sonra seçilen bölgelere EDS taraması uygulanmış, EDS yöntemi ile yarı-kantitatif analiz gerçekleştirilmiştir. EDS analizleri yapının kimyasal analizini de doğrulamaktadır. EDS analizlerinin yarı-kantitatif olması, kütsel değil de lokal noktalardan analiz yapılması nedeniyle kimyasal analizlerden farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Şekil 6.3 farklı dökümlere ait farklı cüruf tanelerinde seçilen bölgelerden noktasal EDS analiz sonuçlarını göstermektedir.

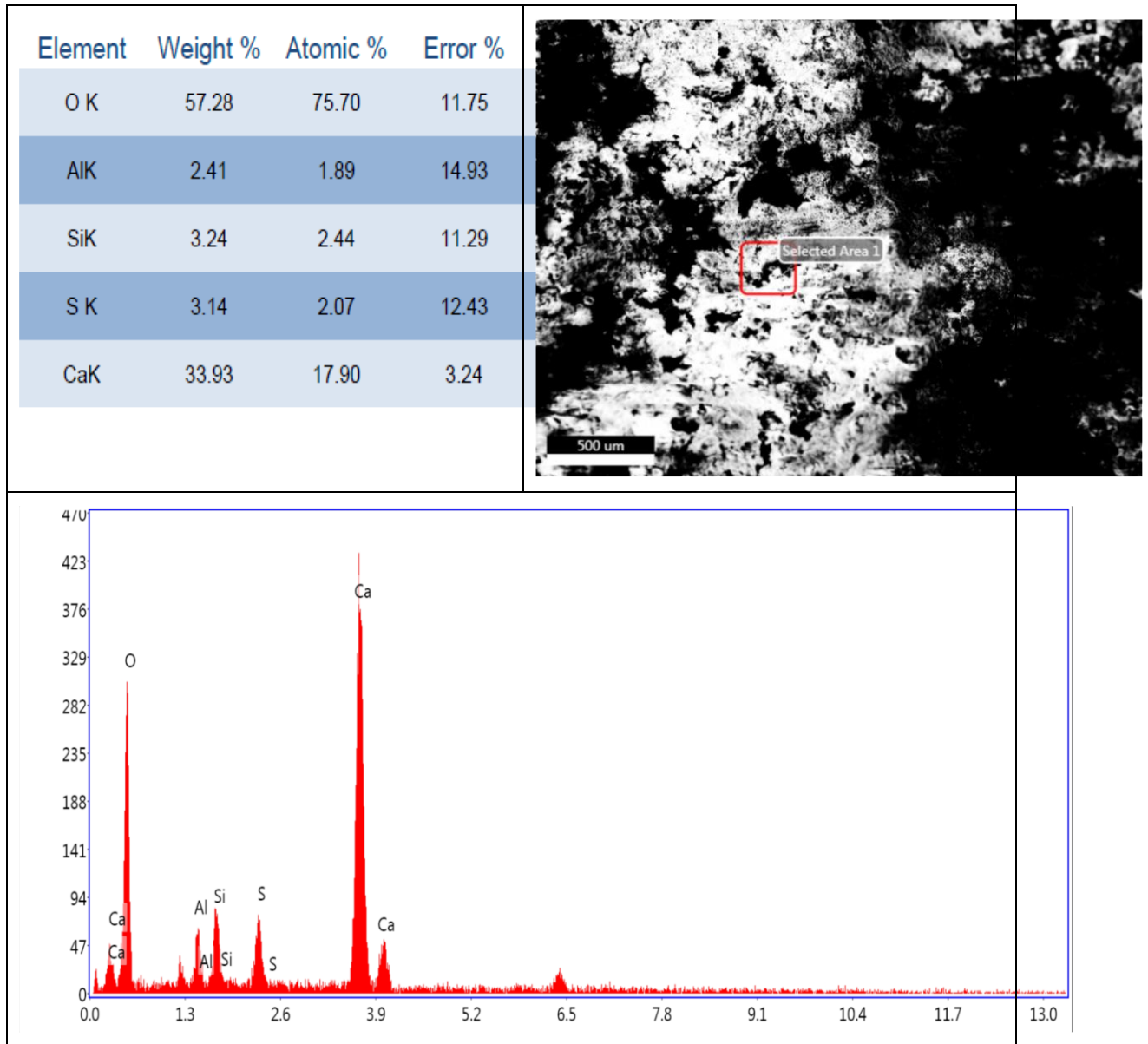
Çelik üretiminde cüruf özellikleri aynı zamanda üretilen çelik ile de ilgili değerli bilgiler sunmaktadır. Çelik üreticileri için cüruf yapımı, çelik yapımı kadar önemli olup bu “Cürufa bak, O çeliğe bakar” deyişi ile ifade edilir.

Şekil a ve b’de Karbon elementi bulunmazken şekil c’de bakılan noktada % 5,23 C görülmektedir. Bu bilgi bize, o dökümde karbon enjeksiyonundan sonra karbonun tüm görevlerini tamamlamak için yeterli süre verilmediği bilgilerini vermektedir.

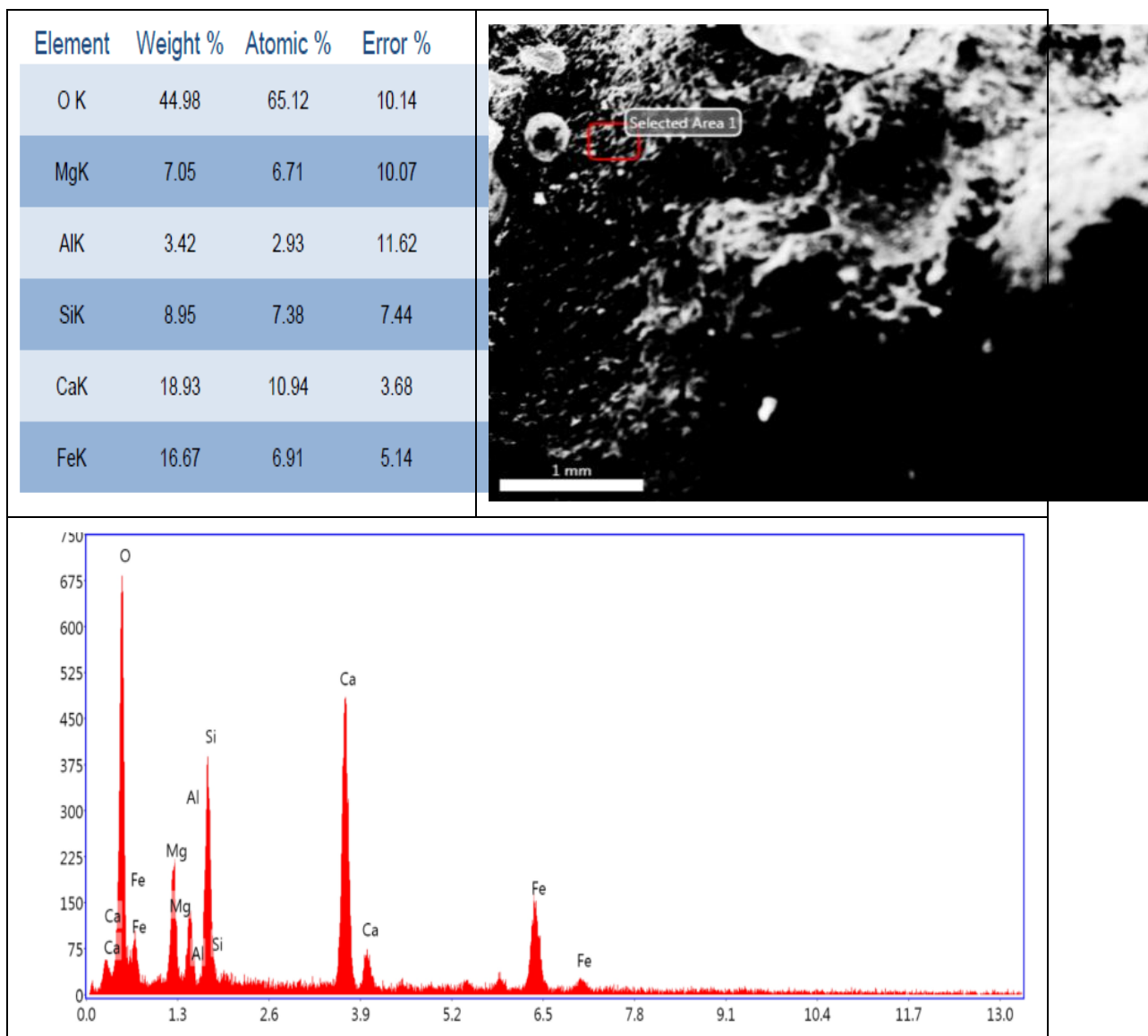
Şekil a’da inceleme yapılan noktada % 3,14 Kükürt görülmektedir. Bu bilgi % 33,93 Kalsiyum ve % 57,28 Oksijen ile birlikte değerlendirildiğinde başarılı kükürt giderme işlemi gerçekleştirilerek Kalsiyum Sülfat (CaSO_4) oluştuğunu anlatır.

Şekil b’de noktasal analiz yapılan inceleme bölgesinde % 7,05 Mg varlığı Dolomitik kireç kullanımından kaynaklanmaktadır

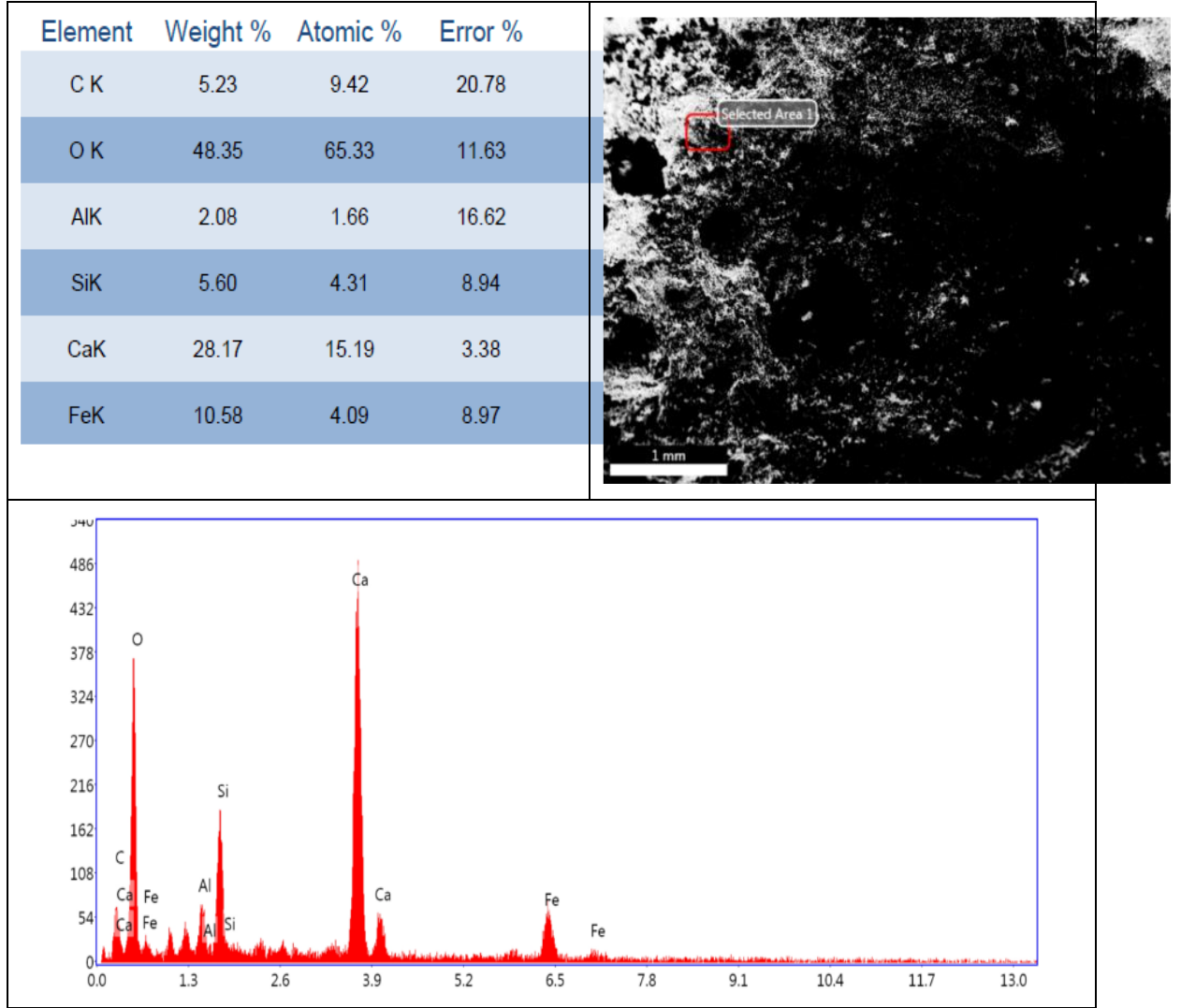
a)



b)



c)



Şekil 6.3 SEM görüntüleri ve EDS analizi sonuçları

6.4 Doğal Agregaya Uygulanan Deneyler

Ayrıca deneylerde karşılaştırma yapılabilmesi adına doğal agregaya da kullanılmıştır. Doğal agregaya Gebze’de yerleşik Aytaş Ayhanlar Madencilik A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Doğal agreganın fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.5’de verilmiştir.

Tablo 6.5 Doğal agreganın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Deneyler	Sonuçlar
İnce Agregada Birim Hacim Ağırlık, gr/cm ³	2,85
Kaba Agregada Birim Hacim Ağırlık, gr/cm ³	2,85
İnce Agregada Su Absorbsiyonu, %	0,44
Kaba Agregada Su Absorbsiyonu, %	0,28
Los Angeles Aşınma Kaybı, %	19,28
Yassılık indeksi, %	30

6.5 Dizayn Çalışması

Deneysel çalışmanın bu aşamasında üç farklı asfalt tabakası için farklı bileşimlerde cüruf ve kalker karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımlar bitümle karıştırılarak Marshall briketleri adı verilen silindirik numuneler oluşturulmuştur.

6.5.1 Bitümlü Temel Dizaynı

Bu bölümde Marshall deneyleri ile mekanik özellikleri belirlenecek olan 63,5 mm yüksekliğinde briket oluşturulma çalışmaları yapılmıştır. Marshall briketleri oluşturulurken, 1200 gr doğal agregada yeterli olurken, cüruf ancak 1400 gr kullanıldığında 63,5 mm yüksekliğinde briket oluştuğu tespit edilmiştir. Tablo 6.6 cürufun elek analiz sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 6.6 Cürufun elek analiz sonuçları

Elek Aralığı	Elek Üstü, %	Miktar, gr
- 19 + 12,5	6,2	86,80
-12,5 + 9,5	12,2	170,80
-9,5 + 4,75	34,4	481,60
- 4,75 + 2	18,3	256,20
- 2 + 0,425	13,5	189,00
- 0,425 + 0,18	5,8	81,20
- 0,18 + 0,075	3,8	53,20
-0,075	5,8	81,20
Toplam	100	1400,00

Granülasyon olarak adlandırılan aşamada bitümün katılma yüzdesi belirlenmiştir her bir yüzde için 3 paralel çalışılmıştır. Tablo 6.7 agregaların kullanım oranları ile dizayn gradasyonu çalışmalarını göstermektedir.

Tablo 6.7 Bitüm yüzdeleri

Deney No	Bitüm		Yükseklik, mm			
	%	gr.	1	2	3	Ort.
1	4,0	56,0	65,3	65,0	64,9	65,1
2	4,5	63,0	64,9	65,1	65,1	65,0
3	5,0	70,0	65,6	65,2	65,6	65,5
4	5,5	77,0	64,0	64,2	64,1	64,1
5	6,0	84,0	64,2	64,4	64,5	64,4
6	6,5	91,0	63,1	63,2	63,5	63,3

Sonuç olarak EAF cürufalarının asfalt karışımlarda kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında, cüruf agregalarla Marshall metoduna göre 2x75 darbeyle 145 °C’de hazırlanan numunelerle yapılan bitümlü temel tabakası dizaynı sonucunda, optimum bitüm; kuru agregaya göre ağırlıkça % 5,3 ± 0,5 (100 g kuru agregaya + 5,30 gr bitüm) olarak bulunmuştur.

Optimum bitüm ağırlığı belirlendikten sonra özgül ağırlık hesaplamaları için ağırlık tayini yapılır. Önce numune su havuzunda bekletilerek tartımı yapılır, daha sonra daha sonra yüzeyi hafifçe kurutularak tekrar tartım alınır. Belirlenen değerler ve hesaplanan özgül ağırlıklar her bir bitüm yüzdesi için tablo 6.8’de verilmiştir.

Tablo 6.8 Bitüm denemelerine ait özgül ağırlık sonuçları

Deney No	Bitüm Miktarı, %	Havada Ağırlık, g	Sudaki Ağırlık, g	Doygun Yüzey Ağırlığı, g	Hacim ¹ , cm ³	Hacimsel Özgül Ağırlık ² , g/cm ³
1	4,0	1428,1	925,1	1432,0	506,9	2,817
2	4,5	1437,9	935,5	1442,1	506,6	2,838
3	5,0	1448,9	947,4	1454,5	507,1	2,857
4	5,5	1456,8	962,1	1462,5	500,4	2,911
5	6,0	1466,5	967,4	1470,1	502,7	2,917
6	6,5	1480,9	982,7	1484,1	501,4	2,954

$$Hacim = DKY - Sudaki Ağırlık$$

$$Hacimsel \text{ Özgül Ağırlık} = \frac{Havadaki Ağırlık}{Hacim}$$

Daha sonra bu değerler kullanılarak, boşluk ve asfaltla dolu boşluk grafiklerinden elde edilen bitüm değerlerinin ortalaması alınmıştır. Optimum bitümdeki analiz sonuçları Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9 Bitüm Denemeleri Analiz Sonuçları

Bitüm Miktarı, %	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, gr/cm ³	3,172	3,141	3,110	3,080	3,051	3,023
Boşluk, %	11,19	9,63	8,12	5,48	4,38	2,29
Agregalar arası boşluk (V.M.A), %	16,85	16,64	16,48	15,30	15,53	14,88
Asfaltla (bitüm) dolu boşluk, %	33,6	42,1	50,7	64,2	71,8	84,6
Akma, mm	2,10	2,55	2,70	2,39	3,10	3,16
Stabilite, kg	1343	1746	1603	1647	1528	1349

$$\text{Maksimum Teorik Özgöl Ağırlık} = \frac{\frac{100 + \text{Bitüm Miktarı}(\%)}{100}}{\frac{\text{Agreganın Efektif Özgöl Ağırlığı}}{100} + \frac{\text{Bitüm Miktarı}(\%)}{100}} \cdot \text{Bitüm Özgöl Ağırlığı}$$

$$\text{Boşluk} = \frac{\text{Maks.Teo.Özgöl Ağırlık} - \text{Hacimsel Özgöl Ağırlık}}{\text{Maks.Teo.Özgöl Ağırlık}} \cdot 100$$

$$\text{V. M. A} = \frac{100 - \left(\text{Hacimsel Özgöl Ağırlık} \cdot \left(100 - \frac{\text{Bitüm Miktarı}(\%)}{1 + \frac{\text{Bitüm Miktarı}(\%)}{100}} \right) \right)}{\text{Agreganın Hacimsel Özgöl Ağırlığı}} \cdot 100$$

$$\text{Asfaltla (bitüm)dolu boşluk} = \frac{\text{VMA} - \text{Boşluk}(\%)}{\text{VMA}} \cdot 100$$

6.6 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

- Asfalt karışımlarında suni agrega olarak kullanılması araştırılan EAF curufunun aşınmaya karşı direnci, donmaya karşı direnci, yassılık indeksi ve absorpsiyonu Karayolları Teknik Şartnamesi limitlerini karşılamaktadır.
- Tüm asfalt tabakalarında, partikül boyutu küçüldükçe optimum bitüm miktarının arttığı tespit edilmiştir.
- Daha öncede bahsedildiği gibi agregalar poroz yapılara sahiptir. Bu sebeple yapıdaki bu boşlukların hacim miktarı su emme yetenekleri ile doğru orantılıdır. Boşluk yapısı daha fazla olan agregaların, daha az poroz yapıdaki agregalara göre su emme yüzdeleri yüksektir. Ayrıca su emme yüzdesi yüksek olan agregaların dona karşı dayanımı oldukça düşük olduğundan beton karışımlarında ve kara yolu yapımında kullanımı mümkün olmamaktadır. Deney sonucu, hem ince hem de kaba agregaların su emme yüzdelerinin %5'ten küçük olması sebebiyle karayollarında kullanımının uygun olduğu görülmektedir.
- Agreganın betonda kullanılması durumunda, ne kadar oranda yer alabileceği de özgöl ağırlık değeri ile ölçülmektedir. Deneyler sonunda kullanılan cürufun, teknik şartnameye uygun değerler arasında kaldığı görülmüştür.
- Daha sonra numuneye Los Angeles aşınma testi uygulanmıştır. Bunun sonucunda LA, % 24,88 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Karayolları Teknik Şartnamesi ile uygunluk göstermektedir. Teknik şartnameye göre % 35'in

altındaki değerler yol yapım malzemesi olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

- Son olarak numuneye yassılık analizi yapılmıştır. Ölçülen tane boyutları arasındaki oran, 0,6'dan küçük olduğu durumlarda malzeme yassı olarak kabul edilmektedir. Agregadaki yassı malzeme oranının çok olması betonda pürüzlü bir yüzeye ve su ihtiyacının artmasına neden olacaktır. Karayollarında, yassı agrega oranının çok fazla olması, yolun dayanım özelliklerinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Tane büyüklüğü, 8mm'den büyük agrega tanelerinde kusurlu tanelerin oranı % 50'den fazla olmamalıdır. Bunun için, agregaların tane boyutlarının mümkün olduğunca orantılı olması istenmektedir. Deney sonucunda yassılık indeksinin %8 olduğu görülmüştür. Bu değer karayolları teknik şartnamesine uygunluğunu göstermektedir.
- EAF Cürufları kullanarak yapılan Aşınma dizayn sonuçları Karayolları Teknik Şartnamesinde belirtilen kriterleri sağlamaktadır.
- Teknik şartname ve ulaşılan değerler Tablo 6.10'da detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.10 Deney sonuçları

	Dizayn	Şartname
Dizayna Göre Optimum Bitüm	5,30	4-7
Pratik Özgül Ağırlık	2,005	
Stabilite kg.	40387	900
Boşluk, %	42,14	3-5
Asfalt Dolu Boşluk, %	9,5	65-75
V.M.A, %	38,5	14-16

7. GENEL SONUÇLAR ve ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

- Günümüzde, çevresel faktörlerin de etkisiyle sürdürülebilir kalkınma için bir farkındalık yaratılması ve kapsamlı araştırma ve geliştirmelerin yapılmasının gerektiği herkesin hemfikir olduğu bir konudur. Kamu tarafında curufun yeniden kullanımının ilgili mevzuat ve şartnamelerde yapılacak düzenlemelerle teşvik edilmesi ve belli oranlarda şart koşulması, özel sektör tarafında ise öncelikle lisanslı geri kazanım tesislerinin kurulması ve burada işlenmiş curufun ürün olarak kullanım alanlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Çin’de Cürufufla ilgili 18 Ürün Standartı, 7 Test ve Analiz Metodu ve 4 Teknik Şartname vardır. Türkiye’deki mevcut ve gelecekteki curuf oluşumunun sağlıklı bir biçimde yönetilebilmesi için üniversiteler, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı başta olmak üzere kamu ve özel sektör taraflarının işbirliği içinde çalışması sorunun çözümüne katkı sağlayacaktır.
- Firmalarda farklı karakterlerdeki cürufufların teknik özelliklerine uygun depolanmaları, işlenmeleri ve değerlendirilmeleri; EAF cürufufları (siyah cüruf) ile LF Cürufufların (beyaz cüruf) karıştırılmamaları, değerlendirme için uygun bir başlangıç olacaktır.
- Cüruf Tesislerinde halihazırda kullanılmakta olan makine ve ekipmanlar madencilik sektörü için tasarlanmış olduğundan her zaman cüruf uygulamalarında tam randıman verememektedir. Örneğin sekonder kırma işleminde daha başarılı ve verimli sonuçlar alınmasını teminen Dik Milli Darbeli Kırıcıların (VIS – Vertical Impact Shaft Crusher) kullanılması seçeneklerinin değerlendirilmesi, keza magnetik seperasyon ile ayıklamada mıknatıslarda da yukarıda belirtilmiş olan nedenlerle tam verim alınamamaktadır. Bu nedenle jigging veya sıvı kullanarak ayırma seçenekleri değerlendirilebilir.
- Serbest CaO ve Serbest MgO’nun genleşme etkilerinin giderilmesi yönünde çalışmalar yapılması, sıvı cürufun suda şok ile soğutularak daha iyi metal/cüruf ayrışması sağlanıp daha kaliteli agrega elde edilmesi, bu işlem sırasında büyük ölçekli (yıllık üretimleri 2.000.000 ton’dan fazla) çelik fabrikalarımız için sıvı cürufun ısısından enerji elde edilmesi önümüzdeki günlerin konusu olacaktır.

- Değerlendirilemeyen cürufların muhtemel teknolojik gelişmeler gözönüne alınarak, fiziksel ve kimyasal özellikleri bilinen yerüstünde hazır potansiyel maden olarak düzenli depolanabilmelerine olanak sağlanması, kıt kaynakların rasyonel kullanımına katkı sağlayacaktır.
- Zaman içinde Ark Ocaklarının kapasitelerinin on'lardan yüz'lere çıkmasıyla atık yönetimi zorlaşmıştır. Tesisler kurulurken ark ocağına entegre olarak cürufun sıvı fazından başlayarak cüruf işleme tesisleri kurulmalıdır.
- Endüstriyel sorunların çözümünde matematiksel modelleme ve optimizasyon yani en iyiyi bulma her zaman yol gösterici olmuş, bu çözümleri uygulamaya koyma olanağı vermiştir. Süregelen bir işin yapılış biçimi o işin doğru yapıldığı anlamına gelmez. Optimizasyon teknikleri sürekli en iyi tasarımı arar. Bu, amaç fonksiyonlarının doğru tanımlanmasına bağlıdır. Yapılan çalışmalarla daha uygun ürünlerin elde edildiği tespit edilmiştir. İleri mühendislik uygulamaları ile de mevcut duruma göre daha efektif sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir. Bu nedenle öncelikle gereksinim duyulan ve üzerinde çalışılan malzemenin tanınması evresinde ciddi mesafeler kaydedilmiştir. Ar-Ge ve İnovasyon çalışmaları sürdürülmelidir.

8. KAYNAKLAR

1. MATİL, Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş. <http://www.matil.org/tr/sektorden/istatistikler/dunya-celik-sektorunun-genel-gorunumu-274.html> , 18 Mart 2017.
2. Birol, B. (2013) Elektro Cüruf Ergitme (Esr) Yöntemiyle Çelik Hurdalarından Kaliteli Çelik Üretimi Ve Cüruf Özelliklerinin Modellenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
3. Öcal, Y. (2014) Demir Çelik Sektöründe Atık Yönetimi. Uzmanlık Tezi, İktisadi Sektörler Ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Türkiye.
4. Yalçın, T., Ateşok, G. (1973) Demir Cevherlerinin Zenginleştirilmesi. Madencilik Dergisi Teknik Raporu, 20-32.
5. Çoşar, Ş. (2006) Demir Konsantrelerinin Peletlenmesinde Bor Minerallerinin Ve Atıklarının Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
6. Gündoğdu, N. (2013) Demir-Çelik Tesislerinde Açığa Çıkan Tufalden Demirin Geri Kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
7. Stahleisen, V. (2008) SteelManuel, 1.Baskı, Verlag Stahleisen GmbH, Duesseldorf, Almanya.
8. 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.
9. Singh, R. (2016) Chapter 6 - Classification Of Steels, *Applied Welding Engineering*, Second Edition, Boston, 57-64.
10. O'brien, A., Guzman, E. C. (2011) Part 1, *Welding Handbook. Materials And Applications*, Vol. 4.
11. Bahar, H. (2007) Malzeme Bilimi, Çelik Sunumu. Manisa: Celal Bayar Üniversitesi.

12. Singh, R. (2016) Chapter 7 - Cast Iron, *Applied Welding Engineering*, Second Edition, Boston, 65-81.
13. The Asm Handbook Committee, (1993) Welding, Brazing And Soldering, *Asm Handbook*, Vol. 6.
14. Cavcar, M. M. (1996) Dökme Demirler Ve Dökme Demirlerin Kaynağı, Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş. Teknik Rapor, İstanbul, Türkiye.
15. Singh, R. (2014) Chapter 7 – Cast Iron, *Applied Welding Engineering*, Second Edition, Boston, 57-64.
16. Kumar, D., Kumar, D. (2016) Chapter 2 - Latest Developments İn The Iron And Steel Industry, *Management Of Coking Coal Resources*, 9-60.
17. Coudurier, L., Hopkins, D.W., Wilkomirsky, I. (1985). Chapter 7 - Iron And Steelmaking, *Fundamentals Of Metallurgical Processes*, Second Edition, Pergamon, 246-300.
18. Asil, S. (2007) Demir Cevheri Numunelerinde X-Işını Floresans Yöntemiyle Molibden Ve Kalay Tayini. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
19. Kaya, A.O. (2014) Esnek Üstyapıların Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
20. Kayır, Y.Z. (2016) Dünyada Ve Türkiye’de Demir Çelik Üretimi. 18. Uluslararası Metalurji Ve Malzeme Kongresi, 29 Eylül-1Ekim, İstanbul.
21. Çelik İhracatçılar Birliği, 2016 Çalışma Raporu, İstanbul
22. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, <http://www.d cud.org.tr/>, 07 Mart 2017.
23. Chaurand, P. (2007) Environmental Impacts Of Steel Slag Reused İn Road Construction: A Crystallographic And Molecular (Xanes) Approach. *Journal of Hazardous Materials*, 139(3), 537-42.
24. Wang, G.C. (2016) Chapter 5 - Slag Processing, *The Utilization Of Slag İn Civil Infrastructure Construction*, Woodhead Publishing, 87-113.

25. Saridikmen, H. (2011) Sulphide And Phosphide Capacities Of Ferroalloy Smelting Slags. PhD Thesis, University Of The Witwatersrand Faculty Of Engineering, Johannesburg, South Africa.
26. Alan, E. (2013) Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı ile Cüruflarda Fosfor Kapasitelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
27. Coudurier, L., Hopkins, D.W., Wilkomirsky, I. (1985). Chapter 6 - Slags, *Fundamentals Of Metallurgical Processes*, Second Edition, Pergamon, 212-245.
28. Wang, G.C. (2016) Chapter 2 -Ferrous Metal Production And Ferrous Slags, *The Utilization Of Slag In Civil Infrastructure Construction*, Woodhead Publishing, 9-33.
29. Shi, C., (2004) Steel Slag, Its Production, Processing, Characteristics And Cementitious Properties. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 230-236.
30. Wang, G.C. (2016) Chapter 3 - Nonferrous Metal Extraction And Nonferrous Slags, *The Utilization Of Slag In Civil Infrastructure Construction*, Woodhead Publishing, 35-61.
31. Wang, G.C. (2016) Chapter 4 - Nonmetallurgical Slags, *The Utilization Of Slag In Civil Infrastructure Construction*, Woodhead Publishing, 35-61.
32. Ramachandra, R.S. (2006) Chapter 8 - Metallurgical Slags, Dust And Fumes. *Waste Management Series*, 269-327.
33. Yi, H. (2012) An Overview Of Utilization Of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791-801.
34. Bilen, M. (2010) Çelikhane Curuflarından Liç-Karbonatlaştırma Prosesi İle Kalsiyum Karbonat Kazanılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
35. Barišić, I., Dimter, S., Netinger, I. (2010) Possibilities Of Application Of Slag In Road Construction. *Technical Gazette*, 17(4), 523-528.

ÖZGEÇMİŞ

Aslan ÜNAL 1959 yılında Mersin’de doğmuştur. İlk, Orta ve Lise eğitimlerini Mersin’de tamamladıktan sonra 1982 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. Askerlik görevinin ardından vardiya mühendisi olarak demir çelik üretim sektöründe çalışma hayatına başlamış olup bu görevini hammadde şefi, proje başmühendisi, yatırım müdür yardımcısı, iş geliştirme ve projeler müdürü gibi farklı pozisyonlarda sürdürmüştür. EuroSlag (Avrupa Cüruf Birliği), TSE, Sanayi Bakanlığı ve Üniversiteler nezdinde ulusal ve uluslararası organizasyonlarda komite üyeliklerinde bulunmuş olup yurtiçi ve yurtdışı birçok seminer ve konferanslara konuşmacı olarak katılmıştır. Halen Çelik İhracatçıları Birliğine bağlı MATİL Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş’ nin İTÜ’de bulunan Çelik Test – Araştırma Geliştirme Merkezinde Kalite Sistemleri ve Sertifikasyon Müdürü olarak görev yapmaktadır.

Evli ve iki çocuk babasıdır.