



**İSKENDERUN TEKNİK**  
ÜNİVERSİTESİ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**DOĞRUDAN İNDİRGENMİŞ  
DEMİRİN ELEKTRİK ARK  
OCAKLI TESİSLERDE  
HURDAYA ALTERNATİF  
HAMMADDE KAYNAĞI  
OLARAK KULLANILMASI**

**Musa ATAŞ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**EYLÜL 2021**





**DOĞRUDAN İNDİRGENMİŞ DEMİRİN ELEKTRİK ARK OCAKLI  
TESİSLERDE HURDAYA ALTERNATİF HAMMADDE KAYNAĞI  
OLARAK KULLANILMASI**

**Musa ATAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2021**

Musa ATAŞ tarafından hazırlanan “DOĞRUDAN İNDİRGENMİŞ DEMİRİN ELEKTRİK ARK OCAKLI TESİSLERDE HURDAYA ALTERNATİF HAMMADDE KAYNAĞI OLARAK KULLANILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Başkan:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

Tez Savunma Tarihi: ...../...../....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza  
Musa ATAŞ  
14/09/2021

DOĞRUDAN İNDİRGENMİŞ DEMİRİN ELEKTRİK ARK OCAKLI TESİSLERDE  
HURDAYA ALTERNATİF HAMMADDE KAYNAĞI OLARAK KULLANILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Musa ATAŞ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Son yıllarda tüm dünyada elektrik ark ocaklarında çelik üretiminde doğrudan indirgenmiş demir kaynaklarının hammadde olarak kullanımında artış söz konusudur. Bu artışın ana nedenleri hurda arzının sınırlı olması ve çelik üretimi sırasında hurda kullanımından kaynaklanan kısıtlamalardır. Doğrudan indirgenmiş demir (DİD) ve sıcak briketlenmiş demir (SBD) gibi doğrudan indirgenmiş cevher bazlı demir kaynaklarının kimyasal saflığı, bu ürünleri temiz çelik üretimi için çok değerli kılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, elektrik ark ocağı (EAO) ile çelik üretiminde hammadde olarak DİD ve SBD gibi cevher bazlı metalik ürünlerin kullanımının avantajlarını ortaya koymaktır. Ayrıca, cevher bazlı metalik hammadde kullanılarak yapılan çelik üretiminin temiz çelik üretimine ve üretim optimizasyonuna yönelik sağladığı faydalar da tartışılacaktır.

Bu çalışmada, cevher bazlı metalik hammaddelerin elektrik ark ocağında (EAO) %100 kullanılması ile elde edilen ve % 100 hurda kullanılarak üretilen dökümler incelenmiştir. Farklı hammaddeler ile yapılan kütük çelik üretimlerindeki elektrik tüketimi, grafit elektrod tüketimi ve üretim hızı ortalamaları tespit edilmiştir. Bu bağlamda, cevher ie özellikle DID ile üretimde elektrik sarfiyatı hurda ile üretimin biraz üzerinde olsa da elektrot tüketiminin çok daha düşük ve üretim hızının çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, DİD kullanımı EAO'da çelik üretim maliyetini düşürücü etki sağlamıştır. Ayrıca, DİD ve SBD ile üretilen çeliklerdeki Cu, S ve P oranlarının hurda ie üretilen çeliğe nazaran oldukça düşük olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, cevher esaslı metalik hammaddeler kullanımının temiz çelik üretimine katkısı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Doğrudan İndirgenmiş Demir (DİD), Sıcak Briketlenmiş Demir (SBD), Elektrik Ark Ocağı, Hammadde, Hurda, Temiz Çelik

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Prof.Dr. Gürel ÇAM

USE OF DIRECTLY REDUCED IRON AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF RAW  
MATERIALS TO SCRAP IN ELECTRIC ARC FURNACE FACILITIES

(M.Sc. Thesis)

Musa ATAŞ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

September 2021

ABSTRACT

There has been a worldwide increase in the use of direct reduced iron products as raw materials for steel production by electrical arc furnaces in recent years. The limited supply of scrap and the constraints resulting from the use of scrap during steel production are the main reasons for this increase. Chemical purity of ore-based metallic raw materials such as direct reduced iron (DRI) and hot briquetted iron (HBI) make these products very valuable for the production of clean steel. The purpose of this study is to investigate the advantages of the use of ore-based metallic products such as DRI and HBI as raw materials in steelmaking by electric arc furnace. Moreover, the benefit of clean steel production and production optimization by the use of ore-based metallic raw materials will also be discussed.

In this study, heats produced by using 100% ore-based metallic raw materials in an electric arc furnace (EAF) and heats produced by using 100% scrap were investigated. The averages of electricity consumption, electrode consumption and production rate in billet steel production made with different raw materials were determined. In this context, although the electricity consumption in the production with ore-based raw materials, especially with DID, is slightly higher than the production with scrap, it has been determined that the electrode consumption is much lower, and the production speed is much higher. Therefore, the use of DID has had a reducing effect on the steel production cost in the EAF. In addition, it has been observed that the Cu, S and P ratios in the steels produced with DID and SBD are quite low compared to the steel produced with scrap. Therefore, the contribution of the use of ore-based metallic raw materials to clean steel production has been demonstrated.

Key Words : Direct Reduced Iron (DRI), Hot Briquetted Iron (HBI), Electrical Arc  
Furnace, Material, Scrap, Clean Steel

Page Number : 81

Supervisor : Prof.Dr. Gürel ÇAM

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca çok değerli yardım, katkı ve eleştirileri ile her zaman yanımda olduğunu hissettiğim ve kendisi ile çalışmaktan büyük onur duyduğum; bir bilim insanı olarak her zaman örnek aldığım çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Gürel ÇAM'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca birlikte çok şey öğrendiğim, verdikleri destekler ile her zaman bana yardımcı olan değerli iş arkadaşlarım Mehmet CANBAY ve Rıfat KARABAŞ'a ve Topyalı Algeria Iron and Steel şirketi çalışanlarına teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan ve onlarla birlikte olmaktan her zaman mutluluk duyduğum sevgili annem Besime ATAŞ ve çelik misali aldığı suyu unutmayan evlatlar yetiştiren çelikhane emekçisi kıymetli babam Mehmet ATAŞ'a sonsuz teşekkürler. Ayrıca, 7. evlilik yıl dönümümüzde kendisine verebileceğim en önemli hediyelerden biri olarak bu çalışma ile sevgili eşim Selda'ya çok teşekkür ederim.

Son olarak da bu çalışmanın ve de bana dair yaşamın motivasyon kaynağı Kavin Zerya'ya sonsuz teşekkürler.

Ve Hasan'a...

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Demir ve Çelik Üretimnin Tarihçesi.....	3
2.2. Alternatif demir üretim prosesleri.....	10
2.2.1 Bessemer prosesi .....	11
2.2.2 Açık ocak (open hearth) prosesi .....	14
2.2.3. Bazik oksijen çelik üretimi .....	15
2.2.4. Elektrikli ocak çelik üretimi .....	15
2.2.5. İkincil çelik üretimi ve sürekli döküm.....	16
2.3. Elektrik Ark Ocağı (EAO) .....	17
2.3.1. EAO Yapısı .....	23
2.3.2. Elektrik Ark Ocağında Ergitme Prosesi.....	24
2.4 Doğrudan İndirgenmiş Demir .....	31
2.4.1. Doğrudan İndirgeme Prosesi Tanımı .....	32
2.4.2. Doğrudan İndirgeme Prosesleri .....	33
2.4.3. Hammaddeler.....	36
2.5. Doğrudan İndirgenmiş Demir Özellikleri ve Kullanımı.....	41
2.5.1. Doğrudan indirgenmiş demir özellikleri.....	41
2.6. Elektrik Ark Ocağında Doğrudan İndirgenmiş Demir Kullanımı.....	46
2.6.1. Doğrudan indirgenmiş demir kullanmanın avantajları .....	46
2.6.2. Optimum Şarj Dizaynı .....	48
2.6.3. Şarj Etme Yöntemi.....	50



2.6.4. DİR/SBD'deki karbon içeriği, metalizasyon ile silikanın EAO işlemi ve performansına etkileri .....	52
2.6.5. SBD/DİD Şarjının EAO Kimyasal Enerjisine Etkisi.....	55
3. MATERYAL VE METOD .....	58
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA .....	60
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	71
5.1. Sonuçlar .....	71
5.2. Öneriler .....	74
KAYNAKLAR.....	76



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Yüksek fırın demir yapımının tarihsel gelişimi .....	10
Çizelge 2.2. 2017, 2018 ve 2019 yıllarındaki dünyadaki bölgelere göre ve proses göre DID üretimi.....	12
Çizelge 2.3. Dünya çelik üretimi (1000 ton).....	20
Çizelge 2.4. Ürün ve prosese göre eülkemizde ham çelik üretimi (Milyon ton).....	21
Çizelge 2.5. Türkiye'nin ham çelik üretim kapasitesi (1.000 ton) .....	22
Çizelge 2.6. Çelik sektörünün hammadde ithalatı .....	22
Çizelge 2.7. 1650 ° C'deki önemli EAO reaksiyonları .....	31
Çizelge 2.8. Karbon ve CO gazını yakmak için gereken oksijen miktarı.....	31
Çizelge 2.9. Doğrudan indirgeme süreçleri .....	33
Çizelge 2.10. Gaz bazlı proses için doğal gaz bileşimi.....	39
Çizelge 2.11. Doğrudan indirgenmiş demirin tipik kimyasal bileşimi	42
Çizelge 2.12. Doğrudan indirgenmiş demirin fiziksel özellikleri.....	42
Çizelge 2.13. %DRI şarj ilavesinin işletme parametreleri üzerindeki etkileri.....	46
Çizelge 2.14. DRI/HBI metalizasyonunda %1 artışın faydaları .....	51
Çizelge 2.15. Asya fabrikaları için BHP steel tarafından tanımlanan çeşitli gang bileşenleriyle ilişkili maliyetler.....	52
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan hurda ve cevher bazlı metalik hammaddelerin (DİD ve SBD) kimyasal kompozisyonlarının karşılaştırılması .....	55
Çizelge 4.1. Doğrudan indirgenmiş demir kullanılarak elde edilen dökümlere ait üretim değerleri.....	57
Çizelge 4.2. Sıcak briketlenmiş demir kullanılarak elde edilen dökümlere ait üretim değerleri .....	59
Çizelge 4.3. Hurda kullanılarak elde edilen dökümlere ait üretim değerleri.....	60
Çizelge 4.4. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim değerlerinin karşılaştırılması.....	61
Çizelge 4.5. Doğrudan indirgenmiş demir (DRI) ile gerçekleştirilen üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek kalıntı element miktarı..	63
Çizelge 4.6. Sıcak briketlenmiş demir (HBI) ile gerçekleştirilen üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek kalıntı element miktarı.....	64
Çizelge 4.7. Hurda ile gerçekleştirilen üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek kalıntı element miktarı .....	64
Çizelge 4.8. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek kalıntı element miktarı.	66

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 1900 yılı civarında bir yüksek fırın için döner dağıtıcılı iki çan tepesi .....	9
Şekil 2.2. Bessemer konvertörü çelik üretimi şematik gösterimi .....	13
Şekil 2.3. Dünya çapında ham çelik üretimi (EAO vs. toplam). Üstte: 2005-2014 yılları arasında ve Allta: 2050 yılına kadar tahmini üretim miktarları.....	19
Şekil 2.4. Dünya ve Türkiye’de prosese göre çelik üretimi (%).....	19
Şekil 2.5. Türkiye çelik haritası .....	21
Şekil 2.6. Elektrik ark ocağının zaman içindeki gelişimi .....	22
Şekil 2.7. EAO gösterimi: (1) Dönüştürücü, (2) Kablo bağlantıları, (3) Elektrot kolları, (4) Elektrod kelepçeleri, (5) Kollar, (6) Soğutulmuş çıkış gazı kanalı, (7) Soğutma panelleri, (8) İskelet, (9) Ağırlık kaldırma panelleri, (10) Yük kolonları, (11) Soğutma çatısı, (12) Ocak devirme (13) Hidrolik sistemler .....	24
Şekil 2.8. Ark ocağı çelik üretim aşamaları .....	25
Şekil 2.9. Elektrik ark fırınına oksijen, karbon, doğalgaz ve kireci şarj etmek için enjektörlerin kullanılması .....	26
Şekil 2.10. DİD’in farklı biçimleri: (A) parça, (B) pelet ve (C) SBD.....	41
Şekil 2.11. %DİD/SBD ile nominal şarj uygulaması.....	48
Şekil 2.12. SBD şarj için sepet katmanları gösterimi .....	49
Şekil 4.1. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim değerlerinin karşılaştırılması .....	62
Şekil 4.2. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek %Cu miktarı .....	65
Şekil 4.3. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek %P miktarı .....	65
Şekil 4.4. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek %S miktarı .....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>DRI</b>	Direct Reduced Iron (Doğrudan İndirgenmiş Demir)
<b>DİD</b>	Doğrudan İndirgenmiş Demir
<b>EAF</b>	Electric Arc Furnace (Elektrik Ark Ocağı)
<b>EAO</b>	Elektrik Ark Ocağı
<b>MÖ</b>	Milattan Önce
<b>ABD</b>	Amerika Birleşik Devletleri
<b>BOF</b>	Bazık Oksijen Fırını
<b>LF</b>	Ladle Furnace (Pota Ocağı)
<b>HBI</b>	Hot Briquetted Iron (Sıcak Briketlenmiş Demir)
<b>SBD</b>	Sıcak Briketlenmiş Demir
<b>OFB</b>	Oxy-Fuel Burner (Oksi-Yakıt Brülörü)
<b>PI</b>	Pig Iron (Pik Demir)
<b>FeO</b>	Demir Oksit
<b>CO</b>	Karbon Monoksit

## 1. GİRİŞ

Demir elde edilmesi, çelik üretiminde ilk adımdır. Demir-çelik endüstrisi, dünyadaki enerjinin ve sermayenin en yoğun olduğu imalat sektörlerindedir (Strezov, 2006). Çelik üretim süreçleri, birincil şarj malzemesi olarak demirin farklı formlarını kullanır. Geleneksel olarak, çelik üretimi için ana demir hammadde kaynakları, yüksek fırın sıcak metali (pik demir) ve hurda şeklinde geri dönüştürülmüş çeliktir. Yüksek fırın ile demir üretiminde tesis kok üretimi ve sinterleme için ayrı tesislerin mevcudiyetini gerektirir ve bu durum genellikle işletme esnekliğini azaltır (Lu ve ark., 2015). Koklaşabilir taş kömürü, nispeten daha yüksek maliyette olmasına rağmen birinci sınıf kömür olarak kabul edilir, ancak bu kömürün rezervinin sınırlı olması da üreticileri endişelendirmektedir. Demir-çelik üretiminde demir cevherinin kullanımının azaltılmasında başlıca sebep kömür kullanımı ve bu sebeple oluşan CO<sub>2</sub> kaynaklı kirlilik ve sera gazı emisyonlarıdır (Yılmaz ve Turek, 2017). Hem yüksek fırın - bazik oksijen fırını hem de elektrik ark ocağındaki çelik üretim aşamalarında hurda kullanımının giderek artması dolayısıyla hurda çelik kaynağı da giderek azalmaktadır.

Demir ve çelik endüstrisi, artan kirlilik ve iklim değişikliği sorunlarını azaltmak, hem mevcut hem de yeni demir geri kazanım süreçlerini çevresel olarak daha sürdürülebilir operasyonlar haline getirmek için daha fazla baskı altındadır. Bu amaçla, son gelişmeler fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına ve alternatif doğrudan demir cevheri indirgeme teknolojilerinin kullanılmasına odaklanmıştır (Xu ve Cang, 2010). Sünger demir olarak da bilinen doğrudan indirgenmiş demir (DİD), yüksek üretkenliği ve hammaddelere güçlü bir şekilde uyarlanabilirliği nedeniyle demir yapım endüstrisinde önemli bir gelişmedir (Guo ve ark., 2017). DİD yüksek metalizasyon derecesine, düşük gang içeriğine ve gözenekli yapıya sahip olup, bünyesinde düşük kalıntı elementleri bulundurması nedeni ile elektrik ark ocaklarında (EAO) ve bazik oksijen fırınlarında (BOF) kaliteli hurdanın yerine alternatif hammadde olarak kullanılmaktadır (Geçim, 2006; Ersundu, 2007; Turgut, 2010; Doğanstepe, 2013). Geçtiğimiz 40-50 yıl boyunca, elektrik ark ocağı (EAO) prosesi ile çelik üretim oranında istikrarlı bir büyüme yaşanmaktadır. Bununla birlikte, yüksek yatırım maliyetleri ve ayrıca ekolojik nedenlerden dolayı yeni çelik üretim yöntemlerinin geliştirilmesi amacıyla çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Geliştirilen iki temel alternatif doğrudan indirgeme ve izabe indirgeme işlemleridir. Bu proseslerin pik demir üretimine göre başlıca avantajları, yatırım

maliyetlerinin daha düşük olması ve önceden hazırlık gerektirmeden hammadde olarak parça demir cevheri, ince demir cevheri, pelet ve kömür kullanılmasıdır. İndirgeme gazı, doğal gaz veya kömür ile sağlanmaktadır.

Temiz kimyasal bileşimleri sayesinde, doğrudan indirgenmiş demir - DİD (direct reduced iron - DRI) ürünleri, verimli yüksek kaliteli çelik üretimi için tercih edilen şarj malzemesi haline gelmiştir. Doğrudan indirgenmiş demirin kalıntı element içeriği hurdaya göre çok daha düşüktür. Doğrudan indirgeme işlemi, çoğunlukla EAO çelik üretimi için kullanılan sünger demir veya DİD gibi katı formda metalik demir üretir. Bu süreçler, yüksek fırın/bazık oksijen fırın metodlarına alternatif olan EAO çelik üretimi için oldukça önemlidir. Son zamanlarda artan demir çelik üretimi nedeniyle meydana gelen hurda sorunları ve dünya devletlerinin artan çevre kuralları nedeniyle hurdaya alternatif şarj malzemesine ihtiyaç duyulmaktadır (Quintero, 2002). Bu amaçla DİD gibi cevher esaslı hammaddelerin EAO'da çelik üretiminde kullanımı üzerine birçok çalışma yürütülmüştür. Mevcut tez çalışması da bunlardan bir tanesidir ve bu çalışmada cevher bazlı metalik hammaddelerin elektrik ark ocağında %100 kullanılması ile elde edilen ve % 100 hurda kullanılarak üretilen dökümler incelenmiştir. Cevher esaslı metalik hammaddelerin kimyasal kompozisyonlarında düşük miktarda bakır (Cu), fosfor (P) ve kükürt (S) gibi elementleri bulundurmasıyla temiz çelik üretimine katkısı gösterilmiştir. Ayrıca; grafit elektrod tüketimi ve enerji tüketimi yönünden incelenmesi ile üretim optimizasyonuna olan faydası gösterilmiştir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, dört alt başlık altında sırasıyla, demir ve çelik üretiminin tarihçesi, elektrik ark ocağı, doğrudan indirgenmiş demir ile elektrik ark ocağında doğrudan indirgenmiş demir kullanımı konuları ile bu konularda daha önce yapılmış çalışmalar göz önünde bulundurularak tartışılacaktır.

### 2.1. Demir ve Çelik Üretimnin Tarihçesi

Yerkabuğunda yaklaşık olarak %5 oranında demir vardır. Ancak demir, doğada demir oksit halinde yani bileşik olarak mevcuttur (Turgut, 2010; Doğantepe, 2013). Demir, bir indirgeme maddesi ile indirgenerek oksitten metalik Fe olarak elde edilebilir. Kullanılan ana madde, kok kömürü, kömür veya odun kömürü şeklinde doğal olarak oluşan karbondur. Demirin ekonomik olarak çıkarılması için, genellikle %55-60'ın üzerinde Fe içerikli nispeten zengin demir cevheri yatakları kullanılır (Turgut, 2010). En bol bulunan demir oksit minerali hematittir ( $Fe_2O_3$ ) ve ardından manyetittir ( $Fe_3O_4$ ). Demir cevherleri ayrıca alüminyum, silikon, manganez ve fosfor gibi diğer bazı elementlerin oksit minerallerini de içerir. Bu mineraller fiziksel olarak kum, kaya ve kil gibi topraklı malzemelerle karıştırılır. Bu maddelerden bazıları bitmiş ürünlerin özellikleri için zararlıdır. Bunlar, ekstraksiyon sırasında çıkarılması gereken safsızlıklar olarak kabul edilir. Demir, birçok elementle alaşım oluşturma özelliğine sahiptir. Bu tür alaşımlama, çeşitli uygulamalar için gerekli özelliklere sahip çeşitli derecelerde demir alaşımları üretmek için kasıtlı olarak yapılır. Genel olarak, demir ürünleri üç kategoriye ayrılabilir; dövme demir, dökme demir ve çelik. Günümüzde demirin en önemli ürünü çeliktir, onu dökme demir takip ederken, dövme demir çok az miktarlarda kullanılmaktadır (Biswas, 1996).

Demirin dövme demir, dökme demir ve çelik olarak sınıflandırılması demirin tarihte kullanıldığı ilk günlerde yaygın değildi, yani bu terminolojiler eski zamanlarda bilinmiyordu. O günlerde tüm ürünler demir olarak biliniyordu. Demir nesnelere yıllar içinde toprak, hava ve su ile temas ettiğinde paslanıp yok olduğundan, demir kullanımının antik çağlarda ne zaman kullanıldığı belirsizdir. Britanya Müzesinde (British Museum) korunan en eski örnek yaklaşık MÖ 3500-4000'e kadar uzanmaktadır (Ghosh ve Chatterjee, 2008). Demir oksidin odun kömürü ile indirgenmesi, yalnızca 900-1000 °C'lik

bir sıcaklığın üzerinde kayda değer oranlarda mümkündür. Bu olay muhtemelen ateş yakılırken tesadüfen keşfedilmiştir. Küçük yüzdelerde nikel içeren ilk demir nesnelere, meteorlarda elemental durumda bulunan metalik demirden yapıldığına dair kanıtlar vardır. Oksitin indirgenmesiyle demir yapımının ilk kesin kanıtı, MÖ 1500'lere kadar uzanmaktadır (Tylecote, 2013). Saf demirin ergime noktası 1536 °C'dir, ancak demir karbonu emdiğinde ergime noktası önemli ölçüde düşer. %4,26 karbon içeren en düşük ergime derecesine sahip bileşim (yani ötektik bileşim) 1147 °C civarında ergir. Demiri çıkarmak için kullanılan ilkel fırınların boyutları küçüktür ve yaklaşık 1-1,5 m yüksekliğinde, 0,4 ila 0,8 m arasında değişen çaplarda derin bir kâse şeklindedir. Astar esas olarak kurutulmuş kilden oluşmaktadır ve indirgeme ajanı olarak odun kömürü kullanılmıştır. Oksijen, ağızda tutulan borulardan ve daha sonra körüklerden hava üflenerek sağlanmıştır. Sağlanan hava, fırın sıcaklığını artıran karbon monoksit ve ısı oluşumu ile birlikte karbonun kısmi yanması ile sonuçlanmıştır. Gerçek azalma CO tarafından gerçekleştirilmiştir:



(Bu denklem denkleştirilmemiştir. Sadece tepkiyi niteliksel olarak göstermektedir.)

Kullanılan küçük fırınlarda, maksimum sıcaklık bölgesinde 1100 ° C veya daha yüksek sıcaklıklara ulaşmak zordur. Bu koşullar altında, metalik demir fazla karbon emememektedir. Bu nedenle, ergitme gerçekleşmemiştir ve elde edilen sıcak demir, çok yüksek oranda FeO içeren düşük ergime noktalı bir cüruf ile karıştırılmış katı halde kalmıştır. Tekrar tekrar ısıtmanın ardından bir çekiçle çeşitli şekillerde dövüldükten sonra, cürufun çoğu, neredeyse saf (veya düşük karbon konsantrasyonlu) demir elde edilmek için sıkıştırılmıştır. Bu tür ürünler, dövme olarak bilinir hale gelmiştir. Demirin farklı şekillerde dökülmesi ihtiyacı, sıvı halde demir üretimini gerektirmiştir. Bu ancak daha sonraki bir aşamada mümkün olmuş; bu nedenle, dövme demirden sonra tarihsel olarak sıvı demir gelmiştir. Sıvı demir, bazı tarihçilere göre ilk olarak Hristiyanlık döneminden önce Çin'de üretilmiştir. Çin'de yaklaşık MS 1000 yılına kadar giden bazı büyük dökme demir nesnelere hala mevcuttur (Tylecote, 2013). Eski Çin'de demir dökümünün başarısı aşağıdakilere bağlanabilir:



- Daha iyi astar ve daha güçlü üfleme ekipmanı ile daha verimli fırınlar geliştirilmesi
- Karbonun demir tarafından emilmesine izin veren ve böylece ergime noktasını düşüren bir tekniğin tanıtılması
- Bazı Çin hammaddelerinin yüksek fosfor içeriği ve üçlü Fe-C-P sisteminin karşılık gelen Fe-C ikili sisteminden çok daha düşük ergime noktaları göstermesi (Fruehan, 1999; Sarma ve ark., 2001).

### Avrupa'da demirciliğin gelişimi

Antik demir yapımı süreci Akdeniz çevresinde gelişmiş, daha sonra Fenikeliler, Keltler ve Romalılar aracılığıyla Kuzey Avrupa'ya yayılmıştır. Bir sonraki önemli gelişme, Catalan Forge olarak bilinen İspanya'nın Katalonya eyaletinde gerçekleşmiştir. Burada, hava üfleme için su çarkları kullanılmış, bu da daha yüksek üretim oranları ve daha iyi odun kömürü kullanımı sağlanmıştır. Her 12 saatte bir partiler halinde yaklaşık 100 kg metal üretimi sağlanmıştır. Daha fazla demir talebi, Almanya'da Stukofen'in gelişmesine yol açmıştır. Stukofen'in yüksekliği 3-4.5 metredir ve şekli modern bir yüksek fırına benzemektedir (Wiklund, 2016). Su ile çalışan körüklere ve taş ve kilden yapılmış üstün bir fırın astarına sahiptir. Haklı olarak modern yüksek fırının öncüsü olarak kabul edilir. Sıcak demir kabarması (bir katı formunda) eskiden alttan çekilirdi ve yan ürün olarak yalnızca küçük miktarlarda sıvı demir üretilirdi. Bireysel Stukofenler ile yılda 100-150 ton demir üretilmekteydi (Wiklund, 2016). Demir yapımı fırını tasarımındaki bir sonraki önemli adım, 14. yüzyılda Almanya'daki Ren Vadisi'nde esasen savaş için top atmak üzere geliştirilen Flussofen (akış fırını) idi. Avrupa kıtasında geliştirilen odun kömürü yüksek fırınları daha sonra demir yapımı teknolojisinin bir sonraki evriminin gerçekleştiği Büyük Britanya'ya yayılmıştır. Çeşitli iyileştirmeler daha büyük ve daha verimli fırınlara yol açmıştır. Yaklaşık 1880 yılına kadar meydana gelen önemli gelişmeler aşağıda özetlenmiştir.

### Kömürün kok ile değiştirilmesi

Kömür kullanımı, Parlamento'nun demir üretimini sınırlandırma yasasını onaylamasından önce Büyük Britanya'daki ormanların büyük ölçekli tahrip olmasına yol açtı. Kömürün karbonizasyonu ile elde edilen kok, ilk olarak 1709 yılında Dudley tarafından bir yüksek fırında kullanılmıştır. Kok kullanımı sadece 1800 yılı civarında önemli ölçüde artmıştır (Mott, 2014). Kok, odun kömüründen daha güçlü olduğu için, yüksek fırının yüksekliği artmış olabilir.

### Hava üfleme için buhar motorlarının kullanılması

Buhar motoru tahrikli üfleyiciler 1760'da icat edildi. Bu püskürtücüler, daha önce kullanılan püskürtücülerden daha güçlüydü ve sonuç olarak kısa sürede tüm yüksek fırınlarda kullanıldı. Bu gelişmenin ardından daha büyük fırın boyutları ve daha yüksek üretim oranları elde edilmeye başlandı.

Hava fırınının ön ısıtması: Neilson, 1829'da hava fırınının önceden ısıtma konseptini duyurdu. Daha önce, bir ton demir yapmaya yetecek kadar kok üretmek için yaklaşık 8 ton kömüre ihtiyaç duyuluyordu, ancak havanın yaklaşık 150 °C'ye ön ısıtılması mümkün olduğunda, tüketim 5 tona düşmüştür. Diğer değişiklikler, ön ısıtma sıcaklığının yaklaşık 600 °C'ye ulaşmasına izin vermiştir (Wiklund, 2016). 1857'de Cowper, ön ısıtma sıcaklığının daha da artırılmasına izin veren ateş tuğlası kaplı sobaların patentini aldı (Hyde, 2019). Bu sobalar rejeneratif prensiple çalıştı - iki soba, yüksek fırın gazının yakılmasıyla ısıtılırken, bir soba üflenen havayı fiilen ısıtıyordu. Bu, günümüz modasında olduğu gibi döngüsel bir şekilde yapılmıştır.

### Yüksek fırın gazının yakıt olarak kullanılması

Fırın üstünden çıkan sıcak gaz, yüksek fırın gazı olarak adlandırılır. Isı sağlamak için yakıt olarak hava ile yakılabilen yüksek oranda karbon monoksit içerir. Daha önce, fırının tepesinden çıkan gazın tamamı, hava üflemesinin ön ısıtması için yakılıyordu. 1845 yılında Bunsen ve Playfair, bu yaklaşımda gazın kalorifik değerinin büyük bir kısmının boşa harcandığına dikkat çekerek, gazın sadece havanın ön ısıtması için değil, aynı zamanda kok, demir cevheri gibi başka bir yerde kullanılabilen fikrini öne sürmüşlerdir. Fırına

şarj ve malzeme besleme için bir düzenleme gerekmekteydi. Bu, atmosfere herhangi bir gaz sızıntısı olmadan fırının tepesinden demir cevheri, kok, vb. hızla şarjı için bir düzenleme gerektirdi. Kule-çan sistemi 1850 civarında icat edilmiş ve daha sonra çift çan şarj sisteminin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu, yaklaşık 1970-1980 yılına kadar tüm yüksek fırınların standart bir özelliği haline geldi. İlk günlerde karşılaşılan bir başka sorun da, gazın boru hatlarını, sobaları vb. boğan çok sayıda toz parçacığı içermesiydi. Toz içeriğini azaltmak için, gaz, hızın düşmesi nedeniyle bir miktar tozun oturduğu büyük bir odadan geçmeye başladı. Bununla birlikte, bu düzenleme pek tatmin edici değildi bu nedenle modern yüksek fırınlar, çok daha ayrıntılı gaz temizleme sistemleri ile donatılmıştır (Ghosh ve Chatterjee, 2008).

### Yüksek fırın teknolojisi

19. yüzyılın sonlarından itibaren ABD'de demir-çelik endüstrisi büyümeye başlamıştır. Carnegie Steel Co.'nun Andrew Carnegie tarafından kurulması önemli bir dönüm noktasıdır ve bunu takiben ABD'li demirciler ve Avrupa'dakiler birkaç öncü girişimde bulunmuşlardır. 1880'den 1950'ye kadar, gelişmelerin çoğu fırın tasarımı ve mühendisliği alanındadır (Ghosh ve Chatterjee, 2008). Proses teknolojisinde önemli bir değişiklik olmamıştır, bunun nedenleri şunlardır:

Yüksek fırın reaksiyonlarının fizikokimyasal ve metalurjik yönleriyle ilgili bilgi sınırlı idi. Termodinamiğin uygulanması ve bunun sonucunda metalurjik termodinamiğin gelişmesi ancak 1930'larda başlamıştır. İlgili reaksiyonların kinetiği ve ilgili dönüşüm olayları bilgisi 1950'lerin başında bile çok temel bir aşamadadır. Ancak 1950'ler ile 1960'lar arasında bu alanda hızlı adımlar atılmıştır.

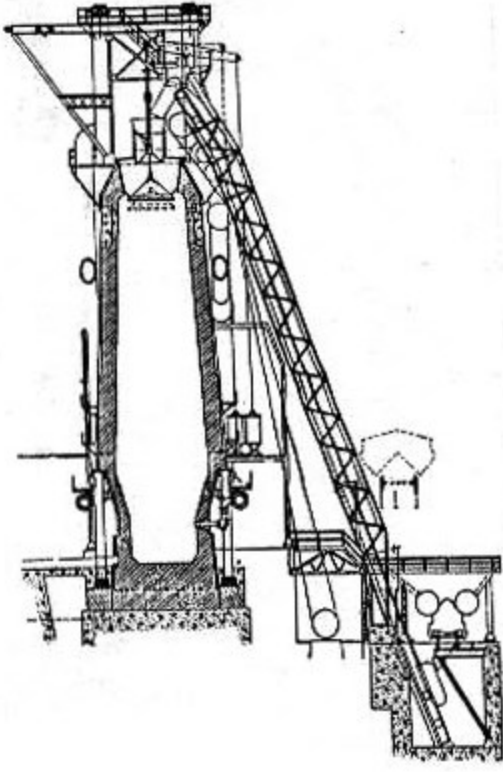
Yüksek fırın bir kara kutu gibiydi ve girdi ve çıktıya ilgili bazı bilgiler dışında iç durumu bilinmiyordu. İlk büyük atılım, 1950'lerde, Japonya'da çalışan bir yüksek fırının, tüyerlerine soğuk nitrojen püskürtülerek hızla soğutulmasıyla gerçekleşmiştir. Daha sonra fırın kesitlere ayrılmış ve kimyasal ve fiziksel inceleme için çeşitli bölgelerden örnekler alınmıştır. 1950'ye kadar olan gelişmeler aşağıdaki değişikliklere yol açmıştır:

- Daha güçlü üfleme motorları

- Daha yüksek patlama sıcaklıkları
- Daha büyük fırınlar
- Daha iyi şarj ekipmanı
- Gelişmiş hammadde depolama
- Vergilerin ortadan kaldırılması ve hammaddelerin taranması
- Yüksek fırın gazının daha verimli temizlenmesi
- Daha iyi refrakterlerin kullanılması ve fırın kaplamasının iyileştirilmiş tasarımı
- Demir işlemek için daha çok yönlü tesisler
- Giriş ve çıkışların bileşimi ve sıcaklığının doğru ve hızlı ölçümü.

Bu özelliklerden bazıları günümüzde yüksek fırınlarda standart hale gelmiştir. Elbette ara dönemde önemli iyileştirmeler yapılmıştır; aşağıda bazı özel örnekler verilmiştir.

- Fırının tepesinde kullanılan çift çan hammadde yükleme sistemi 1880'lerde ortaya çıkmıştır. Daha önce hammaddeler, 1883'te yerine atlamalı vinçler ile değiştirilen, dikey kaldırma tertibatları kullanılarak tepeye taşınmakta idi. Otomatik atlama yüklemesinin ortaya çıkışı, ancak, ciddi bir yük dağılımı sorunu ortaya çıkarmıştır. Bu sorun, 1890'da McKee döner tablaların takılmasıyla çözülmüştür. Şekil 2.1, bu özelliklerin dahil edildiği 1900'lerin başlarına ait bir yüksek fırını göstermektedir. Bu özelliklerin çoğu bugün bile mevcuttur, ancak çoğu modern fırının artık çan kullanmadan şarjı vardır.
- Günümüzde mevcut olan yüksek fırın gaz temizleme sistemi, bir toz tutucu, bir ıslak yıkayıcı ve bir elektrostatik çöktürücüden oluşur. Son tesis, 1919'da Lodge ve Cottrell tarafından elektrostatik çöktürücülerin icadının ardından dahil edilmiştir.



Şekil 2. 1. 1900 yılı civarında bir yüksek fırın için döner dağıtıcı iki çan tepesi (Chatterjee ve Ghosh, 2008).

- Sistemin ömrü, karbon ocak dahil olmak üzere sistemin su ile soğutulmasıyla önemli ölçüde iyileştirilmiştir.
- Yüksek fırınlardan akıtılan daha önce erimiş demir, kum yatakları üzerine dökülmektedir. Pik döküm makinesi 1896'da Uehling tarafından icat edilmiştir. Aynı zamanda, sıcak metal karıştırıcıların piyasaya sürülmesi, sıvı demirin daha uzun mesafelerde potalarla transferine ve çelik eritme atölyelerinde depolamaya izin vermiştir. Tüm bu gelişmelerin yüksek fırın demir üretimi üzerindeki etkisi, yıllar içindeki en iyi işletim uygulamalarına göre Çizelge 2.1'de verilmiştir.

1950'den sonraki, yüksek fırın demir üretimi alanındaki gelişmeler dikkat çekicidir. Bunun çoğu, temelde yatan bilimin daha iyi anlaşılması ve araştırma ve geliştirme çalışmalarını takiben fırının iç çalışmasının daha iyi anlaşılmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, sadece tasarım ve mühendislikte değil, aynı zamanda prosesin metalurjisinde de büyük gelişmeler sağlanmıştır. Önemli gelişmeler şu şekilde özetlenebilir:

- Sinter ve pelet şeklinde hazırlanmış yüklerin kullanılması

- Düzgün boyutlandırılmış ve daha kaliteli kok kömürü
- Püskürtücülerden sıvı, gaz veya toz haline getirilmiş katı hidrokarbon enjeksiyonu - en yaygın olanı pülverize kömür enjeksiyonudur
- Daha büyük fırın hacmi
- Daha yüksek yakma sıcaklığı
- Hava yanmasının oksijenle zenginleştirilmesi
- Yüksek üst basınç işlemi
- Daha iyi yük dağılımı - çan sisteminden başka şarj yönteminin benimsenmesi
- Bilgisayar destekli proses kontrolü (Yeniçeri, 1990; IISI, 1997; Ghosh ve Chatterjee, 2008).

Çizelge 2. 1 Yüksek fırın demir yapımının tarihsel gelişimi (Chatterjee ve Ghosh , 2008)

Yıl	Fırın boyutu, m		Ortalama üretim, ton	Kok miktarı, ton sıvı demir başına kok kg
	Çalışma yüksekliği, m	Çap, m		
1880	20	3,4	110	3400
1901	22	4,5	415	2500
1950	25	8	1500	1000

## 2.2. Alternatif demir üretim prosesleri

Yüksek fırın, demir üretiminde en fazla kullanılan reaktördür. Yüksek fırını kullanmayan ve birincil indirgeyici olarak koka bağımlı olmayan alternatif demir üretim süreçleri şu anda toplam küresel demir üretiminin yaklaşık % 8'ini oluşturmaktadır. Bu alternatif süreçler genel olarak iki kategoriye ayrılabilir:

- Demirin katı hal indirgeme yöntemi ile üretildiği süreçler
- Katı ve sıvı hal indirgeme kombinasyonu ile sıvı demir üreten işlemler.

**Sünger demir:** Demir oksidin indirgenmesiyle katı olarak üretilen demir, halk arasında sünger demir olarak bilinir. Eski demirciler tarafından erimiş metal sıcaklıklarına ulaşamadığı için aslında sünger demir yapmışlardır. Yapılan sünger demir, dövme ürünleri doğrudan imal etmek için kullanılmıştır; bugün bile sünger demir, elektrikli fırınlar için bir hammaddedir. Bu nedenle, teknik literatürde sünger demir, Doğrudan İndirgenmiş Demir - DİD (Direct Reduced Iron - DRI) olarak da adlandırılır. DİD genellikle gözenekliliğini azaltmak için sıkıştırılır ve bu sıkıştırılmış ürüne Sıcak Briketlenmiş Demir - SBD (Hot Briquetted Iron - HBI) denir (Dutta ve Sah, 2016). Çizelge 2.1.'den, DRI üretmek için yapılan ilk girişimin 1910 gibi erken tarihlere dayandığı görülmektedir. 1950'den sonra artan ilgi aşağıdaki nedenlerden kaynaklanmaktadır.

- Elektrik ark ocak ile çelik üretimi arttıkça çelik hurda olarak verilen metal şarjı kıt hale gelmiştir. DİD, EAO'larda yardımcı besleme malzemesi olarak hurdayı desteklemek için kullanılmaktadır.
- Yüksek fırın tabanlı çelik fabrikaları nispeten büyük sermaye yatırımı gerektirir ve her yerde bulunmayan metalurjik koklaşabilir taş kömürüne bağlıdır. Öte yandan, DRI üretim platformlarının boyutu küçüktür, toplam sermaye yatırımı sınırlıdır ve indirgeyici, koklaşabilir olmayan kömür veya doğal gaz gibi indirgeyiciler olabilir. Sonuç olarak, alternatif süreçler özellikle gelişmekte olan ülkeler için ilgi çekicidir. Tonaj açısından, gaz esaslı Midrex ve HYL süreçleri her zaman üretimde en büyük paya sahip olmuşlardır. Çizelge 2.2'den de görüleceği üzere, 2019 yılında yıllık küresel DİD üretimi 108,1 milyon ton ile bir rekora ulaştı ve 2018 yılına göre üretimi%7,3 arttı. 2015'ten bu yana dünya çapında DİD üretimi 35.5 milyon ton (%49) arttı. 2019 yılı büyüme öncelikle Hindistan'da kömür bazlı DİD'deki artıştan, İran'daki mevcut ve yeni gaz bazlı santrallerin yüksek kapasite kullanımından ve Tosyalı'nın Cezayir'deki MIDREX® Fabrikasının üretim artışından kaynaklandı. Hindistan ve İran'ın toplam üretimi, küresel DİD'in yarısından fazlasını oluşturmaktadır (TOBB, 2019).

### 2.2.1 Bessemer prosesi

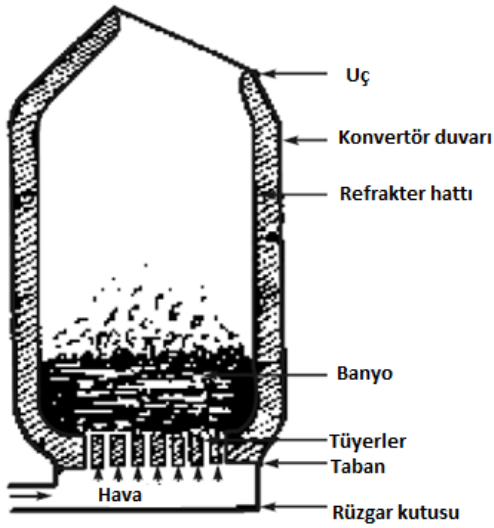
Bessemer işleminde, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi silindirik bir kap (konvertör) kullanır. Konvertör orijinal olarak asidik oksitlerden gelen saldırılara dayanabilecek silisli refrakterlerle örülüdür. Mesnetlere monte edildiği için potanın tamamını dikeyden yatay konuma döndürülebilmek mümkün olmaktadır. Yüksek fırınlardan gelen sıvı demir (yani

sıcak metal) önce konvertöre dökülür ve yatay konumda tutulur. Altındaki hamlaçlardan havanın üflenmesi daha sonra konvertörü dikey tutmaya başlayacaktır. Üflenen havadaki oksijen, SiO<sub>2</sub>, MnO, vb. gibi oksitler oluşturmak için sıcak metalde bulunan Si, C ve Mn ile reaksiyona girecektir. Bu oksitler bazı FeO ile birlikte asidik bir cüruf oluşturacaktır. Karbon, konvertörün ağzından doğrudan atmosfere kaçacak olan CO ve CO<sub>2</sub>'ye oksitlenecektir (Metal Dünyası, 2021).

Çizelge 2. 2. 2017, 2018 ve 2019 yıllarındaki dünyadaki bölgelere göre ve prosese göre DID üretimi (TOBB, 2019)

	2017	2018	2019		2017	2018	2019
Mide East / North Africa	40,53	47,19	50,15	MIDREX*	64,8%	61,5%	60,5%
Asia / Oceania	22,91	29,09 (r)	34,33	HYL/Energion	16,9%	15,7%	13,2%
Latin America (Including Mexio and Caribbean)	10,5	10,12	9,77	PERED*	*	2,4%	2,1%
CIS / Eastern Europe	6,99	7,90	8,03	Other	0,7%	0,2%	0,2%
North America (USA ve Canada)	4,60	5,02	4,68	Rotary Kiln	17,6%	20,2%	24%
Sub-Saharan Africa	0,93	0,83	0,66				
Western Europe	0,63	0,56	0,47				
a) Bölgelere göre DID üretimi (mio,ton)				b) Prosese göre DID üretim dağılımı (%)			





Şekil 2. 2. Bessemer konvertörü çelik üretimi şematik gösterimi (Total Materia, 2021)

Oksidasyon reaksiyonları ekzotermik olduğundan, sıvı banyo sıcaklığı herhangi bir yabancı yakıt kullanımına gerek kalmadan otomatik olarak yükselecektir. Bu işlem ekonomik avantajlar sağladığı ve prosesi çok hızlı olduğundan (rafine etme neredeyse 20 dakika sürer), nispeten düşük bir maliyetle seri çelik üretimi için ideal olarak uygun hale gelmiştir. Rafine etme tamamlandıktan sonra, sıvı metal ve cüruf ayrı ayrı çekilir ve sıvı çelik külçe olarak dökülür. Külçeler daha sonra çeşitli şekillerde sıcak dövme/haddelenmiş olacaktır. Bununla birlikte, işlemin önemli bir sınırlaması, sıcak metalde bulunan kükürt ve fosforu giderememesidir. Bu zararlı safsızlıklar, ürünlerin sıcak işlenmesi sırasında sıklıkla kırılmalara neden olur. Bessemer çeliğinin oksijen içeriği de aşırı derecede yüksektir. 1864'te Mushet, bir potaya akıtıldıktan sonra ferromangan kullanılarak sıvı çeliğin deoksidasyonunun oksijen seviyesini düşürdüğünü keşfetti (Barraclough, 1981). Bu aynı zamanda çeliğin Mn içeriğini de artırdı ve bu da yüksek sülfür seviyelerinden kaynaklanan sıcak kısısalığı önlemeye katkıda bulundu. Fosfor söz konusu olduğunda, orijinal Bessemer işleminde, sadece düşük fosforlu İsveç demir cevherlerinden yapılan sıcak metal rafine edildi. Bu eksikliklere rağmen, asit Bessemer süreci 1910 yılına kadar baskın hale geldi. Fosfor sorunu, 1879'da İngiltere'de Sidney G. Thomas tarafından Thomas sürecinin icat edilmesinin ardından ele alınmıştır (Barraclough, 1981). Yüksek CaO içerikli bazik bir cüruf oluşturmak için üfleme sırasında fluks olarak bazik oksitler (örneğin CaO) ilave edilmiştir. Bu tür bazik cüruf, kalsiyum fosfat formundaki fosforu giderebilmektedir. Bu, orta ila yüksek fosfor içeren sıcak metalden bile kabul edilebilir fosfor seviyelerine sahip çelik üretimine izin vermiştir. Bununla birlikte hem asit Bessemer hem de bazik Bessemer (Thomas) çeliği, konvertör tabanından hava enjeksiyonunu sağlayarak banyoda çözünen

yüksek seviyelerde nitrojen varlığından muzdariptir. Düşük nitrojenli çeliğin üretilebildiği Açık Ocak (Open Hearth) çelik üretim sürecinin icat edilmesiyle Bessemer süreci önemini yitirmeye başlamıştır. Neredeyse tüm Bessemer kovertörler 1950'de kapatıldı ve kalanlar bile daha sonra terk edildi. Süreç artık yok; ancak, sıvı çeliğin toplu üretimini müjdelediği için tarihsel açıdan ilgi çekicidir (Bodsworth, 2001; Gale, 2014).

### **2.2.2 Açık ocak (open hearth) prosesi**

Bessemer işlemi düşük nitrojenli çelik üretmiyordu ve nihai bileşimin ve sıcaklığın hassas kontrolü de zordu. Bu nedenle, yapılan çeliğin kalitesi genellikle tatmin edici değildi. Dahası, süreç ne farklı tipte yükleri barındırabiliyordu ne de spesifikasyonlara göre çeşitli derecelerde çelik üretebiliyordu. Bu sorunlar, açık ocak sürecinin ortaya çıkmasıyla çözüldü. Açık ocak çelik üretimi 1868'de tanıtıldı ve bundan sonra neredeyse bir yüzyıl boyunca dünya çelik üretimine hakim oldu. Bununla birlikte, süreç yavaştı ve dışarıdan ısı girdisi gerektirdi, bunun sonucu olarak 1950'lerin sonlarından başlayarak yerini oksijenli çelik üretimine bırakmak zorunda kaldı (Oster, 1982). Açık ocak süreci de bugün dünyada neredeyse hiç yokken, bilim ve çelik üretim teknolojisinin ilerlemesine muazzam bir katkı yaptığına dair çok az şüphe var. Bu aşamada, açık ocak sürecinin 1860'ların on yılında Karl Wilhelm Siemens ve Martin kardeşler tarafından icat edildiğini belirtmek gerekir. Açık ocak fırınının kendisi, üstünde bir çatısı olan sıg, refrakter astarlı dikdörtgen bir tepsi gibiydi (bu nedenle adı açık ocak). Çelik hurda ve sıcak metal ile kireç ve demir cevherinden oluşan yük, fırının ön duvarında bulunan bir dizi kapıdan fırına verildi. Bu kapılar ayrıca ısı yapımı sırasında sıvı metal banyosunun eklenmesi, incelenmesi ve örneklenmesi için de kullanıldı. Ocak yan duvarlarına yerleştirilen brülörler vasıtasıyla gazlı ve sıvı yakıtların hava ile yakılmasıyla açık ocak fırına ısı sağlanmıştır. Yanma için kullanılan hava, 1600 °C'nin üzerindeki alev sıcaklıklarına ulaşılmasına izin veren rejeneratif ilkeyle önceden ısıtıldı. Si, C, Mn ve P'nin oksidasyonu için oksijen, demir cevheri ve atmosferik oksijen tarafından sağlandı. Neredeyse tüm çelik sınıfları açık ocak fırınlarında yapılabilir, ancak işlem kinetiği yavaştır ve her ısıtma için minimum 6-8 saat gereklidir (Ghosh ve Chatterjee, 2008; Wakelin, 1999).

### 2.2.3. Bazik oksijen çelik üretimi

Hacimce yaklaşık % 80 nitrojen içeren havanın kullanılmasının zararlı etkisi Bessemer işleminde fark edilmekle birlikte, bu aşamada aşağıdaki zorluklardan dolayı saf oksijen kullanımını engellenmiştir:

- Yüksek saf oksijen maliyeti
- Lokalize yüksek sıcaklıklar nedeniyle konvertörün alt tüyerlerinin hızlı aşınması
- Çok hızlı bir sistemde etkili darbe kontrolünün olmaması.

1950 yılı civarında, Union Carbide Corporation'ın Linde Bölümü daha verimli bir hava ayırma süreci tasarlamış ve bu da yığın oksijeni uygun fiyata kullanılabilir hale getirmiştir (Ghosh ve Chatterjee, 2008). Bu, büyük ölçekli çelik üretimi için saf oksijen kullanımını tetiklediği için modern çelik üretimi için bir dönüm noktası haline gelmiştir. Günümüzde oksijen tesisleri, tüm entegre çelik fabrikalarının yanı sıra birçok büyük kapasiteli mini çelik fabrikasının ayrılmaz bir parçasıdır. Oksijen kullanımının ardından alt tüyerlerin etrafında yoğun ısı oluşumu sorunu, dönüştürücü ağzından dikey olarak sokulan bir boru kullanılarak üstten oksijen üflemeye başvurarak çözülmüştür. Böyle bir konfigürasyonu kullanan ilk ticari tesis, 1952-53'te Avusturya'daki Linz ve Donawitz'de faaliyete geçmiştir ve sürece popüler LD çelik üretimi adını verilmiştir (Arnold ve ark., 2006; Snigdha ve ark., 2019).

### 2.2.4. Elektrikli ocak çelik üretimi

Elektrikli ocak çelik yapımının ilk başarılı ticari uygulaması 1899'da Heroult tarafından gerçekleştirilmiştir (Madias, 2014). Birçok yönden, bir elektrik ark fırını açık ocak fırına benzer, yani. sıg bir banyosu, bir tavanı, bir ön kapısı, bir arka boşaltma deliği, vb. vardır. Temel fark, ısının herhangi bir yakıtla değil elektrik arkıyla sağlanmasıdır. Elektrikli ark fırınları, hassas proses kontrolü ve uzatılmış rafinaj süresi boyunca "özel yapım" cüruflar yapma kabiliyeti sayesinde, açık ocak fırınlarından daha iyi kalitede çelik üretme yeteneğine sahiptir. Sonuç olarak, özel ve alaşımli çelikler neredeyse yalnızca bu işlemlerle üretilir. Temel elektrik ark ocağı - EAO (Electric arc furnace - EAF) şu anda

önemli bir çelik üreticisidir. Diğer bir elektrikli eritme fırını türü, ilk olarak 1877'de İtalya'da Ferranti tarafından patenti alınan nüvesiz indüksiyon fırınıdır (Vivek ve ark., 2011). Bir endüksiyon fırınının ilk büyük kuruluşu 1914'te ABD'de yapılmıştır. Proses, yüksek kaliteli özel ve alaşımlı çelikler üretme kapasitesine sahiptir. Yüksek frekanslı indüksiyon fırınları, deneysel amaçlarla küçük, deneme ısıtmaları yapmak için laboratuvarlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bağımsız fırınların kapasitesi birkaç kilogram ile 20-25 ton arasında değişmektedir (Habashi, 2016).

### **2.2.5. İkincil çelik üretimi ve sürekli döküm**

Fırında erimiş metal banyosunun rafine edilmesi tamamlandıktan sonra, sıvı çelik bir potaya akıtılır. Daha önce, potada gerçekleştirilen tek işlem ferromanganez, ferrosilikon vb. ile deoksidasyon ve ardından küçük alaşım ilaveleriyken son elli yılda durum çarpıcı biçimde değişmiştir. Şu anda, pota, sıvı çeliğin çeşitli ikincil işlemlerinin gerçekleştirildiği bir reaktör olarak kullanılmaktadır. Bu şunları içerir: gazdan arındırma, kükürt giderme, yeniden ısıtma ve deoksidasyon. Tüm bu birim süreçler, geniş ikincil çelik üretimi kategorisine ayrılabilir. İkincil çelik üretimine başvurmadan, günümüzde kullanılan çeliğin tüm sofistike niteliklerini üretmek mümkün değildir. İkincil çelik üretiminin modern çelik fabrikalarının standart bir özelliği haline gelmesiyle, BOS ve EAF çelik üretimi artık birincil çelik üretim süreçleri olarak sınıflandırılmaktadır. 1960'lara kadar 150 yıldan fazla bir süre boyunca, sıvı çelik, katılaşmış külçelerin yeniden ısıtılmasından sonra haddeleme / dövme ile daha fazla şekillendirme için çeşitli boyutlarda / ağırlıklarda külçeler halinde parti halinde dökülmektedir. 1960'larda, sıvı çeliğin doğrudan kayda değer uzunluktaki levha / blum / kütüklere döküldüğü sürekli döküm metodu ortaya çıkmıştır. Bu, enerji tasarrufu sağlamış ve külçe sıyırma / yeniden ısıtma vb. gibi karmaşıklıkları azaltmıştır. Bu nedenle, çok kısa bir süre içinde sürekli dökümün yaygın bir şekilde benimsenmesi ve bugün dünya çeliğinin % 96'sından fazlasının sürekli olarak dökülüyor olması şaşırtıcı değildir. Son 40 yılda meydana gelen bir diğer önemli gelişme, sıcak metal ön işleme olarak bilinen şeydir. Yüksek fırınlardan akıtılan sıvı metal, çelik üretim fırınına yüklenmeden önce kükürt, silikon ve hatta bazen fosfor içeriğini düşürmek için bir potada farklı reaktiflerle işlenir. Bu, birincil çelik üretim aşamasının kendisinde daha saf çelik üretimine yardımcı olur (Dutta ve Chokshi, 2020).

### 2.3. Elektrik Ark Ocağı (EAO)

Çelik yapımında kullanılan elektrik ark ocağı (EAO), 1889'da Paul Héroult tarafından icat edilmiştir (Madias, 2014). Bu yeni teknolojinin ortaya çıkışı, yirminci yüzyılın başında, geniş kapsamlı nispeten ucuz elektrik enerjisi üretiminin gerçekleştirilmeye başlanmasıyla başlamıştır. Birinci nesil ocakların kapasitesi 1-15 ton arasındadır. Elektrik ark ocaklarının, başlangıçtaki en güçlü rakipleri Bessemer/Thomas konvertörler ve Siemens Martin fırınları olmuştur. Ancak ilk olarak yüksek sıcaklık, ferroalyaj ergitme ve uzun rafine etme süreleri gerektiren özel çeliklerin üretiminde kullanılmıştır. 1960'larda, kütük dökümünün gelişimiyle birlikte EAO üreticiler için tercih edilen eritme ünitesi, inşaat demiri ve filmaşın üretimi için kütük tekerlekleri besleme gibi yeni bir uygulama alanı kazanmıştır. EAO'nun teknolojik işlevi büyük ölçüde değiştirilmiştir. Hem gerekli çelik kalitelerini hem de daha spesifik özelliklerini sağlayan tüm teknolojik işlemler, ocaklardan ikincil pota metalurji ekipmanına taşınmıştır. Fırın verimliliğindeki gerekli artış, EAO çelik yapımındaki bu devrim niteliğindeki değişiklik olmadan elde edilemezdi. Modern ocaklarda temel teknolojik işlemler, şarj malzemelerinin ergitilmesi ve sıvı banyosunun ısıtılmasıdır. Şimdi fırın üretkenliğini tanımlayan önemli nokta termal enerji süreçleridir. Bu işlemlerin devam etmesi için, diğer enerji türlerinden (elektrik veya kimyasal) ısı elde etmek ve bunu katı yük veya sıvı banyosu bölgelerine aktarmak gerekmektedir. Bu ocaklar şarj malzemeleri seçimi açısından çok esnek hale gelmiştir. Çeşitli çelik hurda, pik demir ve sıcak metal kombinasyonlarında ve pelet veya briket olarak indirgenmiş demiri eritmeye kolayca uyum sağlayabilirler. Fırınların çoğunda, metal şarjı, az miktarda pik demir ilaveli hurdadan oluşur. Geleneksel olarak, hurda fırına yukarıdan tek bir şarj olarak veya iki-üç porsiyon halinde yüklenir (Madias, 2014; Christopher ve ark., 2014).

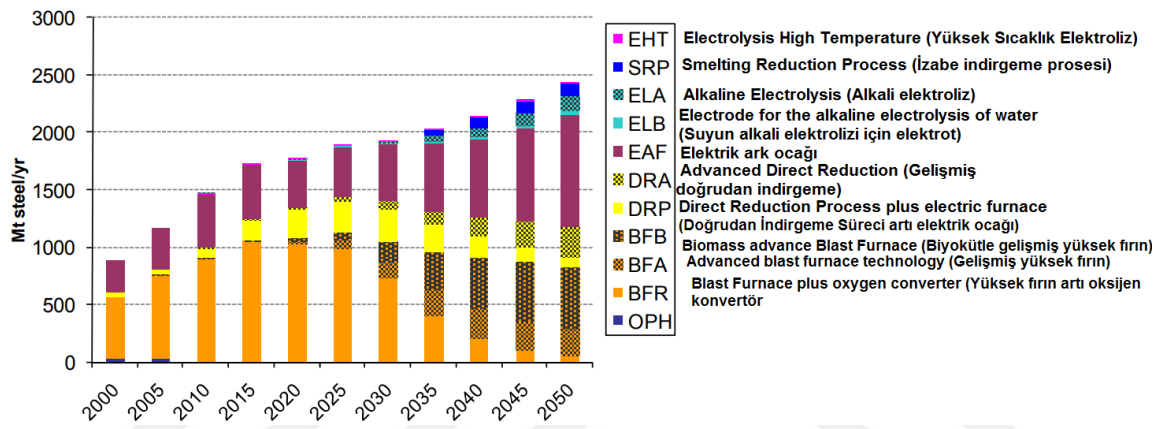
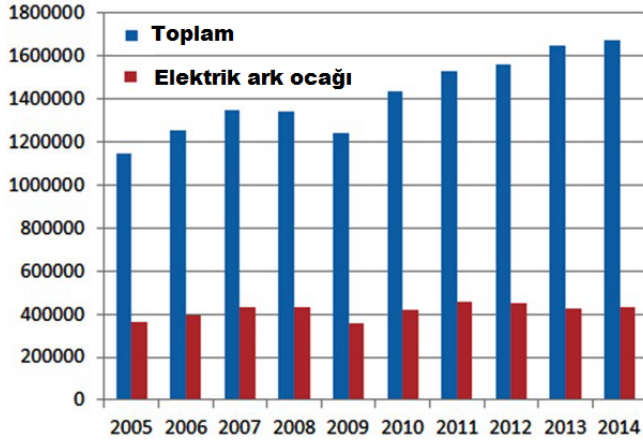
Sonraki yirmi yıl içinde, kütük döküm makinası sayesinde döküm sürelerinin kısılması ile EAO sistemi yeniden düzenlenmiş ve kendi kendine yeten bir ergitme sistemi haline gelmiştir. Yakın zamanda piyasaya sürülen pota fırını sayesinde de elektrik ark ocaklarında üretilen çelik rafine edilmesi işlemi tek çatı altında yapılmaya başlanmıştır. Büyük transformatörlerin ortaya çıkışıyla cüruf köpürtme uygulamasının benimsenmesi için istenen ultra yüksek güçlü fırınlar geliştirilmiştir. Bu şekilde, dökümler arası süre kısalmıştır. 1985 yılına gelindiğinde, elektrikle çelik üretimi için yeni bir alan ortaya çıkmaya başlamıştır ki bunlar yassı ürünler, ince levha dökümü ve doğrudan haddeleme olarak isimlendirilmiştir. Bu proses rotası, dünya çelik üretiminde önemli bir rol oynayarak

2014 yılında % 6'ya yaklaşmıştır. Şekil 2.3, dünya çapında ham çelik üretiminde EAO'nın payını ve 2050 yılına kadar projeksiyonu göstermektedir (Bellevrat ve Menanteau, 2009; Madias, 2014). Şekil 2.4'ten görüleceği üzere en fazla çelik üreten üç ülke Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan ve Çin'dir (Midrex, 2018).

Çizelge 2.3 incelendiğinde, 2020 yılında dünya ham çelik üretimi % 0.9 (16.1 mmt) düşüşle 1.88 milyar tondan, 1.86 milyar tona düştüğü görülmektedir. Ülkemiz 2020'de ham çelik üretimini % 6 arttırıp, Almanya'yı geride bırakarak, 2020'yi Avrupa'nın en büyük üreticisi, dünyanın 7. üreticisi olarak tamamladı.

Dünya çelik üretim kapasitesinin üretim yöntemlerine göre dağılımı ülkemizde çelik üretim kapasitesinin üretim yöntemlerine göre dağılımıyla tezatlık göstermektedir. BOF yöntemine göre dünya çelik üretimi %72,3 mertebesinde bulunurken ülkemizde bu oran % 30,8 değerinde bulunmaktadır (Bkz. Şekil. 2.4). Ülkemizde, çelik tesislerinin büyük çoğunluğu ülkemizde kıyı bölgelerinde kümelenmiştir. Çelik üretiminin İskenderun-Osmaniye, İzmir-Aliğa, Marmara ve Batı Karadeniz sahil bölgelerinde yer aldığı görülmektedir (bkz. Şekil 2.5).

Ülkemizin yıllık ham çelik üretim miktarı ürün ve prosese göre Çizelge 2.4'de sunulmaktadır. Üretimde EAO'lu tesislerde azalmaya karşın BOF'lu tesislerde artış olduğu görülmektedir. 2018 yılında BOF'lu tesislerde 11,6 milyon ton üretim olur iken 2019 yılında 10,9 milyon ton üretim gerçekleştirilerek %6'lık bir düşüş yaşanmıştır.



Şekil 2. 3. Dünya çapında ham çelik üretimi (EAO vs. toplam). Üstte: 2005-2014 yılları arasında ve Altta: 2050 yılına kadar tahmini üretim miktarları (Belleprat ve Menanteau, 2009; Madias, 2014)

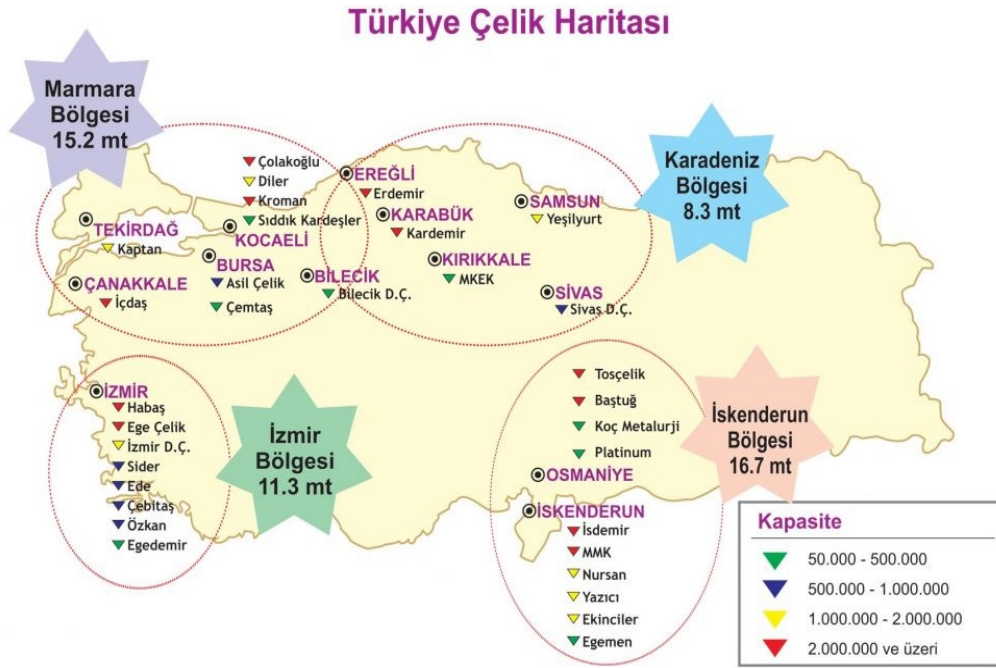


Şekil 2. 4. Dünya ve Türkiye’de prosese göre çelik üretimi (%) (STB, 2020)

Çizelge 2. 3. Dünya çelik üretimi (1000 ton) (Steel-Data, 2021).

Sıra	Ülke	2019	2020	%	Fark
1	Çin	1,001,306	1,052,999	5,2%	51,693
2	Hindistan	111,351	99,572	-10,6%	-11,770
3	Japonya	99,284	83,194	-16,2%	-16,090
4	Rusya	71,575	73,401	2,6%	1,826
5	ABD	87,761	72,690	-17,2%	-15,071
6	Güney Kore	71,412	67,121	-6,0%	-4,291
7	Türkiye	33,743	35,763	6,0%	2,020
8	Almanya	39,627	35,658	-10,0%	-3,969
9	Brezilya	32,569	30,971	-4,0%	-1,598
10	İran	25,609	20,029	13,4%	3,420
11	Ukrayna	20,845	20,626	-1,1%	-220
12	Tayvan	21,954	20,567	-6,3%	-1,387
13	İtalya	23,190	20,203	-12,9%	-2,988
14	Vietnam	17,469	19,500	11,6%	2,031
15	Meksika	18,387	16,854	-8,3%	-1,533
16	Fransa	14,451	11,596	-19,8%	-2,855
17	Kanada	12,897	11,078	-14,1%	-1,819
18	İspanya	13,588	Oct,93	-19,5%	-2,654
19	Mısır	7,257	8,229	13,4%	972
20	Polonyo	8,956	7,889	-12,0%	-1,067
	DÜNYA	1,880,100	1,864,000	-0,9%	-16,100
	Çin Hariç Dünya	878,794	811,001	-7,7%	-67,793





Şekil 2. 5. Türkiye çelik haritası (TÇÜD, 2021)

Çizelge 2.4. Ürün ve prosese göre ülkemizde ham çelik üretimi (Milyon ton) (Demir-Çelik, 2021)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Uzun	26,612	23,231	23,015	25,839	24,699	20,944
Yassı	9,423	8,286	10,148	11,685	12,643	12,799
<b>TOPLAM</b>	<b>34,035</b>	<b>31,517</b>	<b>33,163</b>	<b>37,524</b>	<b>37,312</b>	<b>33,743</b>
EAO	23,752	20,482	21,846	25,963	25,799	22,884
BOF	10,283	11,035	11,317	11,561	11,513	10,859
<b>TOPLAM</b>	<b>34,035</b>	<b>31,517</b>	<b>33,163</b>	<b>37,524</b>	<b>37,312</b>	<b>33,743</b>

Türkiye'nin ham çelik üretim kapasitesi 2019 yılı için EAO'lu tesislerde 37,1 milyon ton, BOF'lu tesislerde ise 12,4 milyon ton olmak üzere toplamda 49,5 milyon tondur (Bkz. Çizelge 2.5).

Hammadde olarak demir çelik sektörü demir cevherinin %60'ını, hurdanın %70'ini ve taşkömürünün %90'ını ithalat yoluyla karşılamaktadır. Sektördeki en fazla dış ticaret açığına 5,6 milyar dolarla hurda ithalatı neden olmaktadır. Ülkeler itibariyle ise, en büyük 5 hurda tedarikçisi sıralamasında, ABD (3.8 milyon ton), Hollanda (2.6 milyon ton), İngiltere (2.2 milyon ton), Rusya (1.9 milyon ton) ve Belçika (1.3 milyon ton) yer almıştır.

Türkiye'nin 2019 yılında toplam hurda ithalatının %62,6'sı söz konusu 5 ülkeden gerçekleştirilmiştir. 2019 yılında değer olarak %21,3 azalışla 5.6 milyar dolar, miktar olarak %8,7 azalışla 18.9 milyon ton hurda ithal edilmiştir (Bkz. Çizelge 2.6).

Çizelge 2. 5. Türkiye'nin ham çelik üretim kapasitesi (1.000 ton) (STB, 2020)

	2013	2.014	2.015	2016	2.017	2.018	2.019
EAO+İO	37,689	38,663	38,739	39,256	38,940	39,484	37,098
BOF	11,550	11,550	11,700	12,250	12,250	12,400	12,400
TOPLAM	49,239	50,213	50,439	51,506	51,190	51,884	49,498

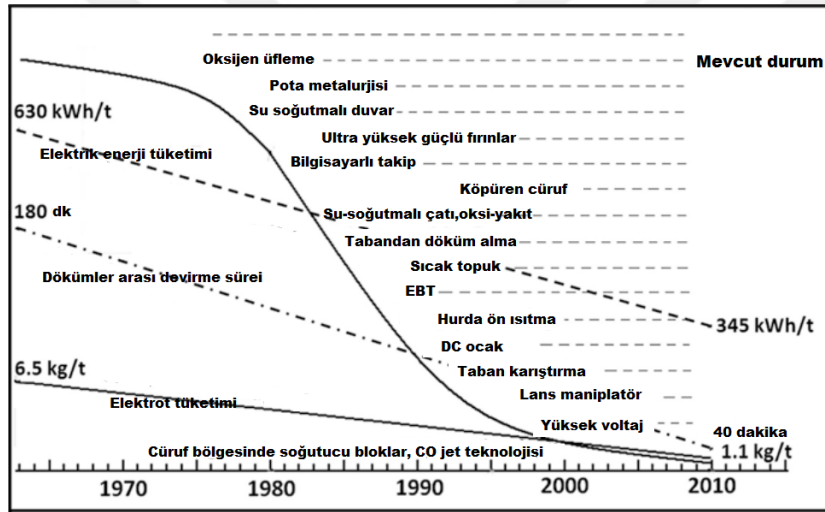
Çizelge 2. 6. Çelik sektörünün hammadde ithalatı (TOBB, 2019)

	2016		2017		2018		2019		% değişim 19/18	
	Bin ton	Milyon \$	Bin ton	Milyon \$	Bin ton	Milyon \$	Bin ton	Milyon \$	Miktar	Değer
Pik demir	1,100	274	1,013	361	1,303	509	1,232	439	-5,4	-13,8
Ferro alyaj	401	372	511	680	452	687	412	550	-8,8	-19,9
Sünger demir	417	75	637	169	293	98	535	146	82,5	49,0
Hurda	17,716	3,692	20,981	6,138	20,660	7,137	18,857	5,615	-8,7	-21,3
Demir cehveri	10,421	698	10,963	1,011	10,736	995	10,124	1,090	-5,7	9,5
Koklaşabilir taşkömürü	5,138	497	4,283	738	5,826	1,098	5,607	1,006	-3,8	8,4
Toplam	5,138	5,878	38,388	9,097	39,270	10,524	36,768	8,846	-6,4	-15,9

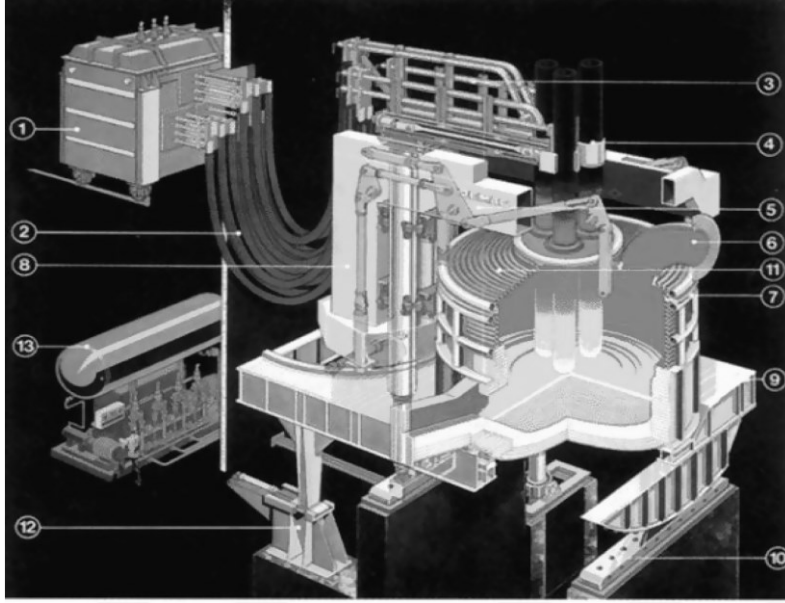
Dünya çapındaki demirli hurdaların çoğu geri dönüştürülmekte ve elektrikli ocaklar aracılığıyla çelik haline getirilmektedir. EAO'lar çok yönlüdür ve her tür hurdanın sıcak briketlenmiş demire (HBI), doğrudan indirgenmiş demire (DRI), pik demire, sıcak metale birçok ürünü hammadde olarak kullanabilir. EAO'lar uzun ve yassı, karbon ve alaşım, ticari ve özel ürünler gibi her tür çeliği üretebilir. 1965'ten beri EAO teknolojilerinde daha düşük elektrik enerjisi tüketimini, daha kısa döküm süresini ve daha az elektrot tüketimini teşvik eden gelişmeler Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Lüngen ve ark., 2013). Fırın boyutu maksimum 350 tona kadar büyütülmüştür, bu da iki döküm arası kademe süresini kısaltarak tek bir ocakla 1 milyon ton/yıl'dan fazla kapasiteye sahip olmayı mümkün kılmıştır. Elektrik enerjisi tüketimi %100 hurda operasyonları için 350 kWh/t'ye düşmüştür. Soğutulmuş çatı ve panellerin değiştirilmesi, cüruf köpürmesi ve refrakter kalitesinin iyileştirilmesi nedeniyle refrakter tüketimi düşmektedir (Madias, 2014).

### 2.3.1. EAO yapısı

Daha önce ifade edildiği gibi, son 50 yılda elektrik ark ocağındaki elektrik gücü artışı, EAO teknolojisinin gelişiminde önemli bir faktör olmuştur. 1960'larda genel olarak EAO gücü 250-300 kVA/t sıvı çelik iken bu değer günümüzde standart ultra yüksek güçlü EAO'lar için 900-1000 kVA /t sıvı çelik değerlerine ulaşmıştır. Bu fırınlar su soğutmalı paneller ve EBT (eccentric bottom tapping- merkezden kaçık tabandan döküm) döküm ile donatılmıştır. EBT teknolojisi ile cüruf kaçması belirli bir dereceye kadar kontrollü olarak yapılmasını sağlamak ve potaya geçen curuf miktarı azaltılmaktadır. Şekil 2.7'de genel olarak elektrik ark ocağı yapısı gösterilmiştir (Madias, 2014).



Şekil 2.6. Elektrik ark ocağının zaman içindeki gelişimi (Lüngen ve ark., 2013, Madias 2014)



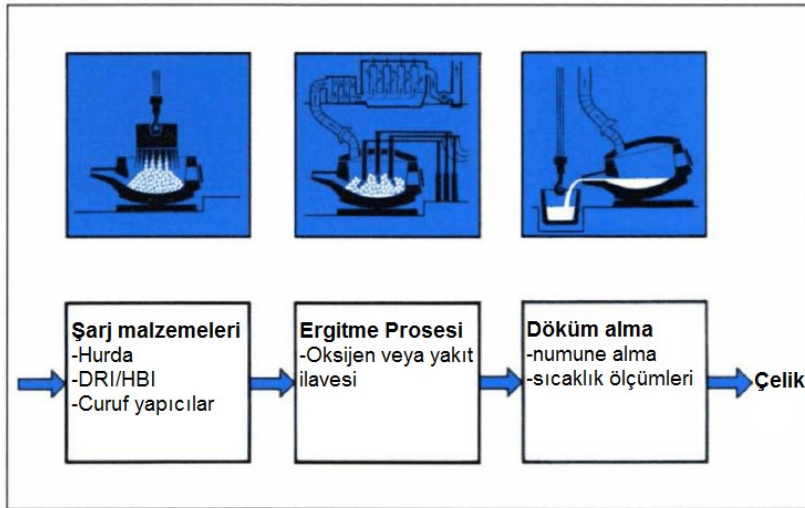
Şekil 2. 7. EAO gösterimi: (1) Dönüştürücü, (2) Kablo bağlantıları, (3) Elektrot kolları, (4) Elektrod kelepçeleri, (5) Kollar, (6) Soğutulmuş çıkış gazı kanalı, (7) Soğutma panelleri, (8) İskelet, (9) Ağırlık kaldırma panelleri, (10) Yük kolonları, (11) Soğutma çatısı, (12) Ocak devirme (13) Hidrolik sistemler (Madias, 2014)

Mevcut fırın üç su soğutmalı parça içerir: çatı, paneller ve gaz çıkış kanalı (Bkz. Şekil 2.7). Soğutma suyu tarafından ısı çekilmesi nedeniyle bir miktar ısı kaybedilmesine rağmen, bu tasarım daha az refrakter tüketimini ve yüksek güç kullanımını mümkün kılar. Panellerin ilk ortaya çıktığı sırada, güvenlik riskleri konusunda bazı korkular ortaya çıkmıştır, ancak maliyet avantajının farkına vardıldıktan sonra neredeyse tüm EAF bunları benimsemiştir. Son zamanlarda, su soğutma ile güvenliğe daha fazla dikkat edilmiştir. Su soğutmalı sistemlerde iki husus önemlidir. Birincisi, su sızıntısı olasılığını tespit etmek, sınırlandırmak ve önlemek ve ikinci olarak, sıcak fırında onarım işi ihtiyacını azaltmak. Hidrojen dahil edildiğinde çıkış gaz analizi, sızıntıyı tespit etmek için yararlı bir araçtır (Dutta ve ark., 2013).

### 2.3.2. Elektrik Ark Ocağında Ergitme Prosesi

Elektrik ark ocağında çelik üretimi belirli adımlardan oluşmaktadır. Bu proses süreçleri Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmiştir. Herhangi bir döküm döngüsünün ilk adımı ocağa "şarj etme evresidir" (Stopar ve ark., 2017). Tavan ve elektrotlar kaldırılır ve hurda yükleme vincinin fırın üzerinden hurda sepetini hareket ettirmesine ve boşaltmasına izin vermesi için fırının yan tarafına doğru döndürülür. Hurda ocağa boşaltılır ve hurda vinci,

hurda kovasını çıkarır. Tavan ve elektrotlar, fırının üzerindeki yerine geri döner. Tavan alçaltılır ve ardından elektrotlar indirilir ve hurdaya bir ark vurur. Bu, üretim döngüsünün ergitme kısmını başlatır. Üretilen sıvı çelik miktarına göre hurda şarj sepetlerinin sayısı öncelikle fırının hacmine ve hurda yoğunluğuna bağlı olarak ayarlanır. Çoğu modern fırın minimum şarj sayısı ile yüklemeye hazır tasarlanmıştır. Bu durum daha avantajlıdır çünkü şarj, ocağın şarj almak için açık olduğu zamanda ergitme yapılmadığı için ölü zaman olarak nitelendirilmektedir. Bu ölü zamanların en aza indirilmesi, ocağın üretkenliğinin maksimize edilmesine yardımcı olur. Ayrıca fırın tavanı her açıldığında enerji kaybı yaşanmaktadır. Bu, her olay için 10-20 kWh / ton olabilir. Çoğu operasyon ısı başına 2 ila 3 sepet hurdayı hedefler ve bu gereksinimi karşılamak için hurdalarını karıştırmaya çalışır. Bazı işlemler tek bir kova şarjı sağlar (Christopher ve ark., 2014; Toulouevski ve Zinurov, 2013).



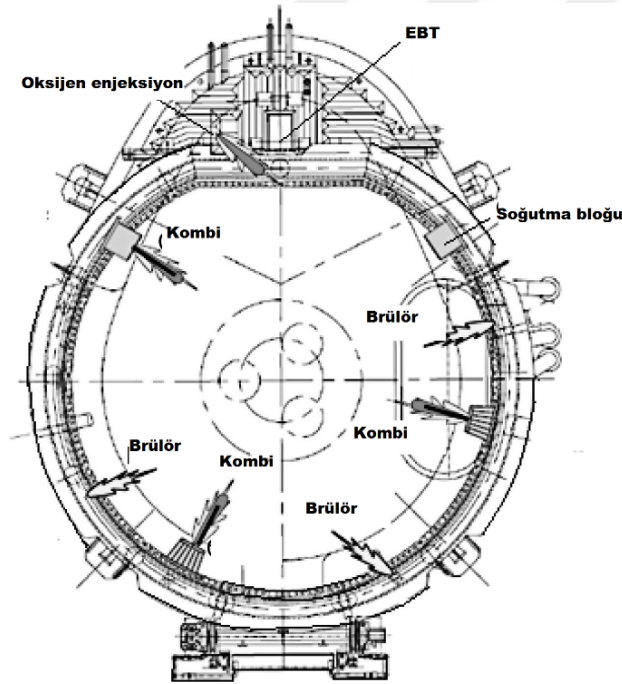
Şekil 2.8. Ark ocağı çelik üretim aşamaları (Degner ve ark., 2007)

Hurda sahası operatörü, eriticinin ihtiyaçlarına göre hurda sepetleri hazırlayacaktır. Şarj kovasının hazırlanması, yalnızca uygun ergitme kimyasını sağlamak için değil, aynı zamanda iyi ergitme koşullarını sağlamak için de önemli bir işlemdir. Yan duvarlar ve çatı için elektrik ark radyasyonundan koruma sağlarken, ocakta sıvı bir çelik havuzunun hızlı oluşumunu desteklemek için hurda, boyut ve yoğunluğa göre kovaya yerleştirilmelidir. Diğer hususlar arasında elektrotları kırabilen hurda oyuklarının en aza indirilmesi ve büyük ağır hurda parçalarının doğrudan brülör deliklerinin önünde durmamasının sağlanması, alevin su soğutmalı paneller üzerine geri püskürmesine neden olur. Şarj kireç, dolomitik kireç ve karbon içerebilir veya bunlar ısı sırasında fırına enjekte edilebilir (Bkz. Şekil 2.9). Çoğu işlem, hurda kovasına biraz kireç ve karbon ekler ve bunu enjeksiyonla tamamlar.

EAO çelik üretimi için ana hammadde çelik hurdasıdır. Hurda, enerjisi yoğun ve değerli bir emtiadır ve esas olarak üç ana kaynaktan gelir (Dragna ve ark., 2018; Schmitt, 1985).

Bunlar:

- Geri kazanılmış veya eskimiş hurda - Eski arabalar, yıkılmış binalar, atılmış makineler ve evdeki nesnelere dahil, kullanım ömrünün ötesinde çok çeşitli malzemelerden kaynaklanan hurda malzeme.
- Endüstriyel veya hazır hurda-Derhal imha edilmek üzere mevcut üretim işlemlerinden kaynaklanan her türden demir içeren hurda malzeme. Normalde tek tip özellikler ve öngörülebilir kalite
- Geri dönüş veya ev hurdası - Çelik üretimi sürecinde oluşan hurda, örneğin haddeleme işlemleri, cürufu metal kayıpları vb. (Jones, 1998).



Şekil 2.9. Elektrik ark fırınına oksijen, karbon, doğalgaz ve kireci şarj etmek için enjektörlerin kullanılması (Madias, 2014)

Son iki hurda biçimi temiz olma eğilimindedir, yani kimyasal bileşimde istenen erimiş çelik bileşimine yakındır ve bu nedenle geri dönüşüm için idealdir. Geri kazanılmış / eskimiş hurda sıklıkla oldukça değişken bir bileşime sahiptir ve çoğu zaman çelik yapımı

için istenmeyen kirleticiler içerir. Geri kazanılmış / eskimiş hurda, endüstriyel / hazır hurdaya göre çok daha fazla mevcuttur ve bu nedenle, hazır hurda kıtlığı artmaya devam ettikçe temiz demir birimlerinin kullanımının artması beklenmektedir. Kalıntı seviyeleri düşük ürünler üreten bir çelik üretim tesisi, çok daha yüksek bir maliyetle daha yüksek kaliteli hurda kullanmaya zorlanacaktır. Alternatif, genellikle temiz demir birimleri veya alternatif demir birimleri olarak adlandırılanlar ile birlikte kirlenmiş eski hurdanın bir kombinasyonunu kullanmaktır. Bunlar çok az kalıntı element içeren veya hiç içermeyen malzemelerdir. Temiz demir birimleri tipik olarak doğrudan indirgenmiş demir (DRI), sıcak briketlenmiş demir (HBI), demir karbür, pik demir ve sıcak metal (erimiş pik demir) biçimindedir. Kalıntı elementler içeren daha düşük dereceli hurda kullanmak mümkündür, eğer bu hurda temiz demir birimleri ile karıştırılırsa, böylece erimeyi takiben çelikte ortaya çıkan artık seviyeler belirli çelik kalitesi için gereksinimleri karşılar. Eski hurda (yüksek artıklar), hazır hurdaya göre çok daha kolay bulunur ve bu nedenle, hızlı hurda kıtlığı artmaya devam ettikçe temiz demir birimlerinin kullanımının artması beklenmektedir. Ergime prosesi, EAO operasyonlarının kalbidir. EAO, son derece verimli bir ergitme aparatına dönüşmüştür ve modern tasarımlar, EAO'nun ergitme kapasitesini en üst düzeye çıkarmaya odaklanmıştır. Ergitme, ocak iç kısmına enerji verilerek gerçekleştirilir. Bu enerji elektriksel veya kimyasal olabilir. Elektrik enerjisi grafit elektrotlar aracılığıyla sağlanır ve genellikle ergitme işlemlerine en büyük katkı bu sayede olur. Başlangıçta, elektrotlar hurdaya delik açana kadar bir ara voltaj arkı seçilir. Genellikle, delmeyi hızlandırmak için yükün üzerine hafif hurda yerleştirilir. İlk hurdada yer açma işleminde hurdanın yaklaşık %15'i eritilir. Birkaç dakika sonra, elektrotlar hurdaya yeterince nüfuz etmiş olur, böylece çatıya radyasyon hasarı korkusu olmadan uzun bir ergitme arkı (yüksek voltaj) kullanılabilir. Uzun ark, gücün hurdaya transferini en üst düzeye çıkarır ve fırın ocağında sıvı bir metal havuzu oluşur. Ergime başlangıcında ark düzensiz ve dengesizdir. Elektrotların hızlı hareketine eşlik eden geniş akım dalgalanmaları gözlenir. Fırın atmosferi ısındıkça ark stabilize olur ve erimiş havuz oluştuğunda ark oldukça kararlı hale gelir ve ortalama güç girişi artar (Toulouevski ve Zinurov, 2013; Szekeley ve ark., 1983).

Kimyasal enerji, oksijen-yakıt brülörleri ve oksijen boruları dahil olmak üzere çeşitli kaynaklarla sağlanabilir. Oksijen-yakıt brülörleri, oksijen veya oksijen ve hava karışımı kullanarak doğal gazı yakar. Isı, sıcak yanma ürünleri tarafından alev radyasyonu ve konveksiyon yoluyla hurdaya aktarılır. Isı, hurda içinde iletim yoluyla aktarılır. Büyük

hurda parçalarının küvette erimesi, küçük parçalara göre daha uzun sürer. Bazı işlemlerde, hurdayı "kesmek" için tüketilebilir bir boru mızrağı yoluyla oksijen enjekte edilir. Oksijen, sıcak hurda ile reaksiyona girer ve demiri yakarak hurdayı kesmek için yoğun ısı üretir. Fırında erimiş sıvı çelik havuzu oluşturulduktan sonra, oksijen doğrudan banyoya aktarılabilir. Bu oksijen, banyodaki alüminyum, silikon, manganez, fosfor, karbon ve demir gibi çeşitli bileşenlerle reaksiyona girecektir. Tüm bu reaksiyonlar ekzotermiktir (yani ısı üretirler) ve hurdanın erimesine yardımcı olmak için ek enerji sağlar. Oluşan metalik oksitler cürufta son bulacaktır. Banyodaki oksijenin karbon ile reaksiyonu, yeterli oksijen varsa fırında yanan ve/veya yakıldığı doğrudan tahliye sisteminden dışarı atılan ve kirlilik kontrol sistemine iletilen karbon monoksit üretir (Spencer ve Cochran, 2015).

İkinci şarjı almak için yeterli hurda eritildikten sonra, şarj işlemi tekrarlanır. Nihai hurda şarjı ergitildikten sonra, ocak yan duvarları arkından gelen yoğun radyasyona maruz kalır. Sonuç olarak, voltaj düşürülmelidir. Alternatif olarak, köpüklü bir cürufun oluşturulması arkın gömülmesine izin verecek ve ocak duvarını koruyacaktır. Ek olarak, cürufta daha fazla miktarda enerji tutulur ve banyoya aktarılır, bu da daha fazla enerji verimliliği sağlar. Nihai hurda şarjı tamamen eridikten sonra, düz banyo koşullarına ulaşılır. Bu noktada banyo sıcaklığı ve numune alınacaktır. Banyo kimyasının analizi, eriticinin arıtma sırasında üflenecek oksijen miktarını belirlemesine izin verecektir. Bu noktada, eritici, toplu döküm alaşım ilavelerinin yapılmasını da ayarlamaya başlayabilir. Bu miktarlar rafine sürecinden sonra kesinleşir (Mombelli ve ark., 2020).

EAO, çeliğin ergitilmesi ve rafine edilmesi için ısıya ihtiyaç duyar. Ana ısı kaynağı, elektrotlar aracılığıyla uygulanan elektrik enerjisidir. Bu ısının geri kalanı kimyasal enerji (kimyasal reaksiyonlar) ile sağlanır. Bir EAF'nin ısı dengesi, süreci ısı tüketen alt süreçlere ve ısı üreten alt süreçlere ayırarak tanımlanabilir. Prosesin sağladığı ısıların toplamı, fırının tükettiği ısıların toplamına eklenirse, transformatörden gelen elektrik enerjisiyle telafi edilmesi gereken bir fark vardır. Aşağıdaki işlemler EAO'da ısı tüketir:

- Hurda, DRI,  $Fe_3C$ , pik demirin vb. eritilmesi ve dökme için gerekli sıcaklığın sağlanması
- Cüruf malzemelerinin eritilmesi ve döküm sıcaklığına getirilmesi
- Torbalı fanların cüruf kapısından, duvarlardaki boşluklardan ocağa çekilen havanın ısısı.



- Elektrik kayıpları
- Su soğutmalı pano ve kanallar
- Tavanın açılması ve kapanması sırasında radyasyon kayıpları.
- Baca gazına duyarlı ısı
- Aşağıdaki işlemler EAF'de ısı sağlar:
  - Elektrik enerjisi
  - Çelikte çözünen C, Si, Mn, Fe ve diğer elementlerin lans ile oksidasyonu
  - Elektrot oksidasyonu
  - Şarj Karbon oksidasyonu
  - Cüruf oluşum reaksiyonları
- Brülörler
- Yanma sonrası (hava girişi yoluyla veya O<sub>2</sub> enjekte ederek) (Janke ve Savov, 2000)

EAO'daki metalik şarjın ısıtılması ve ergitilmesi (Hurda, DRI / HBI, pik demir ve sıcak metal): EAO'da ergimenin ana reaksiyonu şudur:

$$\text{Fe (hurda, DRI...)} @ T_1 = \text{Fe (sıvı)} @ T_2 \quad (3.1)$$

Çoğu işlem için,  $T_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$  ve  $T_2$  ise 1600 ile 1650  $^\circ\text{C}$  arasında bir sıcaklıktadır. Aşağıdaki denklem, demirin oda sıcaklığından (25  $^\circ\text{C}$ ) erimiş olduğu T sıcaklığına kadar ısıtılması için gereken ısıyı (entalpi) hesaplamak için kullanılabilir (Denklem 1500  $^\circ\text{C}$ -1700  $^\circ\text{C}$  aralığında uygulanabilir).

$$\text{Enerji (kWh / Kg Fe)} = (2.27 \times 10^{-4} * T) + 0.0142 \quad (3.2)$$

Bu denklemden 1 kg saf Fe'yi 25 ° C'den 1650 ° C'ye (3002 ° F) ısıtmak ve eritmek için gereken enerjinin 0.389 kWh olduğu hesaplanabilir.

1ton Fe (1000 kg) için enerji gereksinimi: 389 kWh / ton

1ton Fe (2000 lb) için enerji gereksinimi: 353 kWh / ton (Mori, 1988)

EAF'deki kimyasal enerji, ekzotermik bir şekilde yanan elementler veya bileşiklerle elde edilir. Oksijen, karbon, hidrokarbon bileşikleri, silikon, manganez ve demir ile reaksiyona girer. Kimyasal enerji sağlayan kaynaklar şunları içerir:

- Oksi-yakıt brülörleri
- Karbon şarjı
- Köpüren Karbon
- Hurdadaki ekzotermik bileşenler
- Alternatif demir kaynaklarındaki ekzotermik bileşenler

Son iki kaynak, her ikisi de fırının performansını önemli ölçüde etkileyebileceğinden özellikle ilgi çekicidir. Bunun nedeni, Si ve Mn yanma verimliliğinin önemli (% 90 -% 100), köpüklü kömürün yanmasından elde edilen verimin ise nispeten düşük olmasıdır (%30 -%50). EAO'da 1650 °C'deki (3000 °F) önemli ekzotermik reaksiyonlar ve reaksiyon ısıları ( $\Delta H$ ) Çizelge 2.7'de listelenmiştir (Fruehan ve Turkdogan, 1981).

Çizelge 2.7'deki veriler, oksitlerin füzyon entalpisini (endotermik) ve cüruf fazında (ekzotermik) oksidin çözelti entalpisini (karıştırma) hariç tuttuğu için biraz basitleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu entalpi etkilerinin bazıları neredeyse birbirini ortadan kaldırır, böylece veriler karşılaştırmalı olarak kullanılabilir. Çizelge 2.7, hurdadaki Si, Al, Mn ve C'nin fırına önemli miktarda kimyasal ısı katabileceğini açıkça göstermektedir. Entalpi değerleri çok yüksek olan özellikle Si ve Al elementleridir. Ne yazık ki, bu iki elementin oksidasyonu, asidik bileşenler  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün cürufa rapor etmesine neden olur. Cürufun bazikliğini ( $\text{CaO}/ [\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3]$ ) korumak için, fırına daha

fazla ısı gerektiren (endotermik) artan miktarlarda kireç ve dolomit ilave edilmesi gerekecektir. Ocakta akı ve cüruf miktarlarını çok fazla artırmayan bir diğer çok önemli kimyasal enerji kaynağı ise karbondur. Çizelge 2.7'den, karbonun CO'ya yanmasının ekzotermik olduğu ve CO<sub>2</sub>'ye tam yanmanın daha da ekzotermik olduğu açıktır. Aşağıdaki reaksiyonların stokiyometrisinden, karbon ile reaksiyona girmek için gereken minimum oksijen miktarı belirlenebilir (Bkz. Çizelge 2.8.) (Deng, 2012).

Çizelge 2.7. 1650 ° C'deki önemli EAO reaksiyonları (Fruehan ve Turkdogan, 1981)

Reaksiyon	$\Delta H$ (kWh/kg ilk numunenin)	$\Delta H$ (kWh/lb ilk numunenin)	$\Delta H$ (kWh/SCF oksijen)
$Fe + \frac{1}{2} O_2(g) = FeO$	-1.275	-0.578	-0.167
$Si + O_2(g) = SiO_2$	-9.348	-4.240	-0.308
$4Al + 3O_2(g) = 2Al_2O_3$	-8.650	-3.924	-0.365
$C + \frac{1}{2} O_2(g) = CO(g)$	-2.739	-1.242	-0.077
$CO(g) + \frac{1}{2} O_2 = CO_2(g)$	-2.763	-1.253	-0.182
$C + O_2(g) = CO_2$	-9.184	-4.166	-0.129
$Mn + \frac{1}{2} O_2(g) = MnO$	-2.044	-0.927	-0.264
$H_2(g) + \frac{1}{2} O_2(g) = H_2O(g)$	-34.614	-15.701	-0.164
$CH_4(g) + 2O_2(g) = CO_2(g) + 2H_2O(g)$	-13.994	-6.347	-0.132

Çizelge 2.8. Karbon ve CO gazını yakmak için gereken oksijen miktarı (Deng, 2012)

Reaksiyon	Reaksiyona giren tür miktarı	Gerekli O <sub>2</sub> miktarı (kg)	Gerekli O <sub>2</sub> miktarı (SCF)	Oluşan CO/CO <sub>2</sub> miktarı
$C + \frac{1}{2} O_2(g) = CO(g)$	1 kg C	1.333 kg O <sub>2</sub>	35.5	2.33 kg CO
$C + O_2(g) = CO_2(g)$	1 kg C	2.66 Kg O <sub>2</sub>	70.8	3.66 kg CO <sub>2</sub>
$CO + \frac{1}{2} O_2(g) = CO_2(g)$	1 kg CO (g)	0.57 kg O <sub>2</sub>	15.2	1.57 kg CO <sub>2</sub>

## 2.4 Doğrudan İndirgenmiş Demir

Birincil demir üretimi hala ağırlıklı olarak yüksek fırın prosesi ile yapılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek fırın işlemine özgü dezavantajlar vardır, örneğin: 1) yüksek kaliteli metalurjik kalitede kok ve demir oksit besleme stoklarına (pelletler, sinterler, briketler) bağımlılık; 2) yalnızca büyük kapasitelerde ekonomik uygulanabilirlik; 3) kok fırınları ve sinter tesisleri üzerindeki çevresel kısıtlamalar; 4) yardımcı tesislerin gerekliliği (örneğin, hammadde işleme ve hazırlama sistemleri, sinter tesisleri, sıkı çevre kontrol sistemlerine sahip kok fırınları, pelet sertleştirme fırınları); ve 5) yüksek sermaye ve operasyonel yoğunluk, vb. (Satyajit, 1994). Bu dezavantajlar, mini yüksek fırın işlemi, ergitme

indirgeme işlemleri ve doğrudan indirgeme işlemleri gibi alternatif demir üretim işlemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Mini yüksek fırın ve döküm indirgeme prosesleri, odun kömürü (mini yüksek fırın prosesi) veya karbon içeren malzemeler (eritme redüksiyon prosesleri) kullanılarak cürufsuz pik demir üreten demir oksit besleme stoklarının indirgenmesini ve eritilmesini içermektedir. Öte yandan, doğrudan indirgeme süreçleri, demir oksitlerin katı halde, saf demirin füzyon sıcaklığının (1535°C) altına indirgenmesini, hidrokarbon gazlarının ve /veya karbon içeren malzemelerin indirgeyici - karbonlama maddeleri olarak kullanılmasını içerir. Doğrudan indirgenmiş demir (DİD), halen cüruf içeren oldukça metalize bir katıdır. Doğrudan indirgeme süreçleri sırasında, yalnızca demir oksit besleme stoklarına özgü oksijenin sistemden uzaklaştırılması nedeniyle, üretilen DİD, kullanılan demir oksit besleme malzemelerinden benzer, ancak daha gözenekli bir fiziksel forma sahiptir. Bu nedenle, bu gözenekli yapı nedeniyle DİD genellikle sünger demir olarak adlandırılır. Mevcut yüksek fırın proseslerinin tam olarak kurulmuş olmasına rağmen, birçok alternatif demir üretim proseslerinin hala geliştirme aşamasında olduğu belirtilmelidir. Bununla birlikte, doğrudan indirgeme süreçleri belirli bir ticari uygulanabilirlik düzeyine ulaşmıştır ve diğerlerine kıyasla en gelişmiş alternatif demir yapımı yolu olarak kabul edilebilir. Buna ek olarak, elektrik ark ocağında yapılan çelik üretimindeki artış ve DD'e olan talepteki artış nedeniyle DİD, geçtiğimiz yüzyılda daha fazla önem kazanmıştır (Chatterjee, 1999; Stephenson ve Smail, 1980; Thatoi ve ark., 2011; McManus, 1994). Bu nedenle, son yıllarda ülkemizde de sünger demir üretimine yönelik bir çok tez çalışması yürütülmüştür (Geçim, 2006; Ersundu, 2007; Turgut, 2010; Doğantepe, 2013).

#### **2.4.1. Doğrudan İndirgeme Prosesi Tanımı**

Doğrudan indirgenmiş demir (DİD) veya sünger demir, doğrudan indirgeme işlemi ile üretilen gözenekli demiri ifade eder. Doğrudan indirgeme (direct reducing - DR) prosesi parça cevher ya da aglomera toz cevherin ergime ve erime derecesinin altındaki bir sıcaklıkta indirgeyici olarak iyileştirilmiş doğal gaz veya kömür kullanarak demir oksitten ayrıştırılabilir oksijenin uzaklaştırıldığı bir katı hal reaksiyonudur (katı-katı veya katı-gaz reaksiyonu gibi). Oksijenin uzaklaştırılması nedeniyle (ağırlıkta yaklaşık %27-30 oranında azalma meydana gelir), Sünger demir adını alan bal peteği şeklinde bir mikro yapı gelişir (yani, katı gözenekli demir; hava ile dolu birçok boşluğu olan topaklar / peletler) (Dutta ve ark., 1988). DİD, demir oksit (genellikle topak demir cevheri veya peletler) katı halde

metalik forma indirgendiğinde elde edilir. Erime olmadığı için dış şekli korunur. Renk kırmızıdan siyaha dönüşür. Gerçek yoğunluk, yaklaşık  $3,5 \times 10^3$  ila  $4,4 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> arasında değişir. Saf demirin gerçek yoğunluğu  $7,8 \times 10^3$  kg/ m<sup>3</sup>'tür. Bu yüzden, gerçek hacimde yaklaşık %45-56 azalma vardır ve bu, sünger demir parçalarının iç kısmında gözeneklerin oluşumunda kendini gösterir (Prasad, 2009; Romenets, 2001; Scarnati, 1995).

#### 2.4.2. Doğrudan İndirgeme Prosesleri

Kullanılan indirgeyici türlerine bağlı olarak, doğrudan indirgeme prosesleri genel olarak iki gruba ayrılabilir:

- Katı indirgeyici, yani kömür esaslı doğrudan indirgeme işlemi kullanma
- Gazlı indirgeyici, yani gaz esaslı doğrudan indirgeme işlemi kullanma

Doğrudan indirgeme süreçleri Çizelge 2.9'da özetlenmiştir.

Kömür esaslı süreçler: Kömür esaslı doğrudan indirgeme (DR) proseslerinde, indirgeyici ajan olarak koklaşmayan kömür kullanılır. Katı indirgeme işlemlerinde, demir oksitler katı indirgeyici (koklaşmayan kömür) ile birlikte reaktöre yüklenir. İndirgeme gazı (esas olarak CO) üretimi, indirgeme reaktöründe gerçekleşir ve ürünün, düşük sıcaklıkta boşaltımdan sonra manyetik ayırma yoluyla fazla indirgeyici, kül ve / veya sülfür emici malzemelerden (kireç, dolomit) ayrılması gerekir, bu durum ürün işlemeyi daha karmaşık hale getirir. DİD'de bu maddelerin varlığından dolayı kömür bazlı proses için sıcak briketleme ve sıcak besleme mümkün değildir. Manyetik ayırıcı ayrıca DİD'i ayırmak için yüksek sıcaklıklarda çalışmaz (Midrex, 2016).

Çizelge 2.9 Doğrudan indirgeme süreçleri (Dutta ve Sah, 2016)

Proses	Reaktör tipi	Cevher kullanım türü	İndirgeyici türü	Sıralama*
Midrex	Şaft	Parça/pelet	gaz	1
HyL	Hazneli Fırın	-Do-	-Do-	3
SL/RN, ACCAR, CODIR, etc.	Döner Fırın	-Do-	Katı	2
HIB	Akışkan Yatak	İnce	Gaz	4

\*(Sıra, dünyadaki üretim ve popülerlik açısından)

Döner fırını reaktör ve kömürü indirgeyici olarak kullanan SL/RN (1970), ACCAR (1973), KRUPP (1973), CODIR ve TDR (1975) gibi kömüre dayalı DR süreçleri dünya çapında

geliştirilmiştir. Hindistan, geniş koklaşabilir olmayan kömür rezervi nedeniyle dünyadaki en yüksek DİD üretimi için ucuz bir enerji kaynağı olarak bu tür kömürü kullanan teknolojileri takip etmeye büyük ilgi göstermiştir. Bu işlemler, kullanılan hammadde türlerine karşı oldukça hassastır (Chatterjee, 1999).

Aşağıdakiler kömüre dayalı süreçlerdir:

- Döner fırın tabanlı süreçler SL/RN, CODIR, ACCAR, DRC, TDR, SIIL, OSIL, Jindal
- Şaft fırını tabanlı işlemler Kinglor, Metor, NML, Vertical Retort
- Döner ocak fırını (RHF) tabanlı prosesler INMETCO, FASTMET, Comet kömür bazlı proseslerin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir:
  - (i) Nadiren bulunabilen yüksek kaliteli kömüre ihtiyaç duymazlar.
  - (ii) Koklaşmayan kömür kullanıyorlar.
  - (iii) Daha düşük kapasitede kurulabilirler.
  - (iv) Küçük kömür ve demir cevheri rezervlerinin bulunduğu yerlere kolayca kurulabilirler.
  - (v) Küçük ölçekli işlem modülleri mevcuttur.

Kömür bazlı işlemlerin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- (i) Daha düşük ölçek ekonomisi.
- (ii) Yüksek enerji tüketimi (16.0–21.0 GJ / t).
- (iii) Üründe düşük karbon içeriği (<% 1,0).
- (iv) Daha düşük verimlilik (0,5–0,9 t / m<sup>3</sup> / gün).

(v) Çelik üretim fırınına sıcak besleme ve sıcak briketleme, DİD'de artık kömür ve kül bulunması nedeniyle mümkün değildir.

Gaz esaslı süreçler: İndirgeyici ajan olarak ıslah edilmiş doğal gaz kullanılmaktadır. Demir cevheri topakları veya peletleri katı halde indirgenir ve demir oksitten oksijen, gaz halindeki bir indirgeme maddesi ile çıkarılır. Doğal gaz, CO ve H<sub>2</sub> indirgeyici gazlar üretmek için katalizörlerin (Ni veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) varlığında 950 °C'de (1223 K) yeniden biçimlendirilir. İndirgeyici gazlar H<sub>2</sub>, CO veya H<sub>2</sub> ve CO karışımı yüksek sıcaklıklarda [1000 °C'ye (1273 K) kadar] ve basınçta (5 bara kadar) reaktöre verilir. İndirgeyici gazda CH<sub>4</sub> mevcutsa, indirgenmiş ürünün karbürizasyonu ile sonuçlanır. Gaz azaltımına dayalı süreçler, doğal gazın makul bir fiyata bol miktarda bulunduğu alanlarla sınırlıdır. İndirgeyici maddeler olarak dönüştürülmüş doğal gazı kullanan ticarileştirilmiş süreçler Midrex (1969) ve HyL'dir (II-1957, III – 1980)'dir (Midrex, 2016).

Aşağıdakiler gaz esaslı süreçlerdir:

- Otoklav işlemleri HyL I, Hognas
- Şaft fırın prosesleri Midrex, HyL III, Plasmared, Armco, Purofer, NSC, HyL IV
- Akışkan yatak prosesleri FIOR, Finmet, Dairesel

Tartışılan süreçlerin hem avantajları hem de dezavantajları vardır. Gaz bazlı süreçler aşağıdaki avantajlara sahiptir:

- (i) Yüksek verimlilik
- (ii) Daha düşük enerji tüketimi (10,5-14,5 GJ / t)
- (iii) Üründe daha yüksek karbon içeriği (>% 1,0)

Gaz bazlı süreçler, dünyadaki DİD üretiminin% 78,8'ini oluşturmaktadır (Midrex, 2018). Gaz bazlı prosesler, kömüre dayalı proseslere göre belirgin avantajlar sunar (Midrex, 2016):

- Daha az sermaye maliyeti: Kömüre dayalı tesislerde kurulu kapasitenin tonu başına sermaye maliyeti, gaz temelli tesislerinkinden 1.8-2 kat daha yüksektir.
- Yüksek üretkenlik: Gaz bazlı DİD tesislerinin üretim oranları, kömüre dayalı tesislere göre çok daha yüksektir. Gaz bazlı tesislerin üretkenliği, kömüre dayalı tesisler için sadece 0,5-0,9 t / m<sup>3</sup> / gün'e karşılık 11 t / m<sup>3</sup> / gün kadar yüksek olabilir.
- Daha iyi kalite: Metalleştirme ve karbon içeriği açısından üretilen DİD kalitesi, gaz bazlı tesisler için de daha yüksektir.
- Enerji verimliliği: Gaz bazlı süreçler yıllar içinde önemli ölçüde gelişmiştir ve yüksek enerji verimlidir.
- Daha iyi tesis kullanılabilirliği: Gaz bazlı süreçler artık oldukça standart hale getirilmiştir. Gaz temiz bir yakıt kaynağıdır ve kömürde olduğu gibi kül içeriği sorunu yoktur, bu da halka oluşumuna ve diğer ilgili sorunlara yol açar. Gaz bazlı tesisler, döner fırınlarda sıklıkla karşılaşılan bakım problemlerinden muzdarip değildir ve bu nedenle tesis mevcudiyeti daha iyidir.
- Çevre kirliliği: Gaz temiz bir yakıt kaynağı olduğu için çevre kirliliği açısından avantajlıdır (Klawon ve Hoffman, 2005; Ganguly ve ark., 1982).

### 2.4.3. Hammaddeler

Doğrudan indirgeme (DR) süreçleri, süreçte kullanılan hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine çok duyarlıdır. Demir cevheri veya peletler, indirgeyici (yani koklaşmayan kömür veya doğal gaz) ve kireçtaşı / dolomit, DR teknolojisinin ana hammaddeleridir. Başarılı operasyonlar için DR teknolojisi prosesi, süreçte kullanılacak hammaddelerin özelliklerini belirlemiştir.

#### Demir cevheri

Demir cevherinin özellikleri: Parça veya pelet cevher yüksek demir içeriğine, düşük çentik içeriğine ve iyi mekanik mukavemete sahiptir ve kolayca indirgenebilir ve tekrarlanmayan bir çeşittir. Reaktörlere beslenen demir cevheri aşağıdaki özelliklere sahiptir:



- Kimyasal bileşim
- İndirgeme özellikleri
- Fiziksel özellikler

Kimyasal bileşim: DİD üretimi için gerekli temel girdi malzemesi demir cevheridir. DİD yapımı bir katı hal indirgeme süreci olduğundan, cevherdeki gang, üründe tutulur. Oksijenin uzaklaştırılmasına bağlı olarak ağırlıkta yaklaşık % 30 azalma olur ve gang malzemesi yüzdesi yaklaşık 1,4 kat artar (Prasad, 2009). Bu nedenle, daha yüksek kalitede demir cevheri girdisi seçmek çok önemlidir.

Tüm DR süreçlerinde, meydana gelen tek dikkate değer kimyasal değişiklik, yüklü demir cevherindeki demir oksitten oksijenin uzaklaştırılmasıdır. Eritme veya rafine etme meydana gelmediğinden, cevher beslemesindeki tüm safsızlıklar indirgenmiş üründe yoğunlaşır. Sonuç olarak, doğrudan indirgeme işlemi için seçilen herhangi bir demir cevherinde, toplam demir içeriği mümkün olduğu kadar yüksek olmalı ve gang içeriği sadece minimum olmamalı, aynı zamanda gang, kullanıcısı tarafından kabul edilebilir bir bileşime sahip olmalıdır. son ürün. Genel olarak, % 65'in üzerinde demir içeriğine sahip bir cevher tercih edilir. DİD'in gang içeriği, yani silis artı alümina seviyesi, mümkün olduğu kadar düşük (<% 5) olmalıdır. Demir cevherinin fosfor içeriği son derece önemlidir ve mümkün olduğu kadar düşük olmalıdır (tercihen % 0,03'ün altında) çünkü indirgeme işlemi sırasında fosfor giderilmez. Bazı cevherler % 0,04 ile % 0,08 arasında fosfor içerir ve eğer kullanılırlarsa, DİD'in fosfor içeriği en az % 0,055 ve hatta % 0,10 kadar yüksek olacaktır ki bu, normalde çelik yapımında kullanılan hurdadaki fosfordan önemli ölçüde daha yüksektir. Fosfor gibi, demir cevherinin kükürt içeriği de düşük olmalıdır (% 0,02'nin altında), çünkü indirgeme sırasında bir miktar kükürt birikebilir. Dünyada bulunan birçok demir cevherinin kükürt içeriği oldukça düşüktür (% 0.01-0.02) ve buna bağlı olarak DİD'deki düşük kükürt, özellikle fosfor seviyeleri yüksekse, olumlu bir özelliktir. Cevher beslemesindeki özel kireç (CaO) ve magnezya (MgO) gereksinimleri, pelet olarak yüklenirse, genellikle çelik yapımı için gereken cüruf özelliklerine göre belirlenir; % 2.5'e kadar CaO ve % 1.0 MgO genellikle kabul edilebilir. Bu bileşenlerin daha yüksek yüzdeleri (bazı peletlerde bağlayıcı olarak kullanılır), peletlerin indirgenebilirliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir. Benzer şekilde, titanya (TiO<sub>2</sub>) cüruf oluşturan bir bileşen

olmasına rağmen, aşırı miktarlarda indirgenebilirlik üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabilir ve böylece belirli bir reaktörde elde edilebilecek maksimum metalleşme derecesine sınırlar getirebilir. Genel olarak cevher beslemesinde titanya içeriği % 0.15'i geçmemelidir. Çelik yapım sınıfı DİD, minimum% 65 toplam Fe, maksimum% 4.5-5.0 gang ( $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve düşük kükürt ve fosfor içeriğine (her biri % 0.05'ten az) sahip demir cevheri gerektirir (Chatterjee, 1999; Gerigk ve ark., 1982).

İndirgeme özellikleri: Herhangi bir DR (doğrudan indirgeme) işleminin tekno-ekonomik açıdan uygulanabilir olması gerekiyorsa, demir cevheri yeterli indirgenebilirliğe ve uygun su azaltma özelliklerine sahip olmalıdır. Demir oksidi belirli bir kalitede DİD'e düşürmek için gereken alıkonma süresi, büyük ölçüde cevherin indirgenebilirliğine bağlıdır. İndirgenebilirlik ile alıkonma süresi arasında ve dolayısıyla herhangi bir reaktörün üretkenliği arasında doğrudan bir ilişki vardır. İndirgenebilirlik ne kadar yüksek olursa, gereken tutma süresi o kadar düşük olur ve sonuç olarak verimlilik o kadar yüksek olur. İndirgeme bozunması, hematitin manyetite dönüştüğü ve genleşme gerçekleştiğinde indirgemenin ilk aşamalarında meydana gelen kimyasal bir olgudur. Cevherin türüne bağlı olarak, azaltımdan kaynaklanan toz oluşumu % 3-4 kadar düşük veya % 10-15 kadar yüksek olabilir.

Fiziksel özellikler: Demir cevheri beslemesinin önemli fiziksel özellikleri, boyut aralığı, parçalanma indeksi, yuvarlanma indeksi, aşınma indeksi ve sıkıştırma mukavemetidir (özellikle pelet durumunda). Demir cevherinin optimum boyutu, esas olarak indirgenebilirlik özellikleriyle belirlenir. Daha yüksek indirgeme oranlarıyla en üst boyut artırılabilir. Oldukça azalan tipte cevherlerin durumunda, daha büyük bir boyut gerekli olabilir, böylece bozunmadan sonra bile, ince tanelerin oluşumu ( $3 \times 10^3$  m'nin altında) minimumdur. Topak cevherleri söz konusu olduğunda, normalde yaklaşık  $12 \times 10^3$  m'lik bir boyut aralığı ile  $8 \times 10^3$ - $20 \times 10^3$  m boyut aralığı tercih edilirken, peletlerde de  $6 \times 10^3$  ila  $22 \times 10^3$  m ve çoğunluğu  $9 \times 10^3$  ila  $16 \times 10^3$  m boyutlu peletler tercih edilir. Döner fırınlarda, fırın içinde halka oluşumunu teşvik ederler, böylece fırın kullanılabilirlik alanını etkiler ve cevher partiküllerinin yatağın geri kalanından ayrılma eğiliminin artmasına yol açar. Cevherin zayıf aşınma özelliği, yuvarlanma hareketinden kaynaklanan fiziksel parçalanma nedeniyle para cezalarının oluşmasına da katkıda bulunabilir (Chatterjee, 1999).

## Kömür

Koklaşmayan kömürler için istenen özellik, yüksek sabit karbon içeriğine ve yüksek uçucu içeriğe sahip olmalarıdır; kül, kükürt ve nem içeriği düşük; ve kül füzyon noktası yüksek. Ayrıca, kömürün yüksek derecede reaktif olması ve düşük koklaşma ve şişme endekslerine sahip olması gerekir. Kömür indirgeyici ve ısı kaynağı olarak gereklidir. Kömürün maliyeti, DRI üretim maliyetinin yaklaşık %50'si kadardır. Daha yüksek reaktiviteli kömürler, fırının daha düşük sıcaklıkta ve daha yüksek fırın çıkışı ile çalışmasına izin verdikleri için tercih edilir. Daha yüksek reaktiviteye sahip bitümlü yüksek uçucu verimli kömür aralığındaki daha düşük dereceli kömürler. Genel olarak daha yüksek sabit karbonlu kömürler, indirgeme için daha fazla karbon sağladıkları ve daha yüksek ısı değere sahip oldukları için tercih edilirler. Ancak daha yüksek sabit karbon, daha düşük uçucu madde (VM) anlamına gelir ve bu nedenle kömür reaktivitesini düşürür. Fırın verimini ve ısı ihtiyacını olumsuz etkilediği için kül içeriği mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Yüksek nem aynı zamanda fırın verimini düşürür ve enerji ihtiyacını artırır. Kömürlerin sülfürü DRI tarafından toplandığı için mümkün olduğu kadar düşük olmalıdır. Ayrıca, DİD üretimi için kömür seçerken külün erime özelliklerinin dikkate alınması gerekir (Vijayavergia ve Chauhan, 2006).

DİD üretimi için kömür seçiminde aşağıdaki özellikler önemlidir:

- Reaktiflik
- Kül içeriği
- Kül füzyon sıcaklığı
- Uçucu madde ve kükürt içeriği
- Koklaşma ve şişme endeksleri

## Doğalgaz

Gazlı yakıtların başlıca avantajları aşağıdaki gibidir:

- Temizdir ve kül oluşumu yoktur (yani reaksiyonlardan sonra kalıntı yoktur).
- Kullanımı kolaydır.
- İyi yanma özelliklerine sahiptir.

Tüm gaz bazlı işlemlerde indirgeyici doğal gazdır.

Doğalgaz, esas olarak hidrokarbon formundaki karbon ve hidrojen bileşiklerinden oluşur. Aşağıdaki nedenlerden dolayı doğalgaz doğrudan gaz bazlı DR süreçlerinde kullanılamaz (Ghosh ve Chatterjee, 2008):

- H<sub>2</sub> ve CO ile karşılaştırıldığında çok yavaş redüksiyon
- Karbon is oluşumu ve endotermik etkiler nedeniyle reaktörlerde istenmeyen termal denge ve boğma (tıkanma) gibi proses problemleri oluşumu.

Bu nedenle doğrudan indirgeme işlemi için doğalgaz, işlenmemiş haliyle kullanılamaz. Kalorifik değeri artırmak ve oksitleyici gazlara (CO<sub>2</sub> gibi) göre indirgeyici gaz oranını artırmak için ağırlıklı olarak H<sub>2</sub> ve CO karışımına dönüştürülmelidir. H<sub>2</sub> ve CO'ya dönüştürmenin bu adımı, reformasyon olarak bilinir. Reformasyon % 75 H<sub>2</sub> ve % 25 CO karışımı ile indirgeme, sistem üzerinde neredeyse sıfır ısı etkisine sahip olduğundan ısı denge sorununu çözer (ekzotermik CO redüksiyonu, iki gazın bu oranında H<sub>2</sub> ile endotermik indirgeme ile dengelenir). Gaz bazlı DR işleminde kullanılacak doğalgazın önerilen analizi Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10. Gaz bazlı proses için doğalgaz bileşimi (Dutta ve Sah, 2016)

Kimyasal analiz	% Hacim
CH <sub>4</sub>	en az 75
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0–25
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0–4
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0–2
+ C <sub>4</sub> hidrokarbon	0–0.5
CO <sub>2</sub>	en fazla 20
N <sub>2</sub>	en fazla 20
S	en fazla 20 ppm

### Diğer hammadeler

Kireçtaşı veya dolomit döner fırınlarda kükürt giderme ajanı olarak kullanılır. Çoğu demir cevheri çok düşük kükürt (% 0.01-0.02) içerdiği için, DİD'deki kükürt miktarı neredeyse tamamen şarj edilen kömürden gelir; en iyi koklaşmayan kömürler bile genellikle % 0.5-0.6 kükürt içerir. Dolomitin, tek başına kireçtaşına veya aynı büyüklükteki dolomit ve kireçtaşı karışımına kıyasla daha iyi bir eritici madde olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, boyutlarının  $1 \times 10^3$  ila  $4 \times 10^3$  m arasında olması koşuluyla hem dolomit hem de kireçtaşı kabul edilebilir. Etkin kükürt gidermeden ödün vermeden fırın içinde birikme oluşumunu en aza indirmek için, kükürt gidericinin çoğunun (en az % 60)  $1 \times 10^3$  ila  $2 \times 10^3$  m boyutunda olması ve çok az  $1 \times 10^{3??}$  olması önemlidir. 3 m parçacıklar. Kireçtaşı minimum % 46 CaO ve maksimum % 6 SiO<sub>2</sub>, dolomit minimum % 28 CaO, % 20 MgO ve maksimum % 6 SiO<sub>2</sub> içermelidir. Dolomit, esas olarak, fırın içindeki kömürün yanmasıyla açığa çıkan kükürten DİD tarafından kükürt alınmasını önlemek için bir kükürt giderme maddesi olarak kullanılır.

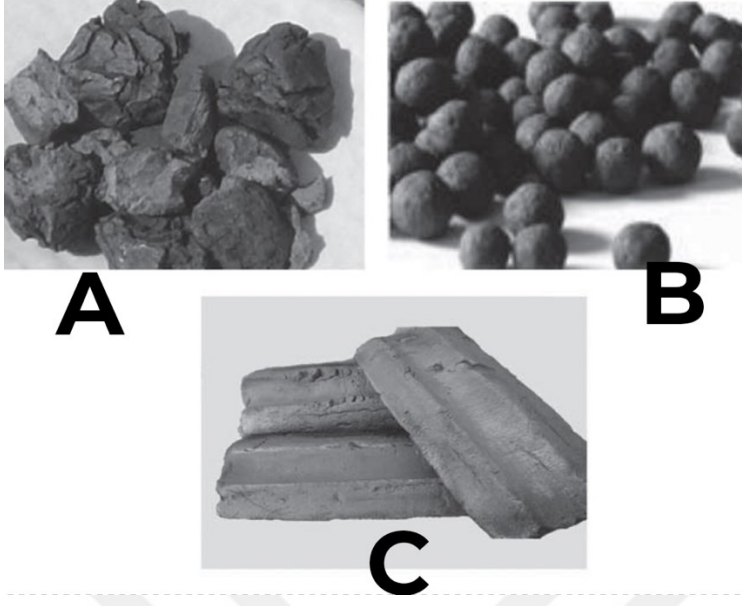
## **2.5. Doğrudan İndirgenmiş Demir Özellikleri ve Kullanımı**

### **2.5.1. Doğrudan indirgenmiş demir özellikleri**

Doğrudan indirgenmiş demir, temel olarak yüksek fırın için koklaşabilir taş kömürü ve çelik üretiminde çelik hurda sıkıntısı nedeniyle 1980'lerden beri dünya çapında yaygınlaşan kullanım alanına sahiptir. Doğrudan indirgenmiş demir, koklaşmayan kömür/doğal gaz kullanılarak demir cevherinin doğrudan indirgeme prosesi ile üretilmektedir. Üretilen doğrudan indirgenmiş demirin büyük bir kısmı, çelik üretiminde

hurda yerine kullanılmaktadır. DİD, yığın, pelet ve sıcak briket olmak üzere üç ana ürün biçiminde tüketilir (Bkz. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi). Diğer ikincil ürün formu DİD ince tanelerinden yapılan soğuk briketlerdir. Sıcak briket formu kısaca HBI olarak bilinir. SBD doğrudan indirgenmiş demirin üretiminin hemen ardından 700-800 °C'de (973–1073 K) sıcak preslenmiş topak ve peletlerinin birleşik katı formudur. SBD'in en önemli özellikleri, yüksek yoğunluğu ve daha düşük özgül alanıdır, bu da yeniden oksitlenmeye karşı direnci artırır ve işlenmesini kolaylaştırır. Yüksek yoğunluk nedeniyle, SBD'in fırında şarj edilmesi çok daha kolay ve eritme daha hızlıdır.

Çizelge 2.11 ve 2.12, farklı DİD formlarının kimyasal bileşimini ve fiziksel özelliklerini karşılaştırmaktadır (Dutta ve Sah, 2016). Boyut olarak uniform olan DİD'in taşınması, işlenmesi kolaydır ve elektrik ocaklarında çelik üretiminde sürekli şarja izin verir. Doğrudan indirgeme işlemi, demir oksitte bulunan oksijenin büyük kısmını ve bir miktar kükürdün uzaklaştırılmasını içerir, ancak işlemde başka hiçbir arıtma ve erime meydana gelmez. Sonuç olarak cevherin tüm orijinal safsızlıkları, yani tüm gang, üründe kalır ve bu da yüksek kaliteli şarj malzemelerine sahip olmanın önemini vurgular.



Şekil 2.10. DİR'in farklı biçimleri: (A) parça, (B) pelet ve (C) SBD (Anameric ve Kawatra, 2007; Dutta ve Sah, 2016).

Doğrudan indirgenmiş demirin temel kimyasal özellikleri

- Metalizasyon
- Karbon içeriği
- Gang içeriği
- Safsızlıklar (S, P, vb.) ve artık elementleridir (Taylor, 1985).

Çizelge 2.11. Doğrudan indirgenmiş demirin tipik kimyasal bileşimi (Anameric ve Kawatra, 2007)

**Ürün Formu**

<b>Kimyasal Bileşim</b>	<b>Kömür esaslı parça</b>	<b>Gaz esaslı pelet</b>	<b>SBD</b>
Fe(m) (%)	82-87	83-88	85-88
Fe(t) (%)	91-93	91-93	91-93
Metalizasyon (%)	88-93	92-95	93-95
C(%)	0,15-0,20	1,0-2,5	1,0-1,5
S(%)	0,01	0,005-0,015	0,002-0,006
P(%)	0,05	0,02-0,04	0,02
Toplam gang içeriği (%)	4,7	1,8-4,0	3,5-4,0

Çizelge 2.12. Doğrudan indirgenmiş demirin fiziksel özellikleri (Anameric ve Kawatra, 2007)

<b>Ürün formu</b>	<b>Karbon %</b>	<b>Metalizasyon %</b>	<b>Görünür yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>) (x10<sup>3</sup>)</b>	<b>Bulk yoğunluk (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Şekil ve boyut (m) (x10<sup>-3</sup>)</b>	<b>Ağırlık (kg) (x10<sup>-3</sup>)</b>	<b>Göreceli inceleme oluşumu</b>
Parça	0,2 max	93max	3,2	1,7	Düzensiz,3-5	3-5	Fazla
Pelet	1,0 min	92 min	3,5	1,6-2,0	Yuvarlak, 4-20	3-4	Az
HBI	1,0-1,5	93,5	5,0	2,6-2,7	Yastık şeklinde, 35x50x110	450-750	Minimum

### Metalizasyon

DİD indirgeme derecesi genellikle ürünün metalleşme yüzdesi olarak ifade edilir. DİD'de bulunan metalik demirin DİD'de bulunan toplam demire oranıdır. Metalleşme derecesi, büyük ölçüde kullanılan indirgeme işleminin türüne bağlıdır. Metalizasyon derecesi, DİD üretimi için benimsenen sürece bağlı olarak %85 ile %95 arasında değişmektedir (Taylor, 1985). Düşük metalleşme derecesi, çelik yapımı sırasında daha yüksek enerji tüketimi, daha yüksek cüruf hacmi, daha fazla ısınma süresi ve daha düşük verim gibi ekonomik bozulmaya yol açar.

### Karbon içeriği

DİD'in karbon içeriğinin kontrolü, kullanılan doğrudan indirgeme sürecine bağlıdır. Katı indirgeyicilere dayalı olanlar genellikle düşük karbon içeriği (<0,5) verir ve bu, sürecin kendisine özgüdür. Bununla birlikte, gaz halindeki indirgeme süreçleriyle, karbon seviyesi sınırlar dahilinde istenen herhangi bir değere ayarlanabilir. Gaz bazlı DİD'in karbon içeriği,



sırasıyla % 85 ila % 95'lik bir metalleşme derecesine karşılık gelen yaklaşık % 1.0 ile % 3.0 arasında değişmektedir (Taylor, 1985).  $Fe_3C$  olarak karbon, işlem için yararlı olmayabilecek gevşek karbon ince tanelerinden veya isden daha fazla arzu edilir. DİD'de bulunan oksijen, eriyik banyosu içindeki DİD'deki karbon ile kuvvetli bir şekilde reaksiyona giren ve ısı transferini, cüruf metal temasını ve eriyik banyosunun homojenliğini iyileştiren FeO formundadır. Bu nedenle, DİD'de daha yüksek karbon yüzdesine ihtiyaç duyulmaktadır ve bu nedenle çelik üreticileri kömür bazlı DİD (% 0.2 C) yerine gaz bazlı DİD'i (% 1.0-2.5 C içerir) tercih etmektedir. Çelik yapımı sırasında DİD'de bulunan indirgenmemiş demir oksit cürufa girer (Dutta ve Sah, 2016).

### Gang içeriği

Normal cüruf üreten katkı maddelerinin yerini alan DİD'deki gang, çelik üretim işlemini kötü etkilemez ve genellikle % 2 ile % 4 arasındadır. Bununla birlikte, gerçek miktar, gang içinde eritilmesi gereken silika ( $SiO_2$ ) oranına ve DİD'den türetilen yükteki demir birimlerinin yüzdesine bağlıdır. Doğrudan indirgeme tesisine beslenen demir cevherinin gang bileşimi doğrudan indirgenmiş demire geçmektedir. DİD, çelik hurdası ile rekabetçi hale geldiğinden, DİD'in gang içeriği önemli ölçüde azaltılmalıdır. Doğrudan indirgeme süreçleri için demir cevheri beslemeleri genellikle % 2'den az  $SiO_2$  ve % 1  $Al_2O_3$  içerir. Ayrıca, indirgeme sırasında demir cevheri peletlerinin davranışını iyileştirmek için belirli miktar kireçtaşı veya dolomit ilaveleri yapılır (Dutta ve Sah, 2016). Bu nedenle, DİD'de bir miktar kireç ve magnezya bulunur.

### Safsızlıklar ve artık elementler

Genellikle çelik hurdada (Cu, Zn, Pb, Sn, As, Cr, Ni ve Mo) bulunan kalıntı elementler, demir cevheri yataklarında genellikle önemli miktarlarda bulunmazlar ve bu nedenle bu elementler yalnızca eser miktarda bulunurlar (DİD'de  $< \% 0,02$ ). DİD'de bulunabilen safsızlıklar alkaliler ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ), titanyum oksit, kükürt ve fosfordur. İlk üçü genellikle çelik üretim uygulamasına herhangi bir etkisi olmayacak kadar küçük miktarlarda bulunur [örn. ( $Na_2O + K_2O$ )  $< \% 0.1$  ve  $TiO_2$   $< \% 0.1$ ]. DİD'in kükürt içeriği, kullanılan yakıtlardaki ve indirgeyicilerdeki kükürt miktarına bağlı olarak nispeten düşüktür (Taylor, 1985). DRI'nin kükürt içeriği, kükürtsüz gaz kullanan doğrudan indirgeme süreçlerinde % 0,005'ten az, kükürt içeren kömür ve kireç taşı ile şarj karışımında demir cevheri kullanan

doğrudan indirgeme süreçlerinde yaklaşık % 0,02'ye kadar değişmektedir. Doğrudan indirgeme işlemi sırasında fosfor elimine edilmez ve bu nedenle DİD'de bulunan miktarlar doğrudan demir cevherinde bulunanların bir işlevi olacaktır. Normalde DİD'de bulunan fosfor içeriği, % 0.01 ile % 0.04 arasında değişmektedir (AISE, 1999).

## **2.6. Elektrik Ark Ocağında Doğrudan İndirgenmiş Demir Kullanımı**

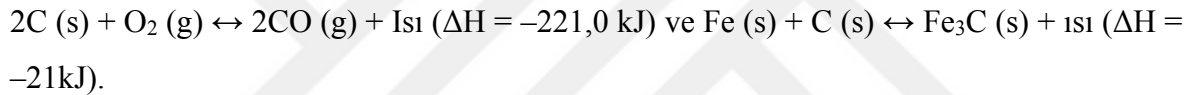
Bir Elektrik Ark Ocağına demir üretimi için doğrudan indirgenmiş demirin kısmi veya tamamen eklenmesinin iki nedeni vardır: kalıntı kontrolü ve premium hurda eksikliği. Hurda bulunabilirliği dünyanın belirli bölgelerinde sınırlıdır. Hurda piyasası üzerindeki maden tesisleri kaynaklı baskılardan dolayı, hurda kullanıcıları demir kaynağı olarak eski hurda gibi daha düşük kaliteli hurda kaynaklarına yönelmektedirler. Eski hurda ile ilgili sorun, kalitesidir. Elektrik ark ocağında çelik üretimindeki büyüme, kaçınılmaz bir şekilde daha hızlı hurda dönüşüne ve sonuç olarak, diğer elementler tarafından hurda kirliliğinin artmasına yol açmıştır (Grobler ve Minnitt, 1999). Hurda türüne bağlı olarak % 0,15 ile % 0,75 arasında değişen Cr, Ni, Mo, Cu ve Sn gibi kalıntılar çeliğin bazı mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Kaliteli çeliklerin yanı sıra düşük karbonlu çelik ürünlerin üretimi için yalnızca hurda bazlı EAO'ların kullanımından genellikle kaçınılır. Sadece hurda bazlı EAO'lar için bahsetmeye değer bir diğer sorun da nitrojendir. EAO çeliklerinin nitrojen içeriği, bazik oksijen fırın (BOF) çeliklerinden daha yüksektir. Sonuç olarak, ark fırınlarında üretilen çelikler genellikle onları örneğin derin çekme uygulamaları için pratik olarak uygunsuz kılan zayıf yaşlanma özelliklerine sahiptir (McManus, 1994; Duarte, 2004; Memoli ve ark., 2015).

### **2.6.1. Doğrudan indirgenmiş demir kullanmanın avantajları**

Doğrudan indirgenmiş demir kullanımının avantajları şunlardır:

- Sabit boyut ve ölçüler.
- Bilinen kompozisyon.
- Kalıntı elementlerin olmaması.

- Saflık veya metalik olmayan maddelerin olmaması, daha iyi üretkenlik ve enerji tüketimine yol açar.
- EAF'de kolay kullanım: DİD peletleri, kovalar veya sürekli besleme kullanılarak hurda ile birlikte bir EAO'ya boşaltılabilir.
- Bulunabilirlik: Düşük kalıntılı hurda tedarikinin aksine, DİD genellikle piyasada mevcuttur.
- İlişkili karbon: Hurdaya kıyasla DİD'in, kombine karbon biçiminde ilişkili bir enerji değeri içermesi gibi ek faydası da bulunmaktadır. HYL işlemiyle üretilen DİD, pik demirin karbon yüzdesini aşabilen ve % 6'ya varan değerlere ulaşabilen karbona sahiptir. Karbon, aşağıdaki reaksiyonlarla enerji verecektir:



Yukarıdaki reaksiyonların kombinasyonu, özellikle karbon  $Fe_3C$  formundaysa, DRI'daki her % 1 karbon başına 37 kWh / tondan fazla sıvı çelik ( $t_{sıvı \text{ çelik}}$ ) verecektir.

- Kolay köpüklü cüruf oluşumu.
- Doğrudan şarj: Doğrudan bir fırına taşınan ve şarj edilen sıcak DİD kullanımı, 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda DİD'in enerji değerini kullanarak enerji tüketimini % 16 ila % 20 oranında azaltabilir (Scarnati, 1995).
- Kolay kullanım ve saklama: sürekli besleme sistemi ile fırın çatısını açmadan besleme imkanı, elektrot kırılma riskini azaltan stabil çelik banyo yüzeyi.
- DRI fiyatlarının hurdaya nazaran daha ucuz olması çelik üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltacaktır.
- Daha çevre dostu: EAO tozlarında kurşun veya kadmiyum gibi tehlikeli kirletici madde sorunlarını önler ve olası dioksin ve furan oluşumunu azaltır. HYL rotası, özellikle doğal gazdaki ağır hidrokarbonların, demir cevherindeki kükürt ve/veya NOx sistemindeki ağır

hidrokarbonların artırılması için özel proses gereksinimlerine ve/veya ek ekipmana ihtiyaç duymadan dünya çapındaki en katı çevre düzenlemelerine uygundur. Enerji geri kazanımı için büyük bir hava ön ısıtma sistemi olmadan bile mümkün olan HYL işleminin genel enerji entegrasyonu nedeniyle NOx seviyesi çevresel sınırların altındadır (Takla, 1999; Duarte ve ark., 2008).

### 2.6.2. Optimum Şarj Dizaynı

Şarj karışımının optimizasyonun çok önemli olduğu, şarjın bir EAO'daki sıvı çeliğin toplam maliyetinin %73-89'unu oluşturduğu düşünüldüğünde anlaşılmaktadır. İlk başlarda fabrikalar DİD/SBD kullanımının bazı bilinmeyen noktalardan kaynaklı olarak 8-30 ABD Doları kar verebileceğini düşünüyorlardı (daha yüksek kWh/ton (kWh/Te), döküm süreleri (TapToTap), flakslar, cürufun FeO içeriği (FeO<sub>cüruf</sub>), refrakterler ve elektrotlarda aşınma ve verim kayıpları gibi nedenlerden dolayı). Bu işletme maliyetlerini arttırıcı etmenlerden dolayı yalnızca yüksek kaliteli, düşük kalıntılı çeliklerin üretimi için doğrudan indirgenmiş demirin elektrik ark ocağında kullanılmasının doğru olacağı düşünülmekteydi. Bu durum eğer EAO operatörleri, DİD/SBD'e ait özellikleri ve nasıl kullanılması gerektiğini bilmiyorsa ancak geçerli olabilir. Fakat zaman içerisinde eğitimli EAO operatörleri, yalnızca önceden belirlenmiş dezavantajları ortadan kaldırmakla kalmayıp, aynı zamanda operasyonları ve işletme maliyetlerini de iyileştiren standart işletim uygulamaları (SOP'ler) oluşturmuşlardır. Çizelge 2.13'de % 50 DİD şarj edilmesinin durumundaki kWh/t cinsinden elektrik sarfiyatının ve döküm süresinin % 100 hurda şarj edildiği durumla karşılaştırması verilmiştir. Bu durum (DİD'in şarjdaki oranı) günümüz itibarıyla %100 seviyelerine çıkarılmıştır.

Çizelge 2.13. %DRI şarj ilavesinin işletme parametreleri üzerindeki etkileri (Hornby ve ark., 2016)

%DRI	kWh/ton	Döküm süresi (Tap-to-tap time) (min.)
Tamamen hurda	421	61
25	375	52
30	377	53
35	380	54
40	393	55
45	399	57
50	408	59

Daha düşük işletme maliyetleri elde etmek için, çelik fabrikaları mevcut işletme verimliliklerini gerçekten anlamalı ve ölçmeli, uygulamalarını şarj karışımıyla optimize etmeli ve verimi doğru bir şekilde tanımlamalıdır. DİD kullanımıyla ilişkili değişkenlerin maliyetinin ölçülmesi gerekir: sürekli şarj, güvenlik ve kullanım kolaylığı (nakliye, aktarma, ayırma, depolama, şarj), nitrojen giderme kapasitesi, karbon verimliliği (içerilen, yerinde, enjeksiyon veya doldurmaya karşı) ve DİD kullanımına uyum sağlamak için gerekli değişiklikleri uygulama gibi. Ancak o zaman DİD'in gerçek değeri ortaya çıkacaktır. Optimize edilmiş şarjları tanımlamak için en önemli kavramı göz önüne almamız gerekmektedir: Metallerin kullanım değeri (VIU), hammaddenin maliyetini, kalitesini, kimyasını, verimini, şarj yöntemini (sürekli veya toplu) ve sıcaklığını, doğru bileşim ve kalitede sıvı çeliğe dönüştürme maliyeti üzerindeki bireysel metallerin operasyonel etkisiyle dengeler. Dönüştürme maliyetleri, sarf malzemelerinin maliyeti (güç, elektrotlar, oksijen (O<sub>2</sub>), karbon, NG, flakslar, alaşımlar, refrakterler, karıştırma tapaları, çatı ömrü, yardımcı ekipman) gibi sahaya özgü operasyonel ve ürün kimyası kısıtlamalarını içerir. Atıkların ortadan kaldırılması için yazılan cezalar (cüruf, toz ve verim kaybı), metallerin geri kazanımı, yerel metal tedariki (malzeme, teslimat, depolama, envanter, taşıma maliyetleri, vb.) ve çevresel etki, bunların tümü kar hanesini etkileyen etmenlerdir. Bu giderler ve kısıtlamaların maliyetleri, bir tonu hurda eritmenin gerçek maliyetini (Te) belirleyecektir. Bu VIU tesise özeldir ve bölge (yerel, ulusal, uluslararası) ve mevcut ekonomi dikkate alınarak her bir şarj malzemesi için tanımlanmalı ve atanmalıdır.

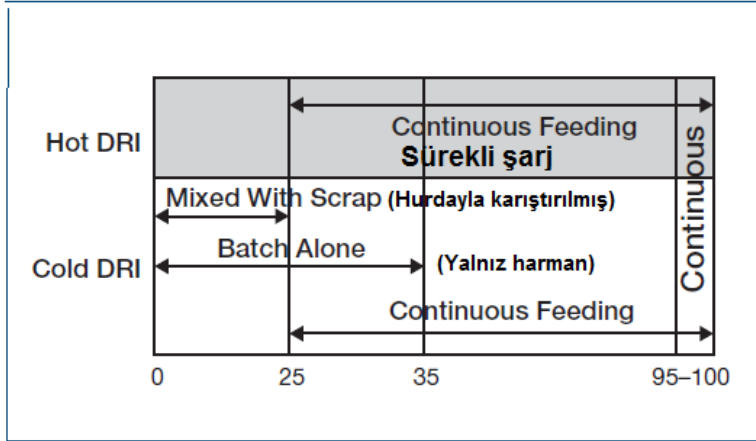
Acindar, Sidbec Dosco (şimdi ArcelorMittal (AM) Montreal East), IMEXSA (şimdi AM Meksika), Essar Steel India Ltd. ve Tuscaloosa Steel'den alınan bazı metalik VIU örnekleri (hurda, DİD / SBD ve pik demir (PI)) (şimdi Nucor Steel Tuscaloosa Inc.):

- Sürekli şarjın, sepetle şarja göre 26,87 US \$ / ton (29,50 US \$ / metrik ton) kar (maliyeti düşürür).
- Sepetle şarjın sayısını azaltarak (daha küçük, daha yoğun, malzeme) güç ve zaman maliyetlerini düşürür ve üretkenliği artırır.
- Metalik boyut ve tip, koşullara bağlı olarak zararlı veya değerli olabilir.

- Değerli - yüksek yoğunluk (DİD, SBD, PI), mükemmel ürün kimyası için düşük kalıntılar (DİD, SBD, PI) elde edilmesini sağlar.
- DİD, SBD, PI karbon enerjisi ve yoğunluk avantajlarına sahiptir; DİD/SBD, zararlı gang etkisine sahiptir.
- Sıcak şarj, enerjiyi düşürür (20 kWh / 100 ° C gerçekleşir) ve üretkenliği artırır (Hornby, 2015; Midrex, 2020; Midrex, 2016; Hornby-Anderson, 2002).

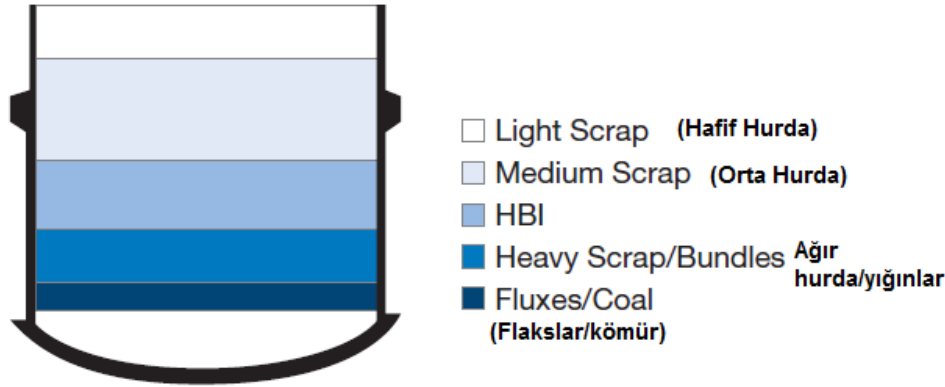
### 2.6.3. Şarj Etme Yöntemi

DİD kullanımı dünya çapında arttıkça, şarj yöntemleri de değişmektedir. Şartları kısıtlı DİD tesislerinde yüksek % DİD şarjı boldur (Arjantin ve Orta Doğu ve Kuzey Afrika (MENA) gibi düşük kaliteli veya düşük hurda bulunabilirliği nedeniyle oluşan kısıtlar gibi) ve beşinci deliğe sürekli bir şarj sistemi aracılığıyla EAO'ya doğrudan tedarik şarj etme de mevcuttur. EAO atölyesi bakım veya plansız gecikmeler nedeniyle kapalı olduğunda veya DİD tesisinin durdurulması gereken durumlar için stoklama gerektiğinde DİD tedarikini sağlayabilmek amacıyla daima depolar bulundurulur. Şekil 2.11, nominal şarj uygulamalarının sıcaklık ve şarj edilen % DİD ile nasıl değiştiğini gösterir. Besleme oranının güç ve kimyasal enerji girdisiyle dengeli olmasını kolaylaştırmak ve "iceberg" veya "ferroberg-erimemiş DİD" oluşumunu önlemek için sürekli şarj genellikle % 25'in üzerinde kullanılır. Ferroberglerin önlenmesi kısmen besleme hızı ve mevcut güç girişi ile belirlenir. Örneğin, düz bir banyoda 80 MW'lık ortalama bir aktif banyo, 1.333 kWh/min'e eşittir. DİD'i eritmek için 500 kWh/Te (455 kWh/t) tüketirse, gerekli ilerleme hızı 2,7 Te/min veya 33,75 kg/W/min (2,97 t/min, 81,67 lb/MW/min) olacaktır.



Şekil 2.11. %DİD/SBD ile nominal şarj uygulaması (Hornby ve ark., 2016)

Sepet Şarjı: Sepet şarjı, genellikle% 25-30'dan daha az DİD/SBD kullanan çelik fabrikaları tarafından kullanılır, ancak DİD'in sürekli olarak şarj edilmesi tercih edilir. Sepetteki DİD/SBD, sıvı çelikteki kalıntıların azaltılmasının yanı sıra şarj yoğunlaştırmasına da yardımcı olur. Sepet şarjı, sürekli bir şarj sisteminin maliyetini ortadan kaldırır. SBD, yükün yoğunlaştırılmasını en üst düzeye çıkarmak için genellikle ağır hurda veya demetlerin üzerine yüklenir (Bkz. Şekil 2.12) ve sepetin geri kalanı, sahaya özgü uygulamalara göre yüklenir. SBD genellikle çoklu sepet şarjlarında sepetlere bölünür, fakat en çoğu ise düşük %C ve artırılmış O<sub>2</sub> bileşeninin O<sub>2</sub> giriş kapasitesini kompanse edebilecek ve ısının sonunda gaz bırakmayı minimize edebildiği noktadaki ergime rafinesiini arttırmak için son sepete koyulur. Tek sepet şarj uygulaması kullanılıyorsa, SBD birden çok katman halinde girilir. SBD tonajı genellikle "iceberg" oluşumunu azaltmak için sınırlıdır. DİD'in sepetin altından düşmesini önlemek için DİD, sepette daha yükseğe (üçüncü ve sondan bir önceki katmanlar) yüklenir (IMTC, 2012).



Şekil 2.12. SBD şarj için sepet katmanları gösterimi (Hornby ve ark., 2016)

Beşinci Delik (Çatı) Şarjı: DİD için beşinci delik şarjı tercih edilir ve % 30'dan fazla DİD kullanıldığında kesinlikle daha verimlidir. Sürekli şarj, cüruf kontrolünü (köpüklenme yüksekliği, viskozite, vb.) sağlamak ve soğuk DİD çok hızlı şarj edildiğinde oluşacak ferrobergları önlemek için besleme hızının güç girişi ve flaks besleme ile koordinasyonunu kolaylaştırır. Sürekli olarak sıcak DİD şarjı (600 °C), gereken enerjiyi % 16-20 oranında azaltabilir.

Yandan Şarj: Yandan şarj (Consteel veya eşdeğeri) SBD şarjı için daha uygundur ve DİD'i çatıdan sürekli beslemeyle birleştirilebilir. Bu kurulumun geleneksel bir EAO'ya göre önemli avantajları vardır: sabit düz banyo çalışma koşulu, DİD'in daha uzun bir süre boyunca daha düşük bir hızda (daha az ferroberg olasılığı) anında beslenmesine izin verir; sürekli akış ilaveleri cüruf bileşimini daha kolay kontrol eder; ve SBD, EAO'ya giderken bant üzerinde önceden ısıtılır (Memoli ve ark., 2015).

#### 2.6.4. DİR/SBD'deki karbon içeriği, metalizasyon ile silikannın EAO işlemi ve performansına etkileri

##### Karbon

Yüksek  $FeO_{cüruf}$  refrakter aşınmasını artırır. Nötralizasyon, DİD'in FeO için her %1 Fe'e karşılık % 0.215 C içermesini ister. %93 toplam demir içeren DİD (DRI), "nötrleştirme" için teorik olarak % 1,4 C gerektirir. Oksijenle yanma için herhangi bir fazla karbon mevcuttur ve elektrik enerjisi gereksinimlerini azaltacaktır (4.13 kWh, % 100 verimlilikte 1 lb. C yanmadan elde edilebilir (9,09 kWh / kg)). Fazla karbon ayrıca  $FeO_{DRI}$  eridikçe ve CO ve / veya  $CO_2$  geliştikçe daha hızlı, daha erken, köpüklü cüruf reaksiyonunu teşvik



eder. 1990'ların başında, çelik üreticilerinin çoğu, eriyiği ekonomik olarak dekarburize etmek (de-C) için O<sub>2</sub> tesisleri olmaması ve / veya O<sub>2</sub> tedariki olmaması nedeniyle % 1.6-1.8 C DİD talep etmişlerdir. Daha verimli O<sub>2</sub> uygulamalarının, daha büyük atık gaz sistemleri (OGS'ler) ve miktar ve ekonomik açıdan daha verimli karbon içeriği ortaya çıktıkça, günümüzde daha yüksek %C'lu DİD kullanılmaktadır. 1999'da Midrex DİD / SBD'de ortalama % C değeri % 1.77 C (% 0.49-2.23 C) ve metalizasyon % 91.29 ile % 96.31 arasında değişmektedir. AM Meksika, 1999'da % C'sini % 2,5 ile % 3,1 arasına çıkarmıştır. Şarj edilmiş/enjekte edilmiş karbondan banyoya ısı transferi % 25-75 verimlidir, AM Mexico ise DİD in-situ karbondan % 95 verimlilik elde edildiğini bildirmektedir (Midrex, 2000; Hornby-Anderson, 2002).

### Metalizasyon

Çizelge 2.14'de Acindar, Ternium Guerrero ve genel olarak endüstride metalizasyondaki % 1'lik bir artıştan (metalın toplam demire oranının bir yüzdesi olarak tanımlanmıştır) elde edilen faydaları göstermektedir. Verimde % 0,3 ile % 2 arasında artışla 10–25 kWh, 0,425 kg refrakter ve 0,0375 kg elektrot / Te<sub>SİVİ çelik</sub> (9,1-22,7 kWh, 0,85 lb. refrakter, 0,075 lb. elektrot/t<sub>SİVİ çelik</sub>) tasarrufu sağlanmıştır. Metalizasyonun % 91'den% 95'e yükseltilmesi, güçte 40 kWh/Te'ye (36.4 kWh/t) ve metalizasyonda % 1.5 /% 1 arttırmıştır. Qatar Steel'de de benzer sonuçlar elde edilmiştir (D'Souza ve Al Marr, 2011; Hornby, 2007; Midrex, 2000; Torre ve ark., 2005).

### Gang

DİD'deki yüksek oksit içeriğinin prosese zararlı etkileri vardır. Örneğin, % 10 DİD şarjı ilave 15 kWh / Te<sub>SİVİ çelik</sub>, 0.19 kg / Te<sub>SİVİ çelik</sub> (13.63 kWh / t<sub>SİVİ çelik</sub>, 0.38 lb./t<sub>SİVİ çelik</sub>) güç artışı, 2.5 dakikalık döküm süresi artışı, cüruf oluşturucu kullanımı (dolayısıyla daha büyük cüruf hacmi ve bertaraf maliyeti) gerektirir ve bu durum % 0.4 verim kaybına neden olur. Metalleşmedeki her % 1'lik azalma için, güç gereksinimi 8 ile 16 kWh/Te (7,3-14,6 kWh/t) arasında artar. Aksine, % 10 PI-pik demir (% 4 karbon, düşük oksit) güç gereksinimini 27,1 kWh/Te<sub>SİVİ çelik</sub> (24,6 kWh/t<sub>SİVİ çelik</sub>) düşürür. Kir ve beton, refrakter gibi diğer metal olmayan maddeler içeren düşük kaliteli, açık zeminde depolanmış, ıslah edilmiş (inşaat demiri) veya eskimiş hurdalar göz önünde bulundurulduğunda gang içeriği % 10 kadar yüksek olabilen hurda olabileceği unutulmamalıdır. Asit gang içeriğinin % 1 arttırılması,

dördüncül EAO cürufu “V” oranını (V4) sağlamak için bazik flaksları (MgO ve CaO) artıracaktır. Her % 1 SiO<sub>2</sub> artışı için CaO % 2 artmalıdır, ancak SiO<sub>2</sub> % 2'den yüksek olduğunda ilişki üsteldir (doğrusal değildir). Bu, güç gereksinimlerini 20 kWh/Te (18,2 kWh/t) artıracak ve cüruf hacmini ve cüruf ortadan kaldırma maliyetlerini artıracaktır. Çizelge 2.15, BHP Steel tarafından tanımlanan Asya fabrikalarındaki çeşitli gang bileşenleri ile ilişkili ek maliyet artışlarını göstermektedir. Asit gang bileşenleri, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, üretim maliyetleri üzerinde temel bileşenlere (MgO ve CaO) göre daha maliyetli bir etkiye sahiptir. Bu ek maliyetin çoğu, flaks maliyetinden ve verim kaybından kaynaklanmaktadır (Hornby, 2015; Hornby-Anderson, 2002; Midrex, 2000).

Çizelge 2.14. DRI/HBI Metalizasyonunda %1 Artışın Faydaları (Hornby ve ark., 2016)

Fayda kategorisi	Genel	Acindar	Ternium Guerrero
KWh/t sıvı çelik	10-25	25	12
Refrakter korunumu/metrik ton sıvı çelik	0,425kg	US\$0.70	-
Elektrot kazanımı/metrik ton sıvı çelik	0.0375 kg	0.15 kg	-
Verim artışı %	0,3-2	1	-0,4kg/t
Kok kazanımı/ metrik ton sıvı çelik	0-4kg	5,8kg	-
Üretkenlik artışı %	5'e kadar	5'e kadar	-
Maliyet düşüşü/(VIU)/ metrik ton sıvı çelik	US\$0.68-2.96	US\$6.00-8.09	US\$5.00
Metalizasyondaki artış %	92-93	93,5-94,5	-

Flaksa yardımcı olmak veya kireç ve/veya dolomitik kireci çözmek ve böylece erken bir sıvı cürufu teşvik etmek için sistemde belirli bir miktarda FeO gereklidir. Ayrıca DİD'deki FeO'nun % 67'si karbon tarafından azaltılacağından, oluşan CO gazı daha erken, daha iyi köpüklü cürufu teşvik edecektir.

Çizelge 2.15. Asya fabrikaları için BHP steel tarafından tanımlanan çeşitli gang bileşenleriyle ilişkili maliyetler (Hornby ve ark., 2016)

Gang	+Flakslar	+İlaveler	Verim kaybı	Cüruf maliyeti	Toplam
SiO <sub>2</sub> /0.1%	0.156	0.062	0.135	0.015	0.368
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /0.1%	0.114	0.062	0.135	0.015	0.326
CaO/0.1%	(0.075)	0.030	0.135	0.001	0.091
MgO/0.1%	(0.071)	0.028	0.135	0.001	0.093

### 2.6.5. SBD/DİD Şarjının EAO Kimyasal Enerjisine Etkisi

EAO enerji kullanımını etkileyen ana parametreler, hammaddelerin bileşimi (kimya, metalizasyon, enerji içeriği), işletim uygulamaları (güç profilleri, karbon ilaveleri, köpüklü cüruf ve eritme uygulamaları) ve fırın tasarımıdır. Doğrudan indirgenmiş demirin doğru şekilde kullanılması görüleceği üzere işletim maliyetlerine ve ürünlerin kalitesine önemli ölçüde fayda sağlayabilir. (Hornby-Anderson, 2002; Torre ve ark., 2005; Al Saif ve ark., 2005; D'Souza ve Al Marr, 2011; Stagnoli, 2011).

Kimyasal enerji genellikle karbonun (şarj edilen veya enjekte edilen), oksijenin, doğal gazın ve elementlerin (demir (Fe), silikon (Si), alüminyum (Al), vb.). Günümüz EAO teknolojisi ve kimyasal enerji araçları, kimyasal enerjiyi toplam enerji ihtiyacının yaklaşık % 35'ine tekabül edecek seviyeye kadar çıkarmıştır. Kimyasal enerji için gerekli olan % C fazlası DİD'de mevcuttur. AM Montreal East bunu Tablo 6.12'de tanımlamıştır. In-stu DİD karbon, FeO'yu (dolayısıyla refrakter aşınmasını) ve kWh/Te<sub>SIVIÇELİK</sub>'i azaltır ve CO üretimini artırır (geliştirilmiş köpüklü cüruf ve ark kararlılığı-özellikle uzun ark DC operatörleri için önemlidir). İşletmelerin yüksek enerjiden yararlanabilmesi koşuluyla bu, tesise özgü karbon maliyetleri önemli ölçüde etkilemektedir. Banyo koşulları, oksiyakıt brülörü (oxy-fuel burner - OFB) kullanımına elverişli değildir ve hızlı dekarburizasyon ve nihai karbona ulaşmada gecikmelerin önlenmesi için yüksek hızlı oksijen lanslarına gereksinim duyar. Daha fazla kimyasal enerji, kısmi yanma nedeniyle OGS'de hacim ve enerji kaybına neden olur (nominal olarak standart EAO'larında % 17–22, Consteel® ve saft fırınlarında %10 ve baca fırınlarında %7). Maksimum enerji girdisi miktarını yakalamak/korumak için optimizasyon gereklidir. Bu durum, yanma ve ısı tutmayı en üst düzeye çıkarmak için malzemelerin kullanım değerini, kısmi yanma kaynağını, kimyasal ve elektrik enerjisini dengelemeyi ve OG sıcaklıklarını ve bileşimini ölçmeyi gerektirir (Midrex, 2002; Hornby-Anderson, 2002).

Sıcak şarj metalleri (katı veya sıvı) kimyasal enerji girişini artırır ve enerji ihtiyacını önemli ölçüde azaltır. DİD / SBDI sıcak şarj etmek gang'in etkisini ortadan kaldırır (Hornby, 2015). HM enerjisi en çok azaltır, ancak dekarburize-C (verimlilik kaybı) bir sorun haline gelir. DİD tabanlı bir EAO operasyonunda kimyasal enerji uygulamasına örnek Krakatau Steel işletmesi verilebilir. EAO'larının altısından ikisinin enjeksiyon sistemini revize ederek 155 kWh / Te<sub>SIVIÇELİK</sub> (141 kWh / t<sub>SIVIÇELİK</sub>) ve 0.1 kg elektrot / Te<sub>SIVIÇELİK</sub>

azalma (0.2 lbs./tIs) gerçekleştirilmiştir ve verimlilik artışı gözlemlenirken O<sub>2</sub> lans boruları ortadan kaldırılmıştır. Krakatau, doğalgaz tüketiminde (+3 Nm<sup>3</sup> / Te<sub>SIVIÇELİK</sub> (96.3 scf / t<sub>SIVIÇELİK</sub>)) ve refrakter aşınmasında hafif bir artış görülmüştür (Stagnoli, 2011).

Uluslararası pazardaki yüksek çelik hurda fiyatları, küçük ölçekli birimler için ithalat işlemindeki zorluk ile birleştiğinde, DİD, çelik hurdaya en uygun alternatif haline gelmiştir. Çelik hurda kıtlığı ve yüksek hurda fiyatları göz önüne alındığında, ikincil çelik üreticileri, çelik üretmek için metal besleme malzemesi olarak DİD'e güvenmek zorundadır. İkincil çelik üreticilerinin metalik besleme malzemesi talebini karşılamak için önemli miktarda DİD'in yerli olarak mevcut olacağı düşünülmektedir. EAO'da DİD kullanmak ocak verimliliğini artırır ve hem elektrot hem de güç tüketimini azaltır. En iyi eritme sonuçlarına ulaşmak, DİD'in EAO'nın beslediği hızın kontrolünü de gerektirir. Besleme hızı esas olarak etkili güç girişine bağlıdır, ancak aynı zamanda DİD bileşimi, banyo sıcaklığı ve termal kayıplardan da etkilenir. DİD kullanımı, besleme malzemesi olarak sadece EAO ile sınırlı değildir. Dahası, DİD'in BF'de yüklenmesi, verim ve fırın verimliliğinde büyük değişiklikler gösterir, DİD için daha fazla alan yaratır ve artan üretkenlik ve düşük kok oranı ile sonuçlanır. DİD, BOF çelik yapımında da soğutma sıvısı olarak yüklenmektedir. Daha düşük metalleşme derecesine sahip DRI, daha fazla soğutma etkisine sahiptir. DİD kullanımı, hurda soğutmaya kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Hurda 1.0 birim soğutma etkisi veriyorsa DİD 1.2 birim soğutma etkisi veriyor yani % 20 daha verimli oluyor. DİD ayrıca döküm demir yapmak için kupoldaki pik demiri kısmen ikame eder. DİD ayrıca kaliteli çelik üretmek için çelik hurdasında bulunan çelik yapımında kalan elementleri seyreltmek için de kullanılır (Dutta ve Sah, 2016; Dutta, 2017).

DİD'in bir besleme malzemesi olarak avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- DİD, bilinen ve tek tip bir kimyasal bileşime sahiptir.
- Tek tip bir boyuta sahiptir ve sürekli şarj etme kabiliyetine sahiptir.
- Çok düşük seviyelerde artık elementler (Cu, Sn, Ni, Cr, Mo gibi) içerirken, hurda ve pik demir sırasıyla % 0.13-0.73 ve % 0.06 artık element içerir.

- Düşük seviyelerde kükürt tutar.
- DİD'deki indirgenmemiş demir oksit, eriyik banyosunda karbonla (yani kaynayan karbon) kuvvetli bir şekilde reaksiyona girerek, ısı transferini, cüruf metal karışımını, homojenliği ve banyodaki düşük çözünmüş gaz içeriğini geliştirir.
- EAO banyosunda köpüklü cürufla arkın koruyucu örtüsünü oluşturabilir.
- Atık gazlardan hissedilir bir ısı geri kazanımı potansiyeline sahiptir.
- DİD, hurdaya göre tahmin edilebilir bir fiyat yapısına sahiptir çünkü DİD bir üründür ve hurda bir yan üründür. Ayrıca DİD hurdaya nazaran daha ucuz bir üründür.

### 3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, elektrik ark ocaklarında cevher esaslı metalik malzeme kullanımının avantajlarını ortaya koymak için % 100 hurda ve % 100 cevher esaslı metalik hammadde ile çelik üretimi yapılarak elde edilen çeliklerin kimyasal özellikleri ve üretim değerleri belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu bağlamda, hurda ve iki farklı cevher bazlı metalik hammadde kullanılarak yapılan çelik üretimi Tenova marka 340 ton sıvı çelik kapasiteli ultra yüksek güçlü bir elektrik ark ocağında (340 ton UHP EAF, Transformer Gücü: 240 MVA-AC) gerçekleştirilmiştir. Bu elektrik ark ocağında çelik üretiminde hurda, doğrudan indirgenmiş demir (DİD) ve sıcak briketlenmiş demir (SBD) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bu üç farklı hammaddenin kimyasal kompozisyonları Panalytical Zetium marka XRF cihazında gerçekleştirilen X-ışını floresans spektrometresi ile tespit edilmiştir. Çizelge 3.1’de bu analizlerin sonucu elde edilen kimyasal kompozisyonlar verilmektedir. Ayrıca, hurda ile doğrudan indirgenmiş demir ve sıcak briketlenmiş demir kullanılarak üretilen çelik içerisindeki % Cu, % P ve % S miktarları, S3 MiniLAB 300 cihazında gerçekleştirilen Metal Analiz Spektrometresi ile belirlenmiştir. Bunlara ilaveten, üç farklı hammadde (hurda, doğrudan indirgenmiş demir ve sıcak briketlenmiş demir) ile yapılan çelik üretim değerleri de belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan hurda ve cevher bazlı metalik hammaddelerin (DİD ve SBD) kimyasal kompozisyonlarının karşılaştırılması

	HURDA	SBD (HBI)	DİD (DRI)
Toplam Fe	94	90	91
Metalik Fe	90	84	85
Metalizasyon	96	93	93
% C	0,08	1,5	2,5
% P	0,060	0,010	0,020
% S	0,080	0,020	0,030
% Gang	4,25	4,50	5,00

Bir aylık süre boyunca cevher esaslı metalik hammaddeler ile toplam 50 döküm gerçekleştirilmiştir. Bu 50 döküm içerisinde 25 döküm doğrudan indirgenmiş demir kullanılarak gerçekleştirilmiş olup kalan 25 döküm ise sıcak briketlenmiş demir kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doğrudan indirgenmiş demir (DİD) sıcak olarak ocak içerisine konveyör bantlar kullanılarak sürekli besleme yöntemi ile şarj edilmiştir. Sıcak briketlenmiş demir de ocak içerisine yine sürekli besleme yöntemi ile şarj edilmiştir. Cevher esaslı metalik malzemeler ile karşılaştırma amacıyla çelik hurda kullanılarak da 3 döküm gerçekleştirilmiştir. Hurda ise ocak içerisine ark ocağı kapağı açılarak hurda sepetleri yardımıyla şarj edilmiştir. Bu şekilde farklı hammaddeler ile yapılan kütük çelik üretimlerindeki elektrik tüketimi, elektrod tüketimi ve üretim hızı ortalamaları tespit edilmiştir. Ayrıca, her bir hammadde ile üretilen kütük çelik içerisindeki % Cu ve % S, % P oranları da belirlenmiştir.

#### 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

İlk olarak doğrudan indirgenmiş demir kullanılarak 25 döküm alınmıştır. Doğrudan indirgenmiş demir (DİD) sıcak formda (600 °C'ye ısıtılmış olarak) konveyör bant yardımıyla elektrik ark ocağına beslenmiştir. DİD kullanılarak yapılan 25 döküme ait üretim değerleri Çizelge 4.1 'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Doğrudan indirgenmiş demir kullanılarak elde edilen dökümlere ait üretim değerleri

Döküm Numarası	Kullanılan Hammadde Miktarı (ton)	Döküm Tonajı (ton)	Verim (%)	Elektrik Tüketimi (kWh)	Birim Elektrik Tüketimi (kWh / ton)	Döküm Süresi (dakika)	Üretim Hızı (ton çelik / saat)
HDRI 1	280	238	85%	109.956	462	46	313
HDRI 2	276	235	85%	111.155	473	44	327
HDRI 3	286	240	84%	108.720	453	48	300
HDRI 4	292	242	83%	114.224	472	44	327
HDRI 5	281	239	85%	111.852	468	45	320
HDRI 6	287	241	84%	108.932	452	47	306
HDRI 7	282	240	85%	109.200	455	46	313
HDRI 8	274	236	86%	109.740	465	46	313
HDRI 9	286	243	85%	110.322	454	44	327
HDRI 10	286	237	83%	107.361	453	45	320
HDRI 11	289	240	83%	108.960	454	45	320
HDRI 12	281	239	85%	109.223	457	43	335
HDRI 13	282	240	85%	112.080	467	47	306
HDRI 14	285	239	84%	112.569	471	45	320
HDRI 15	281	239	85%	111.613	467	44	327
HDRI 16	285	242	85%	110.352	456	47	306
HDRI 17	289	240	83%	109.440	456	45	320
HDRI 18	282	240	85%	112.320	468	46	313
HDRI 19	287	238	83%	107.814	453	48	300
HDRI 20	285	239	84%	110.418	462	43	335
HDRI 21	277	238	86%	109.242	459	44	327
HDRI 22	285	242	85%	109.868	454	45	320
HDRI 23	279	237	85%	107.361	453	42	343
HDRI 24	290	244	84%	113.216	464	43	335
HDRI 25	288	242	84%	109.384	452	43	335
<b>Ortalama</b>	<b>284</b>	<b>240</b>	<b>84%</b>	<b>110.212</b>	<b>460</b>	<b>45</b>	<b>320</b>

25 döküme ait değerlerin ortalaması alındığında doğrudan indirgenmiş demir kullanılarak elde edilen dökümlerde ortalama hammadde verimi % 84 olarak saptanmıştır. Verim hesabı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.



$$Verim (\%) = \frac{Döküm Tonajı}{Kullanılan Hammadde Miktarı} \times 100 \quad (4.1)$$

Doğrudan indirgenmiş demir kullanılarak elde edilen dökümlerde ortalama birim elektrik tüketimi ise 460 kWh / ton çelik olarak hesaplanmıştır.

Bir diğer mukayese değeri olarak ise üretim hızı değeri kullanılmıştır. Üretim hızı değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$Verim (\%) = \frac{Döküm Tonajı}{Kullanılan Hammadde Miktarı} \times 100 \quad (4.1)$$

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanan üretim hızlarının ortalaması alındığında DİD kullanılarak yapılan çelik üretiminde ortalama üretim hızı saatte 320 ton olarak tespit edilmiştir.

Doğrudan indirgenmiş demir kullanılarak yapılan üretimler ile elde edilen toplam döküm tonajı 5.990 ton dur.

Bu üretimlerin gerçekleştirilmesi aşamasında toplamda 4 adet ark ocağı elektrodu değiştirilmiştir. Her bir adet elektrod 1.800 kg ağırlığında olduğundan üretimlerin sonunda toplamda 7.200 kg elektrod tüketimi olmuştur. Ton başına birim elektrod tüketimini bulmak için elektrod tüketim miktarını üretilen toplam döküm tonajına böldüğümüzde birim elektrod tüketimi 1,20 kg / ton çelik olarak hesaplanmıştır.

Çalışmamızın ikinci aşamasında başka bir cevher esaslı metalik hammadde olan sıcak briketlenmiş demir (SBD) kullanılarak 25 adet döküm üretilmiştir. Sıcak briketlenmiş demirin hammadde olarak kullanılması ile elde edilen dökümlere ait üretim değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

25 döküme ait değerlerin ortalaması incelendiğinde SBD kullanılarak elde edilen dökümlerde ortalama hammadde verimi % 83 olarak saptanmıştır.

Sıcak Briketlenmiş Demir kullanılarak elde edilen dökümlerde ortalama birim elektrik tüketimi 550 kWh/ton çelik olarak hesaplanmıştır. Doğrudan indirgenmiş demir (DİD)'in ark ocağına sıcak olarak beslenmesi nedeniyle doğrudan indirgenmiş demir ile

gerçekleştirilen üretimlerdeki birim elektrik tüketimi sıcak briketlenmiş demir (SBD) ile yapılan üretimlerdeki birim elektrik tüketimine göre daha düşük seviyededir.

Çizelge 4.2. Sıcak briketlenmiş demir kullanılarak elde edilen dökümlere ait üretim değerleri

Döküm Numarası	Ark Ocağına Beslenen Hammadde Miktarı (ton)	Döküm Tonajı (ton)	Verim (%)	Elektrik Tüketimi (kWh)	Birim Elektrik Tüketimi (kWh / ton)	Döküm Süresi (min)	Üretim Hızı (ton çelik/h)
HBI 1	282	237	84%	131.298	554	52	273
HBI 2	285	239	84%	133.123	557	50	287
HBI 3	284	236	83%	128.620	545	52	272
HBI 4	294	241	82%	133.032	552	51	284
HBI 5	289	243	84%	134.622	554	50	292
HBI 6	292	242	83%	131.648	544	50	290
HBI 7	292	245	84%	132.790	542	51	288
HBI 8	286	243	85%	133.164	548	47	310
HBI 9	289	243	84%	132.435	545	49	298
HBI 10	296	243	82%	136.566	562	47	310
HBI 11	298	244	82%	133.468	547	49	299
HBI 12	289	243	84%	132.678	546	51	286
HBI 13	283	238	84%	130.900	550	50	286
HBI 14	288	239	83%	131.689	551	50	287
HBI 15	287	238	83%	134.946	567	52	275
HBI 16	285	239	84%	129.299	541	52	276
HBI 17	286	240	84%	131.280	547	50	288
HBI 18	287	241	84%	132.068	548	51	284
HBI 19	294	241	82%	130.863	543	51	284
HBI 20	288	239	83%	131.928	552	49	293
HBI 21	286	240	84%	132.720	553	49	294
HBI 22	283	238	84%	129.948	546	48	298
HBI 23	286	240	84%	133.680	557	49	294
HBI 24	288	239	83%	131.928	552	50	287
HBI 25	289	240	83%	131.280	547	52	277
<b>Ortalama</b>	<b>288</b>	<b>240</b>	<b>0,83</b>	<b>132.239</b>	<b>550</b>	<b>50</b>	<b>288</b>

Sıcak Briketlenmiş Demir (SBD) kullanılarak elde edilen dökümlerdeki üretim hızlarının ortalaması incelendiğinde ortalama üretim hızı 288ton çelik/h olarak hesaplanmıştır. Sıcak briketlenmiş demir kullanılarak yapılan üretimler ile elde edilen toplam döküm tonajı 6.011 ton dur. Bu üretimlerin gerçekleştirilmesi aşamasında toplamda 5 adet ark ocağı elektrodu değiştirilmiştir. Her bir adet elektrod 1.800 kg ağırlığında olduğundan üretimlerin sonunda toplamda 9.000 kg elektrod tüketimi olmuştur. Ton başına birim elektrod tüketimini bulmak için elektrod tüketim miktarını üretilen toplam döküm tonajına böldüğümüzde birim elektrod tüketimi 1,50 kg/ton çelik olarak hesaplanmıştır.

Çalışmamızın son bölümünde ise hurda sepetleri kullanılarak ark ocağı kapağı açılarak ocak içerisine hurda şarjları yapılarak 3 adet döküm gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın yapıldığı zaman diliminde hurda arzının kısıtlı olması dolayısıyla çelik hurdanın hammadde kaynağı olarak kullanılması ile sadece 3 döküm gerçekleştirilmiştir.

Hurda kullanılarak yapılan üretim sonucu elde edilen dökümler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Hurda kullanılarak elde edilen dökümlere ait üretim değerleri

Döküm Numarası	Ark Ocağına Beslenen Hammadde Miktarı (ton)	Döküm Tonajı (ton)	Verim (%)	Elektrik Tüketimi (kWh)	Birim Elektrik Tüketimi (kWh/ton)	Döküm Süresi (min)	Üretim Hızı (ton çelik/h)
Hurda 1	276	240	0,87	105.600	440	60	240
Hurda 2	278	239	0,86	104.921	439	59	243
Hurda 3	279	240	0,86	105.600	440	61	236
<b>Ortalama</b>	<b>278</b>	<b>240</b>	<b>0,86</b>	<b>105.374</b>	<b>440</b>	<b>60</b>	<b>240</b>

Hurda kullanılarak gerçekleştirilen 3 döküme ait değerlerin ortalaması incelendiğinde hammadde kaynağı olarak hurda kullanılması ile elde edilen dökümlerde ortalama hammadde verimi % 86 olarak saptanmıştır.

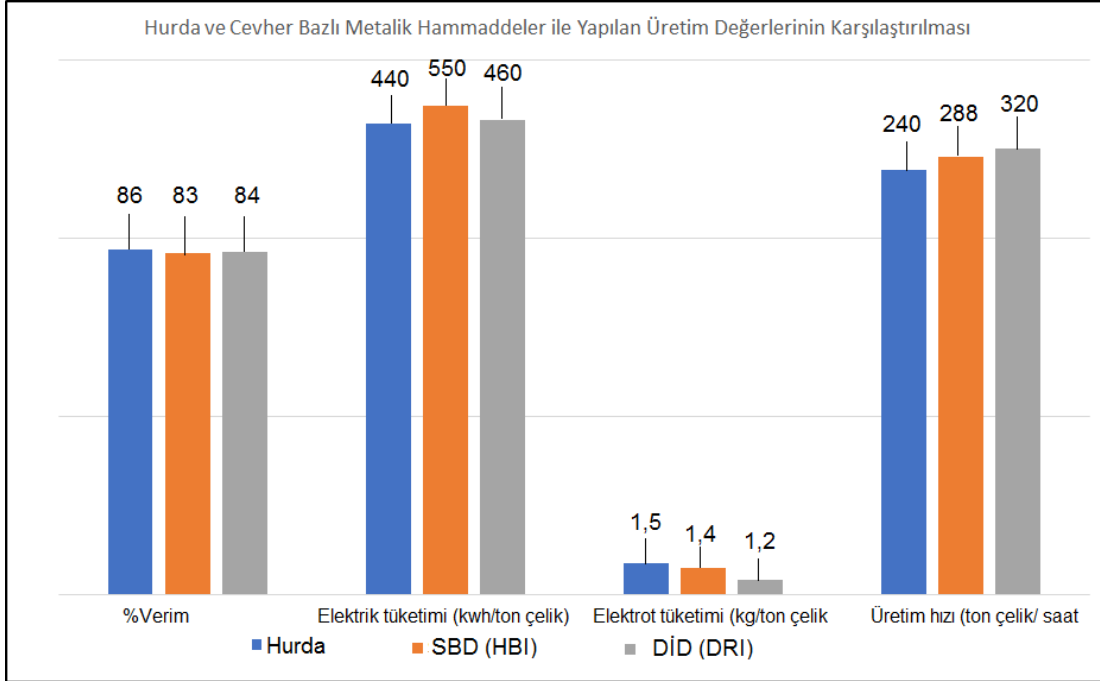
Hurda şarjı yapılarak elde edilen dökümlerde ortalama birim elektrik tüketimi 440 kWh/ton çelik olarak hesaplanmıştır. Hurda kullanılarak elde edilen dökümlerdeki üretim hızlarının ortalaması incelendiğinde ortalama üretim hızı 240 ton çelik/h olarak hesaplanmıştır. Çelik hurdası kullanılarak yapılan üretimler ile elde edilen toplam döküm tonajı 719 ton dur. Bu üretimlerin gerçekleştirilmesi sonrasında elektrod değişimi olmamıştır fakat çıkan elektrodların ağırlığı ile giren elektrodların ağırlıklarının farkı alındığında 1080 kg elektrod tüketimi olduğu tespit edilmiştir. Ton başına birim elektrod tüketimini bulmak için elektrod tüketim miktarını üretilen toplam döküm tonajına böldüğümüzde birim elektrod tüketimi 1,50 kg/ton çelik olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4, üç farklı hammadde (hurda, doğrudan indirgenmiş demir ve sıcak briketlenmiş demir) ile yapılan çelik üretim değerlerinin bir karşılaştırılmasını vermektedir.

Çizelge 4.4. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim değerlerinin karşılaştırılması

	<b>HURDA</b>	<b>SBD (HBI)</b>	<b>DİD (DRI)</b>
% Verim	86	83	84
Elektrik tüketimi (kWh/ton)	440	550	460
Elektrot tüketimi (kg/ton çelik)	1,5	1,4	1,2
Üretim hızı (ton çelik/h)	240	288	320

Bu çizelgeden görüleceği üzere, cevher esaslı metalik hammaddeler ve hurda ile yapılan üretimler karşılaştırıldığında sıvı çelik veriminin hurda ile yapılan üretimlerde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 4.1'de verilen sütun grafikte açıkça görülmektedir. Hurda ile yapılan üretimlerde verimin daha yüksek olmasının nedeni; hurdanın içerisindeki toplam Fe ve metalik Fe değerlerinin daha yüksek olması ile açıklanabilir. Diğer taraftan, DİD veya SBD'den elde edilen sıvı çelik verimi, metalizasyon hızı, toplam gang içeriği, karbon enjeksiyonu ve ilave uygulamalarının bir fonksiyonudur. Tipik bir DİD peleti, % 92'lik bir metalizasyon için % 86 metalik demir ile % 93 toplam demir içerebilir. EAO'da FeO'nun % 100 redüksiyonu mümkün olsaydı, DİD şarjı ile % 93 sıvı çelik verimine ulaşılabilirdi. Ancak, pratikte bu sonuca EAO'de ulaşamamaktadır. Daha yüksek verim elde etmek için, daha yüksek metalizasyonlu DİD veya SBD kullanılması gerekmektedir.



Şekil 4.1. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim değerlerinin karşılaştırılması

Çelik üretiminde önemli bir parametre olan elektrik tüketimi açısından inceleme yapıldığında ise her iki cevher esaslı hammadde kaynağı ile yapılan üretimlerde kullanılan elektrik enerjisinin, özellikle de sıcak briketlenmiş demir kullanılarak yapılan üretimde, hurda kullanılarak yapılan üretime göre daha fazla olduğu belirlenmiştir (Bkz. Şekil 4.1). Ancak; her ne kadar elektrik sarfiyatı açısından demir esaslı metalik hammaddelerin kullanımı dezavantajlı gibi görülse de, çelik üretimindeki en önemli parametrelerden biri olan döküm sürelerini baz alarak belirlenen üretim hızı açısından hurdaya nazaran çok avantajlı oldukları açıkça görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.1’de özellikle sıcak DİD ile yapılan çelik üretiminde üretim hızı ortalamasının hurda ile yapılan üretime nazaran çok daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bunun önemli sebeplerinden biri, hurda şarjı sırasında ark ocağının durdurulup kapağın açılması sonucu döküm sürelerinin uzamasıdır.

Elektrik ark ocağı çelik üretim endüstrisinde elektrot tüketimi de üretim maliyetlerini etkilemesi açısından önemli bir parametredir. Bu nedenle üretim optimizasyonu açısından incelenmesi gereken bir değerdir. Çizelge 4.4’den de görüleceği üzere, cevher esaslı metalik hammaddeler ile yapılan dökümlerdeki, özellikle de DİD ile yapılan üretimdeki, elektrod tüketiminin hurda kullanılarak yapılan dökümlere nazaran daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 4.1’den de açıkça görülmektedir.

DİD, SBD ve hurda kullanılarak elektrik ark ocağında üretilen kütük demirlerin kimyasal analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.5, 4.6 ve 4.7'de verilmektedir. Bu çizelgeler 3 farklı hammadde ile üretilen çeliklerdeki arzu edilmeyen % Cu, % P ve % S miktarlarını göstermektedir.

Çizelge 4.5. Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI) İle Gerçekleştirilen Üretim Sonucu Çelik İçerisinde Haddeme Prosesini Etkileyecek Kalıntı Element Miktarı

<b>Döküm Numarası</b>	<b>% Cu</b>	<b>% P</b>	<b>% S</b>
HDRI 1	0,02	0,004	0,003
HDRI 2	0,03	0,004	0,002
HDRI 3	0,02	0,002	0,002
HDRI 4	0,04	0,002	0,002
HDRI 5	0,01	0,003	0,002
HDRI 6	0,03	0,003	0,002
HDRI 7	0,02	0,003	0,002
HDRI 8	0,03	0,002	0,002
HDRI 9	0,01	0,002	0,002
HDRI 10	0,01	0,003	0,002
HDRI 11	0,02	0,003	0,003
HDRI 12	0,02	0,003	0,003
HDRI 13	0,02	0,003	0,003
HDRI 14	0,03	0,002	0,002
HDRI 15	0,02	0,003	0,003
HDRI 16	0,02	0,002	0,002
HDRI 17	0,01	0,002	0,002
HDRI 18	0,02	0,002	0,002
HDRI 19	0,02	0,003	0,003
HDRI 20	0,02	0,002	0,002
HDRI 21	0,002	0,003	0,003
HDRI 22	0,03	0,002	0,002
HDRI 23	0,03	0,003	0,003
HDRI 24	0,02	0,002	0,002
HDRI 25	0,02	0,002	0,002
<b>Ortalama</b>	<b>0,02</b>	<b>0,003</b>	<b>0,002</b>

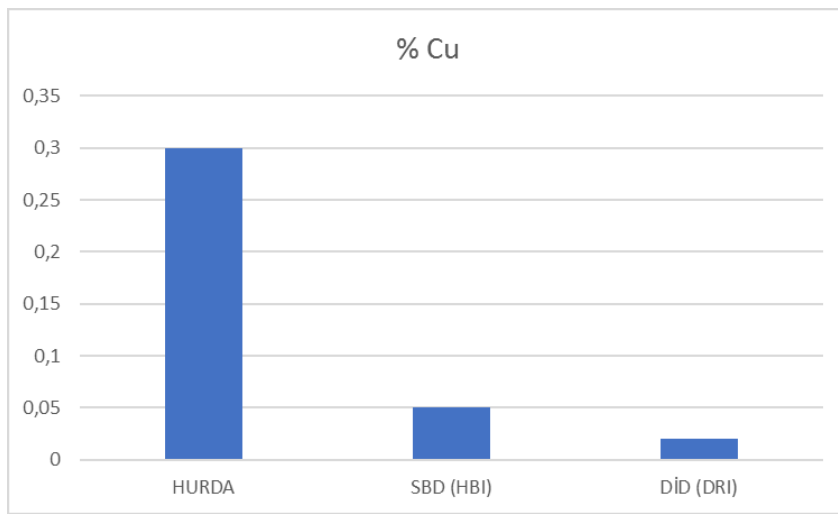
Çizelge 4.6. Sıcak Briketlenmiş Demir (HBI) ile Gerçekleştirilen Üretim Sonucu Çelik İçerisinde Haddelme Prosesini Etkileyecek Kalıntı Element Miktarı

Döküm Numarası	% Cu	% P	% S
HBI 1	0,05	0,002	0,003
HBI 2	0,05	0,002	0,003
HBI 3	0,04	0,002	0,002
HBI 4	0,06	0,003	0,003
HBI 5	0,05	0,002	0,002
HBI 6	0,05	0,002	0,002
HBI 7	0,05	0,002	0,002
HBI 8	0,05	0,002	0,002
HBI 9	0,04	0,002	0,002
HBI 10	0,04	0,002	0,002
HBI 11	0,05	0,003	0,001
HBI 12	0,04	0,003	0,001
HBI 13	0,05	0,003	0,003
HBI 14	0,04	0,002	0,002
HBI 15	0,05	0,003	0,003
HBI 16	0,05	0,002	0,002
HBI 17	0,04	0,002	0,002
HBI 18	0,05	0,002	0,002
HBI 19	0,04	0,003	0,003
HBI 20	0,05	0,002	0,002
HBI 21	0,04	0,003	0,003
HBI 22	0,05	0,002	0,002
HBI 23	0,05	0,003	0,003
HBI 24	0,04	0,002	0,002
HBI 25	0,05	0,002	0,002
<b>Ortalama</b>	<b>0,05</b>	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>

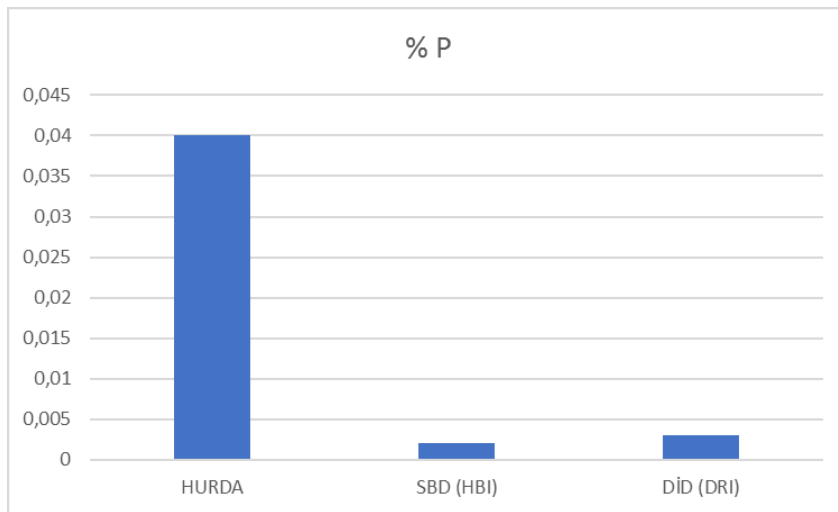
Çizelge 4.7. Hurda ile gerçekleştirilen üretim sonucu çelik içerisinde haddelme prosesini etkileyecek kalıntı element miktarı

Döküm Numarası	% Cu	% P	% S
Hurda 1	0,35	0,040	0,037
Hurda 2	0,28	0,037	0,033
Hurda 3	0,27	0,043	0,035
<b>Ortalama</b>	<b>0,30</b>	<b>0,040</b>	<b>0,035</b>

Çizelge 4.8’de ise, tüm bu hammaddeler ile yapılan üretim sonucu elde edilen çeliklerin kimyasal analizi ile tespit edilen, haddeleme işlemini etkileyecek % Cu, % P ve % S miktarlarının karşılaştırılması, verilmektedir. Bu çizelgeden ve Şekil 4.2., 4.3 ve 4.4’ten görüleceği üzere, hurdayla üretime nazaran hem doğrudan indirgenmiş demir hem de sıcak briketlenmiş demir ile yapılan üretim sonucu elde edilen çeliğin Cu, P ve S oranları çok daha düşüktür. Diğer bir deyişle, her iki cevher bazlı hammadde ile daha temiz çelik üretilmektedir. Bunun nedeni hurdanın bünyesinde bu istenmeyen elementlerin daha fazla olmasıdır.

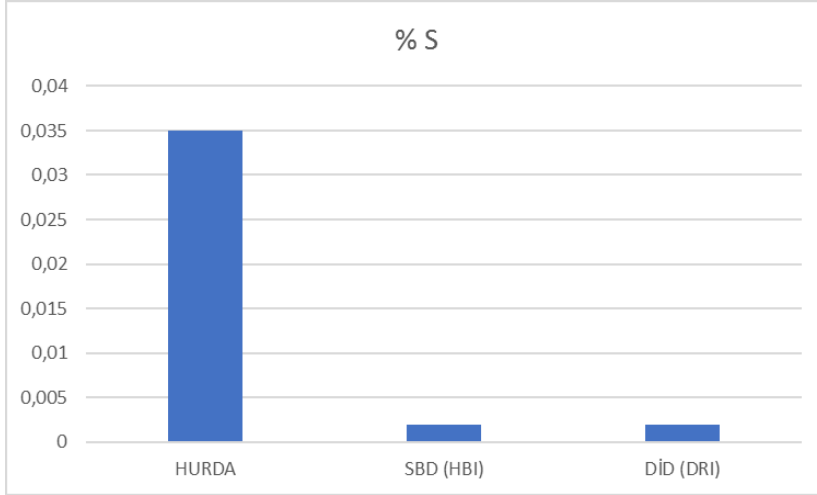


Şekil 4.2. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek %Cu miktarı



Şekil 4.3. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek %P miktarı





Şekil 4.4. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek %S miktarı

Çizelge 4.8. Hurda ve cevher bazlı metalik hammaddeler ile yapılan üretim sonucu çelik içerisinde haddeleme prosesini etkileyecek kalıntı element miktarı

	HURDA	SBD (HBI)	DİD (DRI)
% Cu	0,30	0,050	0,020
% P	0,040	0,002	0,003
% S	0,035	0,002	0,002

Bu sonuçlar göstermektedir ki, elektrik ark ocağında demir esaslı metalik hammaddeler kullanılarak yapılan demir-çelik üretimi hem üretim hızı hem de üretilen çeliğin temizliği açısından hurda ile yapılan üretimden üstündür. Bu tartışılan hususlar yanında, demir esaslı metalik hammadde kullanılarak yapılan çelik üretiminin başka getirileri de bulunmaktadır. Üç farklı şarj malzemesi kullanılarak yapılan üretimlerin sonucunun incelenmesi sonucu elektrik ark ocaklı çelik üretiminde cevher esaslı metalik hammaddelerin hurdaya alternatif olarak kullanılmasının getirileri şu şekilde özetlenebilir:

- Cevher esaslı metalik malzemelerin ark ocağına beslenmeden önce kimyasal bileşiminin bilinmesi dolayısıyla ocağın çalışma performansı artırılabilir.
- Hurdanın sebebiyet verdiği elektrot kırılmaları ortadan kalktığı için elektrot tüketimi düşmektedir.
- Cevher esaslı metalik malzemeler daha iyi cüruf köpürtme prosesi sağladığından ötürü üretim optimizasyonuna fayda sağlamaktadır.

- Cevher esaslı metalik hammaddeler ocağa sürekli olarak kapaktan beslendiğinden ve hurda sepeti ile şarja gereksinim duyulmadığından döküm alma süreleri kısalmıştır ve birim zamanda üretilen çelik miktarı artmıştır.
- Hurda kullanılmaması sonucu patlama riskleri ortadan kalkmakta ve bu da iş güvenliği açısından fayda sağlamaktadır.
- Cevher esaslı metalik malzemeler kurşun, kadmiyum gibi elementler ihtiva etmediğinden daha çevre dostu atmosfer ortamı sağlamaktadır.
- Ayrıca çalışmamızın konusu olmamasına rağmen elektrik ark ocaklı tesislerde çelik üretiminde cevher esaslı metalik hammaddenin kullanımının çelik üretim maliyetine pozitif etkisi de yadsınamaz bir gerçektir. Cevher fiyatlarının hurda fiyatlarına kıyasla daha ucuz olması ve cevher fiyatlarının hurda piyasası gibi ani dalgalanmalar yaşamaması ve dolayısıyla daha stabil olması çelik üretiminde cevher esaslı metalik hammaddenin kullanımının çelik üretim maliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, bu tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar özetlenecek ve elektrik ark ocağında çelik üretiminde hammadde olarak hurda yerine doğrudan indirgenmiş demir ve sıcak briketlenmiş demir kullanımı konusunda bundan sonra yürütülebilecek çalışmalar ile ilgili bazı öneriler yapılacaktır.

### 5.1. Sonuçlar

Çalışmaların ilk aşamasında hammadde kaynağı olarak doğrudan indirgenmiş demir kullanılmış ve 25 döküm yapılmıştır. Elde edilen dökümlerden alınan veriler kullanılarak ortalama hammadde verimi % 84 olarak hesaplanmıştır. Doğrudan indirgenmiş demir (DİD) kullanılarak yapılan dökümler için elde edilen ortalama birim elektrik tüketimi 460 kwh/ton çelik olarak hesaplanmıştır. Üretim hızlarının ortalaması alınarak hesaplanan ortalama üretim hızı 320 ton/h olarak hesaplanmıştır. DİD şarjı ile yapılan üretimlerde toplam 5.990 ton sıvı çelik elde edilmiştir. Bu üretim sürecinde 4 adet ark ocağı elektrodu değiştirilmiştir ve her bir adet elektrot 1.800 kg ağırlığındadır. Toplamda 7.200 kg elektrot tüketimi yapılmıştır. Ton başına elektrot tüketimi 1,20 kg/ton çelik olarak bulunmuştur.

Çalışmamızın ikinci aşamasında hammadde olarak sıcak briketlenmiş demir (SBD) kullanılmış ve 25 döküm yapılmıştır. 25 dökümden elde edilen verilen incelendiğinde SBD kullanılarak elde edilen dökümlerde ortalama hammadde verimi % 83 olarak elde edilmiştir. Dökümlerde ortalama birim elektrik tüketimi 550 kWh/ton çelik olarak hesaplanmıştır. SBD şarjı ile yapılan üretime ait üretim hızlarının ortalaması alındığı zaman ortalama üretim hızı 288 ton çelik/h elde edilmiştir. Üretim sonucu 6.011 ton sıvı çelik elde edilmiştir. Bu üretimlerin gerçekleştirilmesi aşamasında toplamda 5 adet ark ocağı elektrodu kullanılmıştır. 1.800 kg birim elektrot ağırlığına sahiptir ve üretimlerin sonunda toplamda 9.000 kg elektrot tüketimi olmuştur.

Çalışmamızın son bölümünde hurda şarjı kullanılarak 3 döküm alınmıştır. Ocağa şarj etme işlemi hurda sepetleri vasıtasıyla ocak tavanında yapılmıştır. Hurda kullanılarak gerçekleştirilen 3 dökümden elde edilen veriler incelendiğinde ortalama hammadde verimi % 86 olarak saptanmıştır. Dökümlerin ortalama birim elektrik tüketimi 440 kwh/ton çelik

olarak hesaplanmıştır. Dökümlerde ortalama üretim hızı 240 ton çelik/h olarak hesaplanmıştır. Çelik hurdası kullanılarak yapılan üretimler ile elde edilen toplam döküm tonajı 719 ton'dur. Bu üretimlerin gerçekleştirilmesi sonrasında elektrot değişimi yapılmamıştır ancak dökümler öncesi ve sonrası elektrotların ağırlıklarının farkı alınarak 1080 kg elektrot tüketimi olduğu tespit edilmiştir. Ton başına birim elektrot tüketimini 1,50 kg/ton çelik olarak belirlenmiştir.

Elde edilen bütün bu veriler incelendiğinde, elektrik ark ocağında üç farklı şarj malzemesinin beslenmesi ile yapılan çelik üretimleri karşılaştırıldığında şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Hammadde verimleri birbiriyle karşılaştırıldığında en yüksek verimin en yüksek Fe içeriğine sahip hurda malzemeden elde edildiği görülmektedir.
- Sıcak briketlenmiş demir (SBD) ile üretimdeki elektrik sarfiyatı hurda ile üretime nazaran daha yüksektir. Diğer taraftan, doğrudan indirgenmiş demir (DİD) ile çelik üretimindeki elektrik tüketimi ve hurda şarjı ile yapılan üretimdeki elektrik tüketim değerlerine oldukça yakın olup, sadece 20 kWh/ton fazladır. Bu açıdan DİD şarj kullanımının çelik üretimi elektrik tüketiminde hurdaya nazaran çok az miktarda maliyet artışına neden olduğu değerlendirilebilir.
- Diğer taraftan, çelik üretiminde maliyet açısından önemli bir girdi olan elektrot tüketimi değerleri incelendiğinde ton başına 1,20 kg elektrot tüketimi ile en düşük elektrot tüketimi DİD kullanıldığı dökümlerde elde edilmiştir. Dolayısıyla, DİD kullanımı EAO'da çelik üretim maliyetini düşürücü etki sağlamıştır.
- Ayrıca, DİD'in elektrik ark ocağında şarj malzemesi olarak kullanımının temel nedenlerinden birisi de daha önce bahsedildiği üzere içerdiği kalıntı elementlerin az olmasıdır. Nitekim, DİD ve SBD ile üretilen çeliklerdeki Cu, S ve P oranlarının hurda ile üretilen çeliğe nazaran oldukça düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bu sonuçlara göre müşteri talepleri doğrultusunda hassas makine ve ekipmanlarda kullanılacak çelikler için DİD şarj kullanımı önerilebilir.
- DİD, hurda ile harmanlarak sepet içerisinde elektrik ark ocağına şarj edilebileceği gibi konveyör bantlar yardımıyla ocak içerisine sürekli olarak da beslenebilir. Çeşitli şekillerde ocak içerisine şarj edilebilir olması hammadde piyasasındaki ekonomik ve diğer gelişmelere bağlı olarak optimum üretimin devamlılığının sağlanması açısından çelik üretiminde kolaylıklar sağlayabilir.

- DID ve SBD gibi doğrudan indirgenmiş demir kaynaklarının doğru besleme yöntemi seçilerek ark ocağında kullanımı ile; hurda kullanımına kıyasla döküm sürelerinin kısılması ile ark ocağı enerji verimliliği ve üretim hızı arttırılabilir ve dolayısıyla işletme maliyetlerinde düşüş sağlanabilir. Bu bağlamda, hurdaya nazaran DID'in maliyetinin daha düşük olması da işletme maliyetinin düşmesine katkı sağlayacaktır.
- Ayrıca, elektrik ark ocağında cevher esaslı metalik hammadde kullanılarak üretilen çelikler hurda ile üretilen çeliklere nazaran daha düşük kalıntı elementler ihtiva ettiği için, diğer bir deyişle daha temiz olduğundan, ark ocağında hurda yerine demir esaslı metalik hammadde kullanımı sürekli döküm ve haddeleme gibi sonraki süreçlerin optimizasyonuna izin vererek çelik üreticisine daha kaliteli çelik üretme ve daha yüksek verim elde etme imkanı sağlar. Özellikle otomotiv ve beyaz eşya endüstrisinde kullanılan hassas kalitedeki yassı ürünlerin üretimindeki bu daha da önemlidir.
- Yüksek karbon salınımı nedeniyle demir cevherinin yüksek fırınlarda kullanılmasının aksine doğrudan indirgenmiş demir formlarında elektrik ark ocaklarında hammadde olarak kullanılması daha çevre dostu bir yön olarak da irdelenmesi gereken başka bir noktadır.
- Ayrıca, doğrudan indirgenmiş demir ürünlerinin ark ocağında kullanılması sonucu ark ocağı baca tozları içerisinde kurşun ve kadmiyum gibi elementleri bulundurmayaacağı için daha çevre dostu bir ortam sağlayacaktır.
- Sürekli olarak (%100) doğrudan indirgenmiş demir ürünlerinin kullanılması ile beraber hurda içerisindeki patlayıcı malzemeler dolayısıyla meydana gelen patlama riskleri ortadan kalkacağı için iş ve işçi sağlığı açısından da hurda kullanımına göre çok daha avantajlı bir üretim sağlanmaktadır.
- Cevher esaslı metalik hammaddeler; yüksek metalik demir içeriği, ayarlanabilir karbon seviyesi, düşük kalıntı element miktarı ve tutarlı kimyasal ve fiziksel özellikleri ile elektrik ark ocaklarında hurdaya alternatif olarak daha yüksek kaliteli çeliklerin daha yüksek verim ile üretilmesi mümkün kıldığından ve üretim optimizasyonunu iyileştirdiğinden dolayı gelişen çelik üretim sektöründe önümüzdeki yıllarda en önemli hammadde kaynağı olacağı düşünülmektedir.
- Ayrıca, sıcak şarj ve daha büyük kapasiteli doğrudan indirgeme tesisleri gibi teknolojik gelişmeler de, doğrudan indirgenmiş demir-elektrik ark ocağı kombinasyonunu daha da cazip ve ekonomik hale getirecektir.

## 5.2. Öneriler

Ham çelik üretiminin önemli bir kısmının elektrik ark ocaklarında üretilmesi ve dolayısıyla da üretimin temel hammadde kaynağının hurdaya dayanması nedeniyle ülkemizde çok ciddi bir hurda talebi söz konusudur. Ülkemiz dünyada hurda ithal eden ülkeler sıralamasında birinci sırada yer almaktadır. Mevcut gereksinimi ithalat yoluyla karşılanan hurdaya iyi bir alternatif hammadde kaynağı olarak tamamen yerel kaynaklarımız kullanılarak gerçekleştirilecek sünger demir üretimi büyük önem kazanmaktadır. Ülkemizde bu tesislerin kurulabileceği orta boy demir rezervleri mevcuttur. Temennimiz yakın gelecekte ülkemizde bu rezervlerden üretilen cevherlerin uygun tesislerde işlenerek ülkemiz gereksinimlerinin karşılanmasıdır.

Sünger demir üretiminde baca tozu, tufal gibi metalurjik atıklar da kullanılarak, demir çelik tesislerinin çevre problemlerine bir ölçüde çözüm olacak, atık ürünü ara ürüne dönüştürerek ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, EAO'da sünger demir kullanılarak yapılan çelik üretimi sağladığı enerji verimliliğiyle karbon ayak izini en aza indirgeyen çevre dostu bir sistemdir.

Önümüzdeki dönemlerde sünger demir üretim prosesi geliştirilerek, geniş rezerve sahip Hekimhan Hasançelebi (Malatya) bölgesindeki yüksek gang içeriği ve düşük tenör nedeni ile yüksek metalizasyon değerleri elde edilemeyen demir cevherleri başta olmak üzere ülkemizdeki demir yataklarının sünger demir üretiminde değerlendirilebilmesi ülke ekonomisi için çok yararlı olacaktır.

Ayrıca, bu çalışmanın devamı olarak EAO'da çelik üretiminde hammadde olarak sünger demir kullanımı konusunda yapılması faydalı olacak deneysel çalışmalara yönelik diğer öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Ocak içerisine sürekli besleme sistemi olmayan ark ocaklı tesislerde; hurda ile yapılan üretimlerde hurda sepetleri içerisine çeşitli oranlarda 'doğrudan indirgenmiş demir' veya 'sıcak briketlenmiş demir' eklenerek üretim prosesine etkileri karşılaştırılmalı olarak incelenebilir. Böylece hurda tedarikinin kısıtlı olduğu durumlarda üretim hızının yavaşlamasının veya hammadde tedariki kaynaklı üretim duruşlarının önüne geçilebilir.

- Bu çalışmada doğrudan indirgenmiş demir sıcak formda ocak içerisine sürekli olarak beslenmiştir. Fakat soğuk doğrudan indirgenmiş demir kullanılarak da uygulamalar yapılabilir ve bu dökümler sıcak briketlenmiş demir kullanılarak elde edilen dökümler ile karşılaştırılabilir.
- Farklı karbon içeriğine sahip doğrudan indirgenmiş demir kaynakları kullanılarak yapılan üretimler verim, elektrik tüketimi ve prosesi etkileyen diğer endeksler ile karşılaştırılmalı olarak incelenebilir.
- Hurda ve doğrudan indirgenmiş demir ile yapılan üretimler esnasında baca tozlarından alınan numuneler incelenerek çevresel etkileri açısından değerlendirme yapılabilir.
- Hurda ile yapılan üretimler ile cevher esaslı metalik malzemeler ile yapılan üretimlerin ton başına çelik üretim maliyetleri karşılaştırılarak daha ekonomik çelik üretimleri için yol haritaları belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

- AISE. (1999). *MSTS Iron making; The AISE Steel Foundation Chap.* USA: Pittsburgh, PA, 741.
- Al Saif, M.M., Al-Shamari, M., Al-Moslem, H., Brandao, R., and Rajesh, S. (2005). Improvements in Graphite Electrode Consumption in Hadeed Long Products, *Proc. of 8th European Electric Steelmaking Conference*, 173–182.
- Anameric, B., and Kawatra, S. (2007). Properties and Features of Direct Reduced Iron. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, An International Journal*, 28(1), 59-116.
- Arnold, H., Vollmers, A., Schrade, C., Huellen, M., Talhoff, D., and Zulhan, Z. (2006). Secondary Metallurgy for BOF Steelmaking. *Iron Steelmaking Conference*, Linz/Austria, 9-10 October 2006, Secondary Steelmaking Session, 1-9.
- Barracrough, K.C. (1981). *The Development of Early Steelmaking Processes: An Essay in the History of Technology*. PhD thesis, University of Sheffield, UK.
- Bellevrat, E., and Menanteau, P. (2009). Introducing carbon constraint in the steel Sector: ULCOS Scenarios and Economic Modeling. *Revue de Métallurgie*, 106(9), 318-324.
- Biswas, A. (1996). *Minerals and Materials in Ancient India*. New Delhi: D.K. Printworld.
- Bodsworth, C. (2001). *British Iron and Steel AD 1800-2000 and Beyond*. Cambridge: The University Press.
- Chatterjee, S. (1994). Transitional dynamics and the distribution of wealth in a neoclassical growth model. *Journal of Public Economics*, 54(1), 97-119.
- Chatterjee, A. (1999). Role of raw materials in various methods of iron production. *Proc. of Int. Conf. on Alternative Routes of Iron and Steelmaking (ICARISM '99)*, 15-17 Sept. 1999, Perth, Australia, 3-12.
- Chatterjee, A., Singh, R., and Pandey, B. (2001). *Metallics for Steelmaking - Production and Use*. New Delhi: Allied Publishers Ltd.
- Christopher, A.S., Saturday, E.W., Oladeji, B.G., and Biodun, O.O. (2014). Process modeling of steel refining in electric arc furnace (EAF) for optimum performance and waste reduction. *Chemical and Process Engineering Research*, 28, 66-77.
- Degner, M., Fandrich, R., Endemann, G., Ghenda, J.T., Letz, K., Lungen, H.B., Steller, I., Wieland, J., Winkhold, A., Bartos, R., and Winkelgrund, R. (2007). *Steel Manual*. Düsseldorf, Germany: Steel Institute VDEh, Verlag Stahleisen, Düsseldorf.
- Demir-Çelik, Y. (2021). <http://www.demircelik.com.tr/> Son Erişim Tarihi: 05.06.2021
- Deng, L. (2012). *Investigation of Electric Arc Furnace Chemical Reactions and Stirring Effect*. Master Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Doğantepe, G. (2013). *Hematit Karakterli Demir Cevherinden ve Yüksek Fırın Baca Tozundan Sünger Demir Üretilebilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Dragna, E.C., Ioana, A., and Nicolae, C. (2018). Methods of steel manufacturing - The electric arc furnace. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 294(1), 012017.
- D'Souza, J., and Al Marr, A.S.A.A. (2011). Use of High Percentage Quality DRI in EAF and Its Benefit in Cost Reduction. *AISTech 2011 Conf. Proc.* 955-972.
- Duarte, P. (2004.). Latest Advances in Direct Reduction to Serve Mini-Mills and Integrated Mills. *South East Asia Iron & Steel Institute 2004 Conference & Exhibition*, Kuala Lumpur Malaysia.
- Duarte, P.E., D., Becerra, J., Lizcano, C., and Martinis, A. (2008). Energiron: direct reduction technology economical, flexible, environmentally friendly. *Acero Latino Americano*, 52-58.



- Dutta, S.K. and Chokshi, Y.B. (2020). Basic Concepts of Iron and Steel Making. *Springer, Singapore*, 497-536.
- Dutta, S.K. (2017). Iron ore-coal composite pellets/briquettes as new feed material for iron and steelmaking. *Material Sci & Eng Int J*, 1(1), 10-13.
- Dutta, S.K., and Sah, R. (2016). *Direct Reduced Iron: Production. Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, Taylor and Francis. New York: Published online, 1082-1108.
- Dutta, S.K., Sah, R., and Chokshi, Y. (2013). *Iron Ore-Coal/Coke Composite Pellets*. Germany: Lambert Academic Publishing.
- Ersundu, A.E. (2007). *Yerli Demir Cevherlerinin Sünger Demir Üretimine Uygunluğunun Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fruehan, R. J. (1998). *Making, Shaping and Treating of steel, Steel making and refining volume*, AISE Steel Foundation, ed. United states steel. Co.
- Fruehan, R.J., and Turkdogan, E. (1981). *Physical chemistry of iron and steelmaking. In Making, Shaping, and Treating of Steel*. USA: U.S. Steel Corporation.
- STB (2020). Demir Çelik Üretim Raporu, Sektörel Raporlar, Sanayi Genel Müdürlüğü, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.
- Snigdha, G., Bharath, B.N., and Viswanathan, N.N. (2019). BOF process dynamics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 128(1-2), 17-33.
- Gale, W. K. V. (1973). The Bessemer steelmaking process. *Transactions of the Newcomen Society*, 46(1), 17-26.
- Ganguly, A., Gupta, K.N., and Aswath, H.S. (1982). *Symposium on Direct Reduction Processes in Iron and Steelmaking, 36th ATM of IIM*. Rourkela, India, November, 90.
- Geçim, M.K. (2006). *Demir Oksit Peletlerden Linyit Kömürü Kullanılarak Sünger Demir Üretim Koşullarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gerigk, E., Knop, K., and Pena, J.M. (1982). *Symposium on Direct Reduction Processes in Iron and Steelmaking, 36th ATM of IIM*. Rourkela, India, November, 192.
- Ghosh, A., and Chatterjee, A. (2008). *Iron Making and Steelmaking: Theory and Practice*. New Delhi: Prentice-Hall of India (PHI) Learning Private Limited.
- Grobler, F., and Minnitt, R.C.A. (1999). The Increasing Role of Direct Reduced Iron in Global Steelmaking,. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 99(2), 111-116.
- Guo D., Li, Y., Cui, B., Chen, Z., Luo, S., Xiao, B., Zhu, H., and Hu, M. (2017). Direct reduction of iron ore/biomass composite pellets using simulated biomass-derived syngas: Experimental analysis and kinetic modelling. *Chemical Engineering Journal*, 327, 822-830.
- Habashi, F. (2016). *A short history of electric furnaces in iron and steelmaking*. Part 1: The pioneer days of the arc furnace. Métallurgie Extractive Quebec.
- Hornby-Anderson, S. (2002). The Educated Use of DRI/HBI Improves EAF Energy Efficiency and Yield and Downstream Operating Results. *European Electric Steelmaking Congress*. May 2002, Venice, Italy.
- Hornby, S. (2007). EAF Optimization, *2007 Intertech Conference on Scrap Substitutes*, October, 2007, Intertech.
- Hornby, S. (2015). Mini-mill burdening for maximum efficiency and Yield? *Iron & Steel Technology*, 12(1), 50-62.
- Hornby, S., Madias, J., and Torre, F. (2016). Myths and Realities of Charging DRI/HBI in Electric Arc Furnaces. *Iron & Steel Technology*, 81-90.

- Hyde, C.K. (2019). *Technological Change and the British Iron Industry 1700–1870*. Princeton University Press, 2019.
- Janke, D., Savov, L., Weddige, H.J., and Schulz, E. (2000). Scrap based steel production and recycling. *Materiali in Tehnologije*, 34(6), 387-399.
- IISI (1997). *Steel Industry and the Environment*. Technical Report No. 38. UNEP and IISI.
- IMTC (2012). *Scrap Supplements and Alternative Ironmaking VI Symposium*. 28-30 October 2012 Baltimore, MD, USA, The Ironmaking Technology Committee (IMTC).
- Jones, J. (1998). *Electric Arc Furnace Steelmaking*. USA: AISI, Pittsburgh.
- Klawonn, R.M., and Hoffman, G.E. (2005). *Direct from Midrex*. Quarter.
- Lu, L., Pan, J., and Zhu, D. (2015). Quality requirements of iron ore for iron production. *Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, 475-504.
- Lüngen, H.-B., M. Peters, P., and Schmöle, P. (2013). Measures to increase efficiency and to reduce CO<sub>2</sub> emissions in iron and steelmaking in Germany and Europe. *AISTech Proceedings*, 109-119.
- Madias, J. (2014). *Electric Furnace Steelmaking*. In: *Treatise on Process Metallurgy*. Amsterdam: Elsevier Ltd.
- McManus, G. J. (1994). Direct-reduced iron comes of age. *New Steel*, 10(10), 26-29.
- Memoli, F., Picciolo F., Jones, J.A.T., and Palamini N. (2015). The Use of DRI in a Consteel® EAF Process. *Iron & Steel Technology*, 12(1), 72-80.
- Metal Dünyası (2021). Demir ve Çelik Üretimini Kısa Bir Tarihçesi., <https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/86/demir-ve-celik-uretiminin-kisa-bir-tarihcesi.html>. Son Erişim Tarihi: 05.12.2020.
- Midrex (2020). Using HBI in Blast Furnaces. <https://www.midrex.com/tech-article/using-hbi-in-blast-furnaces/> Son Erişim Tarihi: 10.11.2020.
- Midrex (2016). DRIPax™ – MIDREX® Plant Process Optimization System: Status Report of the New Generation Technology, <https://www.midrex.com/tech-article/dripax-midrex-plant-process-optimization-system-status-report-of-the-new-generation-technology/> Son Erişim Tarihi: 10.11.2020.
- Midrex(2018). 2018 World Direct Reduction Statistics [https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex\\_STATSbookprint\\_2018Final-1.pdf](https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex_STATSbookprint_2018Final-1.pdf) Son Erişim Tarihi: 10.11.2020.
- Mombelli, D., Dall'Osto, G., Mapelli, C., Gruttadauria, A., and Barella, S. (2021). Modeling of a continuous charging electric arc furnace metallic loss based on the charge mix. *Steel Research International*, 92(5), 2000580.
- Mori, K. (1988 ). Kinetics of fundamental reactions pertinent to steelmaking process. *Transactions ISIJ*, 28, 246-261.
- Mott, R.A. (2014). Dud dudley and the early coal-iron industry. *Transactions of the Newcomen Society*, 15(1), 17-37.
- Oster, S. (1982). The Diffusion of Innovation among Steel Firms: The Basic Oxygen Furnace. *Bell Journal of Economics*. *The RAND Corporation*, 13(1), 45-56.
- Özsaraç, U., ve Özdemir, Ö. Demir-Çelik Metalurjisi, Sakarya Üniversitesi Ders Notu, <https://docplayer.biz.tr/19920180-Demir-celik-metalurjisi-ders-notu-doc-dr-ozkan-ozdemir-doc-dr-ugur-ozsarac.html> Son Erişim Tarihi: 02.04.2020.
- Prasad, K.K., and Ray, H.S. (2009). *Advances in Rotary Kiln SpongeIron Plant*. New Delhi: New Age International Publishers.
- Romenets, V.A. (2001). New processes for making iron: status and prospects. *Metallurgist*, 45(11), 429-443.

- Quintero, R. (2002). A Re-Engineered DR Plant for Quality, Low-Cost Onsite DRI Production. in *Proc. of 60th Electric Furnace Conference*, November 10-13, 2002, San Antonio, Texas, USA, Iron and Steel Society, 261-274.
- Scarnati, T. M. (1995). Use of DRI and HBI in electric furnace steelmaking: Quality and cost considerations. *Iron Steel Eng.(USA)*, 72(4), 86-89.
- Schmitt, R. (1985). *Introduction To Electric Arc Furnace Steelmaking*. Los Angeles: EPRI Center for Material Production.
- Snigdha, G., Bharath, B.N., and Viswanathan, N.N. (2019). BOF process dynamics. mineral processing and extractive metallurgy. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*, 128(1-2), 17-33.
- Spencer, A.J., and Cochran, D.S. (2015). Design decomposition for selecting an electric arc furnace off-gas system for SDI Butler flat roll division. *Procedia CIRP-International Academy for Production Engineering*, 34, 143-149.
- Stagnoli, P. (2011). Smart Injection Tools in DRI-Based EAF Steelmaking at Krakatau Steel. *Steel Times International*, 35(8), 13-16.
- Steel-Data, (2021). <https://www.steel-data.com/> Son Erişim Tarihi: 06.06.2021
- Stephenson, R.L., Smaier, R.M., and Elliott, J.F. (1980). *Direct Reduced Iron: Technology and Economics of Production and Use*. USA: The Iron & Steel Society of AIME, Warrendale.
- Stopar, K., Kovacic, M., Kitak, P., and Pihler, J. (2017). Electric arc modeling of the EAF using differential evolution algorithm. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(10), 1189-1200.
- Strezov, V. (2006). Iron ore reduction using sawdust: Experimental analysis and kinetic modelling. *Renewable Energy*, 31(12), 1892-1905.
- Szekely, J., McKelliget, J., and Choudhary, M. (1983). Heat – transfer fluid flow and bath circulation in electric – arc furnaces and DC plasma furnaces. *Ironmaking and Steelmaking*, 10(4), 169-179.
- Takla, N.D. (1999). *Utilization of Sponge Iron in Electric Arc Furnaces*. Direct from Midrex, Second Quarter, 3-6.
- Taylor, C.R. (1985). *Electric Furnace Steelmaking*. The Iron & Steel Society of AIME, Warrendale, PA, USA .
- TÇÜD, (2021). <http://celik.org.tr/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- Thatoi, K., Sen Singh, V., and Sohal, G. (2011). *Proc. of Conf. on Direct Reduction and Direct Smelting*. Jamshedpur, India.
- TOBB (2019). Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporu, [http://tobb.org.tr/Documents/yayinlar/2020/demir\\_ve\\_demir\\_disi\\_metaller.pdf](http://tobb.org.tr/Documents/yayinlar/2020/demir_ve_demir_disi_metaller.pdf) Son Erişim Tarihi : 05.05.2021.
- Torre, F., Suligoy, M., Micheletti, J.L., Hopperdizel, P., and Siniscalco, W. (2005). Results of CoJet Technology (Gas and Coal Fines Injection System) in ACINDAR S.A., With Continuous DRI Charging, *15th IAS Steelmaking Conference*, San Nicolás, BA, Argentina, Nov., 24-32.
- İnternet: Steel-making processes, <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=2> Son Erişim Tarihi: 05.06.2021.
- Toulouevski, Y.N., and Zinurov, I.Y. (2013). *Modern Steelmaking in Electric Arc Furnaces: History and Development*. In *Innovation in Electric Arc Furnaces*. Springer, 2nd Edition.
- Turgut, E. (2010). *Doğrudan Redüksiyon ile Sünger Demir Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Tylecote, R.F. (2013). *A History of Metallurgy*. United Kingdom: Maney Publishing.

- Vijayavergia, R.K., and Chauhan, G.I.S. (2006). *Awakening of the Indian Steel Industry: 2005-2020*. Ed.: A. Chatterjee, IIM, Jamshedpur, India, 27.
- Wakelin, D.H. (1999). *The Making , Shaping and Treating of Steel, Vol. 2: Steelmaking and Refining*. 11th Edition, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA, USA.
- Wiklund, C.M. (2016). *Optimization of A Steel Plant Utilizing Converted Biomass*, Doctor of Technology Thesis, Åbo Akademi University, Finland.
- Vivek, R.G., Satish V.B., and Atul B.B. (2011). Induction Furnace - A Review. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(4), 2011, 277-284.
- Xu, C., and Cang, D. (2010). A brief overview of low CO2 emission technologies for iron and steel making. *International Journal of Iron and Steel Research*, 17(3), 1-7.
- Yeniçeri, M. (1990). *Demir Çelik Madenciliğinin El Kitabı*. Ankara: Türkiye Demir ve Çelik İşletmeleri Eğitim Yayını.
- Yılmaz, C., ve Turek, T. (2017). Modeling and simulation of the use of direct reduced iron in a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1519-1530.



**DİZİN****D**

Demir ve çelik endüstrisi · 1  
Demir-çelik · 1  
Doğrudan indirgenmiş demir · *Bakın*

**E**

Elektrik ark ocağı · 60

**G**

Geri dönüş · 25

**H**

Hurda, enerjisi · 24

**I**

İNDİRGENMİŞ DEMİR · iii, *Bakın*

**K**

Koklaşabilir taş kömürü · 1

**P**

pik demir · 1, 16, 26, 28, 30, 45, 48, 51

**S**

Sünger demir · 1, 10, 21, 31, 69

**Y**

yüksek fırın · vii, xi, 1, 2, 6, 7, 8, 9, 30, 36, 38  
yüksek fırın sıcak metali · 1



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite

**İSTE**

