



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**DEMİR ÇELİK ENDÜSTRİSİNDEKİ
ELEKTRİK ARK OCAKLARININ
KİMYASAL BİLEŞİMİNE DAYALI
KÜTLE VE ENERJİ ANALİZİ**

Enver Onur ÖZDEŞ

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2018



**DEMİR ÇELİK ENDÜSTRİSİNDEKİ ELEKTRİK ARK OCAKLARININ
KİMYASAL BİLEŞİMİNE DAYALI KÜTLE VE ENERJİ ANALİZİ**

ENVER ONUR ÖZDEŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2018

Enver Onur ÖZDEŞ tarafından hazırlanan “DEMİR ÇELİK ENDÜSTRİSİNDEKİ ELEKTRİK ARK OCAKLARININ KİMYASAL BİLEŞİMİNE DAYALI KÜTLE VE ENERJİ ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

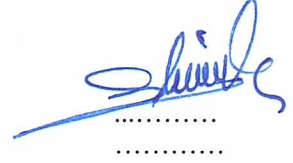
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



Başkan: Prof. Dr. Ali KOÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

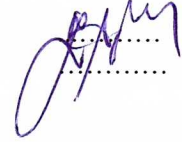
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



Üye: Dr.Öğr.Üyesi Zeki AYDIN

Kimya Anabilim Dalı, Mustafa Kemal Üniversitesi

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



Tez Savunma Tarihi: 07/06/2018

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

Doc. Dr. Folga DEPCI
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde 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



Enver Onur Özdeş

07 / 06 / 2018

DEMİR ÇELİK ENDÜSTRİSİNDEKİ ELEKTRİK ARK OCAKLARININ KİMYASAL
BİLEŞİMİNE DAYALI KÜTLE VE ENERJİ ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Enver Onur ÖZDEŞ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

ÖZET

Sanayi enerji tüketiminde en baş sırada yer alan EAF'lerde yapılacak iyileştirme çalışmaları enerji tasarrufu ve geri dönüştürülemez artık maddelerin minimizasyonu açısından büyük önem arz etmektedir. Demir çelik sektöründeki gün geçtikçe artan arz ve talep dengesi ile doğrudan orantılı olarak artan enerji ihtiyacı ve atılan atık ürün miktarının yönetimi ülke politikaları açısından büyük önem arz etmektedir. Enerji tüketiminin azaltılması konusunda yapılan çalışmalar, ısının direkt olarak atıldığı baca gazları ya da cüruf atık ısıları üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalar her ne kadar doğru ve gerekli ise de atık enerji yönetimi açısından yapılacak çalışmalar öncelikle atığın kaynağı olan atık ürün miktarlarının yönetimi üzerine olması gereklidir. Atık ürün denildiğinde akla gelen baca gazları ve cüruf kaybolan enerjinin büyük bir kısmını ihtiva etmektedir. Dolayısıyla demir çelik üretimi yapan sistemlerde kullanılması kaçınılmaz olan enerji girdisinin azaltılabilmesi için yakıt, cevher ve alaşım elementlerinin optimum düzeyde kullanılması gerekmektedir. Tüm bunlara ek olarak fırının düzenli çalışması ve sistemin zarar görmemesi açısından sistemin bazikliğinin incelenmeside büyük önem arz etmektedir. Çok düşük baziklik, metalürjik olarak ve refrakter aşınmasının kimyasal mekanizmaları açısından sakıncalıdır ve cüruf fazla akışkan fazdadır, ancak çok yüksek baziklikte termal ve metalürjik verimlilik açısından sakıncalıdır ve cüruf düşük viskoziteye sahiptir, her iki noktada çok önemlidir, bu nedenle baziklik oranının 1,8 ile 2,3 aralığında olması istenir ki cüruf bu fazda krem kıvamında olur. Düşük baziklikte sistemden kükürt uzaklaştırılması yapılamaz ve ocağın refrakterlerine zarar verir. Yüksek baziklikte fazla katı cüruf arkın sıvı çelik banyosuna girişini zorlaştırır ve metalürjik açıdan uygunluk sağlanamaz. Burdan yola çıkarak baziklik oranına göre sistemde kullanılan malzemelerin sarfiyatının kontrolü ile tasarruflara gidilebileceği vurgulanmıştır. Bu çalışmada elektrik ark fırınında gerçekleşen her bir reaksiyon irdelenmiş, kütle ve enerji balansı yapılmıştır. Fırın verimini arttırmaya yönelik yapılabilecek çalışmalar üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmada hurda içerisindeki silisyum oranının ve cürufun baziklik oranının elektrik ark ocaklarının optimizasyonu için çok önemli parametreler olduğu üzerinde durulmuştur. Ocak 1,8 ile 2,3 arasında değişen farklı baziklik oranlarında ve hurdadaki sabit silisyum oranında (%1,42) incelenmiştir. Sistemin mevcut baziklik oranı 1,87 olarak hesaplanmış ve 1,8'den 2,3 baziklik oranına değişim yapıldığında harcanan kireç miktarı ortalama 6 tondan 8 tona, çıkan cüruf kütlesi ortalama 14 tondan 18 tonlara artmış ve tüketilen elektrik enerjisi de ortalama 128 GJ'dan 124 GJ'a azalmıştır. Baziklik oranı sabit tutulup (1,87) hurdadaki silisyum oranı %1,42 den %0,5 e doğru değiştirildiğinde de tüketilen kireç miktarının ortalama 6 tonlardan 2 tonlara, cüruf kütlesinin de 15 tonlardan 6 ton civarlarına düştüğü, elektrik enerjisinin de 128 GJ'dan 160 GJ'a kadar arttığı görülmüştür. Bu bilgiler ışığında cürufun optimum baziklik oranının 2,3 değerine çok fazla yaklaşmaması istenmektedir.

Anahtar Kelimeler : Elektrik Ark Ocağı, kütle, enerji

Sayfa Adedi : 73

Danışman : Prof. Dr. Ertuğrul Baltacıoğlu



MASS AND ENERGY ANALYSIS OF ELECTRIC ARC FURNACE BASED ON
CHEMICAL COMPOUND IN THE IRON AND STEEL INDUSTRY

(M. Sc. Thesis)

Enver Onur ÖZDEŞ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2018

ABSTRACT

Improvement studies to be carried out in the EAFs, which are the first place in industrial energy consumption, are of great importance in terms of energy saving and minimization of waste materials that can not be recycled. The demand for energy and the management of the waste products, which are increasing in direct relation with the escalating supply and demand equilibrium in the iron and steel sector, has a great importance for both our country and other countries in terms of country politics. The big part of the studies on reducing energy consumption in steel and iron industries are concentrated on the flue gases or slag waste heat recovery systems. Although these studies are correct and necessary, the studies done for recovering waste energy should be primarily on the waste material management. The flue gases and slag which come to mind first when it comes to waste products of the furnaces contain a large part of the lost energy. Therefore, the fuel, ore and alloying elements should be used at optimum levels to reduce the energy needing of the systems. In addition to all these, it is also important to study the basicity of the system so that the furnace operates regularly and the system is not damaged. Very low basicity adversely affects the metallurgical and chemical mechanisms of refractory erosion and also the produced slag becomes in very liquid phase. On the other hand, at very high basicity, the thermal and metallurgical efficiency of the furnace decrease due to low viscosity in the slag. For this reason, it is desirable that the basicity ratio is in the range of 1.8 to 2.3 so that the slag becomes creamy in this phase. At low basicity, sulphur removal from the system cannot be done and it can damage the refractories of the furnace. At high basicity, excess solid slag forms, which makes it difficult for the electric arc to enter the liquid steel and does not saturate in the metallurgical sense. It is emphasized that it is possible to go to the savings by controlling the consumption of the materials used in the system according to the basicity ratio. In this study, each reaction in the electric arc furnace was investigated and mass and energy balances were made. The studies that can be done to increase the efficiency of the furnace are emphasized.

In this study, it was emphasized that the ratio of silicon in the scrap and the slag basicity ratio are very important parameters for the optimization of electric arc furnaces. The furnace was examined at different basicity ratios ranging from 1.8 to 2.3 and at the fixed silicon rate (1.42%) in the scrap. The existing basicity ratio of the system was calculated to be 1.87, and when the ratio was changed from 1.8 to 2.3 basicity ratio, the amount of lime consumed increased to 8 tonnes from an average of 6 tonnes, the output of slag increased from 14 tonnes to 18 tonnes and the consumed electricity energy decreased averaged 128 GJ to 124 GJ. When the basicity ratio is kept constant (1.87) and the silicon ratio in the scrap is changed from %1.42 to %0.5, the amount of lime consumed is reduced from 6 tons to 2 tons and the slag mass is reduced from 15 tons to 6 tons and the electricity energy is increased from 128 GJ ' up to 160 GJ. It is desirable that this information does not approach the value of the optimum basicity of the slag to 2.3 in the light

Key Words : Electric Arc Furnace, mass, energy.
Page Number : 73
Supervisor : Prof. Dr. Ertuğrul Baltacıoğlu



TEŞEKKÜR

Beni yüksek lisans öğrencisi olarak kabul eden, bu çalışmanın planlanması ve yürütülmesinde bana destek olan, bilgi ve tavsiyelerini benimle paylaşan danışmanım Sayın Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU' na teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca gerekli kolaylığı gösteren, değerli görüş ve katkılarıyla hiçbir desteği esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ali KOÇ ve Sayın Arş. Gör. Hüseyin YAĞLI'ya ve isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgememiş herkese içten teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. ÇELİK ÜRETİMİNE GENEL BAKIŞ.....	6
3.1 Çelik üretim yöntemleri.....	7
3.1.1 Entegre sistemler ile çelik üretimi	7
3.1.2 Elektrik ark ocakları (EAO) ile çelik üretimi	8
4. MATERYAL METOT.....	11
4.1. Çalışması yapılan EAO'nun incelenmesi.....	11
4.2 EAO'da sıvı çelik üretimi esnasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar.....	12
5. ÇALIŞMASI YAPILAN EAO'NUN KÜTLE ANALİZİ.....	13
5.1 Elektrik ark ocağına giren materyaller	13
5.1.1 Hurda	13
5.1.2 Antrasit kömürü.....	14
5.1.3 Sönmemiş kireç	14
5.1.4 Elektrot	15
5.1.5. Doğalgaz.....	16
5.1.6. Oksijen.....	16

	Sayfa
5.1.7. Soğutma suyu	16
5.2. Elektrik ark ocağından çıkan materyaller.....	16
5.2.1 Sıvı çelik.....	17
5.2.2 Cüruf.....	18
5.2.3 Toz.....	19
5.2.4 Baca gazı.....	20
5.2.5 Soğutma suyu	20
5.3. Kütle analizi için matematik model	20
6. ÇALIŞMASI YAPILAN EAO'NUN ENERJİ ANALİZİ.....	23
6.1 Giren enerjiler	23
6.1.1 Elektrik enerjisi	23
6.1.2 Ekzotermik reaksiyonların enerjisi.....	24
6.1.3 Hurda ön ısıtma enerjisi.....	24
6.1.4 Oksijen tüketiminin enerjisi.....	25
6.2 Sistemden çıkan enerjiler	25
6.2.1 Cürufun ocaktan taşıdığı enerji.....	25
6.2.2 Sıvı çeliğin ocaktan taşıdığı enerji.....	25
6.2.3 Tozun ve baca gazının ocaktan taşıdığı enerji.....	26
6.2.4 Elektrik ark ocağında kayıp olan enerjiler.....	26
7. KÜTLE DENGELMESİ HESAPLARI.....	36
7.1 Sisteme girenler.....	36
7.1.1. Hurdanın kimyasal yapısına göre kütle hesabı.....	36
7.1.2. Antrasit kömürünün kimyasal yapısına göre kütle hesabı.....	36
7.1.3 Kirecin kimyasal yapısına göre kütle hesabı	37
7.1.4 Elektrodun kimyasal yapısına göre kütle hesabı.....	37

	Sayfa
7.1.5 Doğalgazın kimyasal yapısına göre kütle hesabı.....	38
7.1.6 Soğutma suyunun kütle hesabı	38
7.2. Sistemden çıkanların kütle hesaplaması.....	38
7.2.1 Sıvı çeliğin kimyasal yapısına göre kütle hesabı.....	38
7.2.2 Cürufun kimyasal yapısına göre kütle hesabı.....	39
7.2.3 Tozun kimyasal yapısına göre kütle hesabı.....	39
7.2.4 Baca gazının kimyasal yapısına göre kütle hesabı	39
7.2.5 Soğutma suyunun kütle hesabı	40
7.3. Sisteme girenlerin kullandığı oksijen miktarı.....	40
7.4. Sistemden çıkanların kullandığı oksijen miktarı.....	41
7.5. Sisteme giren saf oksijen.....	42
7.6. Sistemin kütle dengelemesi	42
8. ENERJİ Dengelemesi Hesapları	43
8.1 Sisteme giren enerjiler.....	43
8.1.1 Ekzotermik reaksiyonların enerji hesabı	43
8.1.2 Hurda ön ısıtma enerjisinin hesabı	43
8.1.3 Oksijen enjeksiyonu için harcanan enerji miktarı	44
8.1.4 Bir döküm için harcanan elektrik enerjisi miktarı	44
8.2 Sistemden taşınan enerjilerin hesabı	44
8.2.1 Cüruf için harcanan enerji hesabı	44
8.2.2 Sıvı çelik için harcanan enerji hesabı	45
8.2.3 Tozun ocaktan taşıdığı enerji hesabı	45
8.2.4 Elektrik ark ocağından iletim ile kayıp olan enerjilerin hesaplanması.....	45
8.2.5 Elektrodlar tarafından kaybolan enerjiler	46

	Sayfa
8.2.6 Ocak kapağının şarj için açılması ile kayıp olan enerjiler.....	47
8.2.7 Soğutma suyu ile ocaktan taşınan enerji miktarı.....	48
8.2.8 Ocak içerisinde absorbe edilen enerjiler.....	48
8.2.9 Baca gazının ocaktan taşıdığı enerji hesabı.....	56
8.2.10 Enerji dengelemesi	56
9. TARTIŞMA VE BULGULAR.....	57
9.1 Farklı baziklik oranlarında kütle ve enerji optimizasyonu.....	57
9.2 Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesine göre kütle ve enerji optimizasyonu.....	61
10. SONUÇLAR	67
REFERANSLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	72
DİZİN.....	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. EAO'da gerçekleşen reaksiyonlar	12
Çizelge 6.1 Ocak içerisindeki malzemelerin poz numarasına göre dağılımı.....	27
Çizelge 6.2 Küresel taban malzemelerin özellikleri	29
Çizelge 6.3. Düz taban malzemelerin özellikleri	30
Çizelge 6.4. Yan duvar malzemelerin özellikleri.....	30
Çizelge 7.1. Hurda kimyasal analizine göre kütle miktarı.....	36
Çizelge 7.2 Antrasit kömürü analizine göre kütle miktarı.....	36
Çizelge 7.3 Kireç analizine göre kütle miktarı	37
Çizelge 7.4 Elektrod analizine göre kütle miktarı	37
Çizelge 7.5 Doğalgaz analizine göre kütle miktarı	38
Çizelge 7.6 Soğutma suyu analizine göre kütle miktarı	38
Çizelge 7.7 Sıvı çelik analizine göre kütle miktarı	38
Çizelge 7.8 Curuf analizine göre kütle miktarı	39
Çizelge 7.9. Tozun analizine göre kütle miktarı	39
Çizelge 7.10. Baca gazı analizine göre kütle miktarı.....	39
Çizelge 7.11. Soğutma suyu analizine göre kütle miktarı	40
Çizelge 7.12. Kireç için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı.....	40
Çizelge 7.13. Elektrod için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı.....	40
Çizelge 7.14. Cüruf için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı	41
Çizelge 7.15. Toz için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı	41
Çizelge 7.16. Baca gazı için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı	41
Çizelge 7.17. Sisteme giren saf oksijen kütle miktarı.....	42
Çizelge 7.18. Sistemin kütle dengelemesi	42
Çizelge 8.1. Ekzotermik reaksiyonların kimyasal bazlı enerjisi hesabı.....	43

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.2. Hurda ön ısıtmanın kimyasal bazlı enerji hesabı.....	43
Çizelge 8.3. Cürufun kimyasal bazlı enerji hesabı	44
Çizelge 8.4. Sıvı çeliğin kimyasal bazlı enerji hesabı	45
Çizelge 8.5. Tozun kimyasal bazlı enerji hesabı.....	45
Çizelge 8.6. Küresel ocak tabanından ısı iletimi ile kayıp olan enerji.....	46
Çizelge 8.7. Düz ocak tabanından ısı iletimi ile kayıp olan enerji	46
Çizelge 8.8. Yan duvarlardan ısı iletimi ile kayıp olan enerji	46
Çizelge 8.9. Elektrotlardan radyasyon ile kayıp olan enerji	46
Çizelge 8.10. Elektrotlardan taşınım ile kayıp olan enerji.....	47
Çizelge 8.11. Kapaktan radyasyon ile kayıp olan enerji.....	47
Çizelge 8.12. Kapaktan taşınım ile kayıp olan enerji	47
Çizelge 8.13. Soğutma suyu ile ocaktan taşınan enerji.....	48
Çizelge 8.14. Küresel taban iletken taban tamir harcı tarafından absorbe olan enerji....	48
Çizelge 8.15. Küresel taban iletken magnesit karbon tuğla tarafından absorbe olan enerji.....	49
Çizelge 8.16. Küresel taban bakır elektrodu tarafından absorbe olan enerji	49
Çizelge 8.17. Küresel taban ocak sacı tarafından absorbe olan enerji.....	50
Çizelge 8.18 Düz taban etek tamir harcı tarafından absorbe olan enerji	50
Çizelge 8.19 Düz taban magnesit karbon tuğla tarafından absorbe olan enerji.....	51
Çizelge 8.20 Düz taban astar tuğla tarafından absorbe olan enerji.....	51
Çizelge 8.21 Düz taban ocak sacı tarafından absorbe olan enerji.....	52
Çizelge 8.22 Yan duvar magnesit karbon tuğla tarafından absorbe olan enerji	52
Çizelge 8.23 Yan duvar astar tuğla tarafından absorbe olan enerji	53
Çizelge 8.24 Yan duvar ocak çelik sacı tarafından absorbe olan enerji	53
Çizelge 8.25 Elektrod 1. Bölgesi için absorbe olan enerji.....	54
Çizelge 8.26 Elektrod 2. Bölgesi için absorbe olan enerji.....	54
Çizelge 8.27 Elektrod 3. Bölgesi için absorbe olan enerji.....	55

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.28 Elektrod 4. Bölgesi için absorbe olan enerji.....	55
Çizelge 8.29 Baca gazının ocaktan taşıdığı enerji.....	56
Çizelge 8.30 Sistemin enerji dengelemesi	56



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1 Çelik üretim yöntemlerinin gösterimi.....	7
Şekil 3.2. EAO genel görünüşü.....	10
Şekil 4.1. EAO'na giren ve çıkan malzemelerin şematik gösterimi.....	11
Şekil 5.1 Hurdanın kimyasal analizi	13
Şekil 5.2 . Antrasit kömürünün kimyasal analizi	14
Şekil 5.3. Sönmemiş kirecin kimyasal analizi	15
Şekil 5.4. Elektrodun kimyasal analizi	15
Şekil 5.5. Doğalgazın kimyasal analizi.....	16
Şekil 5.6. Sıvı çelik kimyasal analizi	17
Şekil 5.7. Curufun kimyasal analizi.....	19
Şekil 5.8 Tozun kimyasal analizi	19
Şekil 5.9 Baca gazının kimyasal analizi	20
Şekil 6.1 Sisteme giren ve çıkan materyallerin sıcaklık bilgileri.....	23
Şekil 6.2. EAO'yu oluşturan unsurlar.....	27
Şekil 6.3. Elektrodun boyut ve bölgelere göre sıcaklık dağılımı	28
Şekil 6.4. Ocak içerisindeki sıvı çeliğin yüksekliğini bulmaya yarayan boyutsal gösterim	31
Şekil 6.5. Ocak içerisindeki sıvı çeliğin yükseklik hesabının boyutsal gösterimi.....	33
Şekil 9.1. Farklı baziklik oranlarında kireç tüketimi ve çıkan cüruf kütlesi.....	57
Şekil 9.2. Baziklik oranındaki değişimin elektrik tüketimine etkisi	58
Şekil 9.3. Baziklik oranındaki değişimin cüruf oluşum enerjisine etkisi	58
Şekil 9.4. Baziklik oranındaki değişimin sıvı çelik oluşum enerjisine etkisi	59
Şekil 9.5. Baziklik oranındaki değişimin oksijen enjeksiyon enerjisine etkisi.....	59
Şekil 9.6. Baziklik oranındaki değişimin verime etkisi	60
Şekil 9.7. Baziklik oranındaki değişimin ekzotermik reaksiyon enerjisine etkisi	60

Şekil	Sayfa
Şekil 9.8 Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesinin sıvı çelik miktarına etkisi	62
Şekil 9.9. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesinin çıkan cüruf kütlesi ve giren kireç kütle miktarına etkisi	62
Şekil 9.10. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesinin çıkan cüruf için harcanan enerji miktarına etkisi	63
Şekil 9.11. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesinin çıkan sıvı çelik için harcanan enerji miktarına etkisi.....	63
Şekil 9.12. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesinin elektrik tüketimine etkisi	64
Şekil 9.13. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesinin oksijen enjeksiyonu ve hurda ön ısıtma enerjisine etkisi.....	64
Şekil 9.14. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesinin sistem verimine etkisi	65
Şekil 9.15. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO ₂ yüzdesinin ekzotermikreaksiyonların enerjisine etkisi.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Fe	Demir
Ni	Nikel
Cu	Bakır
Mo	Molibden
C	Karbon
O₂	Oksijen
Si	Silisyum
P	Fosfor
Cr	Krom
Mn	Mangan
S	Kükürt
Al	Alüminyum
Zn	Çinko
CaO	Kalsiyum Oksit
SiO₂	Silisyum Oksit
Fe₂O₃	Demir Oksit
CO₂	Karbon Dioksit
H₂O	Su
P₂O₅	Fosfor Oksit
CH₄	Metan
C₂H₆	Etan
C₃H₈	Propan
C₄H₁₀	Bütan
Al₂O₃	Alüminyum Oksit
Cr₂O₃	Krom Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
CaS	Kalsiyum Sülfat
MnO	Mangan Oksit

Simgeler**MgO****N₂****CO****Kısaltmalar****kWh****kJ****GJ****Kg****B****EAO****BOF****m****M****n****Q****V****h****s****ε****ψ****η****A****T₁****T₂****T₀****T_{ort}****ρ****Açıklamalar**

Magnezyum Oksit

Azot

Karbon Monoksit

Açıklamalar

Enerji birimi (kilowatt saat)

Enerji birimi (kilo jul)

Enerji birimi (giga jul)

Kütle birimi (kilogram)

Baziklik oranı

Elektrik Ark ocağı

Bazik oksijen fırını

Kütle (kg)

molar kütle (kg/mol)

mol sayısı (mol)

ısı (kJ)

Hacim (m³)

Erimiş hurda şarjının ocak içindeki yüksekliği (m)

Erimiş hurda şarjının yüzey çapı (m)

Isıl yayılım katsayısı

kütle yüzdesi (%)

kütlesel verim (%)

Alan (m²)

İlk sıcaklık

Son sıcaklık

Ortam sıcaklığı

Ortalama sıcaklık

Yoğunluk (kg/m³)

1. GİRİŞ

Çelik, modern toplumun en önemli mihenk taşlarından biridir ve 21.yy. da da çok kritik rol oynamaya devam edecektir [1,2]. Nüfusu hızla artan küresel dünyada sürekli üretim yapılmasının kaçınılmaz olduğu; makine, elektrik makineleri ve ekipmanları, ulaşım ekipmanları, yapı sektörü, fabrikasyon metal ürünleri ve diğer imalat kalemleri olmak üzere 6 ana çelik tüketim endüstrisi bulunmaktadır [3]. Modern dünyanın tüketim popülaritesinden dolayı bu kullanım endüstrileri için olmazsa olmaz ham madde kalemlerinden biri olan çeliğin üretimi için her ne kadar yüksek enerji miktarları kullanılsa da yüksek geri dönüşüm oranından dolayı çevreye yararlı malzeme olma özelliğini her zaman koruyacaktır [4,5]. Günümüzde demir cevherinin ve hurdanın kullanıldığı iki farklı modern çelik üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi demir cevherinin ham madde olarak kullanıldığı entegre demir çelik tesislerinde (bazik oksijen fırınları), diğeri hurda metalin kullanıldığı yarı entegre demir çelik tesislerinde (elektrik ark ocakları) çelik üretimidir [6,7]. Konvansiyonel entegre çelik üretim proseslerinde, yüksek fırından elde edilen demir bazik oksijen fırınında (BOF) çeliğe dönüştürülürken, elektrik ark fırınında (EAF) hurda metal direk eritilerek çeliğe dönüştürülmektedir [8,9]. BOF genelde yüksek tonajlı karbon çelik üretimlerinde tercih edilirken, EAF daha düşük tonajlı karbon çelikleri ve özel çelikleri üretmek için kullanılmaktadır [10,11].

2016 yılı itibariyle dünyada BOF tabanlı tesislerdeki çelik üretimi yaklaşık 1504,3 milyon ton iken, EAF tabanlı tesislerde çelik üretimi yaklaşık 520 milyon tondur. Dünyadaki ilk 10 global çelik üreticileri arasında 8. Sırada, Avrupa'da 2. sırada yer alan Türkiye'nin yıllık 33,2 milyon tona yaklaşan çelik üretiminin 21,9 milyon tonu elektrik ark ocaklarından, 11,3 milyon tonu bazik oksijen fırınlarından sağlanmaktadır [12]. Yüksek fırınlara kıyasla kolay kurulum ve daha az ilk yatırım maliyetlerine sahip olan elektrik ark fırınları (EAF), ham madde olarak hurda demir kullandıklarından oldukça yaygındırlar. Çelik üretiminin büyük bir kısmının EAF'dan sağlandığı düşünüldüğünde, Türkiye hurda ithalatında dünyada ilk sıralarda yer almaktadır [13].

Türkiye'deki toplam sanayi elektrik tüketiminin %21,6 sını oluşturan demir çelik sektöründeki gün geçtikçe artan arz ve talep dengesi ile doğrudan orantılı olarak artan enerji

ihtiyacı ve atılan atık ürün miktarının yönetimi hem ülkemiz, hem de diğer ülke politikaları açısından büyük önem arz etmektedir [14,15].

Atık enerji yönetimi açısından yapılacak çalışmalar öncelikle atığın kaynağı olan atık ürün miktarlarının yönetimi üzerine olması gereklidir. Atık ürün denildiğinde akla gelen baca gazları ve cüruf, kaybolan enerjinin büyük bir kısmını ihtiva etmektedir. Dolayısıyla demir çelik üretimi yapan sistemlerde kullanılması kaçınılmaz olan enerji girdisinin azaltılabilmesi için optimum oranlarda yakıt, cevher ve alaşım elementlerinin optimum düzeyde kullanılması gerekmektedir. Enerji yönetiminin ilk basamağı olan atık kütle yönetiminin yapılması sisteme giren tüm elementlerin gerek kimyasal bileşimlerinin gerekse kütle oranlarının doğru olarak hesaplanması ve sistem içerisindeki elementlerin kimyasal reaksiyonları göz önünde bulundurularak yapılacak çalışmalar daha yerinde olacaktır [16,17]. Çünkü sistemdeki fazla kullanımlar sistemden çıkacak olan cüruf miktarını arttıracaktır. Cürufların yüksek enerji içermelerinden dolayı, EAFlarında atılan cüruf kütlelerinin azaltılması yüksek enerji tasarrufu sağlayacaktır.

Bu çalışmada elektrik ark fırınında gerçekleşen her bir kimyasal reaksiyon irdelenmiş ve fırının kimyasal bazda kütle ve enerji balansı yapılmıştır. Kimyasal bazda yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ışığında cürufun olması gereken baziklik aralığı araştırılmış ve bu baziklik aralığında sistem kütle analizi, enerji tüketimi ve fırın verimi incelenmiştir. Son olarak baziklik oranı sabit kabul edilerek, sabit hurda fakat farklı hurda silisyum oranlarında, sistem tekrar optimize edilmiştir. Cürufun bazikliğinin ve hurda silisyum oranının enerji tüketimine etkisi karşılaştırılmış ve bu şartlara ulaşılabilmesi için fabrikada yapılması gereken iyileştirmelerin tespiti yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Enerji kayıpları ya da tüketimi oluşturan parametreler üzerine mevcut birçok çalışmalar mevcuttur. M.S. Mohsen ve Bilal Akash (1998), Amerika'daki günlük 120 ton döküm kapasiteli bir elektrik ark ocağının ısı kayıpları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Isı kayıplarının toplam enerji girdisinin %17 den %36'ya kadar değiştiğini vurgulamışlardır. Özellikle ocak içerisindeki ve kalıplardaki ısı kayıplarının geri kazanılabilir olduğu üzerinde durmuşlardır. Özgül enerji tüketimini 6 MJ/ton olarak bulmuşlardır [18]. Ünal Çamdalı, Murat Tunç ve Ahmet Karakaş (2002), bir elektrik ark ocağını termodinamiğin 2. Kanununa göre incelemiştir. Bu çalışmada enerji ve korunum analizleri uygulanmıştır. Hurda ön ısıtma, baca gazı ve ocak soğutma suyu irdelenmiştir. Geri kazanılan enerjinin oranını hurda ön ısıtma sıcaklığının derecesinin belirlediği görülmüştür. İki parametre de artar ise gerçek iş, tersinir iş ve tersinmezliğin yavaşça düşmektedir. Sistemin ikinci kanun veriminin ön ısıtma ile geri kazanılan enerji ile doğrudan ilişkili olduğundan, mevcut sistemdeki ön ısıtma sisteminin daha da iyileştirilmesi gerektiği ve gerekli modernizasyon çalışmalarının yapılması gerekliliği vurgulanmıştır [19]. Kirschen, Isonarta ve Pfeifer (2009), yaptıkları çalışmada, bir elektrik ark ocağının enerji balansını yaparak, ocağın enerji verimliliğini ve potansiyel enerji kazanımlarının belirlemek üzerine çalışmışlardır. Farklı bir çok elektrik ocağından topladıkları veriler ile enerji balansını kıyaslamışlardır. Topladıkları veriler ışığında ocakların enerji ihtiyaçlarının 510 ile 880 kwh/ton aralığında, enerji verimliliğinin de ($\eta = \Delta H_{\text{steel}} / E_{\text{total}}$) %40 ve %75 aralığında olduğunu elde etmişlerdir. Çalışmalarını, elektrik ark ocakları proseslerini içeren doğalgaz yanması ve elektrik enerjisi girdisinin, CO₂ emisyonlarını ile ilgili olan toplam enerji üzerine yoğunlaştırmışlardır. Doğalgazın verimli kullanımı, malzeme ve enerji korunumuna yararlı olacağı gibi CO₂ emisyon oranlarını da ciddi manada azaltacağını vurgulamışlardır [20]. Chan, Yang, Lee ve Hong (2009) çalışmalarında, Tayvan'da 2000-2008 yılları arasında 118 farklı demir çelik sektöründeki firma incelenmiş ve potansiyel olarak kazanılabilir enerji miktarının 79,160.8 kL ham petrol eşdeğerinde olduğu tahmin edilmiştir. Çeşitli alanlarda buldukları kazanımlar sırasıyla; elektrik enerjisinde 170,322.8 MWh, fosil yakıtlarda 22,235.1 kL, kömür yakıtlarda 4922 ton ve doğalgazda 10,735 km³'dür. Bu kazanımlar demir çelik endüstrilerinde toplamda 217,866.5 ton CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayacaktır [21].

Bu çalışmalar da gösteriyor ki; demir çelik tesislerindeki enerji talebi sektörün büyüme ihtiyacı ile doğru orantılı olarak arttığından enerji verimliliği üzerine yapılacak çalışmalar

büyük önem arz etmektedir. Elektrik enerjisi elektrik ark ocaklarının ana tüketim kalemini oluşturmaktadır [22]. Elektrik tüketimini de sistemde kullanılan diğer parametreler etkilemektedir. Bu parametreleri, hurdanın kalitesi, kömür ve oksijen tüketimi, brülörlerin doğalgaz tüketimi olarak sıralayabiliriz [23]. Tüm bunlara ek olarak ocağın enerji kayıplarına neden olan ocak geometrik yapısı, içerisinde kullanılan refrakter malzemelerin cinsi ve boyutu, kapak ve gövdenin su soğutmalı sisteminin sistemden taşıdığı enerji, üst kapağın hurda şarjı için açılmasının ocaktan taşıdığı enerji gibi parametreler sistemin enerji verimliliği açısından incelenmesi de önem arz etmektedir.

Bu bağlamda EAF'larında kütle dengesinin ve kimyasal dengenin incelendiği çok sınırlı çalışmalar da mevcuttur. Çamdalı (1998), yapmış olduğu çalışmada, Asil Çelik A.Ş. de bulunan 55 ton/döküm kapasiteli elektrik ark fırınında ve pota fırınındaki kimyasal reaksiyonları, kütle, enerji ve ekserji analizlerini yapmış olup, bu çalışmanın sonunda ekserji verimini %50 civarında bulmuştur. Bu oranın sistemdeki enerji kaybının ne kadar fazla olduğuna dikkati çekmiştir. Tek tek tüm parametrelerin sistemden taşıdığı enerji kaybını incelemiş ve yapılması gereken iyileştirmelere vurgu yapmıştır [24]. Ekmekçi ve arkadaşları (2007), elektrik ark fırınları ve pota fırınlarının kütle balansı modellemesini yapmış oldukları çalışmada, kütle korunumu kanununu baz alarak bu ocaklarda meydana gelen kimyasal reaksiyonları, çıkan ürünlerin kimyasal kompozisyonlarını, kullanılan alaşım elementlerinin oranlarını ve diğer giren materyalleri tespit etmişlerdir. Kütleli verimleri tespit edilmiş olan elementlerin, EAF'a ve pota fırınına giren 100 kg lık malzeme için demir verimi %95.93 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca tam olarak yanan ya da kaybolan malzeme miktarlarını tespit etmişlerdir [25].

Ayrıca sistemin düzenli çalışması için bazikliğın de incelenmesi gereklidir. Çok düşük baziklik, metalürjik olarak ve refrakter aşınmasının kimyasal mekanizmaları açısından sakıncalıdır ve cüruf fazla akışkan fazdadır, yüksek baziklik oranlarında cüruf düşük viskoziteye sahiptir, her iki noktada çok önemlidir, bu nedenle baziklik oranının 1,8 ile 2,3 aralığında olması istenir ki cüruf bu fazda krem kıvamında olur. Düşük baziklikte sistemden kükürt uzaklaştırması yapılamaz ve ocağın refrakterlerine zarar verir. Yüksek baziklikte fazla katı cüruf arkın sıvı çelik banyosuna girişini zorlaştırır ve metalürjik açıdan doyunluk sağlanamaz. Burdan yola çıkarak baziklik oranına göre sistemde kullanılan malzemelerin sarfiyatının kontrolü ile tasarruflara gidilebileceği vurgulanmıştır [26,27]. Kyei-Sing Kwong ve James P. Bennett (2002), yaptıkları çalışmada, optimum baziklik oranında

curufun köpük kıvamında olacağına ve bu durumun da refrakter ömrünü uzatacağına, daha az cüruf çıkışının olacağına, verimliliğin artacağına işaret etmişlerdir. Baziklik oranını 1,5 ile 3 oranında değiştirilerek cüruf kimyasal yapısındaki FeO bileşiğinin oranları kıyaslanmıştır. Çalışmaya göre FeO bileşiği cüruf vizkozitesini direkt etkileyen parametredir. Bu bileşiğin de enerji tüketimini ve verimliliği doğrudan etkilediği üzerinde durulmuştur [28]. Eugene B. Pretorius ve Robert C. Carlisle (1998), yaptıkları çalışmada, cürufun kıvamının kremsiden kabartıya geçeceği evrede olması gerektiği üzerinde durmuşlardır. Eğer enjekte edilen oksijen aynı oranda karbon enjeksiyonu ile dengelenebilirse cürufta FeO miktarının kontrolünün sağlanabileceği ve kremi kıvamın elde edilebileceğini vurgulamışlardır. Köpük kıvamında bir cürufun sağlanabilmesi için baziklik oranları 1,5 ile 2,5 aralığında değiştirilerek ve farklı sıcaklık değerlerinde MgO çözünürlükleri irdelenmiştir [29].

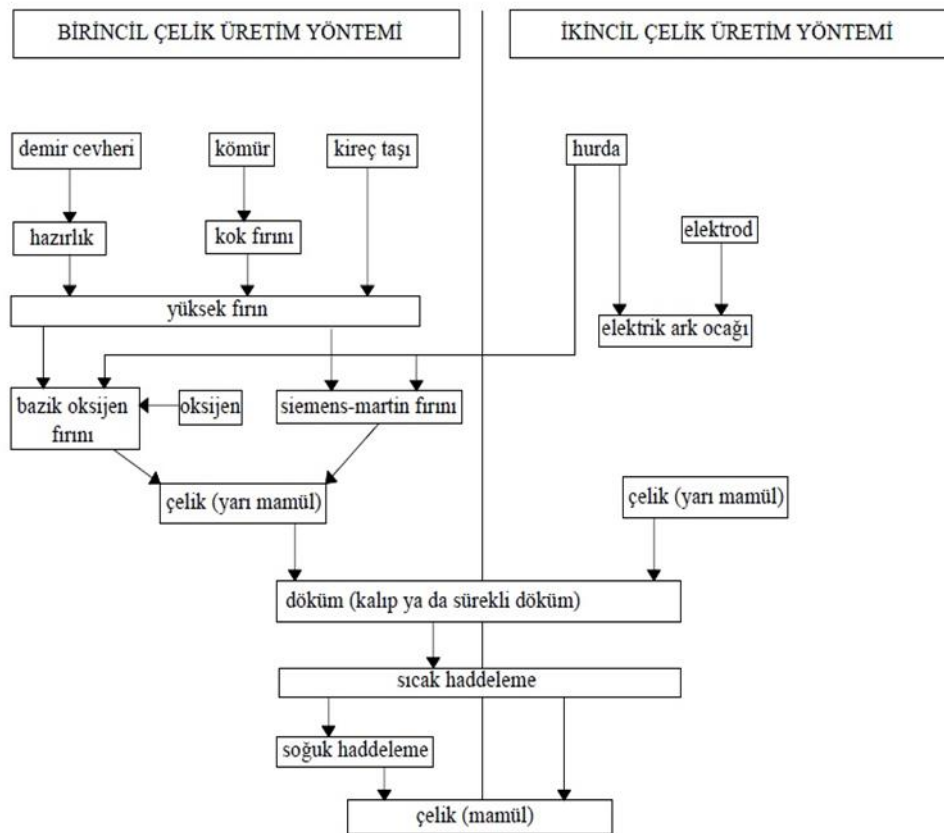
3. ÇELİK ÜRETİMİNE GENEL BAKIŞ

Çelik üretimini 2 ana grup altında inceleyebiliriz. Birincil çelik üretimi, hurda metalin ve demir cevherinin kullanıldığı üretim yöntemi olan entegre sistemlerdir. Entegre sistem, yüksek fırınları, kok üretimini de içine alan bazik oksijen fırınlarında (BOF) ya da Siemens Martin (OHF) fırınlarında gerçekleşen çelik üretimidir. Ancak düşük verimlilik ve yüksek ilk yatırım maliyetlerinden dolayı BOF fırınları, Siemens Martin fırınlarına göre daha yaygın olarak entegre sistemlerde tercih edilmektedir. Sadece hurda metalin kullanıldığı elektrik ark ocaklarında (EAF) gerçekleşen çelik üretim yöntemi ise ikincil üretim şekli olarak adlandırılır.

Dünyada %60 oranında entegre tesislerde, %40 oranında EAO larında çelik üretimi yapılırken, Türkiye’de %34 luk pay entegre tesislerdeki üretimi, %66 lık pay da EAO’lardaki üretimi oluşturmaktadır. Üretimin büyük çoğunluğunun EAO’lardan sağlanmasının en büyük sebepleri arasında hammadde, ulaşım ve ilk yatırım maliyetleri gösterilebilir. [30]

Sektörün önde gelen sıkıntısı ithal mamül ile çalışmasıdır. EAO’larda hammadde olarak kullanılan hurdanın yaklaşık %70’lik kısmı ithal edilmektedir. 2012 Türkiye verilerine bakıldığında 4,6 milyon ton koklaşabilir taş kömürü (991 milyon dolar), 22,415 milyon ton hurda (9,4 milyar dolar), 7,8 milyon ton demir cevheri (1,149 milyar dolar) ithal edilmiştir. [31].

3.1 Çelik üretim yöntemleri



Şekil 3.1 Çelik üretim yöntemlerinin gösterimi

3.1.1 Entegre sistemler ile çelik üretimi

Entegre tesislerde çelik üretim proseslerini şu şekilde sıralayabiliriz; ham madde hazırlık süreci, pik demir üretimi, ham çelik üretimi ve yarı mamul üretimi.

Ham madde hazırlık sürecinde, yüksek fırında pik demir üretimi için 2 ana hammadde gereklidir. Bunlar; cevher ve koktur. Yer altından çıkarılan cevher doğrudan çelik üretiminde kullanılamaz. İçerisindeki bazı maddelerin belirli bir boyuta getirilmesi ve bazılarının da sistemden uzaklaştırılması gereklidir. Bu işlemlere ham madde hazırlık süreci denir. Cevher hazırlama işlemi ile yüksek fırın verimini arttıracak hammadde şartları iyileştirilmiş olur ve bunun sonucunda da daha ucuza sıvı çelik üretimine imkan sağlanır. Cevher hazırlık sürecinden biri olan sinterlemede; toz demir cevheri ısı ve oksidasyon etkisiyle ısıl sertleşmeye uğrar ve blok parça duruma getirilmiş olur. Demir cevherlerinin sinterlenmesinin faydalarını şu şekilde sıralayabiliriz; fazla tozlu cevherin tozunun elimine edilmesi, demir cevherindeki kükürdü oksitleyerek cevher içerisindeki kükürt miktarının

azaltılması, pik demir üretimi için kullanılan kok kömürünün azaltılması ve mukavemetli, ufulanmaya dayanıklı şarj malzemesi elde edilerek üretim verimi artırılmasıdır. Demir cevheri eğer safsızlığı yüksek ise yüksek fırına şarj edilmeden önce zenginleştirme işlemleri yapılır. Bu işlemlerle konsantre ürün meydana gelir. Konsantre ürüne eklenen bağlayıcı madde ile birlikte nem ve ısınmın da eşlik etmesi ile belli boyutlarda sertleştirme işlemine peletleme denir. Böylece demir yönünden zengin ince taneli mineraller elde edilmiş olur.

Yükseklikleri kapasiteye göre 30 ile 90m arasında değişen, demir içerikli hammaddeleri kok ve kireç taşı ile birlikte eritildiği fırınlara yüksek fırın denir. Bu fırınlarda ısı kaynağı oluşturmak için karbon içerikli kok kömür, katran ve fuel oil kullanılabilir. Sıvı pik demir üretmek için demir içerikli cevher, pelet ve sinter kullanılır. Cüruf elde etmek ve cürufun kimyasal yapısını ayarlamak için flux malzemeler, kireç taşı ve dolomit gibi malzemeler kullanılır. Yüksek fırınlarda yakıt olarak kullanılan kok, indirgeyici ve ısı sağlayıcı olarak görev alır. Sıvı pik demir elde edildikten sonra hurda ilavesi ile birlikte BOF ya da Siemens-Martin fırını içerisinde tekrar bir eritme işlemi ile yarı mamül elde edilmiş olur. Sonrasında da sürekli döküm işlemi ile nihai ürün olarak çıkar.

3.1.2 Elektrik ark ocakları (EAO) ile çelik üretimi

EAF'lerin yüksek fırınlara kıyasla daha çok tercih edilmesinin sebepleri arasında; üretim esnekliği, yatırım maliyetleri, daha hızlı devreye alma ve durdurma gösterilebilir. Yüksek fırınlarda üretim çeşitliliğini artırmanın maliyeti EAF'larına kıyasla daha fazladır.

Elektrik ark ocaklarında asidik veya bazik olmak üzere 2 tip ocak içi astarlama yöntemi vardır. Asidik astarlama, cüruf yapısı da asidiktir ve çelik üretimi tam ve kısmi oksidasyon yöntemi ile yapılır. Bu fırınlarda cüruf yapısından dolayı fosfor ve kükürt giderimi yapılamadığından hammaddelerin de buna göre seçilmesi gereklidir. Bazik astarlı fırınlarda ise oksitleyici ve redükleyici çift cüruf uygulaması kolaylıkla yapılabilir. Sistemden de P ve S rahatça giderilir. Bazik astarlı ocaklarda tabanda şamot tuğla ve magnezit tuğla, üstüne de dolomit ile astarlama yapılır. Kapak kısmında krom-magnezit tuğla veya silika tuğla ya da yüksek alüminalı tuğla da kullanılabilir. Cüruf seviyesi ve üzerinde krom-magnezit veya silika tuğla kullanılır

EAF' ler AC ya da DC akım prensibine göre çalışmaktadır. AC prensibinde 3 elektrod kullanılır ve akım bu 3 elektrod arasında oluşturulup çeliğin eritilmesi sağlanır. DC

prensibinde ise tek elektrod kullanılır ve akım anot katot mantığı ile üstten elektrod ve ocak tabanı arasında akım oluşturularak çelik bu akım içerisinde eritilir.

EAF' lerde gerçekleşen işlemleri şu şekilde sıralayabiliriz;

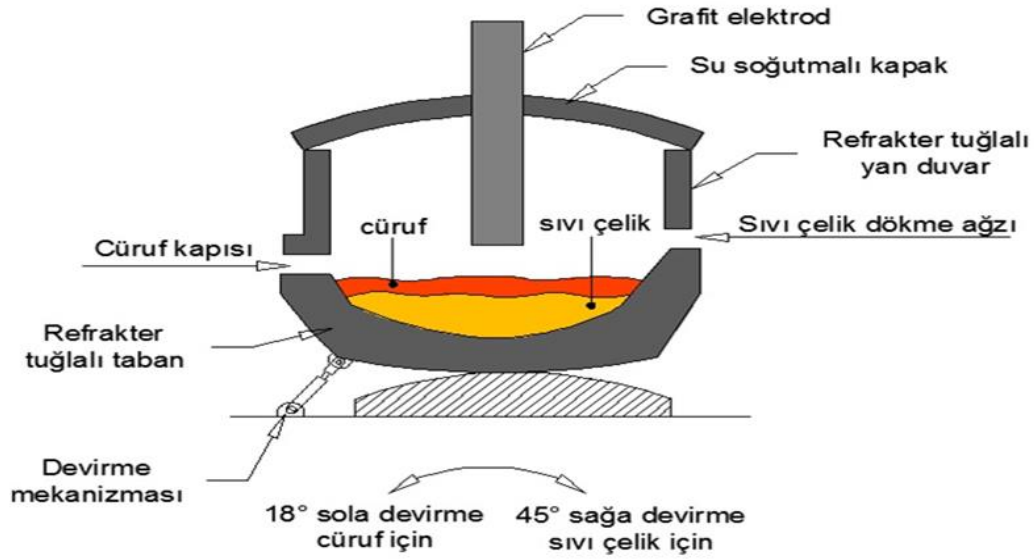
- Hurda şarjı
- Eritme
- Oksidasyon
- Redüksiyon
- Alaşımlama
- Deoksidasyon
- Döküm alma
- Ocağın hazırlanması [32].

Geri dönüşüm malzemesi olan hurda demirinin kullanıldığı EAO'larına, hurda soğuk olarak ya da baca gazı tarafından ön ısıtmaya tabi tutularak şarj edilmektedir. Hurda şarjı yapıldıktan sonra, su soğutmalı ve üzerinde fırın içerisine indirilip kaldırılabilen grafit elektrodlar bulunan kapak ile fırın kapatılmaktadır. Elektrotlar, verilen akımın oluşturduğu şiddetli ark ile hurdayı eritmekte olup, eritme işlemi için döküm başına büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duymaktadır.

Güç düşürme ergitme sonrasında yapılır. Arıtma kademesinde oksidasyon ve redüksiyon periyotları vardır. Oksidasyon periyodunda çelik içinde istenmeyen materyaller oksitlenmesi sağlanarak cürufa katılır. Sıvı metal oluşumu sonrasında cüruf alınır ve fosfor tasfiyesi yapılır. Silisyum, mangan, fosfor ve demir gibi bazı elementler de kısmen oksidasyona uğrarlar. Redüksiyon periyodunda kükürt giderme işlemi banyo sıcaklığını arttırarak yapılır ve gerekli ilaveler ile çelik içinde istenen bileşimler sağlanır. Çalışma şartlarına göre baziklik oranı çok iyi ayarlanmalıdır.

Bileşimin kontrol altında tutulması işlemi sürekli sıcaklık ölçümü ve ocaktan numune alınarak yapılır. Numunenin durumuna göre eksik olan elementlerin ilavesi ile alaşımlama işlemi yapılır. İçerikte fazla olan elementlerin de tasfiyesi yapılır. Sırasıyla fosfor, kükürt, mangan, silisyum ve karbon oranları ayarlanır. Sonrasında banyo içindeki oksitleri almak ve oksijen seviyesini en aza indirmek için kireç ve karbon (deoksidanlar) ilave edilir ve cüruf oluşumu sağlanır. Son olarak sıcaklık ve bileşim kontrolü yapıldıktan sonra güç düşürülür

ve gerekirse bazı ilaveler yapıldıktan sonra, yeterli sıcaklığa ulaşılmışsa fırın, yatayla 18° açı yapacak şekilde yatırılmakta ve erimiş çeliğin üzerindeki cüruf alınmaktadır (Şekil 3.1). Eski konumuna tekrar getirilen fırın, içerisindeki sıvı çeliği potaya boşaltmak için tam tersi istikamete yatayla 45° açı yapacak şekilde tekrar yatırılmakta ve sıvı çelik potaya dökülmektedir. Sıvı çeliğin içerisinde bulunan fazla oksijenin alınması için, potaya boşaltma aşamasında külçe alüminyum ilavesi yapılmakta ve sonrasında talep edilen ürün kimyasal özelliklerine göre hesaplanan miktarlarda Fero-Siliko-Mangan, Fero-Silis ve kireç potaya ilave edilmektedir.



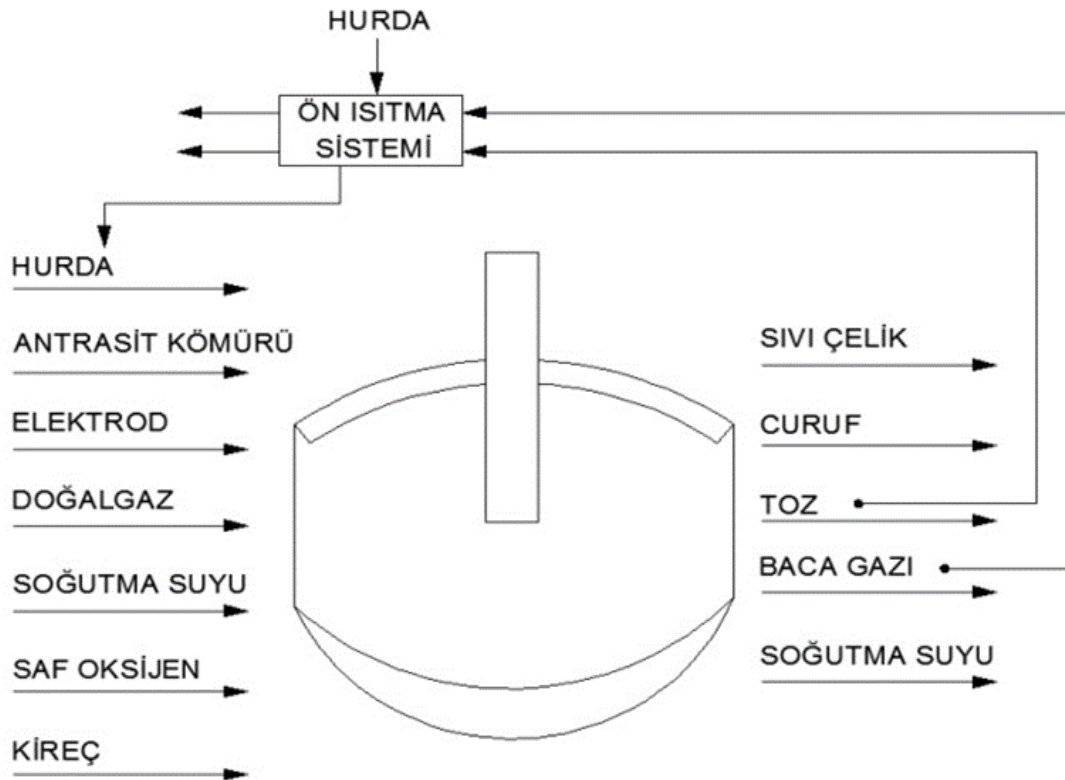
Şekil 3.2. EAO genel görünüşü

Potada yapılmış olan deoksidasyon ve alaşımlama işlemi bittikten sonra, kimyasal içeriği bakımından istenilen ürün özelliklerinin tam anlamıyla elde edilip edilmediğinin tespiti için numune alınmakta ve optik emisyon spektrometresi kullanılarak analiz edilmektedir. Analiz sonucuna göre otomatik bant sistemi yardımıyla karbon ve ferroalyaj ilavesi yapılmaktadır. Pota içerisinde, kimyasal içeriği istenilen şekilde ayarlanmış olan sıvı çelik elektrotlar ile tekrar ısıtılarak istenilen sıcaklığa getirilmektedir. Potada yapılan ısıtma süresince, numune analiz sonucuna göre kalsiyum silis (CaSi) veya alüminyum tel ilavesi yapılabilmekte ve sonrasında sürekli döküm makinesine alınmaktadır.

4. MATERYAL METOT

4.1. Çalışması yapılan EAO'nun incelenmesi

Bu çalışmada bir demir çelik üretim tesisinde bulunan ve doğru akım (DC) prensibine göre çalışan 102 ton hurda yükleme kapasitesine sahip olan elektrik ark ocağı incelenmiştir. Üç elektrot kullanılmakta olan alternatif akım kaynaklı EAO'larının aksine, DC prensibi ile çalışmakta olan tesislerde tek elektrot kullanılmaktadır. Çalışması yapılan tesis de DC prensibine göre çalışmakta olup tek elektrod kullanılmaktadır. Yaklaşık 45 dakikada hurdanın eritilebildiği fırının elektrik sarfıyatı döküm başına ortalama 128 GJ olarak tespit edilmiştir. Ergitme süresince fırına üç defa 35 ton kapasiteli sepetler ile hurda şarj edilmektedir. Ark ocağından çıkan baca gazı ilk olarak sepet içerisinde bulunan hurdaya direkt olarak üflenerek hurdanın ön ısıtması yapılmakta ve yaklaşık 300 °C'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Üretim esnasında iç sıcaklığı 1600°C'ye kadar çıkan ocak ile günde yaklaşık 30 döküm alınmaktadır. Her bir dökümde ocağa eklenmekte olan ve ergitme işlemi sonrasında çıkan ürünlerin şematik olarak gösterimi Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1. EAO'na giren ve çıkan malzemelerin şematik gösterimi

4.2 EAO'da sıvı çelik üretimi esnasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar

Yüksek sıcaklıklarda sıvı çeliğin üretim prosesi süresince endotermik ve ekzotermik reaksiyonlar olmak üzere birçok reaksiyon meydana gelmektedir. Hurdanın, kirecin ve diğer giren ham maddelerin bir arada yüksek sıcaklıklarda meydana getirdikleri etkileşimin yanısıra çalışma kapsamında doğalgazın yanma reaksiyonları da kimyasal olarak incelenmiştir. EAO'da bir her bir döküm süresince gerçekleşen temel reaksiyonlar Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. EAO'da gerçekleşen reaksiyonlar

Kimyasal reaksiyon	Reaksiyon tipi
$\text{FeO} + \text{C} \longrightarrow \text{Fe} + \text{CO}$	Ekzotermik
$2\text{Fe} + 3/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	Ekzotermik
$\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{FeO}$	Ekzotermik
$\text{C} + 1/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}$	Ekzotermik
$\text{Si} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SiO}_2$	Ekzotermik
$\text{Mn} + 1/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{MnO}$	Ekzotermik
$2\text{P} + 5/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{P}_2\text{O}_5$	Ekzotermik
$\text{CaO} + \text{S} \longrightarrow \text{CaS} + 1/2\text{O}_2$	Endotermik
$2\text{Al} + 3/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$	Ekzotermik
$2\text{Cr} + 3/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3$	Ekzotermik
$\text{Ca} + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CaO}$	Ekzotermik
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Ekzotermik
$\text{C}_2\text{H}_6 + 7/2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	Ekzotermik
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \longrightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	Ekzotermik
$\text{C}_4\text{H}_{10} + 13/2\text{O}_2 \longrightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	Ekzotermik

Ark ocağında eritme işlemi esnasında gerçekleşen reaksiyonlara bakıldığında hurdadaki demir oksit (FeO) demir elementi karbon (C) ilavesi ile oksidinden ayrıştırılır ve sisteme tekrar kazandırılır. Sisteme verilen fazla oksijen de, reaksiyonlara bakıldığında sistemden curuf içerisinde FeO olarak çıkmaktadır. Bu da gösteriyor ki sistemde kullanılan materyallerin miktarı çıkan ürün ve verimi doğrudan ilgilendirmektedir.

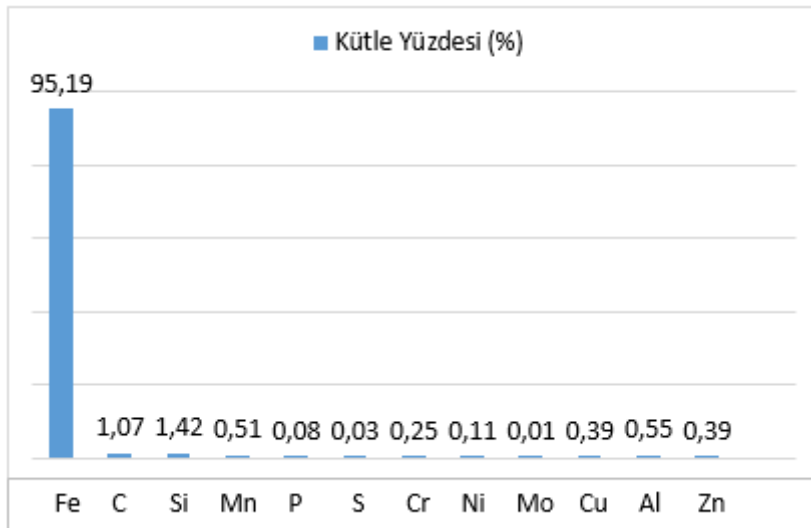
Gerçekleşen reaksiyonlara bakıldığında çelik içerisinde istenmeyen elementler sistemden oksijen ilavesi ile uzaklaştırıldığı görülmektedir. Ayrıca sisteme verilen fazla oksijen de yine sisteme eklenen ve oksijenle kolay reaksiyona girebilen elementler yardımıyla yapıldığı görülmektedir. Bu elementler Si, Al, Mn ve C dur. Ayrıca sistemde ergimeyi hızlandırmak adına kullanılan doğalgazın bileşenlerinin de oksijen ile girdiği reaksiyonlar görülmektedir.

5. ÇALIŞMASI YAPILAN EAO'NUN KÜTLE ANALİZİ

5.1 Elektrik ark ocağına giren materyaller

5.1.1 Hurda

Sistemde ana hammadde olarak imalat artığı, HMS-1, HMS-2 ve değirmen tipi hurdalar olmak üzere 4 tip hurda kullanılmaktadır. İmalat artığı hürdası, endüstrilerde üretim süreci sonrasında ortaya çıkan hurdalardır. Bunlar genelde kalite kontrolden geçmeyen, ölçü hataları olan, çatlak, bozuk veya kimyasal analizi tutmayan malzemelerdir. Et kalınlığı 6,35mm üzerinde olan ve her bir parçası 1524x610mm büyüklüğün altında olan işlenmiş demir ve çelik hurdalarına HMS-1 tip hurdalar denir. Bunlara ağır izabe hürdası da denir ve yoğunlukları 0,8 ton/m³, verimleri de %89 civarındadır. Ortalama parça büyüklüğü 915x475 mm, yoğunluğu 0,7 ton/m³ siyah ya da galvanizli işlenmiş demir çelik hurdalarına HMS-2 tip hurdaları adı verilir. Bu hurdalar da ağır izabe hürdası olarak adlandırılabilir. Kırpılmış, manyetik olarak ayrıştırılmış, paket ve saç karışımı, otomobil parçaları ve işlenmemiş HMS-1-2 hurda karışımlarına değirmen hurda denir. Bu hurda tipinin verimi %91 civarında ve yoğunluğu da 1-1,1 ton/m³ dolaylarındadır. [33].



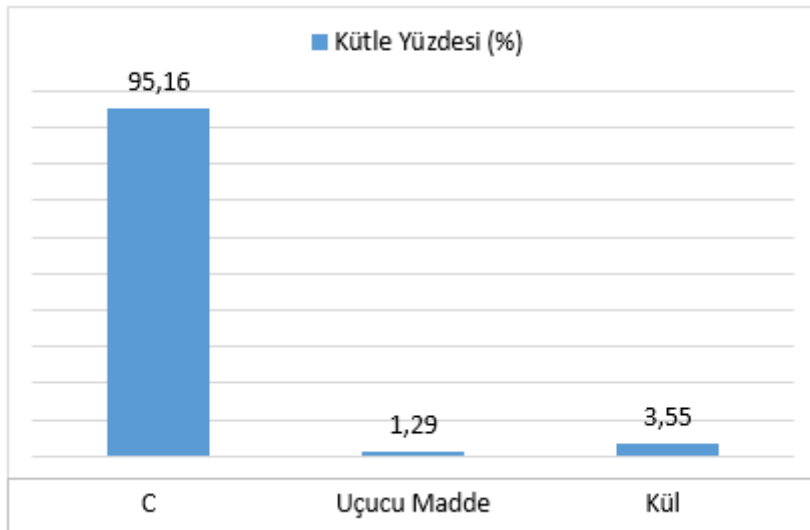
Şekil 5.1 Hurdanın kimyasal analizi

Hurdanın kimyasal analizine bakıldığında, çelik içerisindeki Si, P ve S gibi çelik kalitesine doğrudan olumsuz etki yapan istenmeyen elementlerin sınırlı oranlarda olması istenir. Çelik içinde bulunan fosfor (P), çeliğin uzama, darbe mukavemeti gibi fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler, soğuk çekilebilirliği azaltır. Bu nedenle çelik içindeki miktarı çeşitli

çelik cinslerinde değişmekle birlikte max % 0,05 ile sınırlanmıştır. P, ergitme sırasında oksijen ile rafine edilir ve kireç ile de cürufa bağlanır. Kükürt (S) çeliğin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen ve darbe mukavemetini azaltan bir elementtir. Bu nedenle çelik içinde istenmemektedir ve miktarı sınırlanmıştır. Alınan hurda numunesinin kimyasal analizine bakıldığında kimyasal içerik bakımından Si oranı hariç gayet uygun görünmektedir.

5.1.2 Antrasit kömürü

Sistemde kullanılan antrasit kömürü de içerisinde yüksek miktarda karbon içerdiğinden genellikle karbon adı ile anılmaktadır. Çeliğe aşınma ve sertlik özelliğini katan temel bileşendir. Karbon miktarı arttıkça çeliğin sertleşebilirliği ve aşınma direnci artar. Bu artışın sınırı %1,5 olarak öngörülmüştür. Bu sınıra yaklaştıkça çelikte tokluk azalır ve kırılma artar.

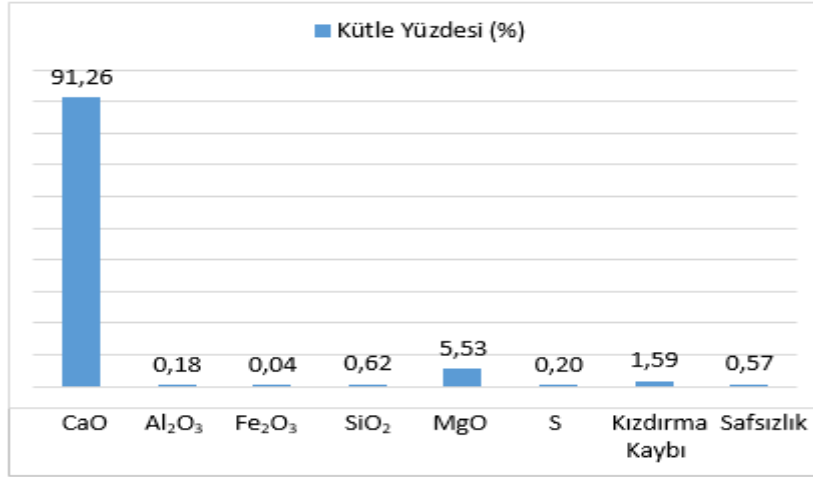


Şekil 5.2 . Antrasit kömürünün kimyasal analizi

5.1.3 Sönmemiş kireç

Sistemde kullanılan sönmemiş kireç çelik içerisinde istenmeyen fosforun uzaklaştırılmasını ve curufun köpük kıvamında kalmasını sağlaması başlıca faydalarındandır. Böylece elektrodun oluşturduğu ark curuf tabakasını aşarak sıvı çeliğe kolayca temasını ve erimenin hızlı olmasını sağlamaktadır. Kireç kullanımının bir diğer nedeni ise kükürt, silisyum gibi istenmeyen elementlerin oksidasyona uğrayarak sistemden cüruf ile atılmasını sağlar, aynı

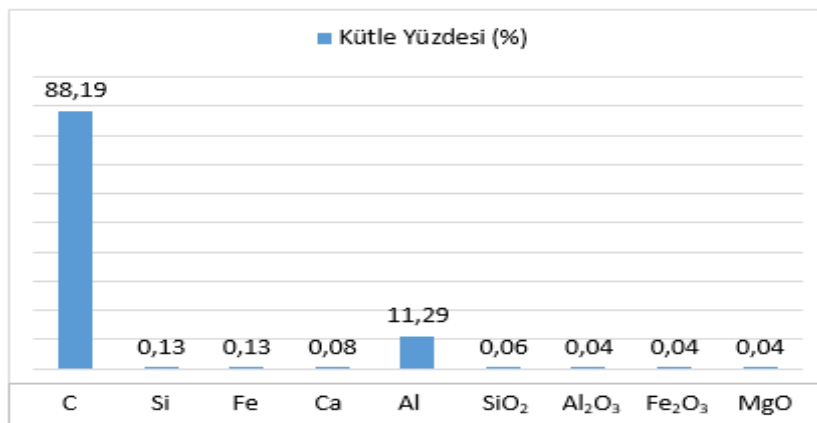
zamanda refrakter tuğlaları için koruyucu bir tabaka oluşturduğundan, ocak tabanında kullanılan refrakterin uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.3. Sönmemiş kirecin kimyasal analizi

5.1.4 Elektrot

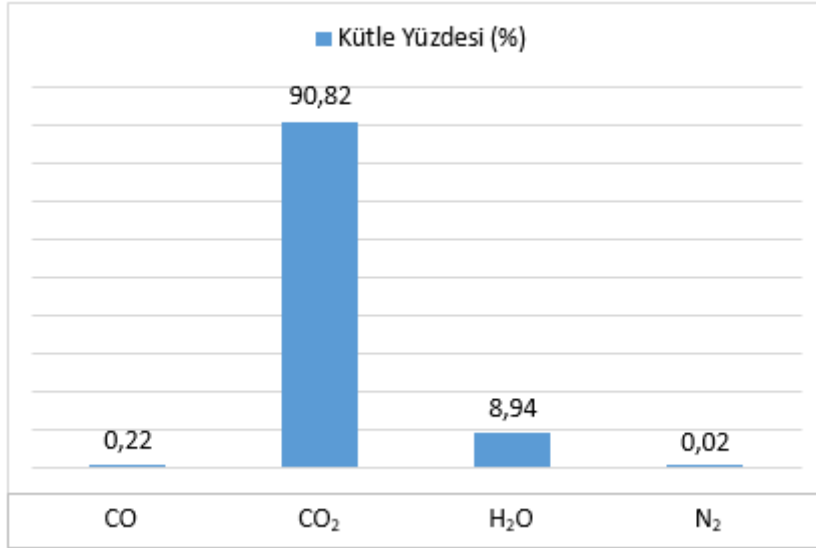
Grafit elektrodlar, elektrik enerjisini ocak içine iletip hurda eritilmesini sağlayan önemli ekipmanlardan biridir. Elektrodlar, yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmalarının yanında enerji iletimini sabit ve sürekli bir şekilde yapabilmeleri gereklidir. Ark oluşumunu sağlayan elektrod yüksek oranda karbon ihtiva eden yapıya sahiptir. Karbondan sonra ikinci en fazla bulunan element alüminyumdur.



Şekil 5.4. Elektrodun kimyasal analizi

5.1.5. Doğalgaz

Ark ocağı içinde yanmayı hızlandırmak için kullanılan doğalgazın bileşenleri incelendiğinde kütle olarak en fazla görülen bileşen metandır.



Şekil 5.5. Doğalgazın kimyasal analizi

5.1.6. Oksijen

Ark ocağı içerisine üflenen oksijen, hem ergime işlemi için kullanılan doğalgazın yanmasında hem de eritmenin daha verimli yapılması için kullanılır.

5.1.7. Soğutma suyu

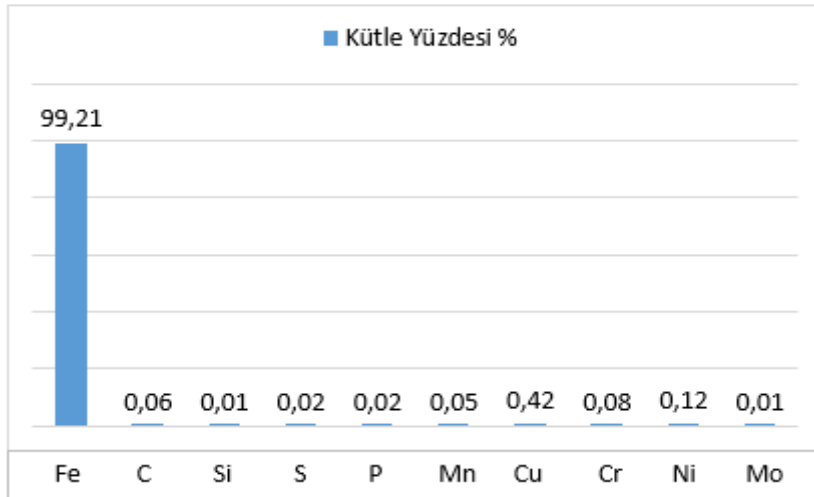
Sıvı çelik üretimi esnasında ocağın gövde ve kapağını yüksek sıcaklıktan korumak için sisteme girer.

5.2. Elektrik ark ocağından çıkan materyaller

EAF'ında yüksek sıcaklıklar altında meydana gelen kimyasal reaksiyonların sonucunda sistemin temel kullanım amacı olan sıvı çeliğin üretimi gerçekleşmektedir. Bunun yanısıra sistem tarafından üretilen baca gazı gibi atmosfere salınan kullanılmayan artık maddeler de mevcuttur. Sistemden çıkan her bir ürünün kimyasal içeriği ve toplam kütle içerisindeki yüzdesel oranları dikkate alınarak fabrikadan alınan veriler ışığında tüm materyeller incelenmiştir.

5.2.1 Sıvı çelik

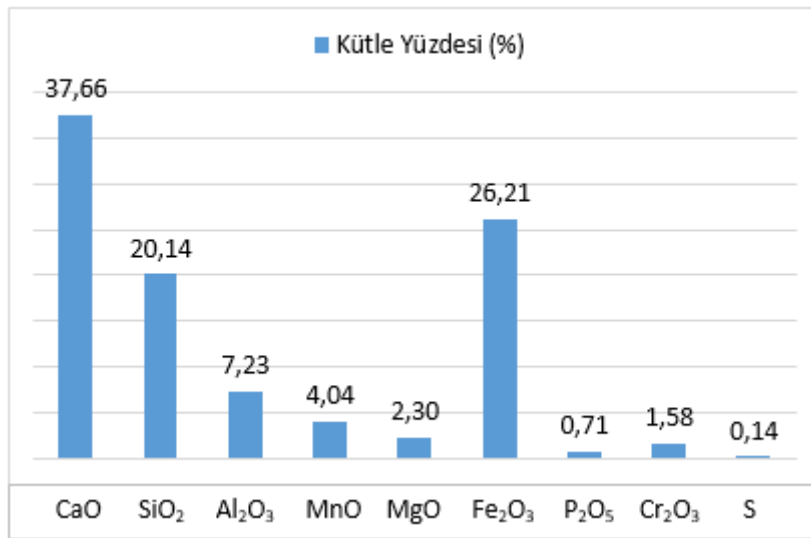
Çelik bir demir karbon alaşımıdır. İçeriğinde %1,7'e kadar karbon bulundurabilir. Çelik içindeki karbon miktarı arttıkça elastikliği azalır ve kırılabilirliği artar. Bundan dolayı %1,40'tan fazla karbon içeren çelik istenmez ve çeliklerin çoğu %0,6'dan az karbon ihtiva ederler. Karbon oranı arttıkça çekme mukavemetinde, akma sınırında ve sertlikte artış olur. Çelikler karbonlu ve alaşımlı olmak üzere ikiye ayrılır. Bütün çelikler karbon içerir ancak buna ek olarak nikel, krom, tungsten gibi özel alaşım elemanlarını içeriyor ise alaşımlı çelikler adını alır. Normal çelikler %0,30- %0,80 Mn içerirler. Manganez çelikte kükürtle reaksiyona girer ve MnS yapar. Böylece kükürdün demirle birleşmesini önlemiş olur. Manganezin fazlası karbonla birleşir ve mangankarbür (Mn_2C) oluşturur. Bu bileşik çeliğin sertliğini, mukavemetini artırır, elastikliğini azaltır. Karbonlu çelikler %0,01'den %0,30'a kadar Si içerirler. Bu element çeliğin imali esnasında içinde meydana gelen gaz boşluklarını önlemek ve çeliği deokside etmek için kullanılır. Normal çelikler %0,05'den az kükürt içerirler. Çeliğin içindeki bütün kükürdün manganezle birleşmesi istenir. İyi çeliklerde %0,05'e kadar fosfor bulunur. Fosfor çeliğin tane boyutunun büyümesine sebep olur. Bundan dolayı fazlası çeliği kırılabilir yapar. Fabrikadan alınan sıvı çelik numunesinin kimyasal analizi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Sıvı çelik kimyasal analizi

5.2.2 Cüruf

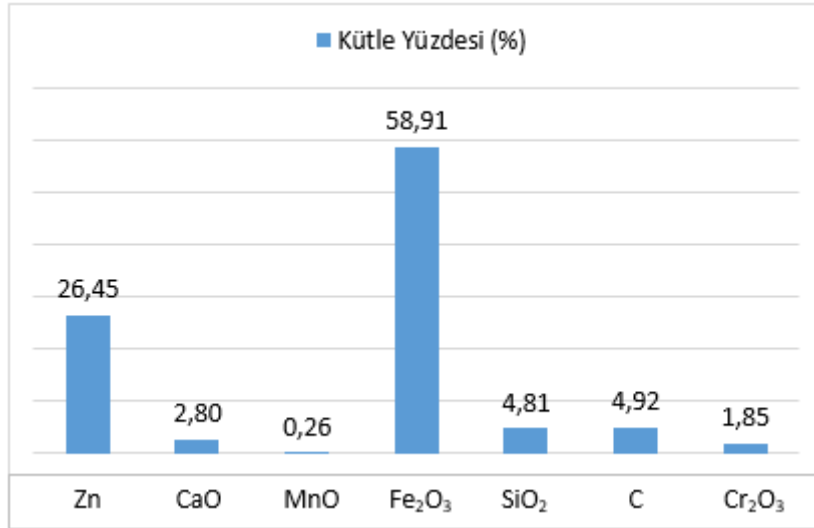
Sistem bazikliğinin ayarlanmasında cürufun kimyasal yapısının önemi büyüktür. Baziklik, CaO/SiO_2 olarak ifade edilir ve bu oran 1,8-2,3 aralığında olması istenir [34]. Toprağı iyi elenmiş ve silisyum oranı düşük hurdanın kullanılması cüruf içindeki SiO_2 oranını azaltacaktır. SiO_2 oranının azalması baziklik ile doğru orantılı olduğundan kireç tüketiminin de azalmasına yol açacaktır. Baziklik yüksekse cüruf katılaştır, düşükse de sıvılaştır bu yüzden bazikliğin bu iki aralıkta ve krem kıvamında olması gerekmektedir. İncelenen dökümde baziklik oranı 1.87 dir ve ideal bir değerdir.



Şekil 5.7. Curufun kimyasal analizi

5.2.3 Toz

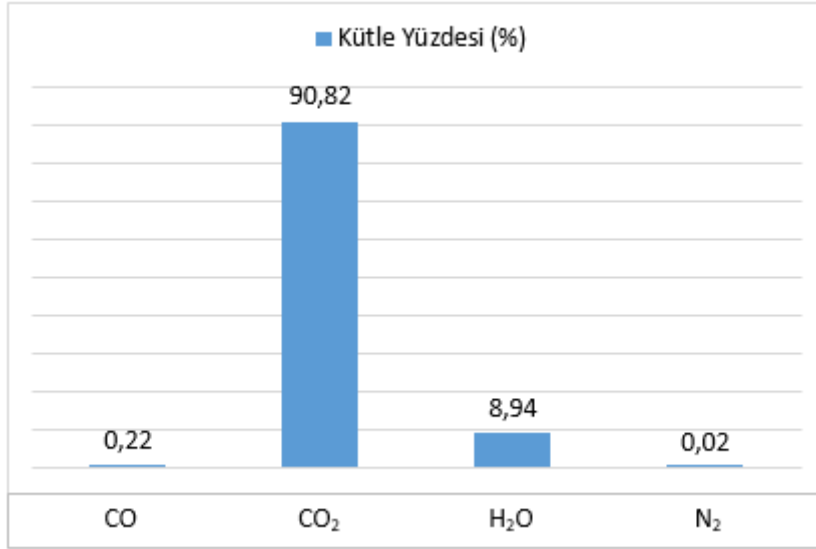
Toz içerisindeki en yüksek oranı Fe_2O_3 yani demir tozu oluşturmaktadır. Demir tozundan sonraki yüksek oranı Zn (çinko) izlemektedir. Bu da gösteriyor ki kullanılan hurda seçilirken çinko kaplı olan hurda türleri tercih edilmemesi atılan toz miktarını azaltacak ve direkt olarak verimi artırarak enerji tasarrufu sağlayacaktır.



Şekil 5.8 Tozun kimyasal analizi

5.2.4 Baca gazı

Baca gazı analizinde, yanma reaksiyonun temel ürünü olan CO₂ elementi oranının en yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra baca gazı içerisinde H₂O'nun bulunmasının ana nedeni doğalgazın yanmasının sonucu çıkan ürün olmasıdır.



Şekil 5.9 Baca gazının kimyasal analizi

5.2.5 Soğutma suyu

Sisteme giren soğutma suyu sıcaklığı yükselmiş olarak sistemden çıkar.

5.3. Kütle analizi için matematik model

Elektrik ark ocaklarında elde edilen sıvı çelik kalitesinin yüksek olması ve istenmeyen elementlerin sistemden çıkarılması için cüruf önemli bir yer taşımaktadır. Cürufun baziklik özellikleri enerji tüketiminde, sistem veriminde ve istenmeyen elementlerin uzaklaştırılmasında doğrudan etkilidir. Bundan dolayı elektrik ark ocaklarında ergitme esnasında sistemdeki cürufun baziklik oranının belirlenmesi sistemin optimum değerlerde çalıştığını görebilmek için büyük önem arz etmektedir. Elektrik ark ocaklarındaki cürufun baziklik oranı;

$$B = \frac{m_{CaO,curuf}}{m_{SiO_2,curuf}} \quad (5.1)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada $m_{CaO,curuf}$ cüruf içerisindeki kütleli kalsiyum oksit miktarını ifade ederken $m_{SiO_2,curuf}$ cüruf içerisindeki kütleli silisyum dioksit miktarını ifade etmektedir. Hurdanın ergitilmesi sonrasında elde edilen cürufun krem kıvamında olması ve sistemden arzu edilen faydanın alınması için baziklik kontrolünün yapılması ve bunu belirli aralıklarda tutulması büyük önem arz etmektedir. Elektrik ark ocaklarında bazikliğin 1,80 ile 2,30 aralığında olması istenir. Sistemde elde edilen cürufun baziklik değerinin hesaplanması için;

$$B = \frac{m_{CaO,kirec} - m_{CaO,toz}}{n_{Si,hurda} * M_{SiO_2} + m_{SiO_2,kirec} - n_{Si,sc} * M_{SiO_2} - m_{SiO_2,toz}} \quad (5.2)$$

denklemden yararlanılmaktadır. Burada m kütleli, n mol sayısını ve M molekül ağırlığını ifade etmektedir. Burada yazılan denklem eşitliğin bir tarafında kirec kütlesi kalacak şekilde tekrar yazıldığında;

$$m_{kirec} = \frac{(B * (n_{Si,hurda} * M_{SiO_2} - m_{SiO_2,toz}) + m_{CaO,toz})}{\varphi_{CaO,kirec} - (B * \varphi_{SiO_2,kirec})} \quad (5.3)$$

eşitliği elde edilir. Sistemin kimyasal analiz tabanlı kütle analizi yapıldığında, bazikliği istenen sınırlarda veya istenilen oranda tutulması için sistemde kullanılması gereken kirec kütlesinin belirlenmesinde yararlanılacak bu denklem ile kullanılabilir minimum kirec kütlesinin tespiti sağlanacaktır. Sistemde kullanılacak olan kirec kütlesinin minimize edilmesi ile birlikte sistemde kullanılacak olan enerji miktarında da tasarruf edilecektir. Elektrik ark ocağında herbir dökümde tasarruf edilecek olan enerji miktarı;

$$Q_{kazanilan} = Q_{döküm} - \left(\frac{Q_{döküm}}{m_{toplam giren}} * (m_{toplam giren} - m_{kazanilan kirec}) \right) \quad (5.4)$$

ile hesaplanır. Burada $Q_{döküm}$ bu çalışmada incelenen elektrik ark ocağında yükleme yapılan 102 ton hurdanın her bir dökümde kullanılan elektrik enerjisi miktarı olup bu değer ortalama 128 GJ'e denk gelmektedir. $m_{total,in}$ elektrik ark ocağına her bir dökümde koyulan toplam malzeme kütlesini ifade ederken $m_{kazanilan kirec}$ ise sistemde yapılan kütleli optimizasyon sonrasında azaltılan kirec kütlesini ifade etmekte ve aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmaktadır.

$$m_{\text{toplam giren}} = m_{\text{hurda}} + m_{\text{kireç}} + m_{\text{kömür}} \quad (5.5)$$

$$m_{\text{kazanılan kireç}} = m_{\text{kireç-2}} - m_{\text{kireç-1}} \quad (5.6)$$

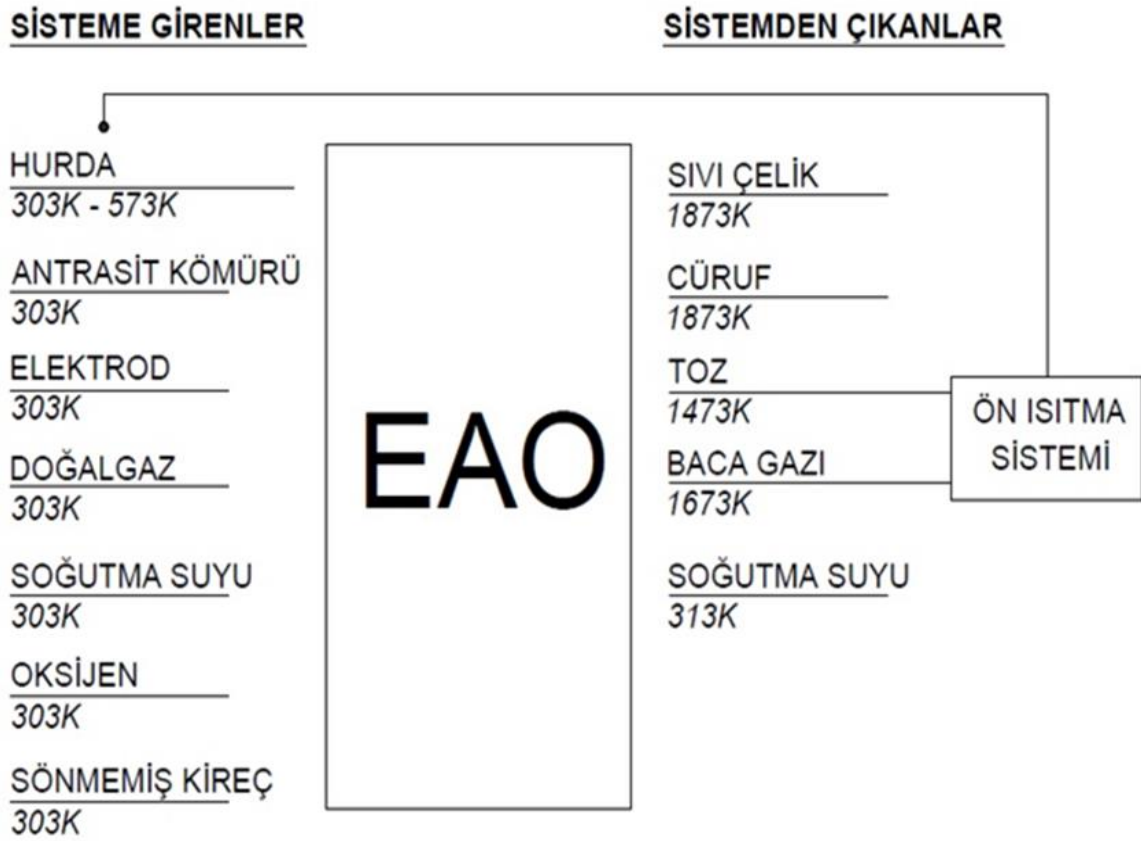
Tüm bunlara ek olarak, azaltılan kireç kütlesine paralel olarak sitem veriminde de bir artış elde edilecek olup, elektrik ark ocakları için verim;

$$\eta = \frac{m_{s\check{c}}}{m_{\text{hurda}}} \quad (5.7)$$

denklemini kullanılarak hesaplanacaktır. Burada $m_{s\check{c}}$ elektrik ark ocağında söz konusu döküm sonucunda elde edilen sıvı çelik miktarını ve m_{hurda} bu dökümde kullanılan toplam hurda kütlesini ifade etmektedir.

6. ÇALIŞMASI YAPILAN EAO'NUN ENERJİ ANALİZİ

Enerji tüketiminde ilk sıralarda yer alan elektrik ark ocakları için enerji analizinin detaylı yapılması çok önemli bir yere sahiptir. Bu çerçevede sistemin sınırlarının iyi belirlenmesi, hesaplamaların doğru yapılması ve parametrelerin doğru kullanılması, bir sonuca varılabilmesi için çok önemlidir. Bu kısımda elektrik ark ocağına giren ve çıkan materyellerin tükettiği enerji, sistemden taşıdığı enerjiler irdelenecektir. Şekil 6.1 'de sisteme giren ve çıkan malzemelerin sıcaklık bilgileri yer almaktadır.



Şekil 6.1. Sisteme giren ve çıkan materyallerin sıcaklık bilgileri

6.1 Giren enerjiler

6.1.1 Elektrik enerjisi

Elektrik ark ocakları elektrik enerjilerinin en güçlü tüketicileridir. Bir ocağın voltaj tüketimi 100-800V'lara, çekilen akım da binlerce ampere çıkabilmektedir. Sıvı çelik üretme periyodu, eritme ve deoksidasyon olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Eritme periyodundaki enerji tüketimi, deoksidasyon periyodundan çok daha fazladır. Küçük ocaklarda ton başına tüketimi 600 kWh/ton'dan 450 kWh/ton'lara düşmektedir. Deoksidasyon periyodunda bu

tüketim 150 ile 400 kWh/ton civarındadır. Bu çalışmadaki elektrik ark ocağı için tüketilen enerji fabrika verilerinden alınmıştır.

6.1.2 Ekzotermik reaksiyonların enerjisi

Sıvı çelik içerisinde eritme işlemini hızlandırmak ve bazı elementleri uzaklaştırmak için kullanılan oksijen, hem yakıt olarak kullanılan doğalgazın yanmasında, hem de alüminyum, demir, fosfor, karbon, silikon, manganez gibi elementler ile kolayca reaksiyona girmesini sağlayarak ısı açığa çıkaran egzotermik reaksiyonlar meydana getirir. Açığa çıkan bu enerji, hurda metali eritmek için ilave enerji kaynağı oluşturur. Ekzotermik reaksiyonların açığa çıkardığı enerji hesabı için yararlanılan hesaplamalar aşağıdaki gibidir;

$$Q = \sum_{\zeta} n_{\zeta} (\bar{h}_f^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{\zeta} - \sum_g n_g (\bar{h}_f^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_g \quad (6.1)$$

$$Q = \sum_{\zeta} n_{\zeta} (\bar{h}_f^{\circ} + \Delta\bar{h})_{\zeta} - \sum_g n_g (\bar{h}_f^{\circ} + \Delta\bar{h})_g \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (6.2)$$

Oluşum entalpileri, standart entalpiler ve cp değerleri Nist'den alınmıştır.

Cp değerleri Eş. 6.3 [35] ile bulunmuştur ;

$$C_p = A + B*t + C*t^2 + D*t^3 + E/t^2 \quad (6.3)$$

ΔH hesabı Eş. 6.4 [35] ile yapılmıştır.

$$H^{\circ} - H^{\circ}_{298,15} = A*t + B*t^2/2 + C*t^3/3 + D*t^4/4 - E/t + F - H \quad (6.4)$$

6.1.3 Hurda ön ısıtma enerjisi

Hurda ön ısıtma, şarj işleminden önce sepetteki hurdayı ısıtmak için sıcak gaz kullanılmasını içerir. Sıcak gaz da ocak içerisindeki eritme işlemi ile açığa çıkan baca gazı ile sağlanmaktadır. EAO için birincil enerji gereksinimi, hurdanın erime noktasına ısıtılmasıdır. Bu nedenle, eğer fırına sıcak hurda şarjı yapılabilir ise enerji tasarruf edilebilir. Hurda ön ısıtma aynı zamanda fırın patlaması olasılığını ortadan kaldıran ıslak hurda şarjını da ortadan kaldırır. Hurda ön ısıtma elektrik tüketimini ve EAO verimliliğini artırır. Çalışması yapılan sistemde hurda 300 °C'ye kadar ön ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır.

Enerji hesabı için Eş. 6.5'den yararlanılmıştır

$$Q = C_{P_{ORT}} \cdot \Delta T \cdot n \quad (6.5)$$

$C_{P_{ort}}$: ortalama özgül ısı (30°C ve 300°C'deki c_p değerlerinin ortalaması Nist'den alınmıştır.)

6.1.4 Oksijen tüketiminin enerjisi

Eritmeyi hızlandırmak ve yanmayı sağlamak için kullanılan oksijen ocak içerisine cüruf kapısından lans yardımıyla enjekte edilmektedir. Oksijen tüketim miktarları döküm başına olarak yine fabrika verilerinden alınmıştır.

6.2 Sistemden çıkan enerjiler

6.2.1 Cürufun ocaktan taşıdığı enerji

Cürufun oluşumunun temel sebebi, sıvı çelik içerisinde istenmeyen safsızlıkların uzaklaştırılmasıdır. Ergime ve rafinasyon aşamasında istenmeyen materyaller banyo içerisinde oksitlenir ve cüruf olarak atılır. Sistemden atıldığı sırada cüruf 1600°C sıcaklığa sahiptir.

Cürufun sistemden taşıdığı enerji hesabı Eş. 6.6 ile yapılmıştır;

$$Q = C_{P_{ORT}} \cdot (T_2 - T_1) \cdot n \quad (6.6)$$

$C_{P_{ort}}$: ortalama özgül ısı (ortalama sıcaklığa göre Nist'den alınmıştır.)

6.2.2 Sıvı çeliğin ocaktan taşıdığı enerji

Nihai ürün olan sıvı çeliğin sistemden taşıdığı enerji hesabı Eş. 6.7'ye göre yapılmıştır ;

$$Q = n \cdot (C_{P_2} \cdot T_2 - C_{P_1} \cdot T_1) \quad (6.7)$$

C_p : özgül ısı (sıcaklığa göre Nist'den alınmıştır.)

6.2.3 Tozun ve baca gazının ocaktan taşıdığı enerji

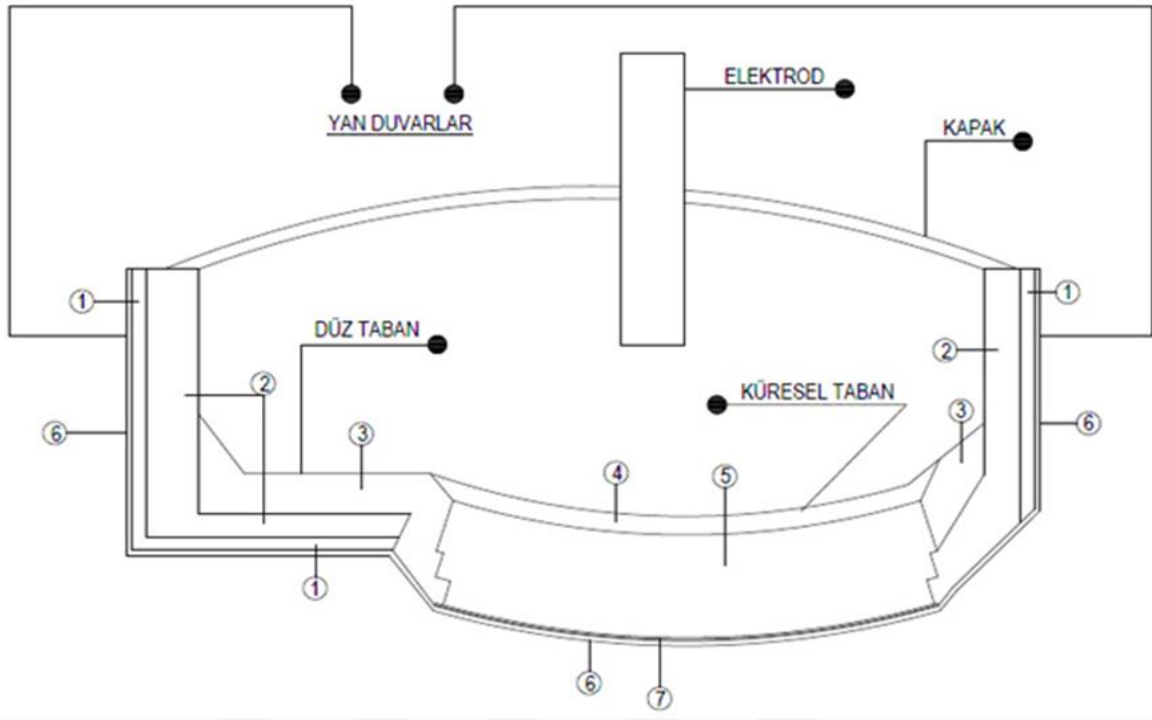
Çelik üretimi esnasında baca gazı ile sistemden çıkan tozlar toz toplama tesisinde tutulmaktadır. Baca gazı da toz tutma tesisinde filtrelendikten sonra atmosfere atılmaktadır. Sistemden taşıdıkları enerji Eş. 6.8'e göre hesaplanmıştır;

$$Q = n \cdot (C_{P2} \cdot T_2 - C_{P1} \cdot T_1) \quad (6.8)$$

C_p : özgül ısı (sıcaklığa göre Nist'den alınmıştır.)

6.2.4 Elektrik ark ocağında kayıp olan enerjiler

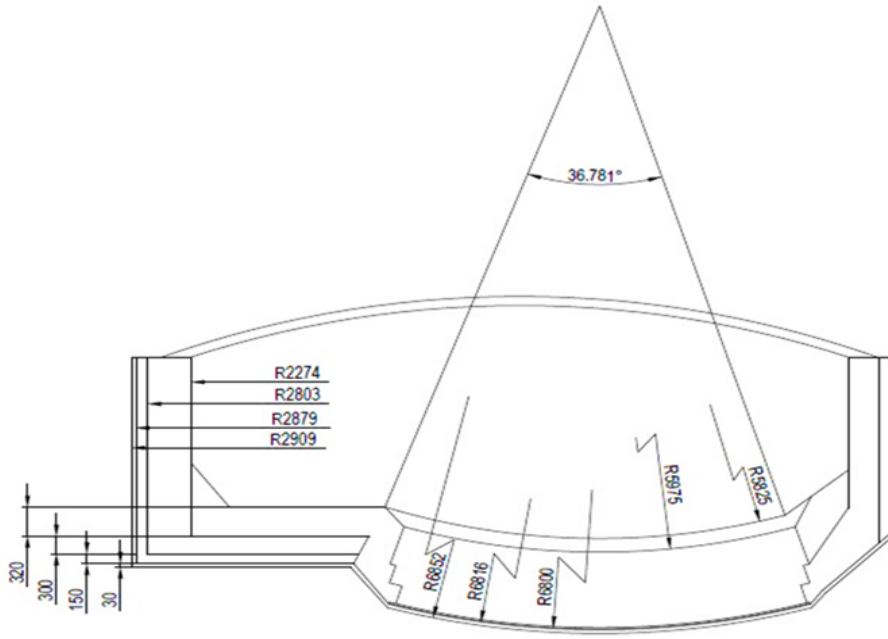
Bu bölümde çalışması yapılan elektrik ark ocağından kayıp olan enerjiler incelenecektir. Ocak yapısına bakıldığında taban kısmı, yan duvarları, kapak kısmı ve elektrod tarafından sistemde kayıp oluşturan enerjileri ve absorbe ettikleri enerjiler üzerinde durulacaktır. Şekil 6.2'ye bakıldığında ocak tabanı küresel olarak en dıştan itibaren sırasıyla ocak çelik sacı, taban elektrod bakırı, iletken magnefit tuğla ve iletken taban tamir harcından oluşmaktadır. Yan duvar malzemeleri sırasıyla magnefit karbon tuğla, astar tuğla ve ocak çelik sacından oluşmaktadır. Düz taban ise sırasıyla etek tamir harcı, magnefit karbon tuğla, astar tuğla ve ocak çelik sacından meydana gelmektedir. Ocak tabanı hariç yan duvarlar ve kapak su soğutmalıdır. Elektrik ark ocak yapısını meydana getiren bu malzemeler için ısı kayıp hesabı ilk olarak iletim ile kayıp enerji olarak irdelenecek sonrasında da absorbe ettikleri ısılar hesaplanacaktır. Bu enerji hesapları yapılır iken bu malzemelerin sıcaklıkları, ölçüleri, ısı iletim katsayıları ve özgül ısıları gibi bilgilerden yararlanılacaktır. Bunlarla birlikte her bir kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri yine fabrika verilerinden alınmıştır.



Şekil 6.2. EAO'yu oluşturan unsurlar

Çizelge 6.1 Ocak içerisindeki malzemelerin poz numarasına göre dağılımı

No	Malzeme
1	Astar Tuğla
2	Magnesit karbon tuğla
3	Etek tamir harcı
4	İletken taban tamir harcı
5	İletken magnesit tuğla
6	Ocak çelik sacı
7	Taban bakır elektrodu



Şekil 6.3. Ocak içerisinde kullanılan malzemelerin ölçü bilgileri

Küresel ocak tabanı için ısı iletimi ile kayıp olan enerji

Küresel taban en dıştan itibaren sırasıyla ocak çelik sacı, taban elektrod bakır, iletken magnisit tuğla ve iletken taban tamir harcından oluşmaktadır. İletim ile kayıp olan enerji hesabı Eş. 6.9'a göre yapılmıştır;

$$Q = \frac{T_1 - T_5}{\frac{r_2 - r_1}{4\pi K_4 r_1 r_2} + \frac{r_3 - r_2}{4\pi K_5 r_3 r_2} + \frac{r_4 - r_3}{4\pi K_7 r_1 r_2} + \frac{r_5 - r_4}{4\pi K_6 r_5 r_4}} \quad (6.9)$$

Kabuller; T1 iç yüzey sıcaklığı sıvı çelik sıcaklığına eşit ve 1600 °C'dir. T5 sıcaklığı dış yüzey sıcaklığıdır ve 30 °C'dir. Toplam ısı kaybı da küresel taban diliminin tekabül ettiği açının (36,787°) tam açığa (360°) bölünüp elde edilen katsayısı ile çarpılarak bulunmuştur.

Hesaplaması yapılan Q_{iletim} tüm katmanlar için sabit olduğundan her bir katman için yüzey sıcaklığı yukarıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2 Küresel taban malzemelerin özellikleri

No	Malzeme	Isı iletim katsayısı (W/mK)	Yarıçap (mm)	T _{ort} (K)
4	İletken taban tamir harcı	K ₄ = 5,418	R ₁ = 5825	1743
5	İletken magnefit tuğla	K ₅ = 5,160	R ₂ = 5975	965
7	Taban bakır elektrodu	K ₇ = 401	R ₃ = 6800	319
6	Ocak çelik sacı	K ₆ = 16,2	R ₄ = 6816 R ₅ = 6852	311

Düz ocak tabanı için ısı iletimi ile kayıp olan enerji

Düz taban en dıştan itibaren etek tamir harcı, magnefit karbon tuğla, astar tuğla ve ocak çelik sacından meydana gelmektedir. Düz taban için iletim ile kayıp olan enerji hesabı Eş. 6.11'e göre yapılmıştır;

$$Q = -kA \frac{dT}{dz} \quad (6.10)$$

$$Q = A \frac{T_{first} - T_{last}}{\frac{L_1}{K_3} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_1} + \frac{L_4}{K_6}} \quad (6.11)$$

A=13m² (Autocad programında hesaplanmıştır)

Kabuller burada da aynıdır; T₁ iç yüzey sıcaklığı sıvı çelik sıcaklığına eşit ve 1600 °C'dir. T₅ sıcaklığı dış yüzey sıcaklığıdır ve 30 °C'dir.

Hesaplaması yapılan Q_{iletim} tüm katmanlar için sabit olduğundan her bir katman için yüzey sıcaklığı yine Eş. 6.11'e göre hesaplanmıştır.

Çizelge 6.3. Düz taban malzemelerin özellikleri

No	Malzeme	Isı iletim katsayısı (W/mK)	Yükseklik (mm)	T _{ort} (K)
3	Etek tamir harcı	K ₃ = 5,418	L ₁ = 320	1559
2	Magnesit karbon tuğla	K ₂ = 6,02	L ₂ = 300	980
1	Astar tuğla	K ₁ = 4,069	L ₃ = 150	519
6	Ocak çelik sacı	K ₆ = 16,2	L ₄ = 30	313

Yan duvarlar için ısı iletimi ile kayıp olan enerji

Yan duvar malzemeleri sırasıyla magnesit karbon tuğla, astar tuğla ve ocak çelik sacından oluşmaktadır. Yan duvarlar için iletim ile kayıp olan enerji hesabında Eş. 6.12 ve Eş. 6.13'den yararlanılmıştır;

$$R_{eş} = \frac{\ln(r_7/r_6)}{2\pi K_2 L} + \frac{\ln(r_8/r_7)}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln(r_9/r_8)}{2\pi K_6 L} \quad (6.12)$$

$$Q_{duvar} = \frac{T_{ilk} - T_{son}}{R_{eş}} \quad (6.13)$$

$L=682mm$ (Sıvı çeliğin yan duvardaki yüksekliği)

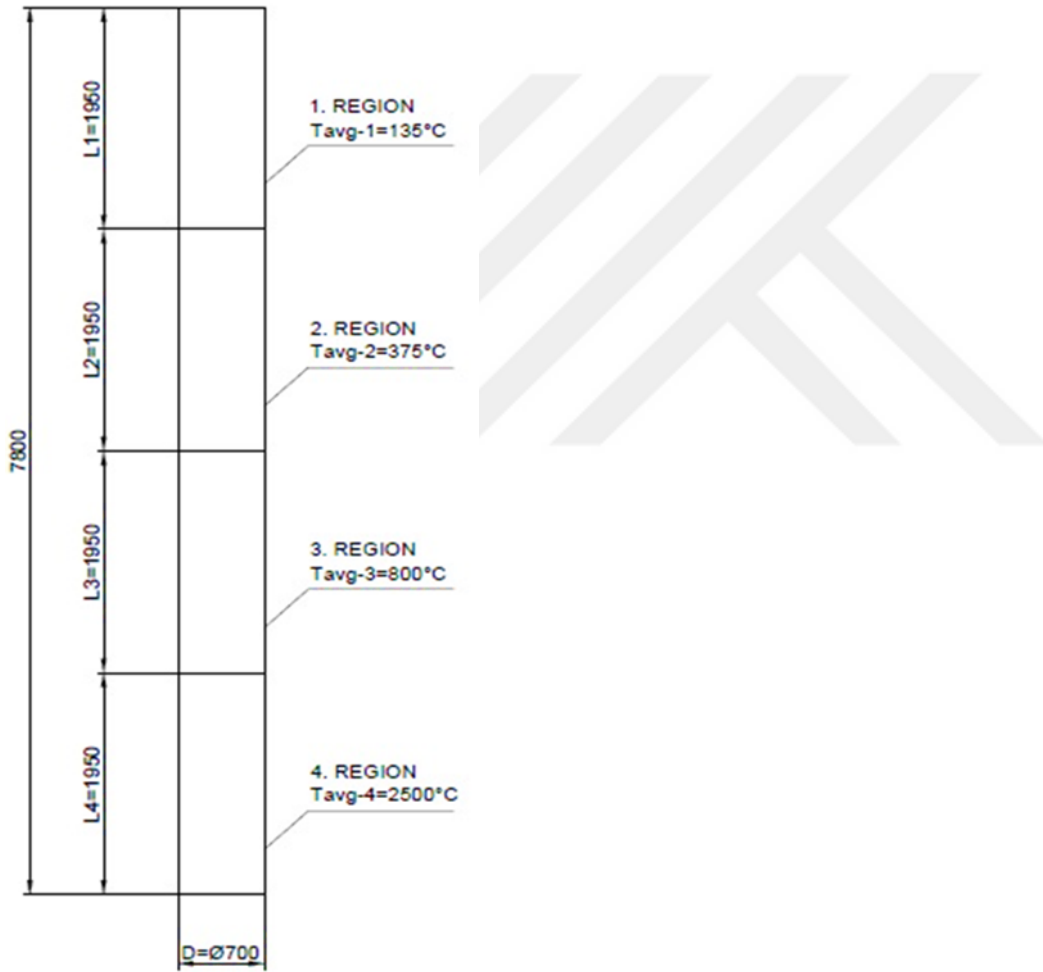
Çizelge 6.4. Yan duvar malzemelerin özellikleri

No	Malzeme	Isı iletim katsayısı (W/mK)	Yarıçap (mm)	T _{ort} (K)
2	Magnesit karbon tuğla	K ₂ = 6,02	R ₆ = 2274	1223
1	Astar tuğla	K ₁ = 4,069	R ₇ = 2803	450
6	Ocak çelik sacı	K ₆ = 16,2	R ₈ = 2879	315
			R ₉ =2909	

Elektrodlar ile kayıp olan enerji

Elektrodlar elektrik akımını direkt ileten ekipmanlar olduğundan çok yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmalıdırlar. Fırın 2. Ve 3. Şarj için açıldığında elektrodlerden taşınım ve radyasyon ile ısı kaybı olmaktadır. Elektrodlar sıcaklıkları farklı 4 bölümden oluşmaktadır.

Elektrodlar üstten ekleme metodu ile değişimleri yapılmaktadır. Sıvı çeliğe en yakın olan en alt parça en kısa sürede değişimi yapılması gereken parçadır. Buna göre en alt parça 36 dökümde bir değişimi, bir üst parçanın 72 dökümde bir değişimi, bir üstündekinin 108 dökümde bir değişimi ve an üst parçanın da değişimi 144 dökümde bire denk gelmektedir. Bu veriler fabrikanın üretimleri izlenerek elde edilen bilgilerdir. Bu bilgiler ışığında absorbe ısı hesabı yapılırken toplam enerji değeri bu döküm sayılarına bölünerek gerçek absorbe edilen ısı enerjisi bilgisine ulaşılmaktadır. Aşağıda Şekil 6.3.'de elektrodun bölgelere göre boyut ve sıcaklık dağılımları görülmektedir.



Şekil 6.4. Elektrodun boyut ve bölgelere göre sıcaklık dağılımı

Fırın kapağının şarj için açılması ile elektrotlardan taşınım ile kayıp olan ısı enerjisi aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunmuştur;

$$\sigma_{RL} = g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \frac{L_1^3}{V^2} \quad (6.14)$$

$$\beta = \frac{1}{k} \quad (6.15)$$

$$Nu = c \cdot (\sigma_R \cdot P_R)^m \quad (6.16)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (6.17)$$

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad (6.18)$$

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta t \quad (6.19)$$

$D=0,7m$ (elektrod çapı)

$L=1,95m$ (her bir elektrod parçasının boyu)

$t=240s$ (kapak şarj için 3 kez açıldığında elektrotun beklemede kaldığı toplam süre)

Fırın kapağının şarj için açılması ile elektrotlardan radyasyon ile kayıp olan ısı enerjisi aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunmuştur;

$$Q_{rad} = \sigma \varepsilon A (T_{ort}^4 - T_0^4) \quad (6.20)$$

$$A = \pi DL \quad (6.21)$$

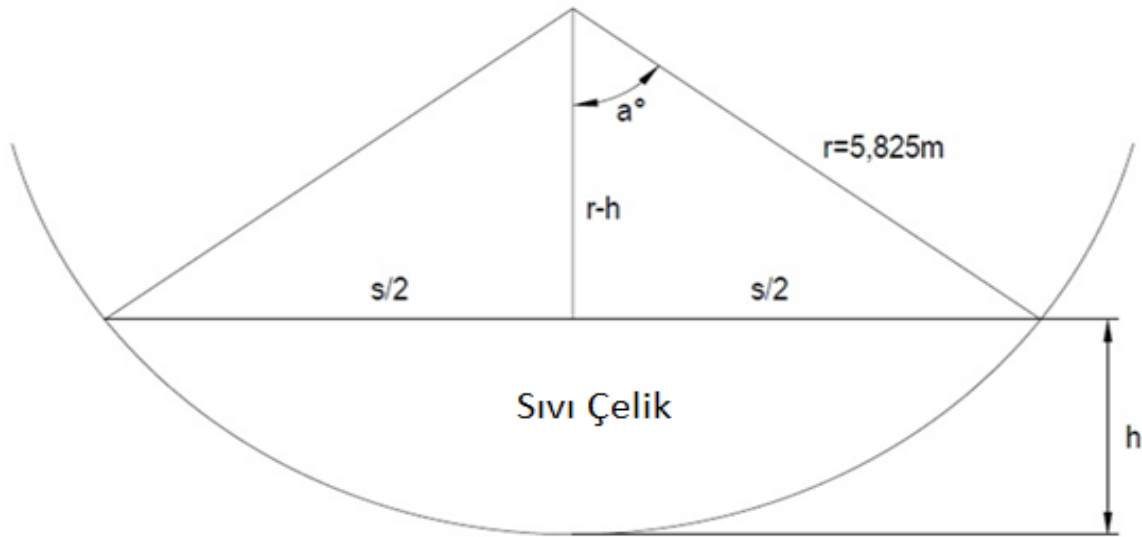
$$\sigma = 5,67E^{-8} W / m^2 K^4 \quad (6.22)$$

$$\varepsilon = 0,8$$

$$T_0 = 30^\circ C$$

Kapak açılması ile kayıp olan enerji

Fırına ilk hurda şarjından sonra fırın kapağı 2 kez daha açılmaktadır. Çünkü yukarıda da belirtildiği üzere ocağa 3 kez hurda şarjı yapılmaktadır. İlk şarj eritildikten sonra 2. Şarj, 2 şarj eritildikten sonra 3. Şarj yapılmaktadır. İlk şarjda yapılan eritmeden sonra içerideki sıvı çeliğin miktarı ile doğru orantılı olarak dışarıya taşınım ve radyasyon ile ısı kayıpları meydana gelmektedir. İlk şarjda ocak içerisine ortalama 35 ton hurda verildikten sonra ilk eritmede bu miktarın ortalama %5'i kadarı cürufa dönüştüğünden kapak 2. Şarj için açıldığında ocak içerisinde ortalama içeride 33250kg, 3. Şarj için açıldığında da içeride ortalama 66500 kg sıvı çelik bulunur. Bu bilgiler ışığında bizim için hesaplamalarda gerekli olacak her şarj için sıvı çeliğin ocak içerisindeki yüksekliği olan 'h' dir. Şekil 6.5'de ocak içerisindeki sıvı çeliğin yüksekliğini hesaplayabilmemiz için boyutsal analiz vardır.



Şekil 6.5. Ocak içerisindeki sıvı çeliğin yükseklik hesabının boyutsal gösterimi

Kapak şarj için açıldığında radyasyon ile kayıp olan enerjiyi bulmak için aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır ;

$$V_{konik} = \pi \cdot (s/2)^2 \cdot (r-h) \cdot 1/3 \quad (6.23)$$

$$V_{sıvıçelik} = 1/3 \cdot r^3 \cdot (1 - \cos a) \cdot 2\pi - \pi(s/2)^2 \cdot (r-h) \cdot 1/3 \quad (6.24)$$

$$\cos a = (r-h)/r = 1 - h/r \quad (6.25)$$

$$V_{k\u00fc\text{repar\u00e7ası}} = 2\pi / 3 \cdot r^3 \cdot (1 - 1 + h / r) = 2\pi / 3 \cdot r^2 \cdot h \quad (6.26)$$

$$V_{sıvı\u00e7elik} = 2\pi / 3 \cdot r^2 \cdot h - \pi \cdot (s / 2)^2 \cdot (r - h) \cdot 1 / 3 \quad (6.27)$$

$$r^2 = (r - h)^2 + (s / 2)^2 = r^2 + h^2 - 2 \cdot r \cdot h + (s / 2)^2 \quad (6.28)$$

$$2 \cdot r \cdot h = h^2 + s^2 / 4 \quad (6.29)$$

$$r = h / 2 + s^2 / (8 \cdot h) \quad (6.30)$$

$$V_{sıvı\u00e7elik} = \pi / 3 \cdot (h^2 + s^2 / 4) \cdot (h / 2 + s^2 / (8 \cdot h)) - \pi \cdot (s^2 / 4) \cdot (h / 2 + s^2 / (8 \cdot h) - h) \cdot 1 / 3$$

$$V_{sıvı\u00e7elik} = \pi \cdot h \cdot (h^2 / 6 + s^2 / 8) \quad (6.31)$$

$$m_{sıvı\u00e7elik} = \rho \cdot V = 7850 \cdot \pi \cdot h \cdot (h^2 / 6 + s^2 / 8) \quad (6.32)$$

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_{final} - T_0) \quad (6.33)$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

$$\varepsilon = 0,44 \text{ (ısı\il yayınım katsayısı)}$$

Kapak \u00e7arj i\u00e7in a\u00e7ıldı\u011fında ta\u00e7ınım ile kayıp olan enerjiyi bulmak i\u00e7in a\u00e7a\u011fıdaki e\u00e7itliklerden yararlanılmı\u015ftır. E\u00e7. 6.37'de ge\u00e7en A, her \u00e7arj eridikten sonraki sıvı \u00e7elik y\u00fczey alanını m² cinsinden ifade etmektedir. T_s de sıvı \u00e7elik sıcaklı\u011fını g\u00f6stermektedir.

$$Gr = g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot D^3 / \nu^2 \quad (6.34)$$

$$\beta = 1 / K \quad (6.35)$$

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^m = \frac{h \cdot D}{k} \quad (6.36)$$

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_0) \quad (6.37)$$

$$D_1 = 4,66m \text{ (ilk şarj eridikten sonra yüzey çapı)}$$

$$D_2 = 5,51m \text{ (ikinci şarj eridikten sonra yüzey çapı)}$$

$$T_{film} = (1600+30)/2 = 1088K$$

T_{film} sıcaklığına göre ; (Mc Growhill heat and mass transfer kitabından alınmıştır)

$$k : 0,07099$$

$$\nu : 1,3563 \times 10^{-4}$$

$$Pr : 0,7156$$

Ocak içerisinde absorbe edilen ısı enerjisi

Ocak içerisindeki malzemelerin absorbe ısılarının hesabı yapılır iken fabrikanın ocağı durdurup bakıma geçtikleri süreç dikkate alınmıştır. Buna göre ocak ortalama 20 günde 1 gün durdurulup içerisindeki refrakterleri değiştirilmektedir. Absorbe ısı hesabı yapılırken de günlük ortalama 31 döküm yapıldığı göz önünde bulundurulur ise bulunan toplam enerji 620 ye bölünerek absorbe olan ısı enerjisi bulunmuştur. Absorbe olan ısı hesabı, iletim ile kayıp enerji hesabında bulunan ortalama sıcaklıklar dikkate alınarak küresel tabanda, düz tabanda ve yan duvarlarda kullanılan malzemelerin kimyasal yapısı, özgül ısıları ve mol bilgileri ışığında her bir malzeme için ayrı ayrı incelenmiştir.

Soğutma suyunun ocaktan taşıdığı enerji

Sisteme giren ve sistemden çıkan soğutma suyunun kütle miktarı ve özgül ısılarına göre ve sıcaklıklarına göre sistem taşıdığı enerji hesabı yapılmıştır.

7. KÜTLE DENGELMESİ HESAPLARI

7.1 Sisteme girenler

Döküm başına analizler aşağıda verilmiştir.

7.1.1. Hurdanın kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.1. Hurda kimyasal analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
Fe	97 747	95,19
C	1 095,68	1,07
Si	1 457,96	1,42
Mn	526,91	0,51
P	81,41	0,08
S	27,09	0,03
Cr	256,67	0,25
Ni	114,12	0,11
Mo	11,02	0,01
Cu	399,43	0,39
Al	568,71	0,55
Zn	400,98	0,39
Toplam	102 687	100,00

7.1.2. Antrasit kömürünün kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.2 Antrasit kömürü analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
C	948,52	95,16
Uçucu madde	12,81	1,29
Kül	35,42	3,55
Toplam	997	100,00

7.1.3 Kirecin kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.3 Kireç analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
CaO	5 775,33	91,26
Al ₂ O ₃	11,68	0,18
Fe ₂ O ₃	2,42	0,04
SiO ₂	39,49	0,62
MgO	349,98	5,53
S	12,89	0,20
Kızdırma kaybı	100,58	1,59
Safsızlık	35,83	0,57
Toplam	6 328	100,00

7.1.4 Elektrodun kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.4 Elektrod analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
C	56,90	88,19
Si	0,08	0,13
Fe	0,08	0,13
Ca	0,05	0,08
Al	7,28	11,29
SiO ₂	0,04	0,06
Al ₂ O ₃	0,03	0,04
Fe ₂ O ₃	0,03	0,04
MgO	0,03	0,04
Toplam	65	100,00

7.1.5 Doğalgazın kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.5 Doğalgaz analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
Metan(CH ₄)	344,48	94,70
Etan(C ₂ H ₆)	7,48	2,06
Propan(C ₃ H ₈)	1,61	0,44
Bütan(C ₄ H ₁₀)	8,39	2,31
Azot(N ₂)	1,80	0,49
Toplam	364	100,00
Üst Isıl Değer	Max 10427 Kcal/m ³	
Üst Isıl Değer	Min 8100 Kcal/m ³	

7.1.6 Soğutma suyunun kütle hesabı

Çizelge 7.6 Soğutma suyu analizine göre kütle miktarı

Kullanıldığı yer	Debi miktarı (m³/h)	Kütle (kg)
Fırın Gövdesi	513,40	384 723
Fırın Kapağı	674,30	513 000
Toplam	1 187,70	897 723

7.2. Sistemden çıkanların kütle hesaplaması

7.2.1 Sıvı çeliğin kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.7 Sıvı çelik analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
C	57,06	0,06
Si	9,51	0,01
S	19,02	0,02
P	20,53	0,02
Mn	47,55	0,05
Cu	399,44	0,42
Cr	73,08	0,08
Ni	114,13	0,12
Mo	11,02	0,01
Fe	94 334	99,21
Toplam	95 085	100,00

7.2.2 Cürufun kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.8 Curuf analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
CaO	5 732,96	37,66
SiO ₂	3 065,51	20,14
Al ₂ O ₃	1 100,00	7,23
MnO	615,02	4,04
MgO	350,00	2,30
Fe ₂ O ₃	3 989,54	26,21
P ₂ O ₅	108,04	0,71
Cr ₂ O ₃	240,28	1,58
S	20,96	0,14
Toplam	15 222	100,00

7.2.3 Tozun kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.9. Tozun analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
Zn	400,98	26,45
CaO	42,45	2,80
MnO	3,94	0,26
Fe ₂ O ₃	893,07	58,91
SiO ₂	72,92	4,81
C	74,59	4,92
Cr ₂ O ₃	28,05	1,85
Toplam	1 516	100,00

7.2.4 Baca gazının kimyasal yapısına göre kütle hesabı

Çizelge 7.10. Baca gazı analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
CO	19,76	0,22
CO ₂	8 158,23	90,82
H ₂ O	802,81	8,94
N ₂	1,80	0,02
Toplam	8 983	100,00

7.2.5 Soğutma suyunun kütle hesabı

Çizelge 7.11. Soğutma suyu analizine göre kütle miktarı

Kullanıldığı yer	Debi miktarı (m³/h)	Kütle (kg)
Fırın Gövdesi	514	384 723
Fırın Kapağı	674	513 000
Toplam	1 188	897 723

7.3. Sisteme girenlerin kullandığı oksijen miktarı

Kireç için kullanılan oksijen miktarı

Çizelge 7.12. Kireç için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
CaO	1 647,75	90,84
Al ₂ O ₃	5,50	0,30
Fe ₂ O ₃	0,73	0,04
SiO ₂	21,03	1,16
MgO	138,93	7,66
Toplam	1 814	100,00

Elektrod için kullanılan oksijen miktarı

Çizelge 7.13. Elektrod için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
SiO ₂	0,02	40,61
Al ₂ O ₃	0,01	23,93
Fe ₂ O ₃	0,01	15,28
MgO	0,01	20,18
Toplam	0,05	100,00

7.4. Sistemden çıkanların kullandığı oksijen miktarı

Cüruf için kullanılan oksijen miktarı

Çizelge 7.14. Cüruf için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
CaO	1 635,67	30,19
SiO ₂	1 632,58	30,14
Al ₂ O ₃	517,82	9,56
MnO	138,71	2,56
MgO	138,94	2,56
Fe ₂ O ₃	1 199,15	22,14
P ₂ O ₅	78,61	1,45
Cr ₂ O ₃	75,88	1,40
Toplam	5 417	100,00

Toz için kullanılan oksijen miktarı

Çizelge 7.15. Toz için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
CaO	12,11	7,95
MnO	3,05	2,00
Fe ₂ O ₃	89,48	58,74
SiO ₂	38,83	25,49
Cr ₂ O ₃	8,86	5,81
Toplam	152	100,00

Baca gazı için kullanılan oksijen miktarı

Çizelge 7.16. Baca gazı için kullanılan oksijen analizine göre kütle miktarı

Kimyasal bileşim	Kütle (kg)	Yüzde (%)
CO	11,28	0,17
CO ₂	5 931,76	89,12
H ₂ O	712,98	10,71
Toplam	6 656	100,00

7.5. Sisteme giren saf oksijen miktarı

Çizelge 7.17. Sisteme giren saf oksijen kütle miktarı

Sisteme Girenlerin İçerdiği oksijen (kg)	Sistemden Çıkanların Kullandığı Oksijen (kg)	Sisteme giren Saf Oksijen (kg)
1 814	12 225	10 411

7.6. Sistemin kütle dengelemesi

Çizelge 7.18. Sistemin kütle dengelemesi

Sisteme Girenler	Kütle (kg)	Sistemden çıkanlar	Kütle (kg)
HURDA	102 687	SIVI ÇELİK	95 085
ANTRASİT KÖMÜRÜ	997	CURUF	15 222
ELEKTROD	65	TOZ	1 516
DOĞALGAZ	364	BACA GAZI	8 983
SAF OKSİJEN	10 411	SOĞUTMA SUYU	897 723
KİREÇ	6 328		
SOĞUTMA SUYU	897 723		
Toplam	1 018 575		1 018 529

8. ENERJİ DENGELMESİ HESAPLARI

8.1 Sisteme giren enerjiler

8.1.1 Ekzotermik reaksiyonların enerji hesabı

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.2'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.1. Ekzotermik reaksiyonların kimyasal bazlı enerjisi hesabı

Kimyasal yapı	Standart Entalpi (kJ/mol)	Oluşum entalpisi (kJ/mol)	Mol (kmol)	Enerji (kJ)
Cr ₂ O ₃	199,49	1 134,70	1,70	1 590 783
SiO ₂	105	905,49	51,57	41 280 527
Al ₂ O ₃	223,34	1 675,69	10,53	15 306 188
MnO	44,2	385	8,40	2 650 689
P ₂ O ₅	100	1 726	0,94	1 483 386
Fe ₂ O ₃	226,09	825,5	29,61	17 751 340
CO	52	110,53	0,70	41 175
CO ₂	83,80	393,52	185,92	57 585 357
H ₂ O	50	242	44,56	7 819 999
Toplam				145 509 444

8.1.2 Hurda ön ısıtma enerjisinin hesabı

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.5'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.2. Hurda ön ısıtmanın kimyasal bazlı enerji hesabı

Kimyasal yapı	C _p ort (j/molK)	Mol (kmol)	Enerji (kJ)
Fe	28,3	1 750	13 374 286
C	10,68	91,22	263 058
Si	22	51,91	308 915
Mn	29	9,59	75 033
P	23,81	2,63	16 900
S	29,6	0,84	6 752
Cr	25,67	4,94	34 220
Ni	29,87	1,94	15 684
Mo	25,12	0,11	779 49
Cu	25,45	6,29	43 201
Al	26	21,07	147 653
Zn	26,84	6,13	44 426
Toplam			14 330 907

8.1.3 Oksijen enjeksiyonu için harcanan enerji miktarı

Fabrikanın oksijen üretim tesisinden alınan bilgiye göre 1 döküm için enjekte edilen oksijenin ortalama enerjisi 14 831 971 kJ'dur.

8.1.4 Bir döküm için harcanan elektrik enerjisi miktarı

Fabrikadan alınan bilgiler ışığında bir döküm için harcanan ortalama elektrik enerjisi 127 909 244 kJ'dur.

8.2 Sistemden taşınan enerjilerin hesabı

8.2.1 Cüruf için harcanan enerji hesabı

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.6'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.3. Cürufun kimyasal bazlı enerji hesabı

Kimyasal yapı	Özgül ısı $C_{p_{ort}}$ (J/molK)	Mol (kmol)	Enerji (kJ)
CaO	50,17	98,36	7 748 236
SiO ₂	61,39	51,00	4 915 498
Al ₂ O ₃	107,81	10,65	1 802 495
MnO	44,20	8,34	578 842
MgO	46,32	8,35	607 587
Fe ₂ O ₃	125,47	24,03	4 734 938
P ₂ O ₅	208,54	0,94	309 542
Cr ₂ O ₃	119,73	1,52	285 910
S	22,00	0,64	22 091
Toplam			21 005 139

8.2.2 Sıvı çelik için harcanan enerji hesabı

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.4. Sıvı çeliğin kimyasal bazlı enerji hesabı

Kimyasal yapı	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 1873K	Mol (kmol)	Enerji (kj)
C	10,68	24,45	4,75	202 196
Si	20,13	69,81	0,33	41 652
S	22,81	58,71	0,59	61 044
P	21,31	40,04	0,74	50 541
Mn	26,41	61,20	1,19	126 846
Cu	24,51	45,17	6,28	485 115
Cr	23,52	41,75	1,53	109 047
Ni	26,11	54,43	1,94	182 844
Mo	23,98	30,76	0,11	5 785
Fe	25,20	72,00	1 691	215 142 734
Toplam				216 407 804

8.2.3 Tozun ocaktan taşıdığı enerji hesabı

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.8'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.5. Tozun kimyasal bazlı enerji hesabı

Kimyasal yapı	Özgül ısı Cp (j/molK) 303K	Özgül ısı Cp (j/molK) 1473K	Mol (kmol)	Enerji (kj)
Cr ₂ O ₃	102,93	132,23	0,18	29 446
SiO ₂	45,07	73,70	1,21	114 834
Zn	25,43	20,76	6,13	140 227
MnO	44,20	44,20	0,06	3 103
CaO	42,41	56,15	0,76	53 093
Fe ₂ O ₃	104,76	143,58	5,59	1 005 273
C	10,68	10,68	6,21	77 598
Toplam				1 423 573

8.2.4 Elektrik ark ocağından iletim ile kayıp olan enerjilerin hesaplanması

Küresel ocak tabanı için ısı iletimi ile kayıp olan miktarı

Aşağıdaki teorik hesaplamayla bulunan sonuç Eş. 6.9'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.6. Küresel ocak tabanından ısı iletimi ile kayıp olan enerji

Bölge	Q (kj)
Küresel ocak tabanı	1 123 864

Düz ocak tabanı için ısı iletimi ile kayıp olan enerji miktarı

Aşağıdaki teorik hesaplamayla bulunan sonuç Eş. 6.11'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.7. Düz ocak tabanından ısı iletimi ile kayıp olan enerji

Bölge	Q (kj)
Düz Ocak tabanı	373 323

Yan duvarlar için ısı iletimi ile kayıp olan enerji miktarı

Aşağıdaki teorik hesaplamayla bulunan sonuç Eş. 6.12'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.8. Yan duvarlardan ısı iletimi ile kayıp olan enerji

Bölge	Q (kj)
Yan duvarlar	432 940

8.2.5 Elektrodlar tarafından kaybolan enerjilerElektrodlardan radyasyon ile kayıp olan enerji miktarı

Aşağıdaki teorik hesaplamayla bulunan sonuçlar Eş. 6.20'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.9. Elektrotlardan radyasyon ile kayıp olan enerji

Bölge	Q (kj)
1	900
2	7 837
3	61 485
4	2 759 794
Toplam	2 830 016

Elektrodlardan taşınım ile kayıp olan enerji hesabı

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.19'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.10. Elektrotlardan taşınım ile kayıp olan enerji

Bölge	T_{film} (K)	k (W/mK)	v (m²/s)	Pr	Q (kj)
1	355,5	0,0297	2,123x10 ⁻⁵	0,7148	552
2	475,5	0,03795	3,486x10 ⁻⁵	0,6972	2 254
3	688	0,05099	6,4524 x10 ⁻⁵	0,6953	4 912
4	1538	0,08785	2,367 x10 ⁻⁴	0,7376	11 366
Toplam					19 084

8.2.6 Ocak kapağının şarj için açılması ile kayıp olan enerjiler

Kapaktan radyasyon ile kayıp olan enerji miktarı

Aşağıdaki sonuçlar Eş. 6.33'den yararlanılarak bulunmuştur.

Çizelge 8.11. Kapaktan radyasyon ile kayıp olan enerji

Şarj no	h (m)	s (m)	Q (kj)
2	0,4879	4,66	1 255 921
3	0,6942	5,51	1 755 875
Toplam			3 011 796

Kapaktan taşınım ile kayıp olan enerji miktarı

Aşağıdaki sonuçlar Eş. 6.37'den yararlanılarak bulunmuştur.

Çizelge 8.12. Kapaktan taşınım ile kayıp olan enerji

Şarj no	Q (kj)
2	48 204
3	67 385
Toplam	115 589

8.2.7 Soğutma suyu ile ocaktan taşınan enerji miktarı

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

Çizelge 8.13. Soğutma suyu ile ocaktan taşınan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 313K	Enerji (kJ/t _{döküm}) (303K)	Enerji (kJ/t _{döküm}) (313K)	Fark enerji (kJ/t _{döküm})
H ₂ O	49 831	75,31	75,26	1 137 094 638	1 173 842 656	36 748 018

8.2.8 Ocak içerisinde absorbe edilen enerjiler

Küresel taban iletken taban tamir harcı tarafından absorbe olan enerji

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

(T_{ort}= 1742,4K)

Çizelge 8.14. Küresel taban iletken taban tamir harcı tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 1742,4K	Enerji (kJ/t _{döküm}) (303K)	Enerji (kJ/t _{döküm}) (1742,4K)	Fark enerji (kJ/t _{döküm})
MgO	18,05	37,42	54,71	330	2 775	2 445
CaO	0,18	42,41	57,37	3,73	29,02	25,29
SiO ₂	0,09	45,07	76,40	1,92	18,68	16,76
Fe ₂ O ₃	0,03	104,76	145,42	1,43	11,44	10,01
Al ₂ O ₃	0,01	80,02	134,55	0,55	5,29	4,75
Toplam						2 502

Küresel taban iletken magnefit karbon tuğla tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

(T_{ort}= 965,44K)

Çizelge 8.15. Küresel taban iletken magnetit karbon tuğla tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp	Cp	Enerji	Enerji	Fark Enerji (kJ/t _{döküm})
		(j/molK) 303K	(j/molK) 965,44K	(kJ/t _{döküm}) (303K)	(kJ/t _{döküm}) (965,44K)	
MgO	677,78	37,42	50,89	12 395	53 710	41 315
CaO	8,06	42,41	53,50	167,05	671,46	504,41
SiO ₂	4,23	45,07	68,60	93,17	451,85	358,68
Fe ₂ O ₃	0,88	104,76	150,62	45,05	206,40	161,35
Al ₂ O ₃	0,83	80,02	124,14	32,46	160,44	127,99
Toplam						42 467

Küresel taban bakır elektrod tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

$$(T_{ort} = 318,92K)$$

Çizelge 8.16. Küresel taban bakır elektrodu tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp	Cp	Enerji	Energy	Fark enerji (kJ/t _{döküm})
		(j/molK) 303K	(j/molK) 318,92K	(kJ/t _{döküm}) (303K)	(kJ/t _{döküm}) (318,92K)	
Cu	21,31	24,51	24,64	255,26	270,09	14,84
Fe	0,244	25,20	25,57	3,00	3,21	0,20
Toplam						15

Küresel taban ocak çelik sacı tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

$$(T_{ort} = 310,96K)$$

Çizelge 8.17. Küresel taban ocak sacı tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 310,96K	Enerji (kJ/tdöküm) (303K)	Enerji (kJ/tdöküm) (310,96K)	Fark enerji (kJ/tdöküm)
Fe	122,95	25,20	25,380	1514	1.565	50,88
C	0,94	10,68	10,680	5	5,04	0,13
Si	0,88	20,13	20,360	9	8,99	0,33
Mn	1,54	26,41	26,640	20	20,58	0,70
P	0,06	21,31	21,500	0,62	0,65	0,02
S	0,04	22,81	23,000	0,45	0,46	0,02
Cr	0,41	23,52	23,670	4,71	4,87	0,15
Cu	0,33	24,51	24,570	3,95	4,07	0,11
Mo	0,06	23,98	24,110	0,70	0,73	0,02
Nb	0,01	24,77	24,820	0,12	0,12	0,00
Ni	0,36	26,11	26,330	4,59	4,75	0,16
Ti	0,06	25,33	25,490	0,74	0,77	0,02
V	0,03	25,01	25,130	0,37	0,38	0,01
Toplam						53

Düz taban etek tamir harcı tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

$$(T_{ort} = 1558,9K)$$

Çizelge 8.18 Düz taban etek tamir harcı tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 1558,9K	Energy (kJ/tdöküm) (303K)	Energy (kJ/tdöküm) (1558,9K)	Fark enerji (kJ/tdöküm)
MgO	197,99	37,42	53,950	3 621	26 857	23 236
CaO	3,15	42,41	56,550	65,29	447,89	382,60
SiO ₂	1,4	45,07	74,560	30,84	262,46	231,62
Fe ₂ O ₃	0,11	104,76	144,200	5,63	39,88	34,25
Al ₂ O ₃	0,08	80,02	132,880	3,13	26,73	23,60
Toplam						23 908

Düz taban magnefit karbon tuğla tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

($T_{ort} = 979,79K$)

Çizelge 8.19 Düz taban magnefit karbon tuğla tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp	Cp	Enerji	Enerji	Fark enerji
		(j/molK) 303K	(j/molK) 979,79K	(kj/tdöküm) (303K)	(kj/tdöküm) (979,79K)	(kj/tdöküm)
MgO	483,77	37,42	50,980	8 847	38 974	30 127
CaO	4,64	42,41	53,580	96,17	392,88	296,71
SiO ₂	2	45,07	68,740	44,05	217,26	173,21
Fe ₂ O ₃	0,63	104,76	150,620	32,25	149,96	117,70
Al ₂ O ₃	0,2	80,02	124,460	7,82	39,34	31,52
Toplam						30 746

Düz taban astar tuğla tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

($T_{ort} = 518,73K$)

Çizelge 8.20 Düz taban astar tuğla tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp	Cp	Enerji	Enerji	Fark enerji
		(j/molK) 303K	(j/molK) 518,73K	(kj/tdöküm) (303K)	(kj/tdöküm) (518,73K)	(kj/tdöküm)
MgO	160,55	37,42	46,070	2 936	6 188	3 252
CaO	3,04	42,41	49,330	63,01	125,47	62,46
SiO ₂	1,7	45,07	60,610	37,44	86,21	48,76
Fe ₂ O ₃	0,21	104,76	133,540	10,75	23,46	12,71
Al ₂ O ₃	0,13	80,02	107,430	5,08	11,68	6,60
Toplam						3 383

Düz taban ocak sacı tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

($T_{ort} = 312,84K$)

Yan duvar astar tuğla tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

$$(T_{\text{ort}} = 449,95\text{K})$$

Çizelge 8.23 Yan duvar astar tuğla tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 449,95K	Enerji (kJ/t _{döküm}) (303K)	Enerji (kJ/t _{döküm}) (449,95K)	Fark enerji (kJ/t _{döküm})
MgO	75,16	37,42	44,44	1 374	2 424	1 050
CaO	1,42	42,41	48,01	29,43	49,48	20,04
SiO ₂	0,80	45,07	56,77	17,62	32,96	15,34
Fe ₂ O ₃	0,10	104,76	126,26	5,12	9,16	4,04
Al ₂ O ₃	0,06	80,02	102,02	2,35	4,44	2,10
Toplam						1 091

Yan duvar ocak çelik sacı tarafından absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

$$(T_{\text{ort}} = 314,96\text{K})$$

Çizelge 8.24 Yan duvar ocak çelik sacı tarafından absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 314,96K	Enerji (kJ/t _{döküm}) (303K)	Enerji (kJ/t _{döküm}) (314,96K)	Fark enerji (kJ/t _{döküm})
Fe	115,65	25,20	25,48	1 424	1 497	73
C	0,88	10,68	10,68	4,59	4,77	0,18
Si	0,83	20,13	20,46	8,17	8,63	0,46
Mn	1,45	26,41	26,75	18,71	19,70	0,99
P	0,05	21,31	21,60	0,52	0,55	0,03
S	0,04	22,81	23,08	0,45	0,47	0,02
Cr	0,38	23,52	23,74	4,37	4,58	0,21
Cu	0,31	24,51	24,60	3,71	3,87	0,16
Mo	0,06	23,98	24,16	0,70	0,74	0,03
Nb	0,01	24,77	24,84	0,12	0,13	0,01
Ni	0,34	26,11	26,43	4,34	4,56	0,23
Ti	0,06	25,33	25,57	0,74	0,78	0,04
V	0,03	25,01	25,19	0,37	0,38	0,02
Toplam						75

Elektrod 1. bölgesi için absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

($T_{ort} = 408K$)

Çizelge 8.25 Elektrod 1. Bölgesi için absorbe olan enerji

Kimyasal Yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 408K	Enerji (kJ/t _{döküm}) (303K)	Enerji (kJ/t _{döküm}) (408K)	Fark enerji (kJ/t _{döküm})
Fe	93,63	10,68	10,68	2 104	2 833	729
C	0,06	20,13	22,27	2,54	3,79	1,24
Si	0,03	25,20	27,57	1,59	2,34	0,75
Mn	0,04	25,95	27,00	2,18	3,06	0,88
P	5,33	24,30	25,87	272,53	390,68	118,15
S	0,01	45,07	54,00	0,95	1,53	0,58
Cr	0,01	80,02	97,70	1,68	2,77	1,08
Cu	0,00	104,76	121,24	0,70	1,10	0,39
Mo	0,01	37,42	43,10	0,79	1,22	0,43
Toplam						853

Elektrod 2. bölgesi için absorbe olan ısı enerjisi

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.7'den yararlanılarak yapılmıştır.

($T_{ort} = 648K$)

Çizelge 8.26 Elektrod 2. Bölgesi için absorbe olan enerji

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 648K	Enerji (kJ/t _{döküm}) (303K)	Enerji (kJ/t _{döküm}) (648K)	Fark enerji (kJ/t _{döküm})
Fe	93,63	10,68	10,68	2 805	6 000	3 194
C	0,06	20,13	24,47	3,39	8,81	5,42
Si	0,03	25,20	33,25	3,39	8,81	3,86
Mn	0,04	25,95	31,33	2,91	7,52	4,61
P	5,33	24,30	28,44	363	909	546
S	0,01	45,07	66,49	1,26	3,99	2,72
Cr	0,01	80,02	114,41	2,25	6,86	4,62
Cu	0,00	104,76	145,42	0,94	2,79	1,85
Mo	0,01	37,42	48,09	1,05	2,89	1,84
Toplam						3 765

8.2.9 Baca gazının ocaktan taşıdığı enerji hesabı

Aşağıdaki teorik hesaplamalar Eş. 6.8'den yararlanılarak yapılmıştır.

($T_{ort} = 1673K$)

Çizelge 8.29 Baca gazının ocaktan taşıdığı enerji hesabı

Kimyasal yapı	Mol (kmol)	Cp (j/molK) 303K	Cp (j/molK) 1673K	Enerji (kJ/t _{döküm}) (303K)	Enerji (kJ/t _{döküm}) (1673K)	Fark enerji (kJ/t _{döküm})
CO	0,71	29,14	35,63	38,09	37 468,80	37 431
CO ₂	185,37	37,35	59,21	12 420	15 830 965	15 818 545
H ₂ O	44,56	75,31	48,69	2 807	2 985 696	2 982 889
N ₂	0,06	29,12	35,31	3,46	3 333,79	3 330
Toplam						18 842 195

8.2.10 Enerji dengelemesi

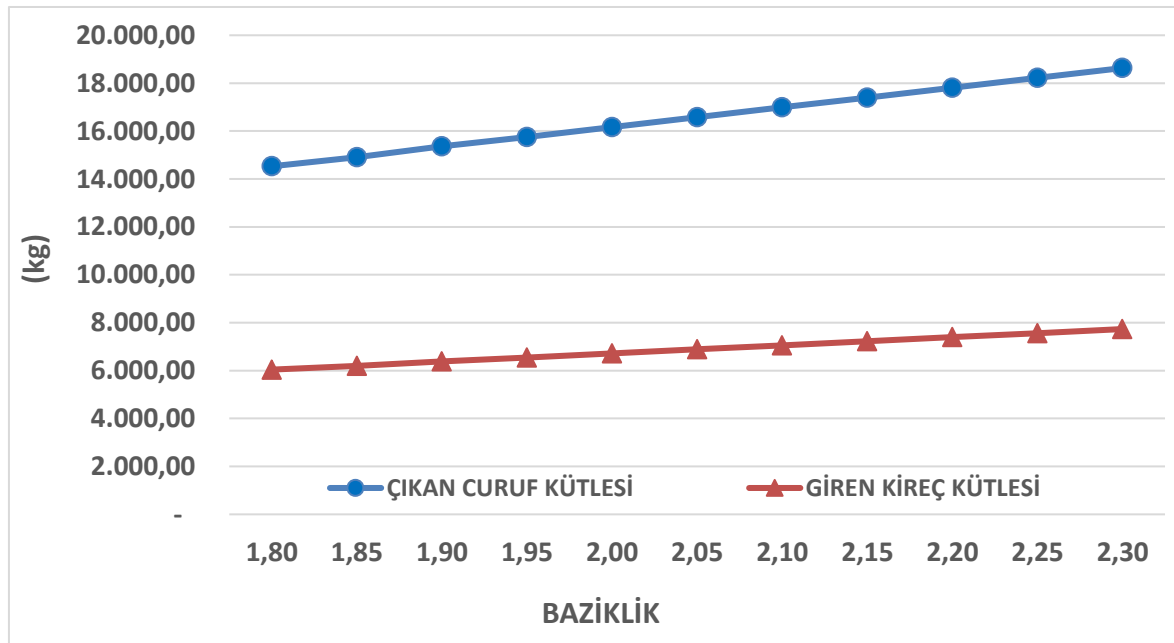
Çizelge 8.30 Sistemin enerji dengelemesi

EAO'na giren enerjiler	Enerji (kJ/döküm)	EAO'dan çıkan enerjiler	Enerji (kJ/döküm)
Elektrik enerjisi	127 909 244	Curuf	21 005 139
Ekzotermik reaksiyonlar	145 509 444	Sıvı çelik	216 407 804
Hurda Ön Isıtma	14 330 907	Toz	1 423 573
Oksijen enjeksiyonu	14 831 971	İletim ile kayıp olan enerji	1 930 127
		Absorbe olan enerji	248 227
		Taşıyım ile kayıp olan enerji	134 673
		Radyasyon ile kayıp olan enerji	5 841 812
		Baca gazından kaybolan enerji	18 842 195
		Soğutma suyunun taşıdığı enerji	36 748 018
Toplam enerji	302 581 566	Toplam enerji	302 581 568

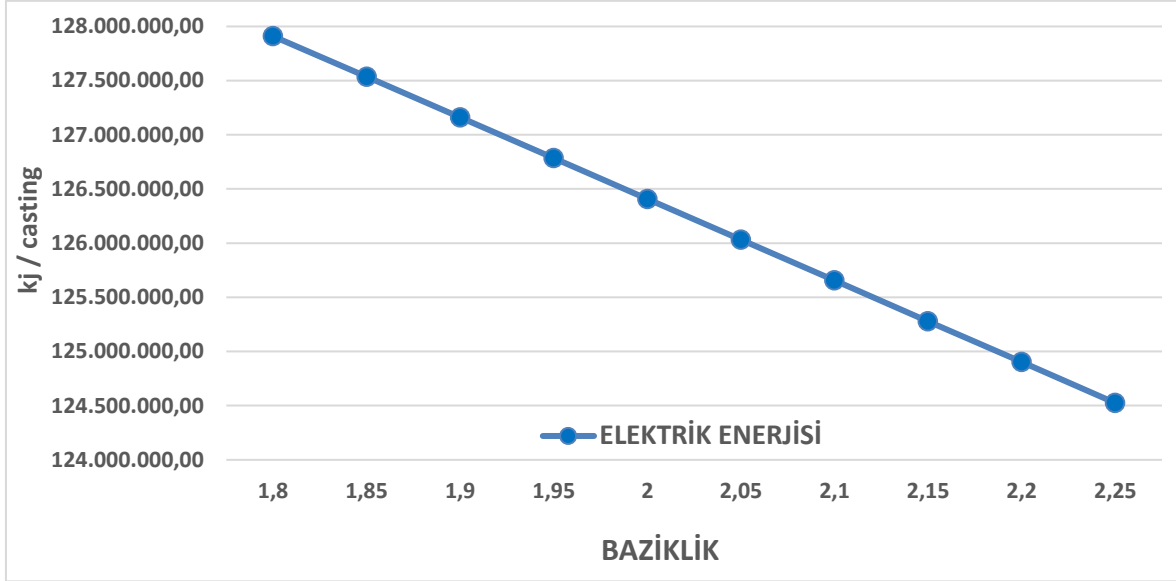
9. TARTIŞMA VE BULGULAR

9.1 Farklı baziklik oranlarında kütle ve enerji optimizasyonu

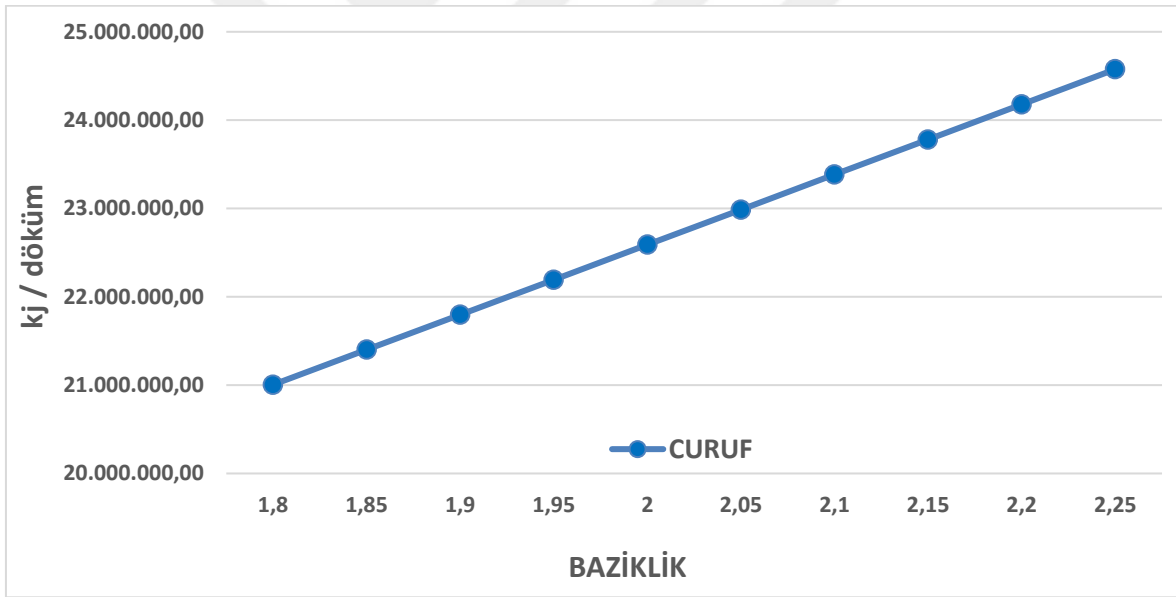
Elektrik ark ocaklarında kullanılan kireç miktarı ayarlanırken en önemli göz önüne alınması gereken parametrelerden biri de, sistemin baziklik oranını 1,8 ile 2,3 aralığında tutarak ocak içerisindeki cürufa kremesi bir yapının verilmesini sağlayarak ve elde edilecek olan sıvı çeliğin kalitesini istenen düzeylerde tutmasıdır. Baziklik oranının 1,8 den 2,3 e doğru artışı meydana geldiğinde, sistemin metalürjik ve elektrik verimi düşmektedir. Düşük baziklik oranlarında, cürufun düşük vizkoziteye sahip olmasından dolayı, kükürt sistemden kolay bir şekilde uzaklaştırılmaz ve refrakter aşınması artar, bunun sonucunda da termal ve metalürjik verimde düşüş meydana gelir. Baziklik oranının 2,3'ün üzerinde olması durumunda cüruf fazla katı formda olur, bu durum da, elektrik arkının sıvı çelik yüzeyinden içeri kolay girmesine engel olur ve ergime verimini düşürür. [34]. Bu noktada baziklik aralıkları dikkate alınarak elektrik ark ocağında optimizasyon ya da seçim yapma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle sistemde kullanılan malzemelerin kimyasal analizi ve sistemin kütle dengesi de dikkate alınarak fırın içerisindeki baziklik oranının olması istenen aralıklarda değiştirildiğinde kullanılacak kireç miktarı ve buna bağlı olarak atılan cüruf ile tüketilen enerji miktarının tespiti sistemin mevcut durumunun belirlenmesi ve optimizasyonu için büyük önem arz etmektedir.



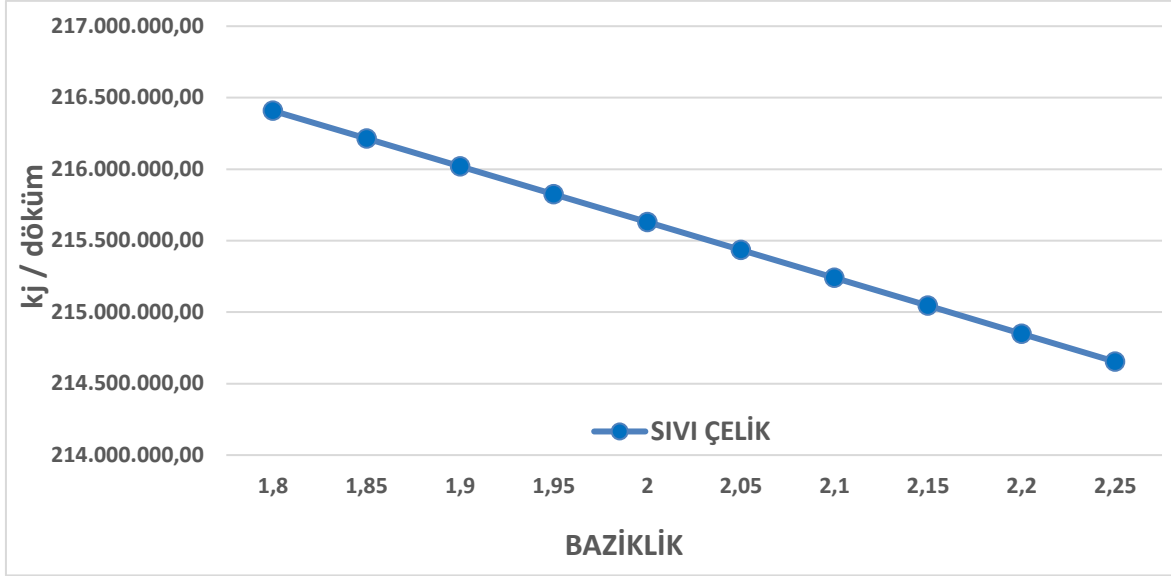
Şekil 9.1. Farklı baziklik oranlarında kireç tüketimi ve çıkan cüruf kütlesi



Şekil 9.2. Baziklik oranındaki değişimin elektrik tüketimine etkisi



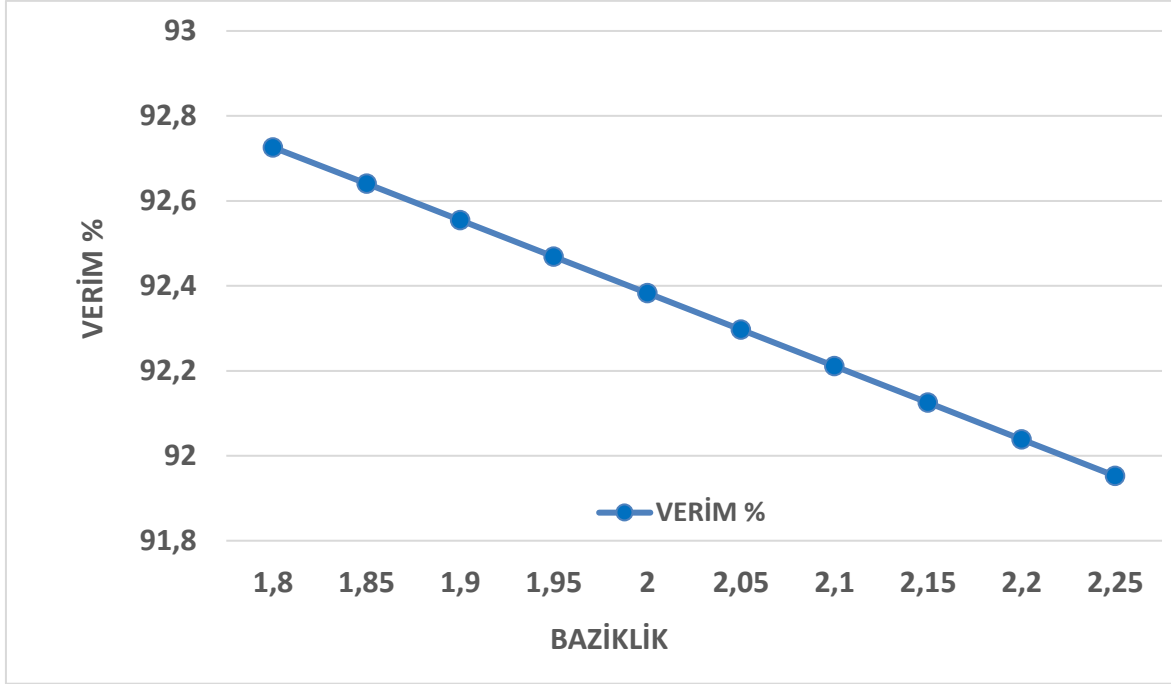
Şekil 9.3. Baziklik oranındaki değişimin cüruf oluşum enerjisine etkisi



Şekil 9.4. Baziklik oranındaki değişimin sıvı çelik oluşum enerjisine etkisi



Şekil 9.5. Baziklik oranındaki değişimin oksijen enjeksiyon enerjisine etkisi



Şekil 9.6. Baziklik oranındaki değişimin verime etkisi



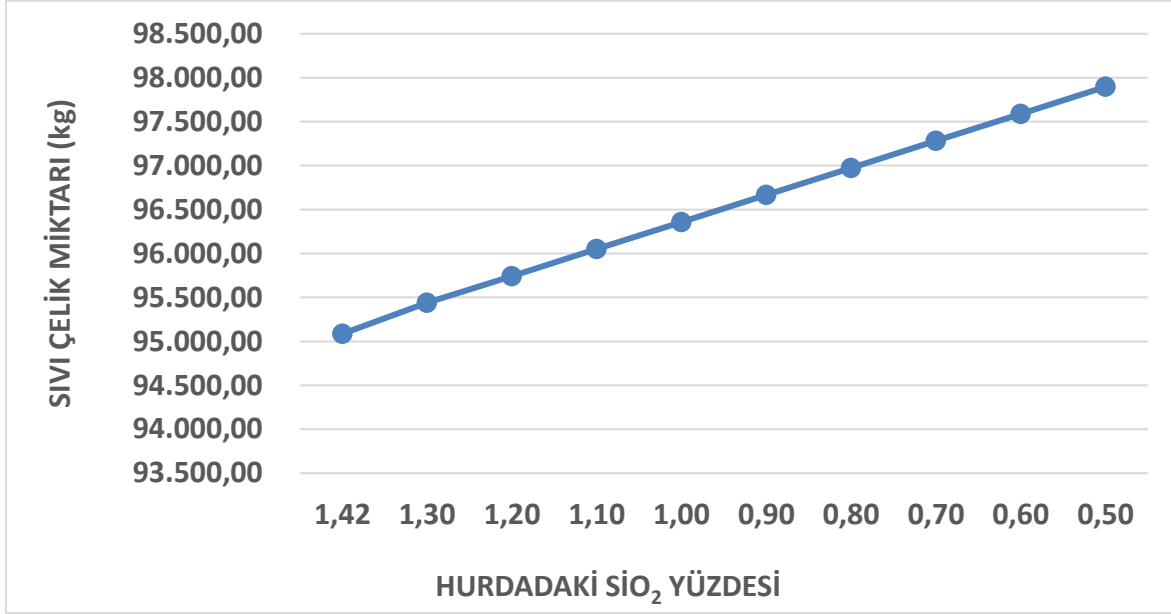
Şekil 9.7. Baziklik oranındaki değişimin ekzotermik reaksiyon enerjisine etkisi

Yapılan literatür çalışmalarında cürufun köpük kıvamında olması için baziklik oranının 1,8 ile 2,3 aralığında tutulmasının gerektiği görülmektedir. Kimyasal bazda analizi yapılmış olan elektrik ark ocağının mevcut durumda baziklik oranı 1,87 olarak hesaplanmıştır. Değişen baziklik oranına bağlı olarak hesaplanan kireç tüketimi, günlük enerji ihtiyacı ve çıkan cüruf miktarları dikkatli incelendiğinde, baziklik oranına bağlı olarak her üç parametrenin de arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda sistemin baziklik oranı 1,8'den 2,3'e doğru

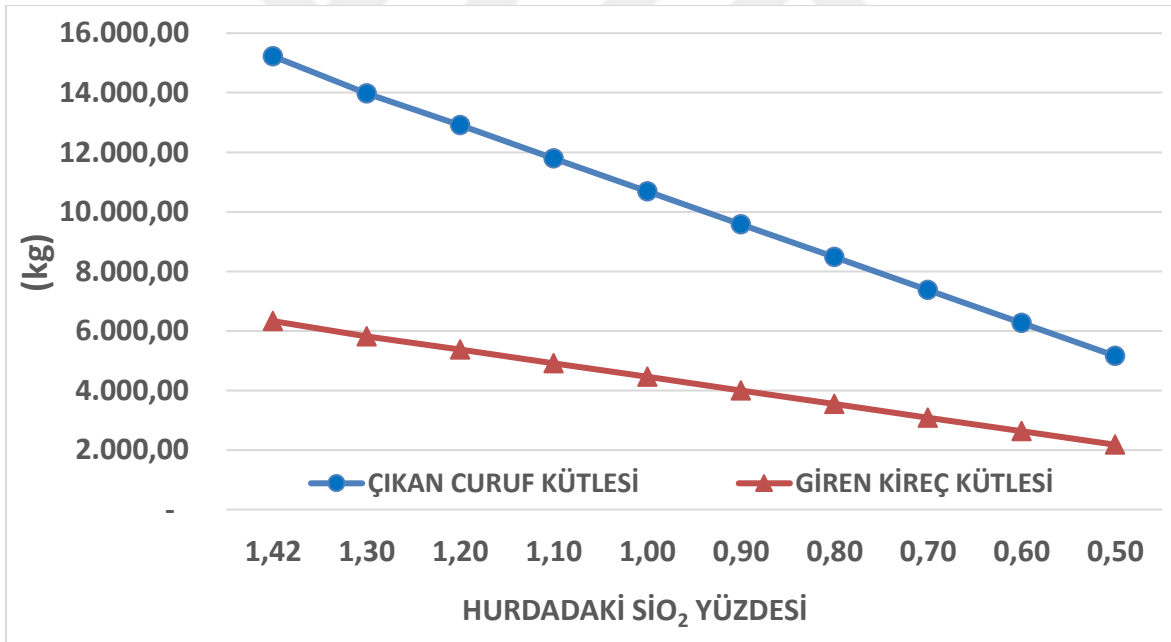
değiştirildiğinde ve hurda içerisindeki silisyum kütle oranı %1,4 sabit kabul edildiğinde döküm başına sırasıyla curuf kütlesinin 18 tonlara kadar çıktığı, kireç kullanımının 8 tonlara kadar yükseldiği, elektrik enerjisi tüketiminin 128 GJ'dan 124GJ'a kadar düştüğü, curuf oluşum enerjisinin 25 GJ'a kadar çıktığı, sıvı çelik oluşum enerjisinin 214 GJ'a kadar düştüğü, oksijen tüketim enerjisinin 15 GJ'a kadar çıktığı, kütle veriminin %92'ye kadar düştüğü ve ekzotermik reaksiyon için harcanan enerjinin 150 GJ'a kadar çıktığı görülmektedir. EAO'larda sıvı çelik üretimini en az maliyetle yapabilmek için en önemli parametreler; tüketilen kireç kütlesi, çıkan curuf kütlesi, harcanan elektrik enerjisi ve sistemin kütle verimidir.

9.2 Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesine göre kütle ve enerji optimizasyonu

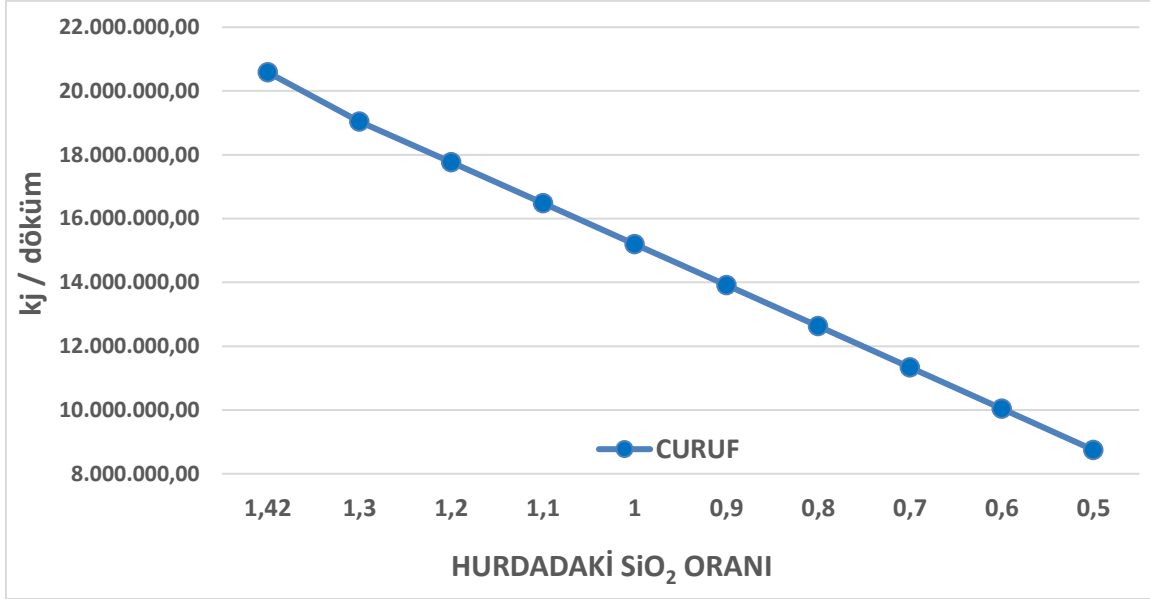
Cüruf içerisindeki kalsiyum oksit kütlesinin silisyum dioksit kütlesine oranı olarak ifade edilen ve 1,80-2.3 aralığında olması istenen baziklik oranını sisteme verilen kireç miktarıyla ayarlamak mümkündür. İncelenen dökümde baziklik oranı 1,87 olarak hesaplanmıştır ve bu istenen aralıklarda ideal bir değerdir. Fakat gerek cüruf miktarını azaltmak gerekse de enerji tasarrufu sağlamak için ideal değerlerde olan baziklik oranını sabit tutmak kaydı ile hurda içerisindeki topraktan kaynaklanan silisyum ile hurda içerisindeki silisyumu azaltarak istenmeyen maddelerin uzaklaştırılması için kullanılan kireç miktarının azaltılması sistem verimini artırırken sistemde kullanılan enerji miktarını da azaltacaktır. Sabit baziklik oranında (1,87) hurda içerisindeki silisyum oranının %1,42'den %0,5'e değiştirilmesi ile elde edilen veriler aşağıdaki grafiklerde görülmektedir.



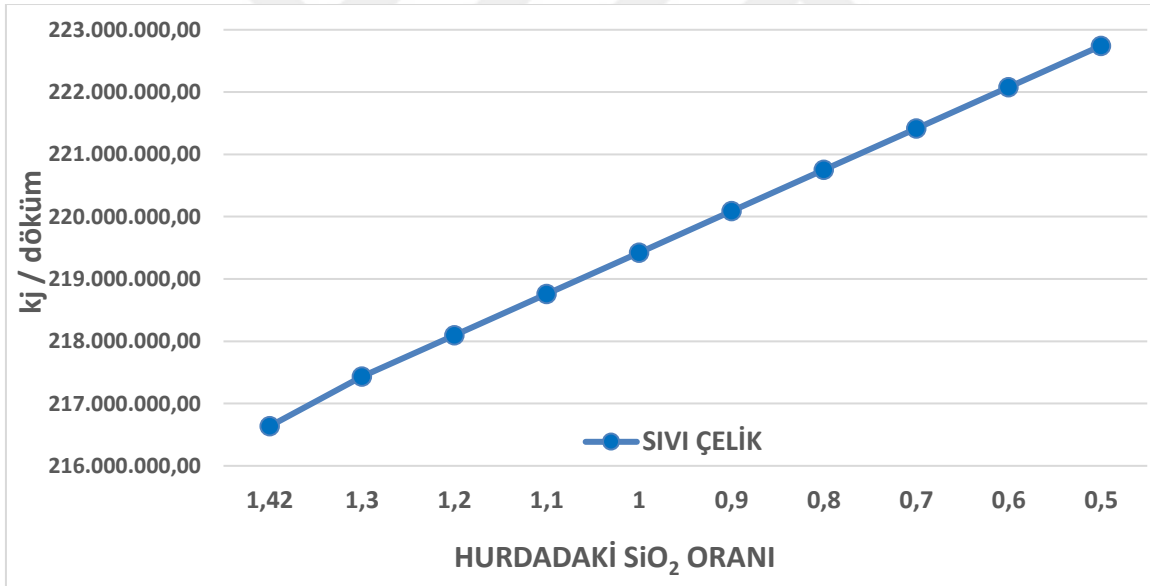
Şekil 9.8 Sabit bazıklık oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesinin sıvı çelik miktarına etkisi



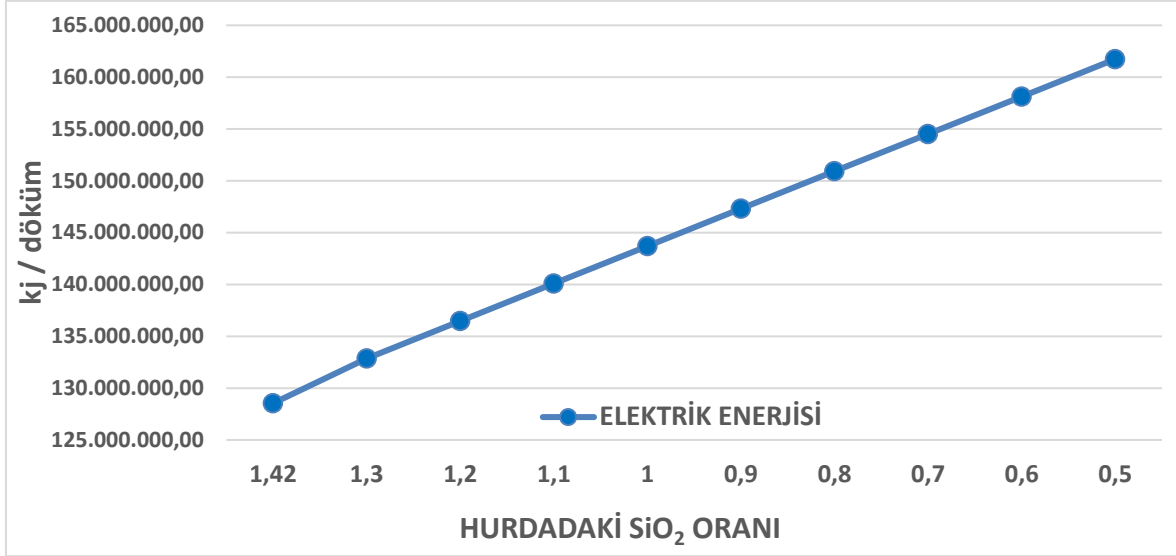
Şekil 9.9. Sabit bazıklık oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesinin çıkan cüruf kütlesi ve giren kireç kütle miktarına etkisi



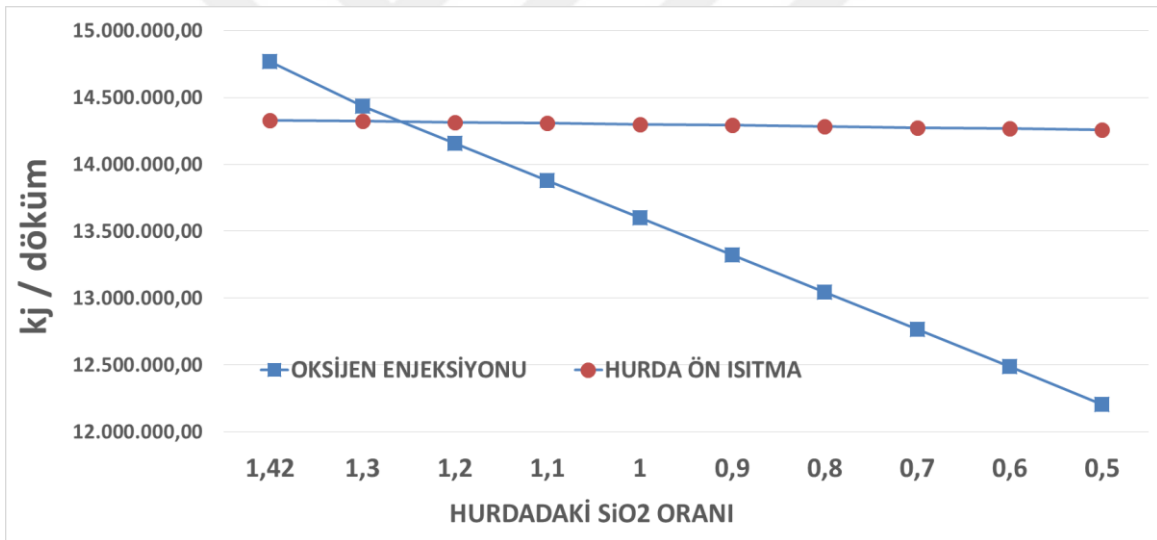
Şekil 9.10. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesinin çıkan cüruf için harcanan enerji miktarına etkisi



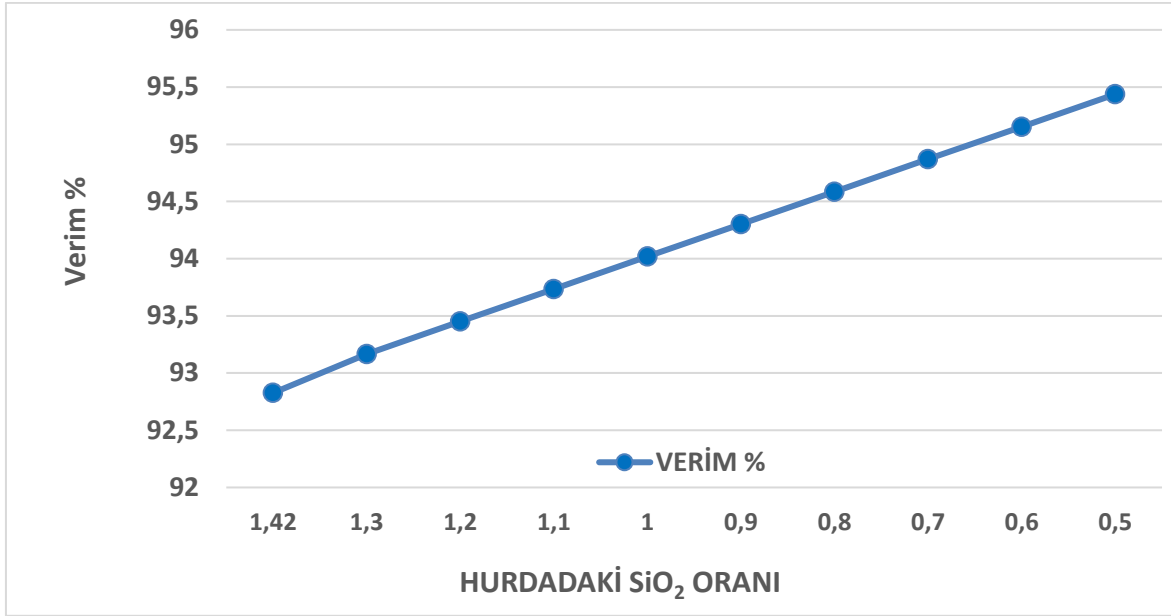
Şekil 9.11. Sabit baziklik oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesinin çıkan sıvı çelik için harcanan enerji miktarına etkisi



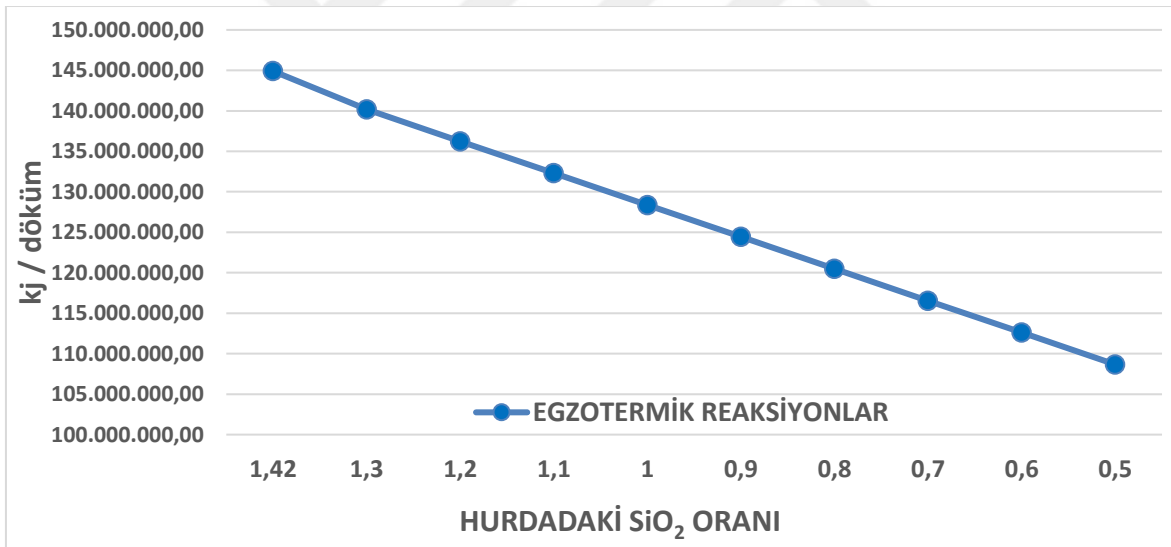
Şekil 9.12. Sabit bazıklık oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesinin elektrik tüketimine etkisi



Şekil 9.13. Sabit bazıklık oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesinin oksijen enjeksiyonu ve hurda ön ısıtma enerjisine etkisi



Şekil 9.14. Sabit bazıklık oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesinin sistem verimine Etkisi



Şekil 9.15. Sabit bazıklık oranında hurdadaki değişken SiO₂ yüzdesinin ekzotermik reaksiyonların enerjisine etkisi

Yukardaki grafikler ışığında hurda içerisindeki silisyum oranı azaltıldığında sıvı çelik miktarını 98 tonlara kadar çıkardığı, çıkan curuf kütlelerinin 6 tonlara kadar düştüğü ve tüketilen kireç miktarının 2 tonlara kadar düştüğü, curuf için harcanan enerjinin 8 GJ'a kadar düştüğü, sıvı çelik için harcanan enerjinin 223 GJ'a kadar çıktığı, tüketilen elektrik enerjisinin 160 GJ'a kadar çıktığı, hurda ön ısıtma enerjisinin pek değişmediği ancak oksijen tüketim enerjisinin 12 GJ'a kadar düştüğü, kütleli verimin %95'lere kadar çıktığı ve

ekzotermik reaksiyon enerjisinin 110 GJ'a kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu optimizasyon ışığında baziklik oranının 2,3'e çok yaklaşmadığı durumda hurdadaki silisyum oranının gereken düzeyde azaltmak elektrik enerjisini belli kademedede arttırarak sistem veriminde artış sağlanmaktadır. Hurda içerisindeki silisyum oranı azaldığında oksijen ile tepkime oranı da azalacağı için doğru orantılı olarak ekzotermik reaksiyonların enerjisinin de azaldığı görülmektedir. Bunun sonucunda da ısı enerjisini sağlayacak olan diğer parametre olan elektrik enerjisine ihtiyaç duyulacağından elektrik tüketimi artmıştır.



10. SONUÇLAR

Bir demir çelik sektöründe hurdanın ergitilmesi için kullanılmakta olan bir elektrik ark ocağının mevcut durumdaki kütle ve enerji bazında dengesinin incelendiği bu çalışmada mevcut durum analizlerinden elde edilen veriler ışığında sistemin öncelikle değişen baziklik oranında, son olarak da en iyi sonuçların elde edildiği baziklik oranı sabit kabul edilerek, hurda içerisindeki değişen silisyum oranlarında optimizasyonu yapılmıştır.

Baziklik oranına göre sistemde kullanılan malzemelerin sarfiyatının kontrolü ile tasarruflara gidilebileceği vurgulanmıştır. Elde edilen değerler dikkate alındığında minimum kireç ve cüruf oranının 1,8 baziklik oranında olduğu ve yine bu baziklik oranında enerji tüketiminin en fazla olduğu görülmektedir. Çünkü 1,8 baziklik oranında ekzotermik reaksiyonların enerjisi düşüktür. Isı açığa çıkaran ekzotermik reaksiyon enerjisinin eksikliğinin yerini elektrik enerjisi ile sistem dengelemek isteyeceğinden elektrik enerjisi bu aşamada yüksektir. Baziklik oranı artışı ile cüruf miktarı artmakta ve cüruf içindeki demir oksit miktarı artmaktadır. Demir oksit miktarının artışı ekzotermik reaksiyon enerji miktarının artmasına sebep olacaktır. Aynı zamanda demir oksit miktarının artışı sıvı çelik içindeki demir miktarını azaltacağından sıvı çelik miktarı azalacaktır. Sonuç olarak baziklik oranının 2,3 değerine yaklaşması ile kullanılan kireç ve çıkan cüruf miktarında artış gözlenirken tüketilen elektrik enerjisi ve verimde azalma görülmektedir.

Toprağı iyi elenmiş ve silisyum oranı düşük hurdanın kullanılması cüruf içindeki SiO_2 oranını azaltacaktır. İyi bir eleme ve kaliteli hurda seçimi ile silisyum kütle yüzdesinin %0,5'e kadar düşürülebileceği öngörülmüş ve hurda içerisindeki silisyumun kütle oranının %1,42 den %0,5'e düşürülmesi durumunda giren kireç kütlesi ve çıkan cüruf kütlesinin azaldığı, tüketilen elektrik enerjisinin ve verimin de arttığı gözlemlenmiştir. Hurda içindeki silisyum oranı düştüğünde oksijen ile reaksiyon da azalacağından ekzotermik reaksiyonların enerjisi düşer. Isı enerjisi açığını elektrik enerjisi kapatacağından elektrik tüketimi artar. Cüruf miktarının azalması da sıvı çelik miktarını arttıracığından bu durum da verimi arttıracaktır.

Hurda içerisindeki silisyum miktarının azaltılması ile elde edilen yüksek verim ve kireç miktarındaki tasarruf gözönünde bulundurulduğunda sisteme temiz hurda verilmesi için kullanılan hurda eleme tesislerinin mevcut durumda optimum faydayı sağlayamadığı, bu

nedenle bu tesislerin hurda içerisindeki toprağı daha iyi eleyerek silisyum oranını azaltacak düzeyde iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Kırma eleme tesisleri ile cüruf içerisindeki demir oksit içerisindeki demir tekrar sisteme kazandırılarak sistem verimi iyileştirilebilir. Bu nedenle EAO'larında verimin artırılması için, cüruf içerisindeki demiri tekrar sisteme kazandırmada kullanılmakta olan kırma eleme tesislerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.



REFERANSLAR

1. DONG, Liang, et al. Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuzhou and Jinan. *Journal of cleaner production*, 2013, 59: 226-238.
2. PAULIUK, Stefan; WANG, Tao; MÜLLER, Daniel B. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 71: 22-30.
3. CAMPATELLI, Gianni; LORENZINI, Lorenzo; SCIPPA, Antonio. Optimization of process parameters using a response surface method for minimizing power consumption in the milling of carbon steel. *Journal of cleaner production*, 2014, 66: 309-316.
4. LIN, Boqiang; WANG, Xiaolei. Exploring energy efficiency in China's iron and steel industry: A stochastic frontier approach. *Energy Policy*, 2014, 72: 87-96.
5. ZHANG, Hui, et al. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. *Applied energy*, 2013, 112: 956-966.
6. LU, Biao, et al. An energy intensity optimization model for production system in iron and steel industry. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 285-295.
7. WANG, Fengyang, et al. Mercury mass flow in iron and steel production process and its implications for mercury emission control. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 43: 293-301.
8. OLMEZ, Gulnur Maden, et al. The environmental impacts of iron and steel industry: a life cycle assessment study. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 130: 195-201.
9. ZHANG, Qi, et al. Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry. *Applied energy*, 2017, 191: 502-520.
10. PAN, Hengyu, et al. Sustainability evaluation of a steel production system in China based on emergy. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1498-1509.
11. PAN, Shu-Yuan, et al. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO₂ fixation via accelerated carbonation. *Journal of cleaner production*, 2016, 137: 617-631.
12. Çevik B (2017) Iron Steel Sector. From Turkey İş Bank, Department of Economic Research, Publication(2017):
https://ekonomi.isbank.com.tr/UserFiles/pdf/sr201703_demir_celik.pdf
13. LEE, H.; SOHN, I. Global scrap trading outlook analysis for steel sustainability. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2015, 1.1: 39-52.
14. MOSIT (Republic of Turkey Ministry of Science, Industry and Technology) (2013), Sectoral Reports and Analysis Series -Iron and Steel Sector Report 2013/1: <http://www.sanayi.gov.tr/Files/Documents/demir-celik-sektor-raporu-16042013164815.pdf> (accessed Nov 9, 2013)

15. HE, Kun; WANG, Li. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 1022-1039.
16. Anaç S & Tamzok N (2007) The mining industry of Turkey. *Proceedings of the 2nd Balkan Mining Congress, Belgrade, 10-13 September*, pp. 37-43, Serbia
17. Worrell E (1995) Advanced technologies and energy efficiency in the iron and steel industry in China. *Energy for Sustainable Development*, 2(4): 27-40.
18. MOHSEN, Mousa S.; AKASH, Bilal A. Energy analysis of the steel making industry. *International Journal of Energy Research*, 1998, 22.12: 1049-1054.
19. ÇAMDALI, Ünal; TUNÇ, Murat; KARAKAŞ, Ahmet. Second law analysis of thermodynamics in the electric arc furnace at a steel producing company. *Energy conversion and management*, 2003, 44.6: 961-973.
20. KIRSCHEN, Marcus; RISONARTA, Victor; PFEIFER, Herbert. Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry. *Energy*, 2009, 34.9: 1065-1072.
21. CHAN, David Yih-Liang, et al. The case study of furnace use and energy conservation in iron and steel industry. *Energy*, 2010, 35.4: 1665-1670.
22. TREJO, Eder, et al. A novel estimation of electrical and cooling losses in electric arc furnaces. *Energy*, 2012, 42.1: 446-456.
23. PFEIFER, H.; KIRSCHEN, M.; SIMOES, J. P. Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand. In: *IOM3 Conference Proceedings, 8th European Electric Steelmaking Conference, Birmingham, England, May. 2005*. p. 9-11.
24. ÇAMDALI, Ü. Elektrik Ark Fırını Yöntemi ile Çelik Üretin Bir Tesiste Termodinamiğin İkinci Kanununun Analizi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 1998
25. Ekmekçi, İ., Yetisken, Y., Çamdali, Ü. Mass balance modeling for electric arc furnace and ladle furnace system in steelmaking facility in Turkey. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 14(5) (2007) 155-6.
26. Ito, K., Fruehan, R.J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results. *Metallurgical Transactions B*, 20(4) (1989) 509-514
27. Ito, K., Fruehan, R.J. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part II. Dimensional analysis and foaming in iron and steelmaking processes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 20(4) (1989) 515-521.
28. Kwong, K.S., Bennett, J.P. (2002) Recycling practices of spent MgO-C refractories. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 1(DOE/ARC-2002-019).

29. Pretorius, E.B., Carlisle, R.C. Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking. *Iron and Steelmaker (USA)*, 26(10) (1999) 79-88.
30. AKMAN, E. Dünyada ve Türkiye’de Demir Çelik Sektörü ve Türk Demir Çelik Sektörünün Rekabet Gücü’. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 2007.
31. T.C. BİLİM, SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI. Demir Çelik Sektörü Raporu (2013/1) Sektörel raporlar ve analizler serisi.
32. ÇAMDALI, Ünal; MURAT, T. U. N. Ç. ELEKTRİK ARK FIRININDA FİZİKSEL EKSERJİ POTANSİYELİNİN VE VERİMİNİN ELDE EDİLMESİ. 2004.
33. Vogler, J., & Reins, D. Technical Paper 10 - Understanding Scrap Metal Recycling. [cited 2017 Oct 21]. Available from: http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABC938.pdf.
34. LIAPIS, Ioannis; PAPAYIANNI, Ioanna. Advances in chemical and physical properties of electric arc furnace carbon steel slag by hot stage processing and mineral mixing. *Journal of hazardous materials*, 2015, 283: 89-97.
35. <https://webbook.nist.gov/chemistry/>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZDEŞ, Enver Onur
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.03.1987, İskenderun
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (532) 796 87 32
 Faks :
 e-mail : onur.ozdes@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2018
Lisans	Çukurova Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2009
Lise	İskenderun lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	TOSYALI TOYO ÇELİK A.Ş.	Mühendis
2011-2015	YAZICI DEMİR ÇELİK A.Ş.	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

Özdeş O., Yağlı H., Baltacıoğlu E., Koç Y., Koç A. (2017). Demir çelik endüstrisindeki elektrik ark ocaklarının kimyasal bileşimine dayalı kütle analizi. *Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Kocaeli. Mayıs 2017, pp. 613-614.

Hobiler

Yüzme

DİZİN

A

Atık enerji · 2

B

bazıklık · i, ix, xiii, xiv, 2, 4, 9, 18, 20, 21, 57, 60, 61, 62,
63, 64, 65, 66, 67

BOF · xvi, 1, 6, 8

C

cüruf · i, 2, 4, 8, 9, 14, 18, 20, 21, 25, 57, 58, 60, 61, 62,
63, 67, 68

Cüruf · vii, viii, x, 8, 18, 41, 44, 61

Ç

Çelik · vi, xiii, 1, 4, 6, 7, 13, 17, 26, 70, 71

E

EAF · i, 1, 4, 6, 8, 9, 16, 70

EAO · vi, vii, x, xiii, xvi, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 23, 24,
27, 56, 61, 68

elektrik ark ocakları · 1, 3, 22, 23

enerji · i, ii, vii, viii, ix, xi, xii, xiv, 1, 2, 3, 4, 5, 15, 18, 19,
20, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 33, 35, 43, 44,
45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 60,
61, 63, 67, 68

Enerji · i, ix, xvi, 2, 3, 23, 25, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 51,
52, 53, 54, 55, 56

H

hurda · i, xiv, xvi, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 18,
19, 22, 24, 33, 61, 64, 65, 67, 68, 74

K

kimyasal · i, vi, vii, viii, x, xi, xiii, 2, 4, 8, 10, 12, 13, 14,
15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 35, 36, 37, 38, 39, 43,
44, 45, 57, 67

kireç · i, vi, xiii, xiv, 8, 9, 14, 18, 21, 22, 57, 60, 61, 62,
65, 67

kütle · i, ii, vii, viii, ix, x, xiv, xvi, 2, 4, 16, 21, 35, 36, 37,
38, 39, 40, 41, 42, 57, 61, 62



TEKNOVERSİTE





teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

