
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 18.01.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 16.03.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.286303	

EAO'daki enerji kaynaklarının HAD simülasyonu

Ekrem Büyükkaya¹

ÖZ

Bu makalede, Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak, karbon yanması ve elektrik ark ile olan enerji üretiminin ve ısı geçişinin modellenmesi yapılmıştır. Hurdanın EAO içerisinde brülörle ısıtılması sırasında gerçekleşen karbon yanması ve elektrik ark radyasyonu ile oluşan ısı enerjisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu nedenle modelleme çalışmalarında karbon partiküllerin ve elektrottan yayılan radyasyonun yanma reaksiyonlarından yararlanılmıştır. Öncelikle partikül yüzeyi ve gaz reaksiyonları, enjekte edilen karbonun yanması irdelenmiştir. Brülör çıkışında kimyasal reaksiyon sonucu, oluşan yanma esnasında çekirdek sıcaklığının yaklaşık 3000 K değerindedir. Cüruf üzerine etki eden sıcaklığın ise 2200 K mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Radyasyon sıcaklığı elektrotların altında kalan bölgede en yüksek olduğu ve eriyiğin döküldüğü uç kısımla yüklemenin yapıldığı bölgede 1850 K mertebelerine düştüğü belirlenmiştir. Sabit çalışma koşullarında, elektrik enerjisinin % 5.5 civarında elektrotlar tarafından absorbe edildiği görülmüştür. Bu çalışma sonucunda, tasarım aşamasındaki bir elektrik ark ocağı için yanma ve radyasyon ile enerji üretiminin ve ısı geçişinin modellenmesi için HAD yazılımının kullanılabilceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrik ark ocağı (EAO), hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Karbon Yanması, Radyasyon Enerjisi

CFD simulation of energy sources in EAF

ABSTRACT

Modeling of energy production and heat transfer by carbon combustion and electrical arc is performed using Fluent computational fluid dynamic (CFD) software in this manuscript. The heat energy generated by carbon burning and electric arc radiation during combustion of the scrap in the EAO has been examined in detail. For this reason, modeling studies have utilized the combustion reactions of carbon particles and electromagnetically emitted radiation. Firstly, particle surface and gas reactions are investigated in terms of injected carbon burning. The result of the chemical reaction at the burner outlet is about 3000 K of the core temperature during combustion. It has been determined that the temperature which acts on the slag is 2200 K. The radiation temperature was found to be highest in the area under the electrodes and fell to 1850 K in the area where the melt was poured. Under steady operating conditions, it was seen that electric energy was absorbed by about 5.5% of the electrodes. As a result of this study, CFD software can be used to model combustion and radiation and energy generation and heat transfer for an electric arc furnace at the design study.

Keywords: Elektrik arc furnace (EAF), Computational fluid mechanic (CFD), Carbon Combustion, Radiation Energy

¹ SAÜ. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 54187 Esentepe-Kampüs/Sakarya

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayi tipi elektrik ark ocağındaki (EAO) hurdanın, ergime sıcaklığına çıkarılabilmesi için büyük miktarda kimyasal enerjiye ve elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Dünya çelik üretiminin yaklaşık %30'u EAO' lı tesislerde yapılmaktadır. Ülkemizde toplam çelik üretiminin yaklaşık dörtte üçü ark ocağına sahip tesislerde, geri kalanı ise demir-çelik üretimi yapan tesisler tarafından üretilmektedir. [1,2]. Yüksek kapasiteli modern bir ocak her yüklemde maksimum 350 tona kadar hurda işleyebilir. Bu işlem yaklaşık 50-60 dakika sürer ve EAO'da üretilen her ton çelik için yaklaşık 6-8 GJ enerji tüketilir. Bu tüketim entegre tesislerde yapılan çelik üretimi esnasındaki tüketimin yarısı olmakla birlikte 100000 nüfuslu bir şehrin elektrik enerjisi tüketimine eşdeğerdir. Dünyada toplam çelik üretim kapasitesi yaklaşık 1.5 milyar ton/yıl olduğu düşünüldüğünde küçümsenmeyecek kadar yüksek enerji tüketimlerinin olduğu görülmektedir. 2015 yılında, Türkiye'nin çelik ürünlerindeki toplam tüketimi, 2014'e göre %20.1 artmıştır. 2017 yılına gelindiğinde, çelik ürünleri üretiminin %12, tüketiminin ise %8 artış göstereceği tahmin edilmektedir. [2]. Enerjiyi oldukça fazla kullanan demir çelik sektörünün, sanayinin enerji tüketimi içerisindeki payı %22 iken Türkiye'nin toplam enerji tüketimi içerisindeki payı ortalama %5 mertebelerindedir [1, 2].

Demir çelik sektörü kapsamında yapılan istatistiklerden de görüleceği üzere her geçen yıl çelik üretimi artmaktadır. Bu durum, birim üretim başına tüketilen enerji miktarının azaltılması yönünde önemli çalışmaların yapılmasını zorunlu kılmıştır. Çelik üretiminin her yıl artmasıyla birlikte, birim üretim başına harcanan enerji miktarının azaltılması yönünde yapılan çalışmalar, sektörde harcanan enerjinin büyüklüğü göz önüne alındığında bir hayli önem kazanmaktadır. Çünkü çelik üretiminde kullanılan enerjinin yaklaşık %50'si çeşitli nedenlerle kullanılabilir enerji açısından kayıp olarak harcanmaktadır [3].

EAO' ların daha az elektrik enerjisiyle ve daha verimli yanma stratejisi ile çalışmasını sağlamak, kaynakların verimli kullanılması açısından önemlidir. Demir çelik sektörü için de ergitme süresini azaltan ve ergitme için ton başına maliyeti düşüren çözümler vardır. Bununla birlikte EAO' ların verimlerini arttırmak için kimyasal enerjiden daha fazla faydalanılması ve istenilen

anda yüksek gücün elde edilebilmesi gerekir. Bunun için ergitme işlemi esnasında ilave edilen hurda malzemesinin enerji kaybına sebep olmadan ocak içerisine yüklenebilmesi, ön ısıtmayı sağlayan brülör sayısının, konumunun ve enjektör püskürtme açılarının belirlenmesi, ocak içerisindeki sıvı akışkanın hızlı ve ideal şartlarda boşaltılması gibi faktörlerin ön planda tutulması gerekir. EAO da enerji dengesi gereği yaklaşık %60-65'lik bir enerjiyi elektrik enerjisi oluşturmaktadır. %30-35 lik kısmı ise kimyasal enerji ile sisteme giren enerjidir. Burada kapağın açılmaması ve karbon enjeksiyonu ile köpüklü cüruf ile çalışılması durumunda elektrik enerjisi yerine kimyasal enerjide %4-5'lik bir artış sağlandığı bilinmektedir [4]. Elektrik enerjisinin ise yüksek bir bölümü hurdayı ergitirken harcanmaktadır. Elektrik enerjisindeki tasarruf ancak ocakta ergime sağlanıp elektrotlar cürufa gömülü çalışırkenki elektrik enerjisinden kimyasal enerji miktarının arttırılması ile sisteme ekstra enerji girdisi yaparak sağlanabilir. EAO'nda kimyasal enerji ile enerji girdisinin ancak %30-35'ı sağlanabilmektedir.

Büyük hacimli ve endüstriyel amaçlı EAO için deneysel düzeneklerin kurulmasının zorluğu, ticari amaçlı EAO üretiminin çok maliyetli olması ve uzun sürmesi gibi nedenlerle tasarımın geliştirilmesi için modelleme yapılması önem arz etmektedir. Bu kapsamda yapılmış literatür çalışmaları incelendiğinde ark ocaklarına yönelik nümerik çalışmaların azlığı dikkati çekerken EAO' ye ait deney düzenekleri kapsamlı ve çok pahalı olduğundan dolayı açık literatürde pratiğe yönelik deneysel çalışmaya hiç rastlanılmamıştır.

Kompleks fiziksel olayların hesaplanmasında HAD yönteminin kullanımının yaygınlaşmaya başladığı yıllarda EAO üzerine yapılan ilk çalışmalar Ushio ve ark. [5] ve daha sonra Szekely ve ark. [6] tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında EAO sistemini ark ve hazne bölgelerini Navier Stokes, enerji korunumu ve Maxwell denklemlerini kullanarak modellemişlerdir. Farklı ısı transferi modellerini kullanarak arktan hazneye doğru olan enerji geçişini HAD ile ilk modelleyen araştırmacılarıdır. Alexis ve diğerleri [7] EAO sisteminde plazma sıcaklığı, basınç ve hızı hesaplamak için enerji, kütle ve momentum korunum denklemleri ile birlikte Maxwell denklemlerini kullanarak çözmüşlerdir. Yaptıkları sayısal çözümlerden arktan çıkan enerjinin %18 'inin doğrudan metal hazneye ulaştığını ayrıca %2'lik bir kısmında elektrot tarafından absorbe

edildiği, geri kalan %80'lik kısmın ise radyasyon enerjisi olarak EAO içerisine yayıldığını belirtmişlerdir. Sunulan projemizde EAO' de termokimyasal olaylar sonucu ortaya çıkan enerjinin tespiti için önceki çalışmalardan farklı olarak detaylı bir yanma simülasyonu yapılacaktır. Yanma, sistem içerisine giren gerçek yakıt ve hava miktarlarının yanma reaksiyonları kullanılarak oluşturulacaktır.

Li ve Fruehan [8] çalışmalarında üç adet elektrodun bulunduğu fakat haznenin modele eklenmediği silindirik bir EAO için üç boyutlu model kullanmışlardır. Bu model üzerinden detaylı bir HAD analizi ile EAO'larda yanma sorası reaksiyonlarını, akış, radyasyon ve konvektif ısı geçişini aynı anda çözmeyi başarmışlardır. HAD analizi sonucunda sistem içerisine giren enerjinin büyük kısmının radyasyon (EAO yan duvarları ve üst kapak) ve baca gazları ile sistemden çıktığını ayrıntılı sayısal verilerle tespit etmişlerdir. Baca gazları ile sistem dışarısına çıkan enerjinin, üretilen toplam enerjinin %30'u olduğunu tespit etmişlerdir. Toplam enerjinin %12'lik kısmının radyasyon enerjisi olarak metal eriğine aktarıldığını, %56'lık kısmının radyasyon ile EAO yan ve üst duvarlarına geçtiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmada, sıvı cüruf yada elektrotlardaki CO₂ ve C arasında reaksiyona giren radyasyon, ısı iletimi, son yanma reaksiyonları ve sonrasındaki yanma reaksiyonu simüle etmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında, elektrik arkından radyasyonla ısı iletiminin EAF'deki metal karışımını eritmek için önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [4].

Guo and Irons [9] tipik bir endüstriyel EAO içerisindeki radyasyon enerjisi dağılımını tespit etmek için 3 boyutlu bir model üzerinde HAD yöntemini kullanmışlardır. Modelledikleri EAO geometrisi silindirik bir üst gövde içinde üç adet elektrik ark kaynağı ve alt kısmı silindirik bir gövdeye bağlı hazneden oluşmaktadır. Radyasyon enerjisinin cüruf içindeki dağılımını belirlemek için 3 boyutlu modele cüruf hacmini de eklemişlerdir. Yaptıkları modelleme çalışması ile yan çeper yansıtıcıları, su ile soğutulan yan yüzeyler ve ocak çatısındaki radyasyon enerjisi dağılımını tespit etmişlerdir. Sayısal hesaplamaların sonucunda grafit elektrotların en yüksek ortalama sıcaklığının 3600 K olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca elektrotlardan iletimde olan ısı kaybının toplam elektrik enerjisinin % 0.3'lük bir kısmı olduğunu hesaplamışlardır. Guo'nun çalışmasına dayanarak, mevcut modelde ısı

transfer katsayıları, duvarların radyasyon yayılımı ve elektrik ark yüzeyleri üzerine bazı varsayımlar uygulanmıştır. Son yıllarda geliştirilen hesaplama yöntemleri, türbülans ve radyasyonun yanı sıra katı partikül (karbon) yanması ve buharlaşma gibi iç içe geçmiş fiziksel problemlerini de çözebilmektedir.

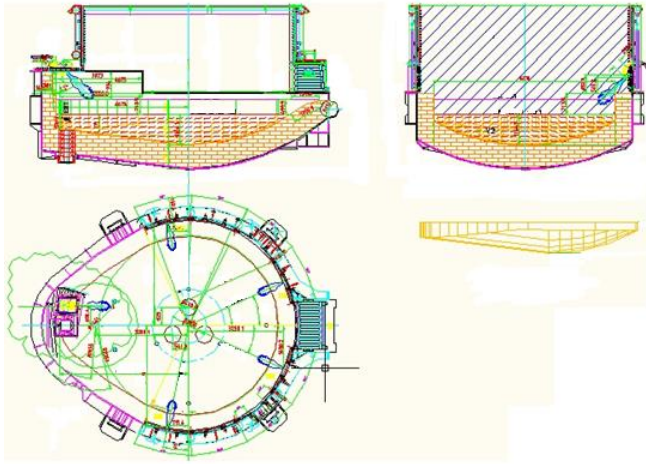
Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalara göre gerçek çalışma şartlarına yakın bir EAO simülasyon metodolojisi geliştirmek için HAD yazılımı kullanılmıştır. Bunun için özellikle karbon yanması ve radyasyon ısı aktarım işlemi için kapsamlı bir üç boyutlu HAD modeli geliştirmek amaçlanmıştır. Çünkü Guo ve Irons tarafından yapılmış çalışmadan farklı olarak cüruf kısmının da modele eklenerek radyasyon enerjisinin cüruf içindeki dağılımının incelenerek literatürdeki önemli bir açık kapatılmış olacaktır. Bunun için radyasyon çözümünün HAD yazılımında mevcut olan EAO radyasyonunu doğru ve hızlı bir şekilde çözdüğü bilinen P1 radyasyon modeli kullanılmıştır.

EAO için kapsamlı bir CFD modeli oluşturmak için önemli hedeflerden biri, simülasyonların doğruluğunu analiz etmek ve doğrulamak için enjekte edilen karbonun, elektrik ark radyasyonunun ve cüruf yüzey sıcaklık dağılımı önem arz eder. İyi cüruf köpük üretiminin sağlanabilmesi için CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir [8]. Bunun için püskürtülecek karbon ve oksijenin cüruf yüzeyi ile yaptığı açının doğru bir şekilde belirlenmesi ve brülör sayısının çok iyi ayarlanması gerekir. Bu modelde, enjektörlerin yeri ve/veya miktarı, enjeksiyon açısı, EAO'nun yanma odası boyutları, oksijen veya karbon içerikleri ve elektrotların ışınım oranları vbg. cüruf yüzeyi üzerinde hedeflenen sıcaklığa ulaşmak için değişkenlik gösterebilir. Bu kapsamda tasarım parametreleri üzerine model esneklik sağlar. Bu parametrelere yönelik bir HAD modeli, bir EAO'nda enerji tüketimini azaltmak için yanma ve elektrot ışınımının optimizasyonunu sağlayabilir. Böylece bu çalışma ile demir-çelik sektöründeki Ar-Ge amaçlı teorik çalışmalara öncülük edecek ve açık literatüre önemli bir katkı sağlanacaktır.

1. SAYISAL HESAPLAMA BÖLGESİNİN OLUŞTURULMASI (FORMING A NUMERICAL CALCULATION AREA)

2.1. EAO'nun geometrisi (Geometry of EAF)

Elektrik ark ocağı Ansys-Fluent 14/Design Modeler programı kullanılarak 3 boyutlu olarak çizildi. Ocağın boyutları CVS Makine San. ve Tic. A. Ş. tarafından verildi. Şekil 1'de EAO'nun üç görünüş resmi gösterilmektedir. Üç boyutlu modeli oluşturmak için EAO'nun iç boyutlarının yüksekliği 3505.25 mm, yarıçapı 3600 mm, cüruf yüzey yarıçapı 3080 mm, ark boyu 320 mm. ve elektrot yarıçapı 305 mm dir.

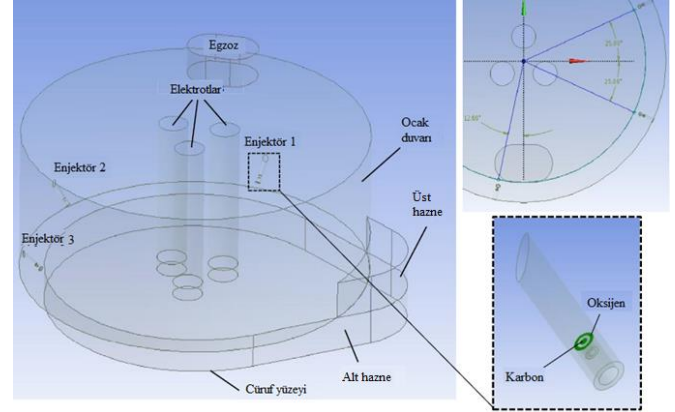


Şekil 1. Elektrik ark ocağının teknik resmi (Technical drawing of electric arc furnace)

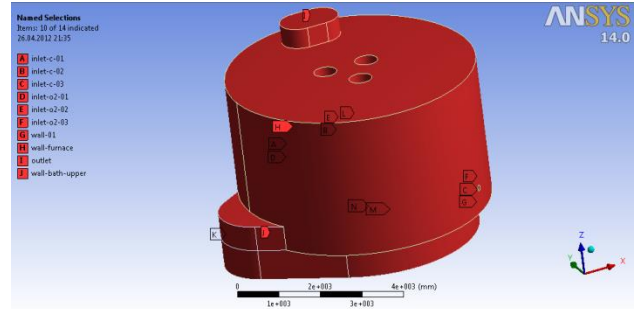
2.2. EAO'nun mesh yapısı ve sınır şartları (Mesh structure and boundary conditions of EAF)

Şekil 1'deki ölçüler temel alınarak çizilen hesaplama bölgesi, Şekil 2' de gösterilmektedir. Enjektörlerin x-y koordinatlarındaki açıları yine Şekil 2' de verilmiştir. (+) x eksenini üzerindeki açıları, enjektör 1 için 25° , enjektör 2 için -25° ve enjektör 3 için -102° olarak alınmıştır. Tüm enjektörler cüruf yüzeyinden 1.07 m yükseklikte olup 45° açı ile aşağı bakacak şekilde ayarlanmıştır. İyi cürufllu köpük üretiminin sağlanabilmesi için CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir [8]. Bunun için püskürtülecek karbon ve oksijenin cüruf yüzeyi ile yaptığı açının doğru bir şekilde belirlenmesi ve miktarlarının çok iyi ayarlanması gerekir. C ve O_2 , Şekil 2'de sağ altta gösterildiği gibi enjektör vasıtasıyla ocak içerisine gönderilmiştir. Modelin

ana amaçlarından biri, erimiş tabakanın üst yüzey sıcaklık dağılımını da elde etmektir. Modeli basitleştirmek için, hesaplamalı alanın alt yüzeyi, cüruf hacminin modellenmesi yerine cüruf yüzeyi olarak kabul edildi. Üç elektrotun alt yüzeyleri elektrik arkı üretir ve sabit ısı akışı ile enerjiyi yayar. Ocak duvarlarının iç yüzeylerini, bacanın üst ve yan duvarlarını içeren sınır koşullarının yerleri Şekil 3' de verilmiştir.



Şekil 2. Model için oluşturulan hesaplama bölgesi ve enjektör konum açıları (Calculation region and injector position angles for the model)



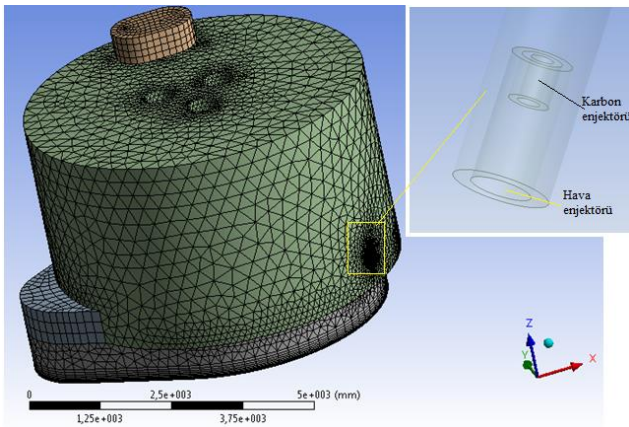
Şekil 3. Sınır şartları (Boundary conditions)

Modelleme çalışmalarında giriş hız değerine yönelik sınır şartları, hızın aksel doğrultudaki bileşeni dikkate alınırken brülör çıkışında radyal yöndeki hız bileşeni ihmal edilmiştir. Brülör çıkışındaki O_2 hızı 480 m/s, her bir brülörden saatte 1200 kg karbonun ocak içerisine girdiği ve ocak çıkışındaki gaz sıcaklığı ise 1873K alındı. Hız girişi ve çıkıştaki basınç için girilen sınır şartlarında türbülans tanımlama yöntemi olarak hidrolik çap ve türbülans yoğunluğu göz önünde bulunduruldu. EAO'nun yüzey sınır şartı için sabit sıcaklık değeri olarak 393K alındı ve elektrotların

alt kısmında 100 MW elektrik enerjisine karşılık gelen ısı akışı girişi tanımlandı. Cüruf yüzeyi üzerindeki ısı transferini göz önünde bulundurarak yüzey sınır koşulunda konveksiyon tanımlandı. Sonuçların doğruluğu açısından modelin ağ yapısı önem arz ettiğinden daha hassas hesaplamalara ihtiyaç duyulan cüruf yüzeyi, elektrotların çevresi ve brülör çıkışına yakın bölgelerdeki ağ dokusu diğer bölgelerdekilere göre daha küçük elemanlardan oluşturuldu (Şekil 4). Sayısal hesaplama sonucunda alınan değerlerin güvenilirliği ağ yapısının kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bundan dolayı, ağ yapısındaki çarpıklıklar incelendi ve kabul edilir aralıklarda olduğu tespit edildi. Tablo 1'de çarpıklık değerleri, boğum ve eleman sayıları verilmiştir.

Tablo 1. Ağ yapısındaki çarpıklık değerleri, boğum ve eleman sayıları (Distortion values of mesh structure, number of nodes and elements)

Boğum sayısı	93235
Eleman sayısı	450158
Min çarpıklık	8.6807e-05
Max çarpıklık	0.851639
Ortalama çarpıklık	0.243337
Standart sapma	0.136735



Şekil 4. Modelin ağ yapısı (Mesh structure of model)

3. EAO'NIN SAYISAL MODELİNİN OLUŞTURULMASI (FORMING THE NUMERICAL MODEL OF EAF)

Fluent yazılımı ile EAO'nun HAD modelinde; türbülanslı akış, yanma reaksiyonları, radyasyon ısı transferi ve diğer fiziksel olaylar için farklı matematiksel çözüm metotlarının kullanılması gerekmektedir. Literatürde bulunan EAO için yapılmış HAD çalışmalarında Launder ve ark.

[11], Fluent yazılımında bulunan P1 radyasyon modeli ile elektrotlardan kaynaklı ışımanın doğru ve hızlı bir şekilde çözebildiğini göstermişlerdir. Bu sebeple HAD modelinde elektrotlardan ve yanma reaksiyonlarından kaynaklı radyasyon için P1 radyasyon modeli kullanılmıştır.

Brülörlere giren akışın türbülans modeli için $k-\varepsilon$ modeli kullanıldı. Bu model, türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans harcanım oranını (ε) içeren yarı ampirik bir modeldir [10, 11]. Türbülans kinetik enerjisinin hesaplanması için aşağıdaki formül kullanıldı [12, 13].

$$k = 1.5(uI)^2 \quad (1)$$

u ; brülör çıkışındaki O_2 hızını, I ise türbülans yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$I = 0.16Re^{-1/8} \quad (2)$$

$k-\varepsilon$ modeli için türbülans harcanım oranı;

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4}(k^{3/2}/l) \quad (3)$$

ile ifade edilmektedir. Denklemdaki l boyut skalası ve C_μ model sabitidir. Boyut skalası sınır koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Hız girişi sınır koşulu için boyut skalası; [8].

$$l = 0.09L \quad (4)$$

ile hesaplanır. Denklemdaki L brülör çıkışının yarıçapıdır. Karbon partiküllerini taşıyan O_2 akışının oluşturulması için ayrı faz modeli (DPM) kullanıldı [4, 9, 10]. Enjeksiyon tipi olarak yüzey, partikül tipi için yanma seçildi. Karbon partiküllerinin boyutları Rosin-Rammler modeline göre belirlendi. Tablo 2'de partikül çapları verilmiştir. Karbon partiküllerinin yörüngeleri gaz faz içerisinde rastgele olarak hesaplandı.

Tablo 2. Rosin-Rammler modelinde tanımlanan partikül boyutları (Particle sizes defined in the Rosin-Rammler model)

Min çap (m)	Max çap (m)	Ortalama çap (m)	Yayılma parametresi
70e-06	200e-06	134e-06	4.52

Yörüngeler, karbon partiküllerinin üzerine kuvvet dengesi uygulanarak hesaplanabilir. Bu kuvvet dengesindeki karbon partikülüne etki eden atalet

kuvveti olarak yerçekimi, kayma ve dış zorlayıcı kuvvetlerle dengelendiği kabulü yapılmıştır [10].

$$\frac{d\vec{u}_d}{dt} = F_D(\vec{u}_h - \vec{u}_d) + \frac{\vec{g}(\rho_d - \rho_h)}{\rho_d} + \vec{F} \quad (5)$$

Denklemdaki u_h gaz fazın (O_2) hızı, u_d ayrık fazın (karbon partikülü) hızıdır. ρ_h : O_2 'nin yoğunluğu, ρ_d : karbon partikül yoğunluğu, g : yerçekimi ivmesi ve F : zorlayıcı dış kuvvetler ile ifade edilmiştir. F_D kayma kuvvetinin formülü aşağıda verilmiştir [10].

$$F_D = \frac{18\mu_d C_D Re}{\rho_d d^2 24} \quad (6)$$

Denklemdaki Reynold sayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$Re = \frac{\rho_h d |u_d - u_h|}{\mu_h} \quad (7)$$

Denklemdaki C_D kayma katsayısı olup Reynold sayısının bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır [14].

Karbon partikülleri ile O_2 arasındaki reaksiyon Species Transport Modeli ile tanımlandı. Bu modelde volumetrik ve partikül yüzey reaksiyonları kullanıldı [15].

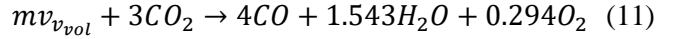
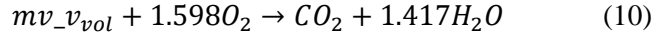
$$m_d c_p \frac{dT_d}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (8)$$

Partiküldeki tüm uçucu bileşenlerin uzaklaşmasından sonra, partikülün yanabilir kısmını tüketen bir yüzey reaksiyonu başlar. Bir yüzey reaksiyonu süresince partikülün ısı dengesi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [14].

$$m_d c_p \frac{dT_d}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} H_{reac} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (9)$$

Denklemdaki H_{reac} yüzey reaksiyonu ile salınan ısıdır. Modelde 4'ü volumetrik 3'ü partikül yüzeyinde olmak üzere 7 reaksiyon tanımlandı.

Volumetrik reaksiyonlar:



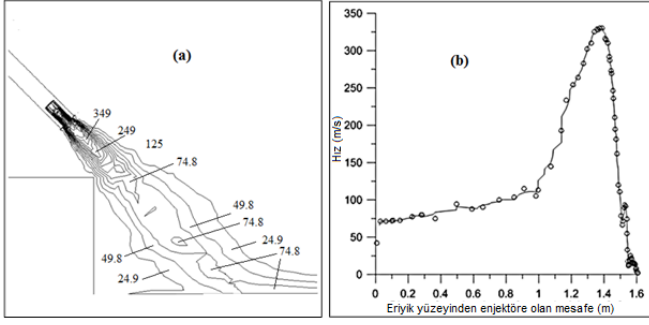
Partikül yüzeyindeki reaksiyonlar:



Nümerik çalışmalarda türbülans, radyasyon, akış, reaksiyon ve enerji denklemleri çözüldü. İlk olarak model I. dereceden sonlu farklar yöntemiyle çözümlendi. Analizin yakınsaması sonrasında elde edilen ilk çözüm modeline başlangıç koşulu olarak girildi. Model yeniden çalıştırılarak ikinci dereceden sonlu farklar çözümüne yönelik bir sayısal analiz yöntemiyle sonuçlar elde edildi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

1 nolu enjektörün merkezini kesen düzlem üzerindeki hız değerleri Şekil 5' de gösterilmiştir. Bu enjektörün hız profilleri Şekil 5'a da, cüruf yüzeyindeki hız grafiği ise Şekil 5'b de verilmiştir. Şekil 5b'de çizilen hız verileri, cüruf yüzeyinden enjektöre doğru olan düz bir çizgiden elde edilmiştir. Ocak içerisindeki O_2 kütle fraksiyonunun dağılımı gösterilmektedir. O_2 'nin brülör çıkışında 0.07 ve baca çıkışında 0.4 mertebelerinde olduğu görülmektedir. Ocak içerisinde ve cüruf yüzeyinde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda O_2 'nin tükendiği anlaşılmaktadır. Aynı şekilde O_2 akımı ve dış akış için hız değerleri 349 m/s maksimum değerinden sıfır değerine kadar düştüğü görülmüştür. Bu hız değerlerinin düşmesi karbon partikülleri ve gazların karışarak genişlemesinden kaynaklanmıştır. Türbülans ve yüksek sıcaklık yanma etkileri, hız değişimlerini daha büyük hacimleri genişletir. Cüruf yüzeyindeki hız değerleri ise yaklaşık 75 m/s civarında gerçekleşmiştir.

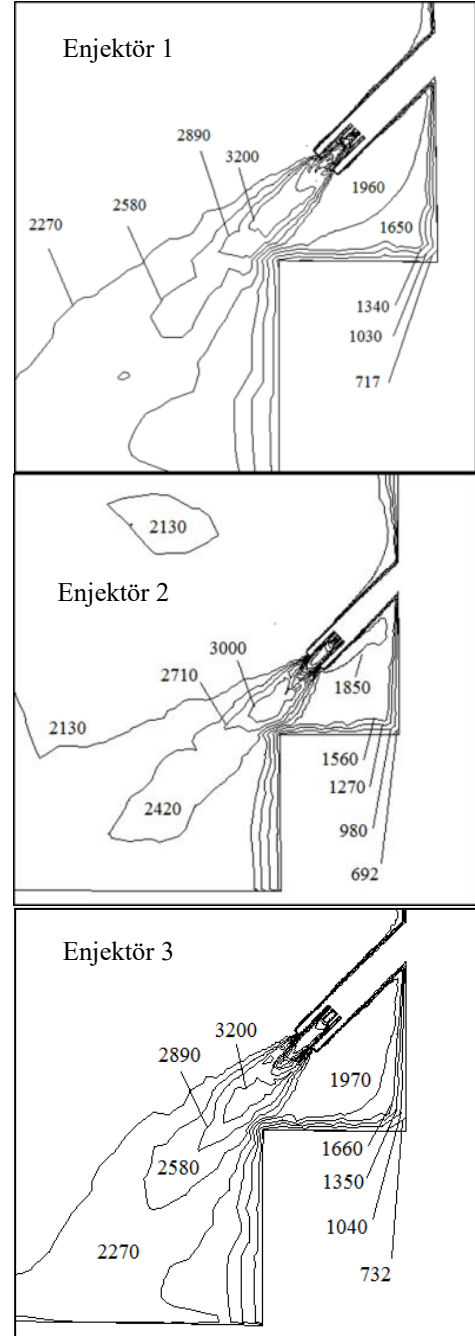


Şekil 5. Enjektör 1'le kesişen bir düzlem için hız (m/s) dağılımı; (a) hız profil eğrisi ve (b) Hızın, cüruf yüzeyinden enjektöre olan değişimi [16] (Velocity value to a plane intersection of the injector 1; (a) Distribution graph of velocity and (b) Variation with slag surface distance of the jet)

EAO içindeki yanma sıcaklık profilleri, enjektörlerin (Enjektör 1, 2 ve 3) merkezinden kesişen bir düzlem için Şekil 6' da sunulmuştur. Enjektör 1 ve 3 çıkışı sonrasında jet akış içerisindeki sıcaklık 2270 K ile 3200 K arasında olduğu görülmüştür. İki enjektör arasında yer alan 2 nolu enjektörün jet akışındaki maksimum yanma sıcaklığı ise 3000 K' dir. Minimum sıcaklık değerleri ise soğutulmuş ocak duvarlarından olan ısı geçişi nedeniyle ocak duvar yüzeylerine yakın yerlerde 692 K olarak belirlendi. Enjektör çıkışındaki maksimum yanma sıcaklıkları cüruf yüzeyi üzerinde 2200 K civarına düştüğü görülmüştür.

Elektrodun alt yüzeyinde tanımlanan radyasyon sıcaklık dağılımı Şekil 7' de verilmiştir. Ocak içerisindeki radyasyon sıcaklığı 2020 K ile 1840 K arasındadır. Sayısal hesaplamaların sonucunda elektrotların en yüksek ortalama sıcaklığının 2200 K olduğunu ve sabit çalışma koşullarında elektrik enerjinin en fazla % 5.5'inin elektrotlar tarafından absorbe edildiği görülmüştür. Bulunan sonuçlar Guo ve Irons tarafından yapılmış çalışmalar ile paralellik göstermektedir [9].

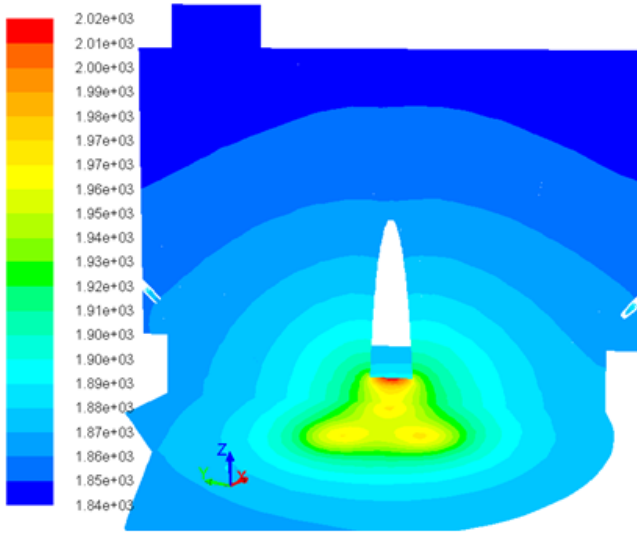
Şekil 8a, radyasyon ve EAF duvarları, cüruf yüzeyi ve bacadan taşınım ile olan ısı geçişini göstermektedir. Işınım ve yanma tarafından üretilen ısı sırasıyla 100.75 MW ve 5 MW'dir. Radyasyonun EAF duvarına ve tavana aktardığı ısı sırasıyla 65.190 ve 26.068 MW'dir. Şekil aynı zamanda 8964 MW ısı enerjisinin ışınım yoluyla metal cüruf yüzeyine iletilmesini göstermektedir. Ayrıca, bacadan olan ısı kaybı sadece 2348 MW'dir. Taşınım ile olan ısı kaybı, ışınım ile karşılaştırıldığında yüzdesel olarak çok düşük olduğundan ısı değişimini gösteren detaylı bir diyagram Şekil 8b'de verilmiştir.



Şekil 6. Ocaktaki üç enjektörün bir düzlem üzerindeki sıcaklık dağılımı (K) (Temperature distribution in a plane of three injectors from the furnace (K))

Çalışmalar sonunda radyasyon ile cüruf yüzeyine geçen ısı miktarı %9 olarak gerçekleştiği ve sonucun Li ve Fruehan'ın yaptığı çalışmadaki sonuç (%12) ile paralel olduğu görülmüştür. Bu durumda toplam enerjinin sadece yaklaşık %10'unun cüruf malzemesine aktarılabilirliğini göstermektedir. Aynı referans çalışmasında [8] radyasyon ile duvara iletilen enerji, toplam enerjinin %45'i iken bu çalışmada %65 değerlerinde gerçekleşmiştir. Bu fark, ocak duvarlarında daha düşük ve değişken termal koşulların uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Cüruf yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 9'de verilmiştir. Cüruf yüzeyi statik sıcaklık değişimi

1860 K ile 1970 K arasındadır ve cüruf yüzeyinin sıcaklığı çoğunlukla 1880 K civarında olduğu ve bu da erime sıcaklığının yaklaşık 1800 K'de tutulması demektir [9,11].



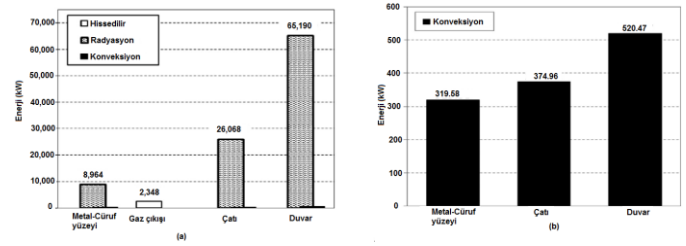
Radyasyon sıcaklık dağılımı (K)

Şekil 7. Bir elektroda ait radyasyon sıcaklık (K) dağılımı (The radiation temperature (K) distribution of an electrode)

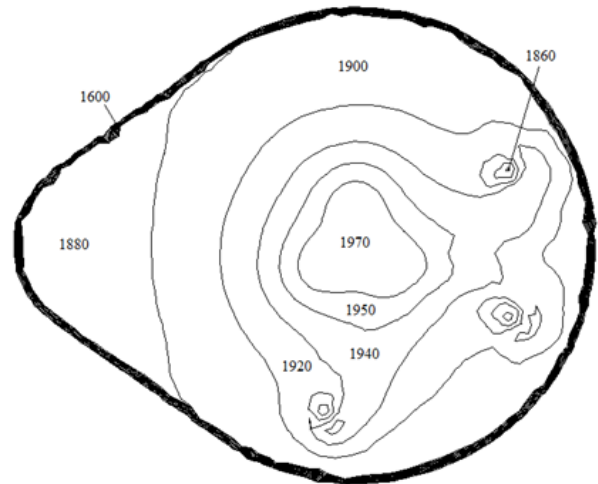
Çalışmalar sonunda radyasyon ile cüruf yüzeyine geçen ısı miktarı %9 olarak gerçekleştiği ve sonucun Li ve Fruehan'ın yaptığı çalışmadaki sonuç (%12) ile paralel olduğu görülmüştür. Bu durumda toplam enerjinin sadece yaklaşık %10'unun cüruf malzemesine aktarılabilirliğini göstermektedir. Aynı referans çalışmasında [8] radyasyon ile duvara iletilen enerji, toplam enerjinin %45'i iken bu çalışmada %65 değerlerinde gerçekleşmiştir. Bu fark, ocak duvarlarında daha düşük ve değişken termal koşulların uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Cüruf yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 9'de verilmiştir. Cüruf yüzeyi statik sıcaklık değişimi 1860 K ile 1970 K arasındadır ve cüruf yüzeyinin sıcaklığı çoğunlukla 1880 K civarında olduğu ve bu da erime sıcaklığının yaklaşık 1800 K'de tutulması demektir [9, 11].

Gerçek şartlarda 5 adet brülör çalışarak, eriyik banyosu oluşuna kadar çalışır ve sonrasında elektrotlar devreye girerek iki brülör tamamen durur. Sadece 3 brülör oksijen ve karbon enjekte etmeye devam ederek hem cüruf oluşumuna hem de elektrotlar ile birlikte enerji üretimine yardımcı olur. Bu işlem ocak içerisindeki malzemeyi tamamen sıvı eriyik ve cüruf oluşumuna kadar devam eder. Bu işlem sonrasında elektrot ile eriyik yüzeyi arasındaki ark boyu 38-48 cm aralığında olduğu ve iyi cürufllu köpük üretiminin

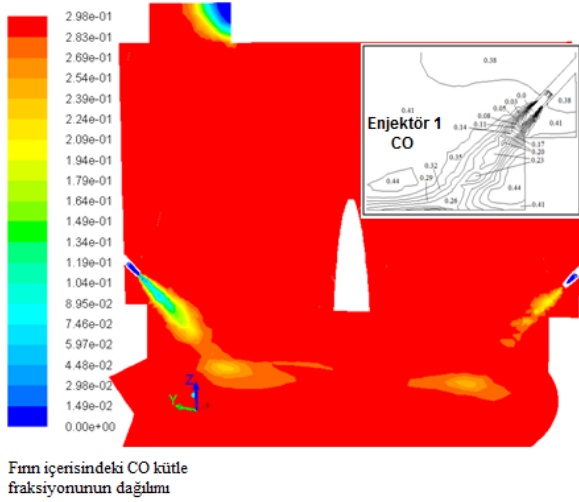
sağlanabilmesi için de CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir [8]. Bunun için püskürtülecek karbon ve oksijenin cüruf yüzeyi ile yaptığı açının doğru bir şekilde belirlenmesi ve yeterli brülör sayısının tespit edilmesi gerekir. Yeterli CO gazının oluşumuna yönelik ocak içerisine gönderilmesi gereken oksijen ve karbon miktarı için 3 adet brülör ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 6 ve Şekil 11). Yine 107 cm yüksekliğe konumlandırılmış brülörlerin köpüklü cüruf oluşumunu sağlaması için yapılan karbon enjeksiyonu, eriyik yüzeyi ile 30°-35°'lik, oksijen ise 42°-48°'lik bir açı aralığında püskürtülmesi ile en iyi CO değerleri elde edilmiştir. Şekil 10 ve 11'de, 1 nolu enjektör çevresindeki CO ve CO₂ kütle fraksiyon dağılımını göstermektedir. Bu enjektör için yanma reaksiyonları sonrası oluşan CO değeri cüruf yüzey difüzyonundan daha düşük olduğu, CO ve CO₂ kütle fraksiyonunun ocak içerisinde sırasıyla yaklaşık 0.298 ve 0.283 mertebelerinde olduğu görülmektedir.



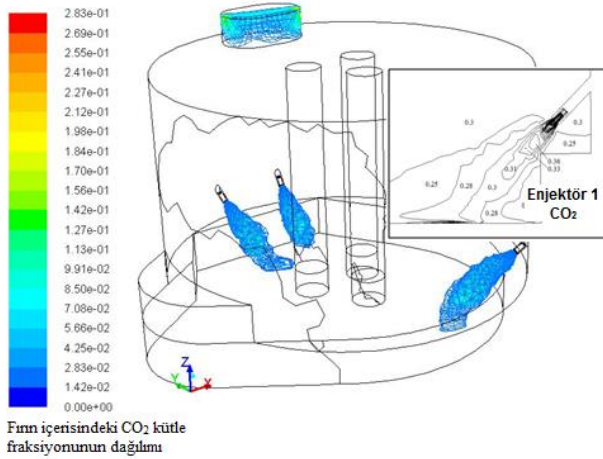
Şekil 8. Ocak içerisindeki taşınım, radyasyon ve atık gazdan elde edilen enerji değerleri [16] (Energy values obtained from transport, radiation and waste gas in the furnace)



Şekil 9. Cüruf yüzeyindeki statik sıcaklık dağılımı (Static temperature (K) on the slag surface.)



Şekil 10. Enjektör 1'in yanma alanındaki CO kütle fraksiyon dağılımı (CO mass fraction distribution in the combustion zone of the injector 1)



Şekil 11. Enjektör 1'in yanma alanındaki CO₂ kütle fraksiyon dağılımı (CO₂ mass fraction distribution in the combustion zone of the injector 1)

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, enjektörlerin konum ve açılarının optimizasyonuna yönelik enjektörün cüruf yüzeyi ile yaptığı açı, enjektörün EAO yan duvarları ile yaptığı açı ve enjektörün cüruf yüzeyinden itibaren olan yüksekliği gibi kritik öneme sahip brülör parametrelerinin belirlenmesine yönelik bir modelleme çalışması yapılmıştır. Böylece bir ark ocağı için kimyasal mekanizma ile karbon yanmasını ve elektrik ark radyasyonunu birlikte çözümlenerek sistemin tam güçte çalışması anında hazne içerisinde gerçekleşen olaylar incelenmiştir. Çalışmalarımız sonrasında;

1) Enjektörlerle sağlanan jet bölgesindeki yanma ile oluşan çekirdek sıcaklığının cüruf yüzeyindeki sıcaklık dağılımına olan etkisi ve karbon yanma reaksiyonları sonucu oluşan CO ve CO₂ gazlarının

EAO içerisindeki dağılımı görsel ve sayısal verilerle HAD modelleme ile ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Böylece cüruf yüzeyindeki toplam ve ortalama sıcaklık dağılımı, gerçek koşullarla uyumlu olduğu görülmüştür. Elektrotların tam altındaki metalin sıcaklığı, tamamen fırın kapasitesinin elektrotlara verilen akım ve elektrot çaplarıyla doğrudan ilişkili olduğu ve elektrot altındaki metal sıcaklık değerinin 3000 K civarında olması literatür çalışmaları ile de paralellik gösterdiği görülmüştür [7].

2) Elektrot ile eriyik yüzeyi arasındaki ark boyunun 38-48 cm aralığında olduğu ve iyi cüruf köpük üretiminin sağlanabilmesi için de CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir [8]. Yeterli CO gazının oluşumuna yönelik ocak içerisine gönderilmesi gereken oksijen ve karbon miktarı için 3 adet brülörün yeterli olduğu tespit edilmiştir. Yine 107 cm yüksekliğe konumlandırılmış brülörlerin köpüklü cüruf oluşumunu sağlaması için yapılan karbon enjeksiyonu, eriyik yüzeyi ile 30°-35°'lik, oksijen ise 42°-48°'lik bir açı ile püskürtülecek şekilde ayarlanması gerektiği görülmüştür.

3) EAO'nun yanma odası boyutlarına göre brülörlerin yeri ve/veya miktarı, oksijen ve karbon enjeksiyon açısı, oksijen ve karbon miktarları ve elektrotların ışınlam oranları vbg. değerler cüruf yüzeyi üzerinde hedeflenen sıcaklığa ulaşmak için değişkenlik gösterecektir. Büyük hacimli ve endüstriyel amaçlı EAO için deneysel düzeneklerin kurulmasının zorluğu, ticari amaçlı EAO üretiminin çok maliyetli olması ve uzun sürmesi gibi nedenlerle bu çalışma ile elde edilen tasarım parametreleri için literatürdeki açık kapatılmış olmakla birlikte, endüstrideki gerçek ocak içi yanma şartlarına daha gerçek yaklaşım olan cüruf hacmindeki sıcaklık dağılımı ve bu hacme aktarılan toplam enerjinin tespiti için veri ve sınır şartlarının elde edilmesi de açık literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır.

4) Aynı zamanda bu çalışma daha az tutarlılık gösteren sıfır boyutlu hesaplama yöntemleri için de alternatif bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem sonucunda EAO'larında ısı geçişinin önemli bir miktarının radyasyonla gerçekleştiği, cüruf yüzeyine geçen ısı EAO duvarlarına ve üst kısmına aktarılan ısıya kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR ACKNOWLEDGMENTS

Bu çalışmaya olan destekleri için CVS Teknoloji Firmasına teşekkür ederim.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Demir Çelik Sektörü Raporu," sayfa 7-8, 2014, www.dogaka.gov.tr
- [2] "Demir-çelik, demir-çelikten eşya sektörü İhracat Genel Müdürlüğü Maden," Metal ve Orman Ürünleri Daire Başkanlığı, sayfa 3-5, 2016.
- [3] Ü. Çamdalı, "Elektrik Ark Fırını Yöntemi ile Çelik Üretin Bir Tesiste Termodinamiğin İkinci Kanununun Analizi," İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1998.
- [4] J. Zhang, W. Prationa. L. Zhang, Z. Zhang, "Computational Fluid Dynamics Modeling on the Air-Firing and Oxy-fuel Combustion of Dried Victorian Brown Coal," *Energy Fuels*, vol. 27, pp. 4258-4269, 2013.
- [5] M. Ushio, J. Szekely, C.W. Chang, "Mathematical modelling of flow field and heat transfer of high current arc discharge", *Iron making and Steel making*, 8, 279–286.
- [6] J. Szekely, J. McKelliget, M. Choudhary, "Heat-transfer fluid flow and bath circulation in electric-arc furnaces and de plasma furnaces," *Ironmaking Steelmaking*, vol. 10, no. 4, pp. 169-179, 1983.
- [7] J. Alexis, M. Ramirez, G. Trapaga, P. Jonson, "Modeling of a DC electric arc furnace-Heat transfer from the arc," *ISIJ Int.*, no. 40, pp. 1089-1097, 2000.
- [8] Y. Li, R. Fruehan, "Computational fluid dynamics simulation of postcombustion in the electric arc furnace *Metallurgical and Materials Transactions*," vol. 34, no. 3, pp. 333-343, 2003.
- [9] D. Guo, G. Irons, "Modeling Of Radiation Intensity An EAF" in *Third international conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, , Melbourne, Australia, p.10-12, 2003.
- [10] ANSYS, Inc. FLUENT, Version 14.0; ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA., 2013.
- [11] B.E. Launder, D.B. Spalding, "Lectures in mathematical models of turbulence", Academic Press., London, England, 1972.
- [12] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, "An introduction to computational fluid dynamics," *Longman Scientific & Technical*, 1995.
- [13] S.V. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow", Taylor & Francis Inc, 2007.
- [14] S.A. Morsı, A.J. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55, no. 2, pp. 193-208, 1972.
- [15] I.B. Matveev, S.I. Serbin, "Modeling of the Coal Gasification Processes in a Hybrid Plasma Torch," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 35, no. 6, pp. 1639-1647, 2007.
- [16] C. Yigit, G. Coskun, E. Buyukkaya, U. Durmaz, H.R. Güven, "CFD modeling of carbon combustion and electrode radiation in an electric arc furnace", *Applied Thermal Engineering*, 90, 831-837, 2015