



تحلیل اکسرژی برای کوره قوس الکتریکی یک کارخانه تولید فولاد

اباذر دقایقی^۱، شاهین شمسی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده برق و کامپیوتر، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده برق و کامپیوتر، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

shaahinshams@gmail.com

چکیده :

در این تحقیق اکسرژی‌های شیمیایی و فیزیکی مواد ورودی و خروجی از کوره 65 تنی در یکی از کارخانه‌های فولاد کشور محاسبه گردید. با تحلیل صورت گرفته میزان تغییرات اکسرژی شیمیایی داخل کوره 42429 MJ و تخریب اکسرژی فرایند 93481 MJ بدست آمد. تلفات اکسرژی فیزیکی ناشی از گاز خارج شونده از کوره 4795 MJ محاسبه شد که فرصت مناسبی را برای بازیافت حرارت مهیا می‌سازد. در تحلیل انجام شده از چهار نوع راندمان اکسرژی مختلف موجود در ادبیات موضوع برای محاسبه راندمان استفاده گردید و مقادیر 37 و 26.3 و 51.8 و 36.8 برای راندمان‌ها حاصل شد که با توجه به ماهیت فرایند کوره استفاده از راندمان مربوط به مقادیر اکسرژی فیزیکی پیشنهاد گردید

کلید واژگان: اکسرژی، کوره های قوس الکتریکی، تولید فولاد

Exergy Analysis for AC Electric Arc Furnace of an Steel Production Factory

Abazar Daghayeghi¹ - Shahin Shamsi²

1- MSc Student, Mechanical Eng. Group, Department of Electrical and Computer Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

2- Assistant Prof. Mechanical Eng. Group, Department of Electrical and Computer Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

†Corresponding Author Email: shaahinshams@gmail.com

Abstract:

In this research chemical and physical exergies of materials going into and out of the electric arc furnace of 65 Ton were calculated for one of the steel production industries in Iran. The amounts of chemical exergy change and exergy destruction of the process were obtained 42429 MJ and 93481 MJ respectively. Exergyloss is 4795 MJ related to stack gas that provides opportunities for heat recovery. In order to obtain exergy efficiency four types of relations found in the literature were used in the research work done, and four different amounts: 37, 26.3, 51.8 and 36.8 resulted from that. Proper relation taking into account physical exergy efficiency was proposed considering the process type of the furnace.

Keywords: Exergy, Electric arc furnaces, Steel production.

۱- مقدمه

حاکمی از این بود که منابع اصلی هدر رفت انرژی گاز خروجی از دودکش می‌باشد که توسط آب خنک کننده خنک می‌گردد و همچنین منبع اصلی تخریب اکسرژی، احتراق و انتقال حرارت می‌باشد. نتایج بدست آمده روشن ساخت که گاز خروجی از دودکش شامل 18.3 درصد و 12.2 درصد از کل مقادیر ورودی را برای انرژی و اکسرژی به خود اختصاص می‌دهد و افزایش نفوذ هوا راندمان‌های انرژی و اکسرژی را کاهش می‌دهد. در مقاله‌ای دیگر که توسط حاجی دولو و علاقه بند [6] به چاپ رسید روشی برای پیش گرم کردن آهن اسفنجی جهت افزایش راندمان کوره قوس الکتریکی پیشنهاد گردید. از آنجا که آهن دارای میل ترکیبی زیاد با اکسیژن است از گاز نیتروژن به عنوان سیال واسطه جهت گرمایش آهن اسفنجی کمک گرفته شد و طرح اولیه استفاده از حرارت گازهای خروجی از دودکش جهت پیش گرم کردن آهن اسفنجی در سیلو ارائه گردید. پس از این تحقیق، یک سیستم بازیافت حرارت از گازهای خروجی از دودکش جهت پیش گرمایش آهن اسفنجی توسط ساهو و همکاران [7] طراحی گردید و همچنین هزینه نصب کامل سیستم طراحی شده که شامل مبادله کن‌های حرارتی همراه با سایر متعلقات می‌باشد 3.33 میلیون دلار بر پایه قیمت سال 2013 برآورد گردید.

کار حاضر در بر دارنده تحلیل اکسرژی یک کارخانه تولید فولاد در ایران به ظرفیت 65 تنبا در نظر گرفتن اثر نفوذ هوا بر راندمان اکسرژی می‌باشد.

۲- فرایند ذوب شارژ و تولید فولاد در کوره قوس الکتریکی

مواد اولیه اصلی که در فرایند تولید فولاد به روش قوس الکتریکی استفاده می‌گردد شامل آهن اسفنجی و قراضه می‌باشد که پس از ورود به کوره بدلیل مقاومت در برابر عبور جریان الکتریکی و تولید حرارت بسیار، ذوب و مافوق گرم شده و سپس از کوره خارج می‌گردند. واکنش‌های شیمیایی اساسی که در کوره به وقوع می‌پیوندد شامل ترکیب مناسب از عناصر و ترکیباتی چون Fe, O, C, Si, Mn, P, S, و تشکیل ترکیباتی نظیر Fe_2O_3 , FeO , $CO(g)$, SiO_2 , MnO , P_2O_3 , Al , Zn , $CH_4(g)$, $C_2H_6(g)$, $C_3H_8(g)$, $O_2(g)$ می‌باشد [Camdali]. مواد ورودی و خروجی از کوره قوس الکتریکی به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱): مواد ورودی خروجی از کوره قوس الکتریکی

مواد ورودی به کوره قوس	مواد خروجی از کوره قوس
آهن قراضه	فولاد مذاب
آهن اسفنجی	سرباره همراه با فولاد موجود
کک	غبار
الکتروود کربنی	گازهای خروجی
آهک	آب خنک کننده

صنعت تولید آهن و فولاد جزو مصرف کنندگان عمده انرژی در میان صنایع انرژی بر می‌باشد که تقریباً مصرف 12 درصد انرژی تولید شده در جهان را به خود اختصاص می‌دهد [1]. سهم استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی در صنایع تولید آهن و فولاد، بسرعت در حال افزایش است و بر اساس تحقیقات صورت گرفته، تخمین زده شده است که حدود 50 درصد از کل تولید فولاد از این تکنولوژی استفاده می‌کنند [2]. بنابراین رشد صنعت فولاد به بهبود استفاده از انرژی، هزینه‌های عملیاتی تولید و کوره‌ها مرتبط است. ذوب فولاد بوسیله کوره‌های قوس الکتریکی یک فرایند پر مصرف انرژی است که در آن دمای آهن اسفنجی به بالاتر از 1500 درجه سانتیگراد می‌رسد و از آنجایی که انرژی الکتریسیته دارای ارزش بالایی بین انواع انرژی می‌باشد که مورد استفاده در کوره‌های قوس الکتریکی است، کاهش مصرف انرژی یکی از نگرانی‌های عمده تولید کنندگان در این صنعت است. متأسفانه حدود 20 درصد از انرژی تولید شده در کوره‌های قوس الکتریکی به همراه گازهای گرم خروجی از دودکش تلف می‌شود. در بررسی‌های انجام شده در تجزیه و تحلیل کوره‌های قوس الکتریکی، دیده شده است که بازده استفاده از انرژی کوره‌ها از 510 تا 880 کیلووات ساعت بر تن بین 40 تا 75 درصد است که کاهش تلفات انرژی در سیستم خنک کننده و گاز خروجی منجر به افزایش بازدهی و در نتیجه کاهش انتشار دی اکسید کربن می‌شود [3]. در سالهای اخیر محققان زیادی از روش تحلیل اکسرژی برای فرایندهای صنعتی استفاده نموده‌اند که دستاورد آنها مشخص شدن محل‌های پر مصرف انرژی در سیستم و ارائه راهکار در کاهش هدررفت انرژی بوده است.

تحلیل اکسرژی یک کارخانه تولید فولاد آلیاژی در ترکیه که از کوره قوس الکتریکی استفاده می‌نمود جهت تعیین پارامترهای بهینه طراحی و شرایط عملکرد توسط کامادعلی و تانک [1] صورت گرفت. در این تحقیق که در آن پیش گرمایش آهن قراضه مورد بررسی قرار گرفت نتایج بدست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده و ادبیات موضوعات قبلی مقایسه گردید. ایشان به این نتیجه رسیدند که بازده اکسرژی در کوره‌های قوس الکتریکی حدود 55 درصد است. در تحلیل ایشان اکسرژی‌های شیمیایی مواد ورودی و خروجی به کوره قوس الکتریکی در محاسبات آورده شد. بسیو و همکاران [4] تاثیر پارامترهای طراحی را در یک کوره قوس الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. بر پایه این تحقیق میزان بازده کل اکسرژی خروجی کوره 55 درصد می‌باشد و در صورتیکه از بازیافت اکسرژی خروجی از کوره توسط سرباره و آب خنک کننده صرف نظر شود این میزان به حدود 52 درصد می‌رسد. حاجی دولو و دیگران [5] یک کارخانه فولاد موجود با ظرفیت 210 تن را جهت تخمین پتانسیل برای افزایش راندمان کوره مورد تحلیل انرژی و اکسرژی قرار دادند. ایشان برای اینکه به نتایج واقعی‌تری دست یابند اثر نفوذ هوا را در محاسبات خود وارد کردند. نتایج حاصله

قرار گرفته است به تعادل کامل ترمودینامیکی با محیطی برسد که ترکیب شیمیایی آن معلوم می‌باشد. اکسرژی شیمیایی مخلوط گازهای ایدال بر پایه مولی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\bar{e}^{CH} = \sum X_k \cdot \bar{e}_k^{CH} + \bar{R}T_0 \cdot \sum X_k \cdot \ln X_k \quad (5)$$

در رابطه فوق X_k نسبت مولی اجزای تشکیل دهنده مخلوط گازی می‌باشد.

۳-۳- مدل جریان اکسرژی برای کوره قوس الکتریکی:

موازنه جریان اکسرژی در سیستم یک کوره قوس الکتریکی که در آن از مواد اشاره شده در جدول (۱) به عنوان ورودی ها و خروجی های کوره همراه با در نظر گرفتن الکتریسیته ورودی و فعل و انفعالات شیمیایی استفاده شده است به صورت زیر می‌باشد [حاجی]:

$$\sum_{in} (m \times e^{PH}) - \sum_{out} (m \times e^{PH}) - \Delta E^{CH} + W = E^I \quad (6)$$

طرف راست رابطه فوق برگشت ناپذیری های کل را شامل می‌شود و همچنین تغییرات اکسرژی شیمیایی در رابطه فوق از طریق رابطه زیر حساب می‌شود:

$$\Delta E^{CH} = \sum_{out} E^{CH} - \sum_{in} E^{CH} \quad (7)$$

طرف راست رابطه فوق تفاضل مجموع کل اکسرژی شیمیایی ترکیبات خارج شونده از کوره را با مجموع کل اکسرژی شیمیایی ترکیبات وارد شونده به کوره نشان می‌دهد [1]، که در آن:

$$\sum_{in} E^{CH} = [m_{Fe} e_{Fe}^{CH} + m_O e_O^{CH} + m_{CO} e_{CO}^{CH} + m_{Si} e_{Si}^{CH} + m_{Mn} e_{Mn}^{CH} + m_P e_P^{CH} + m_{Cr} e_{Cr}^{CH} + m_{CaO} e_{CaO}^{CH} + m_S e_S^{CH} + m_{CaCO_3} e_{CaCO_3}^{CH} + m_{Al} e_{Al}^{CH} + m_{Ca} e_{Ca}^{CH} + m_{Zn} e_{Zn}^{CH} + m_{CH_4} e_{CH_4}^{CH} + m_{C_2H_6} e_{C_2H_6}^{CH} + m_{C_3H_8} e_{C_3H_8}^{CH}] \quad (8)$$

$$\sum_{out} E^{CH} = [m_{Fe_2O_3} e_{Fe_2O_3}^{CH} + m_{FeO} e_{FeO}^{CH} + m_{CO} e_{CO}^{CH} + m_{SiO_2} e_{SiO_2}^{CH} + m_{MnO} e_{MnO}^{CH} + m_{P_2O_5} e_{P_2O_5}^{CH} + m_{Cr_2O_3} e_{Cr_2O_3}^{CH} + m_{CaS} e_{CaS}^{CH} + m_O e_O^{CH} + m_{CaO} e_{CaO}^{CH} + m_{CO_2} e_{CO_2}^{CH} + m_{Al_2O_3} e_{Al_2O_3}^{CH} + m_{ZnO} e_{ZnO}^{CH} + m_{H_2O} e_{H_2O}^{CH}] \quad (9)$$

روابط مربوط به محاسبه اکسرژی فیزیکی به صورت زیر می‌باشند:

$$e_i^{PH} = (h_i - h_{i0}) - T_0 (s_i - s_{i0}) \quad (10)$$

که در رابطه فوق تغییرات انتالپی و انتروپی نسبت به شرایط محیط از روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$h_i - h_{i0} = \int_{T_0}^T c_p dT \quad (11)$$

دولومیت	-
اکسیژن	-
آب خنک کننده	-

۲- مفاهیم تحلیل اکسرژی

۲-۱- مقدمه:

اکسرژی حداکثر کاری می‌باشد که می‌تواند از یک سیستم استحصال گردد تا سیستم با محیط خود به تعادل برسد. هر سیستمی که با محیط خود در تعادل نباشد دارای مقداری اکسرژی می‌باشد، در حالیکه اگر یک سیستم با محیط اطراف خود در تعادل باشد، طبق تعریف دارای اکسرژی صفر است، زیرا که دارای توانایی تولید کار در ارتباط با محیط پیرامون خود نیست. تحلیل اکسرژی روشی می‌باشد که از اصول بقای جرم و انرژی همراه با قانون دوم ترمودینامیک جهت تحلیل، طراحی و بهبود سیستم‌های انرژی استفاده می‌کند. روش تحلیل اکسرژی ابزار مفیدی برای نزدیک شدن به هدف استفاده کارتر از منابع انرژی می‌باشد و دارای برتری نسبت به تحلیل اکسرژی است [8]، چرا که این روش قادر به تعیین محل، نوع و مقدار واقعی هدر رفت‌ها می‌باشد.

۲-۳- اجزای اکسرژی:

در غیاب اثرات هسته‌ای، مغناطیسی، الکتریکی و تنش سطحی، اکسرژی کل یک سیستم (E) می‌تواند به چهار مولفه تقسیم شود:

۱. اکسرژی فیزیکی E^{PH}
۲. اکسرژی جنبشی E^{KN}
۳. اکسرژی پتانسیل E^{PT}
۴. اکسرژی شیمیایی E^{CH}

بنابراین:

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (1)$$

اکسرژی جنبشی و پتانسیل ویژه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$e^{KN} = \frac{1}{2} V^2 \quad (2)$$

$$e^{PT} = g \cdot z \quad (3)$$

اکسرژی فیزیکی E^{PH} یک سیستم شامل دو شکل اکسرژی می‌باشد:

الف- اکسرژی مکانیکی E^M : این نوع اکسرژی وابسته به فشار سیستم می‌باشد.

ب- اکسرژی حرارتی E^T : این نوع اکسرژی وابسته به دمای سیستم است.

$$E^{PH} = E^T + E^M \quad (4)$$

اکسرژی شیمیایی حداکثر کار خالص بدست آمده می‌باشد، زمانیکه ماده خالص یا سیال عامل یک سیستم که در حالت محیط

است. مقدار و نوع مواد خروجی از کوره همراه با میزان اکسرژی‌های فیزیکی و شیمیایی محاسبه شده از روابط موجود، در جدول (۳) نشان شده است.

جدول (۲): اکسرژی‌های فیزیکی و شیمیایی ورودی به کوره

اکسرژی شیمیایی (MJ)	اکسرژی فیزیکی (MJ)	جرم (kg)	مواد ورودی
43009.6	0.17	6030.6	آهن قراضه
357674	1.47	51350	آهن اسفنجی
18439	0.02	604.5	کک
4416	0.01	400	الکتروود کربنی
4688	0.07	2405	آهک
2172	0.04	1170	دولومیت
403	0.12	3250	اکسیژن
-	549	800000	آب خنک کننده
-	105300	-	برق ورودی

تمام مواد خارج شونده از کوره در دمای 1823 K می باشند، بجز آب خنک کننده که در دمای 318 K است.

جدول (۳): اکسرژی‌های فیزیکی و شیمیایی خروجی از کوره

اکسرژی شیمیایی (MJ)	اکسرژی فیزیکی (MJ)	جرم (kg)	مواد خروجی
340449	38933	49579	فولاد مذاب
2836	322	414.9	فولاد در سرباره
4044	2807	3466.3	غبار
12663	5793	13775	سرباره
28381	4795	4073.3	گاز خروجی
-	2149	800000	آب خنک کننده

با یاری گرفتن از رابطه (6) و اطلاعات جدول (2) و فرضیاتی چون ایدال فرض کردن گاز خروجی از دودکش و حالت پایدار بودن کوره، مقدار بازگشت ناپذیری کل سیستم 93481 MJ بدست می آید. جدول (4) دربرگیرنده راندمان های محاسبه شده از روابط (14-17) می باشد. به همین صورت شکل (1) دربردارنده سهم اکسرژی فیزیکی هر یک از مواد خروجی از کوره قوس الکتریکی مورد نظر می باشد.

$$s_i - s_{i0} = \int_{T_0}^T \left(\frac{c_p}{T} \right) dT \quad (12)$$

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^{-2} \quad (13)$$

ضرایب موجود در رابطه (13) را که مربوط به ظرفیت حرارتی ویژه می باشد می توان از جداول مربوطه استخراج نمود [5].

۳-۴- راندمان اکسرژی کوره قوس الکتریکی:

برای محاسبه راندمان اکسرژی کوره قوس الکتریکی روابط متعددی در سوابق تحقیقاتی ارائه گردیده است. در یک حالت راندمان اکسرژی کوره به صورت نسبت کل اکسرژی خروجی از کوره به کل اکسرژی ورودی به کوره در نظر گرفته می شود [1]:

$$\psi = \frac{\sum_{out} m \times e}{\sum_{in} m \times e} = 1 - \frac{E^I}{\sum_{in} m \times e} \quad (14)$$

در رابطه فوق اکسرژی های فیزیکی و شیمیایی منظور می باشد. حاجی دولو و همکاران رابطه زیر را برای محاسبه راندمان اکسرژی کوره ارائه کرده اند [5]:

$$\phi = m_{ls} \times e_{ls} / \sum_{in} m \times e \quad (15)$$

صورت کسر در سمت راست رابطه فوق اکسرژی بازیافت شده از فولاد مذاب خروجی می باشد که دلالت بر اکسرژی فیزیکی دارد و مخرج کسر تمام انواع اکسرژی ها اتم از شیمیایی و فیزیکی، از جمله اکسرژی الکتریسیته را شامل می شود.

جهت تحقیق و بررسی در مورد کاهش تلفات اکسرژی و بازیافت انرژی به منظور افزایش راندمان در یک کوره قوس الکتریکی انجام موازنه جریان اکسرژی و محاسبه راندمان اکسرژی می تواند بدون در نظر گرفتن تغییرات اکسرژی شیمیایی در هر یک از روابط فوق صورت پذیرد، دلیل این امر به ثابت بودن فرایند شیمیایی موجود در کوره بر می گردد. بنابراین می توان از روابط (14) و (15) بدون در نظر گرفتن تغییرات اکسرژی شیمیایی استفاده نمود، در این صورت روابط زیر می توانند برای محاسبه راندمان اکسرژی در نظر گرفته شوند:

$$\psi' = \frac{\sum_{out} m \times e^{PH}}{\sum_{in} m \times e^{PH}} = 1 - \frac{E^I}{\sum_{in} m \times e^{PH}} \quad (16)$$

$$\phi' = m_{ls} \times e_{ls} / \sum_{in} m \times e^{PH} \quad (17)$$

۴- مطالعه موردی:

در کار حاضر تحلیل اکسرژی روی اطلاعات اولیه کسب شده از یک کوره قوس الکتریکی با ظرفیت 65 تن صورت گرفت. مقدار و نوع مواد ورودی به کوره همراه با میزان اکسرژی های فیزیکی و شیمیایی محاسبه شده از روابط موجود، در جدول (2) آورده شده است. فرایند ذوب در این کوره با مصرف معادل 105300 مگاژول الکتریسیته و 800000 کیلوگرم آب خنک کننده با بازه تغییرات دمایی $\Delta T=10$ 12 درجه سانتیگراد صورت گرفته است. تمام مواد وارد شونده به کوره در دمای 303 K می باشند بجز آب خنک کننده که در دمای 308 K

furnace”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp.2255–2267, 2003.

2. Raja, B.V.R., Pal, N., Talwar, P.L. and Jayaswal, N.P., “Technologies for cost reduction in EAF’s”, *steelworld*, pp.1-4, 2000.

3. Kirschen, M., Risonarta, V. and Pfeifer, H., “Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry”, *Energy*, Vol. 34, pp.1065–1072, 2009.

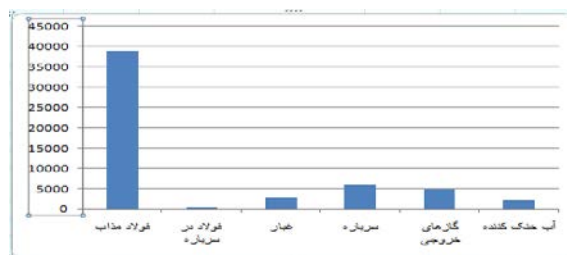
4. Bisio, G., Rubatto, G. and Martini, R., “Heat transfer, energy saving and pollution control in UHP electric-arc furnaces”, *Energy*, Vol. 25, pp. 1047–1066, 2000.

5. Hajidavalloo, Ebrahim, Dashti, Hamze, and Behbahani-Nejad, Morteza, “Exergy and energy analysis of an AC steel electric arc furnace under actual conditions”, *Int. J. Exergy*, Vol. 12, pp. 380-404, 2013.

6. Hajidavalloo, Ebrahim, and Alagheband, Ali, “Thermal analysis of sponge iron preheating using waste energy of EAF”, *Materials Process Technology*, Vol. 208, pp.336–341, 2008.

7. Sahu, S., Tirumalaraju, D., Khanam, S., and Sahoo, A., “Energy Conservation in Sponge Iron Production Process through Proper Utilization of Waste Heat”, *IJESIT*, Vol. 2, pp.359-366, 2013.

8. Shamsi, S.; Omidkhah, M.R., “Optimization of steam pressure levels in a total site using the rmoeconomic method”, *Energies*, Vol. 5, pp. 702–717, 2012.



شکل (۱): اکسرژی فیزیکی خروجی از کوره 65 تنی (MJ)

جدول (۴): راندمان‌های محاسبه شده از روابط مختلف

φ'	ψ'	φ	ψ	راندمان (%)
36.8	51.8	26.3	37	

۵- نتیجه گیری:

مطابق با جدول (3) تغییرات اکسرژی شیمیایی معادل 42428 MJ می‌باشد که از مقدار قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. در واقع این تغییر کاهش سطح اکسرژی شیمیایی مواد وارد شونده به کوره را نشان می‌دهد. گاز خروجی از کوره با دمای 1823K دارای پتانسیل بازیافت انرژی خوبی می‌باشد که این عمل افزایش راندمان قانون دوم را در بردارد [5]. آنچه که در بازیافت از این گاز خروجی حاصل می‌گردد استفاده از انرژی حرارتی موجود در گاز است که شکلی از اکسرژی فیزیکی است. فولاد مذاب خارج شونده از کوره نیز دارای دمای بالا می‌باشد که شکل مفید مورد نیاز محصول است. چنانچه کل کوره به عنوان یک سیستم در نظر گرفته شود می‌توان دریافت که کل مواد ورودی به کوره پس از خروج از آن دستخوش تغییر اکسرژی شیمیایی ثابتی می‌باشند و چنانچه دمای مواد ورودی و خروجی کوره و همینطور میزان آب خنک کننده و الکتریسیته مورد نیاز ذوب تغییر کند، هیچ تغییری در مقدار اکسرژی شیمیایی صورت نمی‌گیرد. بنابراین هنگامیکه افزایش راندمان سیستم مد نظر می‌باشد بهتر است در محاسبات مربوط به تحلیل اکسرژی از تغییرات اکسرژی شیمیایی چشم‌پوشی گردد. همینطور در حالت واقعی تر وقتی بحث نفوذ هوا به داخل کوره قوس الکتریکی مطرح می‌گردد کاهش چشم‌گیر راندمان اکسرژی بدلیل هدررفت زیاد از طریق گاز خروجی از دودکش پدید می‌آید که افزایش مصرف الکتریسیته را در پی خواهد داشت [5] اما تاثیری روی تغییرات اکسرژی شیمیایی ندارد. بنابراین در میان چهار نوع راندمان مقایسه شده در جدول (4) استفاده از روابط 16 و 17 توصیه می‌شود و با توجه به اینکه فولاد مذاب به عنوان محصول هدف سیستم می‌باشد رابطه 17 ارجح است.

۶- مراجع:

1. Camdali, U. and Tunc, M., “Exergy analysis and efficiency in an industrial AC electric ARC