

شبیه سازی موازنه های جرمی و حرارتی به منظور کاهش اتلاف انرژی در کوره های ذوب فلز

سید خطیب الاسلام صدرنژاد (استاد)

هومن فخر نبوی (کارشناسی ارشد)

چکیده

در این پروژه از نرم افزار Excell برای شبیه سازی موازنه جرم و حرارت در کوره ذوب فلز قوس الکتریکی استفاده شده است. انتخاب برنامه Excell به دلیل سهولت ارتباط بین داده ها و استفاده آسان کاربر می باشد. آنالیز بارهای فلزی، مواد کربن دار، آهک پخته و آهک دولومیتی به عنوان ورودی به برنامه داده می شود. داده های موجود در این برنامه از نتایج آنالیز نمونه های بار فولاد انتخاب شده است. این اطلاعات بسته به کاربرد موردی برای کاربر قابلیت تغییر دارند. نحوه محاسبه کاهش اتلاف انرژی و میزان هزینه های عملیات با استفاده از نرم افزار شبیه سازی شده تشریح شده است.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، موازنه جرم، موازنه حرارت، کوره ذوب فلز، فولادسازی

مقدمه

نگرانی در مورد کاهش ذخائر طبیعی از جمله سنگ معدن آهن در جهان روز به روز در حال افزایش است. یک راه حل، بازیافت مواد زائد و مستعمل است. کوره قوس الکتریکی (EAF) وسیله مناسبی است که می تواند کمک طولانی - مدت و شایانی در این زمینه ارائه دهد. در همین راستا، روند تولید فولاد جهان به سوی جایگزینی کوره BOF با EAF متمایل بوده و طبق گزارش سازمان جهانی فولاد، ۳۴ درصد فولاد دنیا در سال ۲۰۰۲ به وسیله کوره قوس الکتریکی تولید شده است [۱]. پیش بینی می شود که حدود ۵۰ درصد کل فولاد جهان تا سال ۲۰۲۰ به روش قوس الکتریکی تولید شود.

با وجود اهمیت و پیچیدگی فرایند فولاد سازی در کوره قوس الکتریکی، فعالیت بسیار کمی برای اتوماسیون این فرایند تا کنون انجام شده است. به طوری که خروجی های مهمی همچون دما و ترکیب شیمیایی فولاد همچنان به طور دستی و توسط اپراتور کنترل می شوند. در نتیجه مشکلات کاری فراوان و اختلالات زیادی در مقادیر خروجی سامانه ها همچنان موجود است. این نوع ناهماهنگی ها منجر به تنزل کیفیت فولاد و کاهش درآمد شرکت های تولید فولاد می شود. با زیاد شدن پیچیدگی های فرایند در اثر افزایش دانش فنی و ارتقاء سطح توقعات کاربرها، کنترل دستی توسط اپراتور روز به روز دشوار تر و ناکارآمدتر می شود. عوامل دیگری مانند تغییر نوع مواد ورودی، آنالیز خروجی مطلوب و توقف فرایند تاثیرات منفی اجتناب ناپذیری بر فرایند می گذارند. اعمال کنترل فرایند، فواید بسیاری بر عملیات کوره قوسی داشته و انتخاب نقطه تنظیم مناسب را میسر می سازد.

از بین بردن اختلالات نامطلوب و تنظیم خروجی ها در یک محدوده مشخص امکان کنترل بهینه عملیات را فراهم می سازد [۳ و ۲]. مزایای حاصل از اعمال کنترل فرایند، توسط بکر Bekker [۵، ۴] و اوست هوزن Oosthuizen [۷ و ۶] تشریح شده است. در هر دو مورد، از مدل سازی برای کنترل فرایند استفاده شده و بنظر می رسد که بر پایه زمینه های کیفی، مدلی مناسب برای نشان دادن فرایند حاصل شده است.

اکثر سیستمهای کنترل بر پایه یک مدل ریاضی مناسب، یعنی مدلی که توسط داده های واقعی تست شده، بنا نهاده شده اند. برای جلوگیری از توقف برنامه ریزی نشده، مرحله تصفیه در شرایط کاری معمولی به طور ناپیوسته اجرا می شود. زیرا تنظیم ترکیب شیمیایی و دمای فولاد مذاب نیازمند اندازه گیری این کمیات و در پی آن اعمال کنترل بر پایه اطلاعات دریافتی است. برای اندازه گیری ترکیب شیمیایی و دما و اجراء کنترل بر پایه نتایج حاصل، مداخله اپراتور اجتناب ناپذیر است و تا زمانی که شرایط حمام مذاب به حد مطلوب نرسیده، اندازه گیری ها باید تکرار شود. این کار اتلاف زیادی را به وضوح به همراه دارد. هر اندازه گیری نیازمند یک پروب جدید یکبار - مصرف است. تاخیرهای ایجاد شده در حین اندازه گیری و اقدام بعدی بر مبنای نتیجه اندازه گیری ها، هزینه بر بوده و به سیستم تحمیل می شوند. در هنگام اندازه گیری دما، برای مثال، از قدرت قوس الکتریکی باید کاست. این کار منجر به کاهش بازدهی قوس می شود. یک راه مناسب برای حل این مشکل، کاهش تعداد اندازه گیری ها است. این کار با کمک گیری از مدل ریاضی شبیه سازی شده امکان پذیر می شود. چنین مدلی بر پایه اندازه گیری های اولیه و ورودی های بعدی، می تواند رفتار آینده کوره را پیش بینی کرده و بعنوان نمایش دهنده مرحله تصفیه عمل کند. این مدل باید بتواند روابط بین ورودی ها و خروجی ها به درستی در نظر گرفته و با تطبیق داده ها با پاسخ های سیستم، پارامترها را به طور صحیح تنظیم نموده و امکان دستیابی به نتایج مطلوب را محقق سازد.

کارهای زیادی در زمینه مدل سازی و شبیه سازی کوره قوس الکتریکی توسط Morales [۸] و همکارانش انجام شده است. آنها اطلاعات زیادی در مورد پفکی سازی سرباره جمع آوری و پس از تحلیل داده ها گزارش کرده اند. بر اساس گزارش آنها، استفاده مداوم از سرباره پفکی منجر به کاهش جریان الکتریکی و افزایش بازدهی فرایند می شود [۹]. این پژوهشگران تحقیقاتی نیز در باره شبیه سازی کوره قوس الکتریکی انجام داده و رفتار سرباره خصوصاً تاثیر ترکیب شیمیایی و در صد FeO و اثرات و ویژگیهای آهن اسفنجی بر فرایند فولاد سازی را توسط برنامه شبیه سازی شده پیش بینی نموده اند. علاوه براین، رفتار کربن و تاثیر دمای کوره نیز توسط ایشان - البته نه بصورت کاملاً جزئی و دقیق - بررسی شده است [۸]. نتایج پفکی سازی سرباره و شبیه سازی EAF به یک مدل واحد تبدیل شد. مرکز توجه این تحقیقات بر شیمی سرباره بود [۱۰، ۱۱].

یک مدل شبیه ساز تصفیه برای EAF توسط اولمن و پرتوریس Oltmann و Pretorius تولید شد [۱۲]. در این کار بر فوائد کف سازی سرباره و کاهش بازدهی حاصل از اکسایش اضافی حمام مذاب، تاکید شده بود [۱۲]. نیسن Nyssen و همکارانش [۱۳] یک مدل استاتیک به منظور کمک به اپراتور کوره EAF طراحی کردند. محاسبات این مدل برای حالت خاموش و قبل از شروع بکار کوره انجام شده و سپس تنظیمات مدل در حین کار انجام می شود. به این طریق می توان انحراف از مقدار پیش بینی شده را بحساب آورده و تلفات حرارتی از طریق سیستم آبگرد را منظور نمود. بنا بر گزارش ارائه شده، استفاده صنعتی از مدل سبب کاهش مصرف انرژی و افزایش میزان تولید شده است. این پژوهشگران در تحقیقی دیگر، یک مدل دینامیک برای EAF ارائه داده اند که قادر به تخمین روند ذوب مواد خام، ارتفاع سرباره، دما و ترکیب فولاد مذاب می شود [۱۳]. بکر Bekker و همکارانش [۵] بر پایه موازنه جرم و انرژی و تکیه بر کنترل دما، ترکیب، فشار و بقیه خروجی های مورد نظر با استفاده از متغیرهای گاز خروجی، فرایند کوره قوس الکتریکی را شبیه سازی کرده اند.

با استفاده از یک مدل کنترلی پیش بینی کننده (MPC)، متغیرهای گازخروجی می تواند برای کنترل فشار کوره (برای به حد اقل رساندن تلفات حرارتی از طریق هوای محیط) و بطور غیر مستقیم دمای حمام مذاب پیش بینی شود. علاوه بر این، مدل می تواند گسترش یافته و عوامل اقتصادی برای فرموله کردن تابع هزینه بمنظور کمینه سازی توسط کنترلر مورد استفاده قرار گیرد [۱۴،۷]. این کار تغییراتی را در استفاده سنتی از عملگرها بر متغیرهای کنترل شده ایجاد می کند.

مطالعات مفصلی در باره جنبه اقتصادی فرایند توسط سایر محققین [۱۶،۱۵] انجام شده است که منجر به تولید مدل های استاتیک شده که هدف آنها بهینه سازی افزایشده های سرباره برای کاهش هزینه بوده است. استفاده از مدل های استاتیک یک شیوه مطلوب برای مدل سازی کوره های قوس الکتریکی است [۱۷-۲۰]. از لحاظ مفهومی، محاسبه جرم و انرژی مورد نیاز برای افزودن بمنظور دستیابی به خواص نهائی مطلوب فولاد، مانند دما و ترکیب، کاری درست و صحیح است [۲۱-۳۰]. این کار در حالت خاموش و قبل از شروع بکار کوره قوس الکتریکی انجام می شود. در هنگام تخلیه نیز گاهی دو باره تکرار شده و انحرافات را جبران می کند. این محاسبات معمولاً در مراحل اولیه دمش اکسیژن انجام می شود تا دمش نهائی اکسیژن تنظیم شود. کنترل دینامیک فرایند هنگامی که نمونه گیری برای تعیین دما و ترکیب شیمیایی از سطح مذاب انجام می شود نیز قابل اعمال است [۱۳ و ۲۲].

هدف این پژوهش کاهش مصرف انرژی با اعمال اصول موازنه جرم و انرژی و استفاده از نرم افزارهای ساخته شده بر مبنای اصول ریاضی می باشد. با استفاده از تغییر بار کوره یا ایجاد تغییر در نحوه کار کوره، مصرف انرژی را می توان کاهش داد. با استفاده از نرم افزار، اثر افزایش کربن آهن اسفنجی، به دو صورت تزریقی و کپه ای و نیز استفاده از شارژ داغ در کوره قوس الکتریکی (HOTLINK) بر قیمت نهایی فولاد تولیدی، مورد بررسی قرار گرفته است.

روش تحقیق

در اثر تغییر درصد کربن آهن اسفنجی ورودی، مقدار بار DRI و مقدار آنتراسیت اضافه شده، انرژی الکتریکی مصرفی و اکسیژن تزریق شده به کوره تغییر می کنند. تاثیر هر یک از این تغییرات به صورت جداگانه بررسی می شوند. با توجه به ثابت بودن ترکیب بقیه شارژهای فلزی، با افزایش کربن موجود در آهن اسفنجی، برای تامین آهن مورد نیاز سرباره و فولاد باید مقدار شارژ DRI ورودی به سیستم افزایش یابد.

الف- بررسی اثر افزایش کربن آهن اسفنجی

افزایش یک درصد کربن، حدود ۰/۵ دلار بر هزینه آهن اسفنجی می افزاید. بر این اساس مقدار آنتراسیت شارژ شده به کوره را می توان محاسبه نمود. با فرض ۰/۷۵ درصد کربن در شارژ فلزی و کربن باقیمانده در فولاد، مقدار آنتراسیت لازم برای افزودن به بار کوره قابل محاسبه خواهد بود. اگر قیمت هر کیلوگرم آنتراسیت ۰/۱ دلار باشد، برای افزایش کربن به صورت کپه ای با نرخ بازیابی ۲۵ درصد، به ازاء افزایش هر درصد کربن آهن اسفنجی، ۱/۳۶ دلار کاهش در هزینه شارژ آنتراسیت و برای تزریق کربن با نرخ بازیابی ۸۰ درصد، ۰/۴۳ دلار کاهش هزینه محاسبه می شود. در هر دو حالت تزریق کربن و شارژ کپه ای، نیاز به کربن آنتراسیت قابل حذف است. کربن موجود در DRI در این صورت قادر به تامین کربن مورد نیاز سیستم خواهد بود.

برای بررسی اثر محتوای کربن بر مقدار اکسیژن مصرفی، باید دو فاکتور در نظر گرفته شود:

۱- طبق قانون بقا جرم:

(۱) جرم تلف شده + جرم خروجی = جرم ورودی

$$C_{\text{Charged}} + C_{\text{Anthracite}} = C_{\text{Steel}} + C_{\text{Burned}} \quad (۲)$$

که در آن C_{Charged} ، $C_{\text{Anthracite}}$ ، C_{Steel} و C_{Burned} به ترتیب مقدار کربن وارد شده توسط شارژهای ورودی بدون در نظر گرفتن کربن اضافه شده به صورت کپه ای یا تزریق شده، مقدار کربن وارد شده از طریق آنتراسیت، کربن موجود در فولاد و کربن اکسید شده در کوره می باشد.

۲- در اثر احتراق، ۸۵٪ کربن به منوکسید کربن تبدیل شده و مابقی در اثر احتراق بعدی (Post Combustion)، به دی اکسید کربن تبدیل می شود. بنابراین اکسیژن لازم برای احتراق را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$O_2 (\text{Kg}) = C_{\text{Burned}} \times \frac{28}{12} \times 0.85 + C_{\text{Burned}} \times \frac{44}{12} \times 0.15 \quad (۳)$$

$$O_2 (\text{m}^3) = \frac{22.4}{32} \times O_2 (\text{Kg}) \quad (۴)$$

بنابراین با تغییر درصد کربن، مقدار کربن شارژ شده به صورت آنتراسیت تغییر کرده و متعاقباً مقدار کربن سوخته شده و اکسیژن مورد نیاز نیز تغییر می کند. مشاهده می شود که مصرف اکسیژن با افزایش درصد کربن تا ۳/۵ درصد، کاهش و از آن به بعد افزایش می یابد. بررسی نحوه تاثیر کربن بر مصرف انرژی الکتریکی تا حدی پیچیده بوده و باید فاکتورهای متعددی را در نظر گرفت. طبق قانون بقا انرژی:

$$\text{حرارت خروجی} = \text{حرارت ورودی} \quad (۵)$$

بنابراین تغییر حرارت ورودی به سیستم نیز با تغییر حرارت خروجی برابر است. تغییر انرژی الکتریکی را نیز می توان از همین طریق محاسبه نمود. در اثر تغییر میزان کربن ورودی سیستم و متعاقباً تغییر میزان کربن سوخته شده، میزان انرژی ورودی به سیستم در اثر احتراق کربن نیز تغییر می کند. بنابراین:

$$\text{تغییر انرژی حاصل از احتراق کربن} = (2.54 + 6.56 \times 0.15) \times \text{مقدار کربن سوخته شده} = \text{انرژی حاصل از احتراق کربن} \quad (۶)$$

(۷) تغییر انرژی حاصل از احتراق کربن - تغییرات انرژی خروجی = تغییرات انرژی الکتریکی
تغییر انرژی خروجی از افزایش گرمای همراه CO و افزایش انرژی همراه گازهای CO، CO₂ و O₂ ناشی می شود.

$$\text{CO Latent Heat (KWh/TLS)} = V_{\text{CO}} \times 3.52 \quad (۸)$$

طبق قانون بویل-ماریوت، در اثر احتراق هر کیلوگرم کربن، ۱/۸۶۵ متر مکعب گاز شامل منو اکسید و دی اکسید کربن تشکیل می شود با توجه به اینکه چگالی گاز CO ۱/۲۵ Kg/m³ و چگالی گاز CO₂ ۱/۹۶ Kg/m³ می باشد، می توان گفت که در اثر احتراق هر کیلوگرم کربن ۱/۹۸ کیلوگرم مونوکسید کربن و ۰/۵۵ کیلوگرم دی اکسید کربن تشکیل می شود. با توجه به تغییر مقدار گاز تولید شده در اثر احتراق کربن و مقدار اکسیژن مصرفی کوره، می توان تغییرات انرژی خروجی کوره را محاسبه کرد.

ب- استفاده از شارژ داغ در کوره قوس الکتریکی (HOTLINK)

هدف این قسمت محاسبه تاثیر درصد آهن اسفنجی و دما بر انرژی الکتریکی مورد نیاز سیستم در شرایط استفاده از بار داغ است [۱۳]. انرژی الکتریکی مورد نیاز برای بار فلزی معمولی به عنوان انرژی پایه در نظر گرفته شده و تغییر انرژی مورد نیاز سیستم نسبت به انرژی پایه محاسبه می شود.

$$\Delta E_{\text{Electric en}} = \Delta E_{\text{Exit}} - \Delta E_{\text{Chemical}} - \Delta E_{\text{HDRI}} \quad (۹)$$

که در آن $\Delta E_{\text{Electric en}}$ تغییر انرژی الکتریکی مصرفی نسبت به حالت پایه است، ΔE_{Exit} تغییر انرژی خروجی (تلف شده) از سیستم

نسبت به حالت پایه، $\Delta E_{\text{Chemical}}$ تغییر انرژی شیمیائی تولید شده حاصل از احتراق کربن، اکسیداسیون سیلیسیم و احیاء آهن و ΔE_{HDRI} تغییر میزان انرژی وارد شده به سیستم از طریق شارژ داغ است.

ابتدا اجزاء و عوامل موثر بر انرژی خروجی (ΔE_{Exit}) معرفی شده و وزن شارژ فلزی (آهن اسفنجی و قراضه) برای تولید یک تن فولاد محاسبه می شود:

$$m_i = 1000 \times \%m_i / (\%Fe_{\text{Tot}} \times \%Yield) \quad (10)$$

که $\%m_i$ درصد آهن قراضه و یا آهن اسفنجی در شارژ فلزی، m_i وزن شارژ فلزی، $\%Fe_{\text{Tot}}$ درصد آهن موجود در بار فلزی و $\%Yield$ درصدی از آهن بار است که قابلیت تولید فولاد دارد.

مقدار گرمای خارج شده به وسیله سرباره و فلز مذاب را می توان از مجموع گرمای خارج شده توسط عناصر یا ترکیبات شیمیایی موجود در شارژ محاسبه کرد:

$$\Delta E_i = \sum (\%j) \times mJ/MJ \times C_p^j \times dT. \quad (11)$$

جمله C_p^j ظرفیت حرارتی عنصر j در شارژ i است. مقادیر مربوط به ظرفیت حرارتی عناصر مورد نظر را می توان از جداول ترمودینامیکی استخراج کرد. میزان تولید سرباره بازه هر تن بار فلزی دارای ۲۰٪ آهن اسفنجی، ۶۵kg در نظر گرفته شده است. این مقدار با افزایش در صد آهن اسفنجی افزایش یافته و در ازا ۱۰٪ آهن اسفنجی به ۱۲۰Kg بر تن شارژ فلزی بالغ می شود.

اگر میزان احتراق ثانویه (Post Combustion) ۱۰٪ فرض شود، ۱/۹۸ کیلوگرم گاز منو اکسید کربن و ۰/۵۵ کیلوگرم گاز دی اکسید کربن در اثر احتراق هر کیلوگرم کربن تولید می شود. مقدار کربن محترق شده را می توان به کمک قانون بقای جرم (معادله ۲) محاسبه کرد. با توجه به میزان کربن سوخته شده، مقدار منو اکسید و دی اکسید کربن محاسبه شده و انرژی خروجی از طریق این دو گاز تعیین می شود. در اثر تغییر شارژ ورودی، مقدار گازهای خروجی منو اکسید و دی اکسید کربن تغییر کرده و در نتیجه انرژی خروجی از سیستم نیز تغییر می کند. به طوری که داریم:

$$\text{Out Gas Energy} = \sum m_i \times (\text{Enthalpy})_i \quad (12)$$

انرژی شیمیایی لازم برای ادامه کار سیستم با افزایش میزان کربن سوخته شده، سیلیسیم اکسید شده و یا تغییر در مقدار آهن احیاء شده ایجاد می شود. مقدار عناصر اکسید و یا احیاء شده را می توان بر اساس قانون بقای جرم محاسبه کرد. به این منظور فرض می شود که ۹۰٪ کربن به منو اکسید و مابقی به دی اکسید کربن تبدیل می شود. سیلیسیم موجود در شارژهای فلزی به دی اکسید سیلیسیم تبدیل شده و وارد سرباره می شود. آهن اسفنجی DRI فاقد سیلیسیم است. فلزات قراضه مصرفی دارای ۰/۱۵ در صد سیلیسیم فرض می شوند. سرباره دارای ۱۹/۵ در صد اکسید آهن فرض می شود. بنابر این میزان آهن احیاء شده را می توان از رابطه زیر تعیین کرد:

$$m \text{ Fe (Reduced)} = m \text{ Fe (Charged)} - m \text{ Fe (Slag)} \quad (13)$$

بخش آخر انرژی وارد شده به سیستم، انرژی آهن اسفنجی داغ است که مقدار آن را می توان به کمک ظرفیت حرارتی عناصر و اکسیدهای تشکیل دهنده در دمای مورد نظر تعیین کرد.

نتایج و بحث

ریز ارقام محاسبه شده برای تعیین مقادیر گرما، انرژی الکتریکی و هزینه برق در جدول های ۱ تا ۳ ارائه شده است. ارقام ارائه شده بر اساس مباحث مطرح شده در باره انرژی الکتریکی و عوامل موثر بر میزان مصرف آن برآورد شده است. در این جداول شارژ

پایه دارای ۰/۵ در صد کربن در نظر گرفته شده است. تغییر انرژی گرمایی خروجی و انرژی الکتریکی نسبت به حالت پایه برای سایر درصدهای کربن محاسبه شده است. اختلاف هزینه ها مربوط به آنتراسیت ورودی و اکسیژن مصرفی و نیز انرژی الکتریکی است. در جدول ۳ تفاوت در هزینه انرژی الکتریکی مصرفی مشخص شده است. در کل می توان به این نتیجه رسید که در حالت پایه، هزینه تولید از طریق تزریق، نسبت به افزایش کپه ای ۸/۲ دلار بر تن کمتر است. علاوه بر این با انتخاب صحیح درصد کربن می توان کاهش هزینه بیشتری را سبب شد. در این بررسی و با توجه به آنالیز قراضه و آهن اسفنجی، مقدار کربن ایده آل ۳/۵ در صد در نظر گرفته شده است. این مطلب در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱ - تاثیر در صد کربن موجود در آهن اسفنجی بر انرژی های گرمایی، مصرف الکتریسیته و هزینه برق مصرفی در شرایط بار کردن جداگانه آنتراسیت بصورت کپه ای. قیمت برق ۴ سنت بر کیلو وات ساعت و واحد انرژی در KWh/Ton در نظر گرفته شده است.

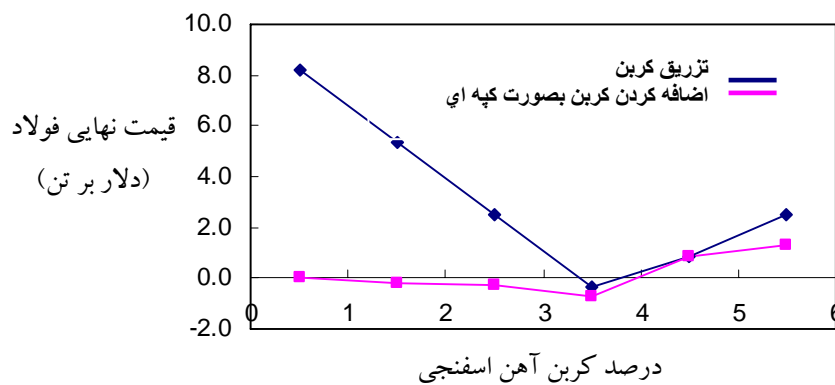
%C DRI	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
CO Latent heat	208.3	159.8	110.3	59.8	76.9	94.8
CO sensible heat	36.6	28.1	19.4	10.5	13.5	16.6
CO ₂ sensible heat	13.1	10.7	8.3	5.8	6.6	7.5
O ₂ sensible heat	2.9	2.2	1.5	0.8	1	1.3
Change in total out put energy	-	-60.1	-121.5	-184.2	-162.8	-140.8
Carbon combustion energy	131.6	101	69.7	37.7	48.6	59.9
Change in carbon combustion energy	-	-30.6	-61.9	-93.9	-83	-71.7
Change in electric energy consumption	-	-29.5	-59.6	-90.3	-79.8	-57
Change in electric energy cost at 0.04 \$/KWh	-	-1.18	-2.38	-3.61	-3.19	-2.28

جدول ۲ - تاثیر در صد کربن موجود در آهن اسفنجی بر انرژی های گرمایی، مصرف الکتریسیته و هزینه برق مصرفی در شرایط تزریق آنتراسیت به طور مجزا. قیمت برق ۴ سنت بر کیلو وات ساعت و واحد انرژی در KWh/Ton در نظر گرفته شده است.

%C DRI	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
CO Latent heat	71.5	67.6	63.7	69.6	76.9	94.8
CO sensible heat	12.6	11.9	11.2	10.5	13.5	16.6
CO ₂ sensible heat	6.4	6.2	6	5.8	6.6	7.5
O ₂ sensible heat	1	0.9	0.8	0.8	1	1.3
Change in total out put energy	-	-4.86	-9.82	-23.64	6.3	28.7
Carbon combustion energy	45.2	42.7	40.2	37.6	48.6	59.9
Change in carbon combustion energy	-	-2.5	-5	-7.5	2.9	14.7
Change in electric energy consumption	-	-2.36	-4.82	-16.14	3.4	14
Change in electric energy cost at 0.04 \$/KWh	-	-0.1	-0.19	-0.64	0.14	0.56

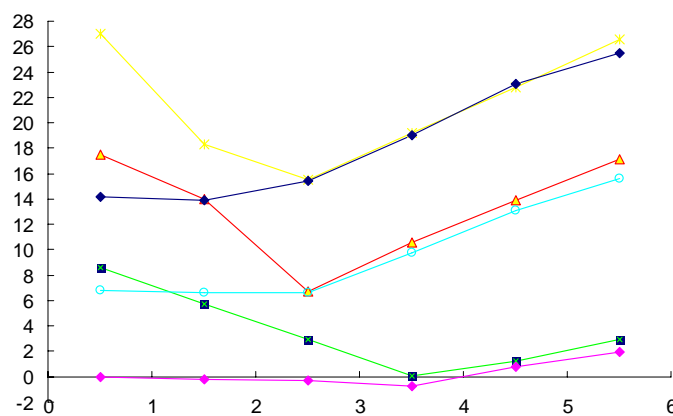
جدول ۳ - تفاوت هزینه انرژی الکتریکی مصرفی برای تولید فولاد در شرایط افزودن آنتراسیت به شیوه تزریق یا کپه ای همراه با شارژ آهن اسفنجی دارای ۰/۵ درصد کربن

	ΔE
CO Latent heat	-136.8
CO sensible heat	-24
CO ₂ sensible heat	-6.8
O ₂ sensible heat	-1.9
Total out put energy variation	-169.5
Carbon combustion energy	-86.4
Electric energy consumption	-83.1
Change in electric energy cost at 0.04 \$/KWh	-3.32



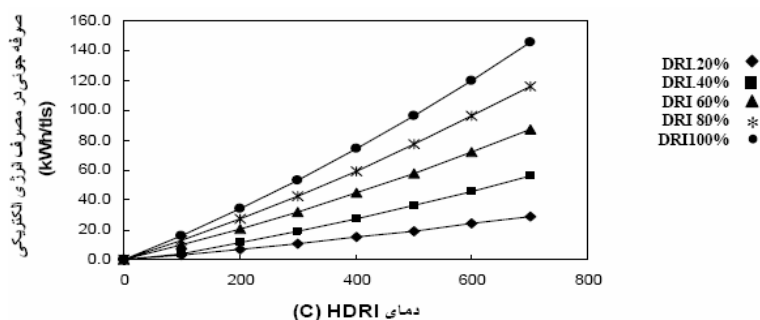
شکل ۱ - تفاوت هزینه های تولید در شارژ فلزی دارای ۲۵٪ آهن اسفنجی دارای درصدهای متفاوت کربن

۲۵٪ آهن اسفنجی، تزریق کربن (سبز) ۲۵٪ آهن اسفنجی، افزایش کپه ای کربن (بنفش)
 ۵۰٪ آهن اسفنجی، تزریق کربن (قرمز) ۵۰٪ آهن اسفنجی، افزایش کپه ای کربن (نارنجی)
 ۷۵٪ آهن اسفنجی، تزریق کربن (زرد) ۷۵٪ آهن اسفنجی، افزایش کپه ای کربن (آبی)

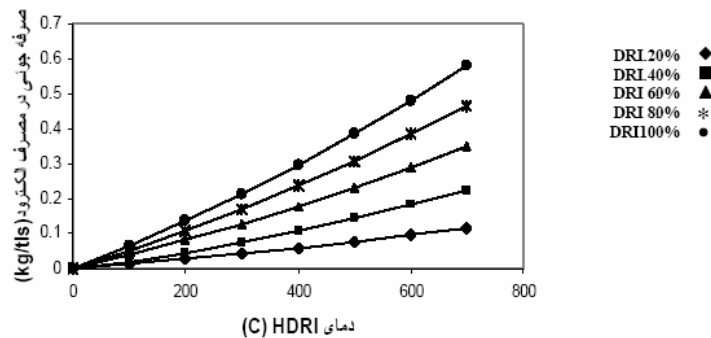


شکل ۲ - تفاوت هزینه های تولید برای شارژ فلزی با درصدهای مختلف آهن اسفنجی در حالت های تزریق کربن و افزایش کپه ای کربن

نمودار ۳ اثر افزایش شارژ داغ به کوره بر محاسبه تغییرات انرژی الکتریکی در مقادیر مختلف شارژ و دماهای متفاوت آن را نشان می دهد. با توجه به اینکه مصرف الکتروود به میزان 0.04 kg/kWh می باشد، بنابراین تغییرات مصرف الکتروود با افزایش مقدار و دمای شارژ داغ قابل محاسبه است. نمودار ۴ این تغییرات را نشان می دهد. مشاهده می شود هنگامیکه 100% آهن اسفنجی به صورت داغ به کوره شارژ می شود، با افزایش هر 100°C به دمای شارژ، مصرف انرژی الکتریکی به طور متوسط 20 kWh/TLS کاهش می یابد. با کاهش درصد شارژ داغ به کوره قوس الکتریکی، میزان صرفه جویی نیز مقداری کاهش می یابد. به عنوان مثال، با شارژ 80% HDRI به کوره قوس الکتریکی، به ازای افزایش هر 100°C بر دمای شارژ، مصرف انرژی الکتریکی کوره به میزان 16 kWh/TLS کاهش می یابد. این روند برای بقیه درصد های شارژ داغ نیز وجود دارد. حال با احتساب قیمت هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی به میزان 0.22 دلار و قیمت هر کیلوگرم الکتروود مصرفی برابر با 3 دلار میزان صرفه جویی اقتصادی پراحتی قابل محاسبه خواهد بود.



شکل ۳- اثر شارژ داغ بر میزان انرژی الکتریکی مصرفی



شکل ۴- اثر شارژ داغ بر مصرف الکتروود در کوره قوس الکتریکی

نتیجه گیری

با افزایش درصد کربن آهن اسفنجی، در هر دو حالت تزریق و افزایش کربن به صورت کپه ای، از 0.5 تا $0.5/5$ در صد در مرحله اول قیمت فولاد تولیدی یک مقدار مینیمم کاهش خواهد یافت و در مرحله بعد با روندی صعودی ادامه می یابد. در تزریق کربن، روند افت قیمت اولیه از 0.5 در صد تا نقطه مینیمم کند تر است. ولی در اضافه کردن کربن بصورت کپه ای، افت قیمت شدیدتر خواهد بود. بطور کلی قیمت اولیه فولاد تا قبل از نقطه مینیمم در حالت تزریق از افزایش کپه ای ارزان تر بوده و از این نقطه به بعد تقریباً یکسان می شود. تغییرات قیمت فولاد برای شارژهای با درصد های مختلف آهن اسفنجی در این پروژه بررسی شده است.

مشاهده می شود که با افزایش در صد آهن اسفنجی در شارژ، مینیمم هزینه تولید فولاد به سمت درصدهای پائین تر کربن حرکت کرده و قیمت فولاد افزایش می یابد. شارژ داغ آهن اسفنجی به کوره قوس الکتریکی هزینه های انرژی و الکتروود را کاهش داده و علاوه بر آن سرعت تولید در فرآیند را افزایش می دهد.

قدردانی

از دفتر تحقیق و فناوری و بخش فولاد سازی شرکت فولاد خوزستان به سبب مساعدت در تهیه اطلاعات صنعتی مفید برای طراحی و ساخت نرم افزار موضوع تحقیق قدر دانی می شود.

مراجع

1. WEC, Energy Efficiency Improvement Utilizing High Technology— an Assessment of Energy Use in Industry and Buildings, London: World Energy Council, 1995.
2. International Iron Steel Institute, Steel Statistics Yearbook 1992, Brussels: IISI, 1992.
3. International Iron Steel Institute, Statistics on Energy in the Steel Industry, Brussels: IISI, 1996.
4. Bekker, J.G., Craig, J.K. and Pistorius, P.C., Modeling and simulation of an electric arc furnace process, ISIJ International, Vol. 39, No. 1, 1999, 23-32.
5. Bekker, J.G., "Modeling and control of an Electric Arc Furnace off-gas Process", Master's Dissertation, University of Pretoria, South Africa, 1998.
6. Oosthuizen, D.J., Viljoen, J.H., Craig, L.K. and Pistorius, P.C., "Modeling of the off-gas Exit Temperature and Slag Foam Depth of an Electric Arc Furnace Process", ISIJ International, Vol. 41, No. 4, No. 4, 2001, pp. 399-401.
7. Oosthuizen, D.J., Craig, I.K. and Pistorius, P.C., Economic evaluation and design of an electric arc furnace controller based on economic objectives, Control Engineering Practice, Vol. 12, 2004, pp 153-265.
8. Morales, R.D., Rodriguez-Hernandez, H., and Conejo, A.N., A mathematical simulator for the EAF steel making process using direct reduced iron, ISIJ International, Vol. 21, No. 5, pp. 426-435, 2001.
9. Morales, R.D., Lule, R., Lopez, F., Camachi, J. and Romero, J.A., The slag foaming practice in EAF and its influence on the steelmaking shop productivity, ISIJ International, Vol. 35, No. 29, 2001, 1054-1062.
10. Kerr, J.J. and Fruehan, R.J., Additions to Generate Foam in Stainless Steelmaking, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 35B, August 2004, 643.
11. Hong, L., Hirasawa, M. and Sano, M., Behavior of Slag Foaming with Reduction of Iron Oxide in Molten Slags by Graphite, ISIJ International, Vol. 38, No. 2, 1998, 1339-1345.
12. Oltmann, H.G. and Pretorius, E.B., Simulation of the EAF refining stage, AISE Steel Technology, March 2003, 25-33.
13. Nyssen, P., Colin, R., Knoops, S. and Junque, J.L., On-line EAF control with a dynamic metallurgical model, Proceedings of the 7th European Electric Steelmaking Conference, Venice, May 2002, 23-304.
14. M.J. Thomson, N.G. Kournetas, E. Evenson, I.D. Sommerville, A. McLean, and J.Guerard, Effect of

oxyfuel burner ratio changes on energy efficiency in electric arc furnaxe at Co-Steel Lasco, Ironmaking and Steelmaking, Vol.28, 2001, 267-272.

15. Thomson, M.J., Kournetas, N.G., Evenson, E., Sommerville, I.D., McLean, A. and Guerard, J., Effect of oxyfuel burner ratio changes on energy efficiency in electric arc furnace at Co-Steel Lasco, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 28, 2001, 267-272.
16. Tuluevski, Y.N., Fleisher, A. and Zinurov, I.Y., Two-stage Fuel Arc Furnace FAF: a-new concept for energy optimization in electric steelmaking, MPT International, No. 5, October 1998.
17. Vercruyessen, C., Wollants, P., Roos, J.R., Robertson, D.G.C., and Bertels, L., Mathematical modeling of refining of stainless steel in MRPA converter, Iron and steelmaking, Vol. 32, No. 4, 1994, 287-296.
18. Morales, R.D., Rodriguez, H.R. and Conejo, A.N., A mathematical simulation for steelmaking process using direct reduced iron, ISIJ International, Vol. 41, No. 5, 2001, 426-435.
19. Nyssen, P., Marique, C., Prum, C., Bintner, P. and Sivini, L., A new metallurgical model for the control of EAF operations, Proceedings of the 6th European Electric Steelmaking Conference, Düsseldorf, June 1999, 43-50.
20. Sadrnezhaad, K., and Simchi, A., Simulation of the Iron Smelting-Reduction Process, Journal of Materials Science and Technology, Vol. 15, No. 2, 1999, 121-127.

۲۱. صدرنژاد، س.خ. و سرکمری، م.، شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القائی، سمپوزیوم فولاد ۷۹، ۳-۴ اسفند ۱۳۷۹،

شرکت فولاد خوزستان، ۱۳۷۹، ۱۱۳-۱۲۳.

22. Holmes, G. and Memoli, F., Operational improvements achieved in Davsteel, utilizing the new technique KT Injection system and TDR digital Regulation: a case study, Electric Furnace Conference Proceedings, Iron and Steel Society, 2001, 527-537.
23. Sadrnezhaad, K., and Elliott, J.F., The Melting Rate of DRI Pellets in Steelmaking Slags, Iron and Steel International, 1980, 327-339.
24. Marique, C., Nyssen, P., and Salamone, P., On-line control of foamy slag in EAF, Proceedings of the 6th European Electric Steelmaking Conference, Dusseldorf, June 1999, 154-161.
25. Sadrnezhaad, K., Effect of Impurities on Energy Requirements in Electric Steelmaking with DRI, Scientia Iranica, Vol. 3, Nos. 1,2&3, 1996, 113-119.
26. Sadrnezhaad, K., Continuous Melting of Metallized Ore Pellets, Iron and Steel International, 1981, 309-314.
27. Sammt, F.L., The pros and cons of high carbon DRI as EAF feed, Steel Times, Vol. 222, No. 10, Oct. 1994, 398-399.
28. Bekker, J.G., Craig, I.K. and Pistorius, P.C., Model predictive control of an electric arc furnace off-gas process, Control Engineering Practice, Vol. 8, No. 4, 2000, 445-455.
29. Vercruyessen, C., Wollants, P., Roos, J.R., Robertson, D.G.C. and Bertels, L., Mathematical modeling of refining of stainless steel in MRPA converter, Iron and steelmaking, Vol. 32, No. 4, 1994, 287-296.
30. Morales, R.D., Rodriguez, H.R. and Conejo, A.N., A mathematical simulation for steelmaking process using direct reduced iron, ISIJ International, Vol. 41, No. 5, 2001, 426-435.
31. <http://www.midrex.com/uploads/documents/Hotlink%20> (1999) 1.pdf (Dated: Feb. 3, 1994.)