

## موازنه جرم و انرژی در کوره های قوس الکتریکی فولادسازی

علی فردوسی<sup>۱</sup>، سید خطیب الاسلام صدرنژاد<sup>۱</sup>، هومن فخرنوبی<sup>۲</sup>، سروش پرویزی<sup>۲</sup>، مهران خرم نیا<sup>۳</sup>، داریوش

خمیسی<sup>۳</sup>، داریوش سلطانی<sup>۳</sup>

پژوهشگاه مواد و انرژی، تهران میدان آرژانتین

Ferdowsi۹@yahoo.com

### چکیده

هزینه مواد اولیه و انرژی معمولاً سهم عمده ای از اقتصاد عملیات تولید فولاد توسط کوره های قوس الکتریکی را در بر می گیرد. برای کاهش این هزینه ها، انتخاب شرایط و نوع مواد در هنگام بار کردن کوره، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مناسب ترین و ارزاترین راه برای بررسی اثر تغییرات مختلف اعمال شده در شرایط فرآیندی بر میزان مصرف انرژی و کیفیت محصول تولیدی از طریق محاسبه و مدل سازی کامپیوتری است. در این پژوهش با استفاده از روشهای برنامه نویسی رایانه ای، محاسبات مربوط به انتقال جرم و انرژی در کوره قوس الکتریکی تولید فولاد، مدل سازی شده و ماحصل کار به صورت نرم افزار کامپیوتری جمع آوری و از آن به منظور بررسی راهکارهای کاهش مصرف انرژی در کوره های قوس الکتریکی بهره گیری شده است. نرم افزار حاصل قادر به پیش بینی مقدار لازم از هر یک از مواد اولیه در شارژ کوره بوده و علاوه بر این، میزان انرژی الکتریکی مصرفی در فرآیند، مصرف الکتروود، حجم اکسیژن دمشی مورد نیاز برای فولادسازی، وزن و ترکیب فولاد تولیدی، وزن و ترکیب سرباره، حجم و ترکیب گازهای خروجی از کوره و میزان گرد و غبار تولیدی است. با استفاده از این نرم افزار، اثر شارژ گرم آهن اسفنجی، استفاده از مشعلهای گاز طبیعی در کوره و سوزاندن گاز طبیعی، و نیز افزودن کربن به کوره و نحوه افزودن آن در کوره قوس الکتریکی بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** شبیه سازی کامپیوتری، فولاد سازی، کوره قوس الکتریکی، موازنه جرم و انرژی، بهینه سازی

<sup>۱</sup> - پژوهشگاه مواد و انرژی

<sup>۲</sup> - دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۳</sup> - شرکت فولاد خوزستان

## ۱- مقدمه

در حالی که تقاضای انرژی هر روز در جهان در حال افزایش است، تغییر الگوی مصرف و راه‌های بکارگیری انرژی در دنیای امروز برای پیشرفت اقتصادی هر کشوری اهمیت حیاتی دارد. نیاز به کارخانه‌های کوچک فولاد سازی برای تولید فولادهای مخصوص و یا با کیفیت بهتر، کاهش سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های تولید، آلودگی‌های زیست محیطی سایر روش‌های فولادسازی، و افزایش تولید قراضه در سال‌های آتی و ارزان بودن انرژی باعث گسترش و پیشرفت روبه گسترش کوره‌های قوس الکتریکی در صنعت فولاد سازی کشور شده است. از آنجایی که یکی از مشکلات اساسی این کوره‌ها مصرف بالای انرژی الکتریکی آنهاست، کاهش انرژی مصرفی در این بخش بسیار با اهمیت است. تولید فلز در کوره قوس الکتریکی سه فاز، مستلزم مصرف برق فراوان و مواد ذوب شونده مناسب مانند آهن قراضه دسته بندی شده، آهن اسفنجی و مواد افزودنی کمکی است. [۱] هزینه مواد اولیه و انرژی (برق) معمولاً سهم عمده‌ای از اقتصاد عملیات را در بر می‌گیرد. برای کاهش این هزینه‌ها لازم است تدابیری اندیشیده شود. [۲] انتخاب شرایط و نوع مواد در هنگام بار کردن در این راستا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تعیین نسبت‌های وزنی مواد برای مثال از دو راه "سعی و خطا" و "محاسبه بر اساس اصول موازنه‌های جرمی و حرارتی، تعادلات ترمودینامیکی و سینتیک تحولات ذوب و تصفیه" قابل انجام است. مناسب‌ترین و ارزاترین راه برای بررسی اثر تغییرات مختلف اعمال شده در شرایط فرآیندی بر میزان مصرف انرژی و کیفیت محصول تولیدی از طریق محاسبه و مدلسازی کامپیوتری است. [۳] یک نرم افزار کامپیوتری تخصصی این امکان را فراهم می‌آورد تا در کوتاهترین زمان و با حداقل هزینه تحولات ایجاد شده در فرآیند بر اثر تغییر اعمالی تجزیه و تحلیل شود و از این طریق راه‌های کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت محصول را بر آورد کرده و میزان کارآیی اصلاحات مختلف ایجاد شده بر روی فرآیند فولاد سازی را پیش بینی کند. [۴-۸] با توجه به اهمیت کاهش مصرف انرژی و افزایش نیاز روزافزون به محصولات صنعتی به ویژه فولادها، بهینه سازی مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی که یکی از بزرگترین مصرف کنندگان انرژی کشور محسوب می‌شوند، ضروری است. در این پژوهش هدف، فرموله کردن روابط بین اثرات ناشی از موازنه مجموع جرم و انرژی مرتبط با انرژی الکتریکی مصرفی در کوره قوس الکتریکی *EAF* و بهره‌گیری از آن به منظور بررسی راهکارهای کاهش مصرف انرژی در کوره‌های قوس الکتریکی، از طریق پیش بینی رفتار کوره توسط اصول موازنه جرم و انرژی است.

نرم افزارهای بسیاری تا کنون درباره موازنه جرم و انرژی در کوره‌های تولید فلز در جهان ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم افزارها معمولاً قابل استفاده برای هر کارخانه خاص بوده و بر حسب طبیعت مواد و تکنولوژی مورد استفاده با هم تفاوت دارند. اطلاعات اولیه، نحوه استفاده و کارایی این نرم افزارها

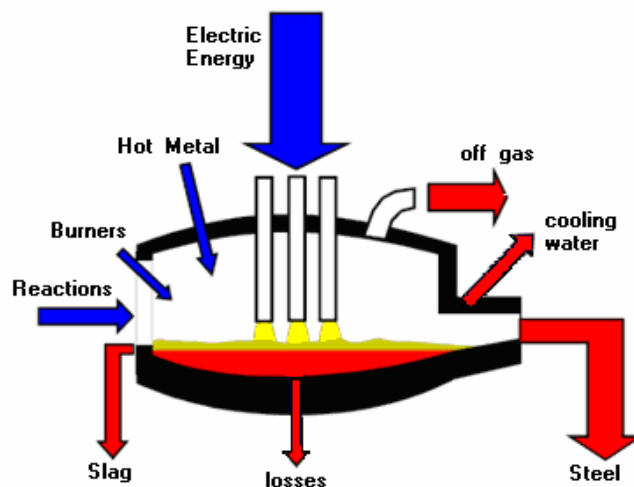
معمولاً در ارتباط با شرایط منطقه‌ای و خاص کاربر و سئوالاتی که نرم افزار باید پاسخ گوید نیز تفاوت می کند. [۹-۱۱]

نرم افزار حاصله ترکیب شارژ ورودی، قراضه، آهن اسفنجی، آهک، کک و ...، شرایط کاری کوره و ترکیب محصول مطلوب را به عنوان ورودی دریافت کرده و با انجام محاسبات موازنه جرم و انرژی برای اجزای مختلف شارژ، مقدار لازم از هر یک از مواد اولیه را در شارژ کوره تعیین می کند. علاوه بر این، نرم افزار میزان انرژی الکتریکی مصرفی در فرآیند، مصرف الکتروود، حجم اکسیژن دمشی مورد نیاز برای فولادسازی، وزن و ترکیب فولاد تولیدی، وزن و ترکیب سرباره، حجم و ترکیب گازهای خروجی از کوره و میزان گرد و غبار تولیدی را پیش بینی می کند.

## ۲- روش تحقیق

برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ابتدا باید پارامترهای موثر در موازنه انرژی کوره قوس الکتریکی شناسایی شود. نکته اساسی در مورد این کوره ها آن است که هر دو مقوله بقای جرم و انرژی در موازنه انرژی آنها وارد می شود. بنابراین لازم است پس از بررسی روش های انتقال حرارت از کوره و ارائه روابطی برای محاسبه آن، مبانی متالورژیکی فرآیند نیز شناسایی شده و روابط حاکم بر واکنش های شیمیایی و معادلات ترمودینامیکی آنها استخراج گردند.

برای تولید فولاد در کوره های قوس الکتریکی مواد اولیه که شامل آهن اسفنجی، آهن قراضه، مواد سرباره ساز، کک و سایر افزودنیهاست وارد کوره شده و ذوب می شوند. حرارت مورد نیاز برای تولید فولاد از چند منبع مختلف تامین می شوند که عبارتند از قوس الکتریکی، مشعلهای جانبی، واکنشهای شیمیایی و گرمای همراه مواد ورودی به کوره. از سوی دیگر حرارت از طرق زیر از کوره خارج می شود: گرمای همراه با فولاد مذاب، گرمای همراه با سرباره مذاب، گرمای خروجی توسط گرد و غبار، گرمای اتلافی از دیواره های کوره توسط سیستم آبگرد. شکل ۱ شماتیک منابع ورود و خروج انرژی در یک کوره قوس الکتریک نوعی را نشان می دهد.



شکل ۱) منابع ورود و خروج انرژی به کوره قوس الکتریکی

موازنه کلی انرژی را برای کوره قوس الکتریک می توان به صورت زیر نوشت:

$$E_{electric\ energy} + E_{burner} + E_{reactions} + E_{HM} = E_{steel} + E_{slag} + E_{off\ gas} + E_{cw} + E_{losses} \quad (1)$$

که سمت چپ این معادله نشان دهنده انرژی های ورودی و سمت چپ آن نشان دهنده انرژی های خروجی است. در این رابطه  $E_{electric\ energy}$ ، نشان دهنده انرژی ورودی توسط قوس الکتریکی،  $E_{burner}$ ، انرژی ورودی از طریق مشعلهای گاز سوز کوره،  $E_{reaction}$ ، حرارت تولیدی در اثر انجام واکنش های شیمیایی،  $E_{HM}$ ، گرمای همراه با مواد ورودی به کوره،  $E_{steel}$ ، گرمای خروجی همراه با فولاد مذاب،  $E_{slag}$ ، گرمای خروجی همراه با سرباره،  $E_{off\ gas}$ ، گرمای همراه با گازهای خروجی،  $E_{cw}$ ، گرمای اتلافی توسط سیستم آبگرد و  $E_{losses}$ ، انرژی اتلاف شده است.

امروزه در کوره های قوس الکتریک به منظور کاهش مصرف انرژی الکتریکی، افزایش راندمان ذوب و کاهش زمان فولادسازی از مشعلهای گازسوز استفاده می شود. در این مشعلها انرژی از سوختن گاز متان طبق واکنش زیر تولید می شود.



بنابراین انرژی ورودی به کوره حاصل از احتراق متان در مشعلها برابر است با:

$$E_{burners} = Q_{CH_4} \cdot \Delta H_{CH_4} \quad (3)$$

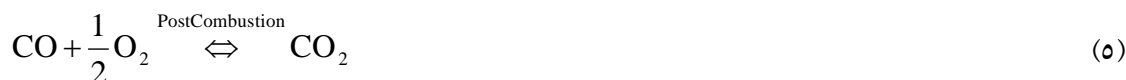
که در این معادله  $Q_{CH_4}$  و  $\Delta H_{CH_4}$  به ترتیب حجم و ارزش حرارتی متان می باشد.

پس از ذوب مواد اولیه ورودی به کوره، مذاب تشکیل شده دارای مقادیر زیادی ناخالصی است. مهمترین این ناخالصیها شامل کربن، سیلیسیوم، منگنز، گوگرد و فسفر می باشند. در طول فولادسازی، مقدار این عناصر در فولاد از طریق دمش اکسیژن و اکسیداسیون آنها، کنترل می شود. در اینجا واکنشهای اکسیداسیون آهن،

همایش ملی سوخت، انرژی و محیط زیست

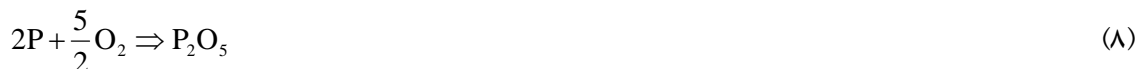
کربن، سیلیسیوم، منگنز، فسفر و نیز گوگردزدایی در نظر گرفته شده است. بیشتر این واکنشها حرارت زا بوده و مقداری از حرارت مورد نیاز کوره را تامین می کند.

کربن در دو مرحله و بنابر واکنشهای گرمزای زیر اکسید می شود. [۱]



درصد پیشرفت واکنش تولید  $CO_2$  با توجه به درصد *Post Combustion* قابل تغییر است.

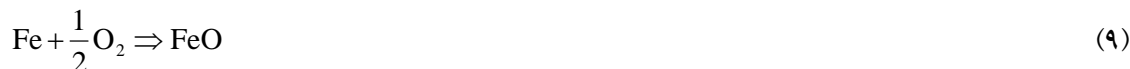
اکسیداسون سیلیسیوم و منگنز و نیز واکنش فسفرزدایی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.



برای محاسبه حرارت تولیدی در اثر این واکنشها، با استفاده از روابط موازنه جرمی و ضریب توزیع این عناصر در مذاب و سرباره، جرم ماده واکنش داده و در نتیجه انرژی حاصل از اکسیداسیون عنصر مورد نظر تعیین شده است.

در نتیجه دمش اکسیژن مقداری از آهن اکسید شده و وارد سرباره می شود. [۱] اکسیداسیون آهن بر اساس

واکنشهای زیر در نظر گرفته شده است:



از سایر واکنشهای شارژ ورودی به دلیل تاثیر ناچیز آنها در محاسبات انرژی صرفنظر شده است. بنابراین  $E_{reaction}$  انرژی حاصل از واکنشها به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E_{reactions} = \sum m_i \cdot \Delta H_i \quad (11)$$

در این معادله  $m_i$  جرم جزء  $i$  اکسید شده و  $\Delta H_i$  گرمای واکنش اکسیداسیون جزء  $i$  می باشد.

در صورتیکه قراضه ورودی به کوره پیشگرم شده باشد و یا آهن خام مذاب به کوره شارژ شود، حرارت

قابل ملاحظه ای توسط این مواد وارد کوره شده که می تواند مقداری از انرژی مورد نیاز برای فولاد سازی را تامین نماید.

گرمای همراه مواد ورودی بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود:

$$E_{HM} = \int_{298}^{T_{in}} m.c_p.dT \quad (12)$$

دمای فولاد سازی در حدود  $1630^{\circ}\text{C}$  می باشد و بنابراین مواد خروجی از کوره با دماهای بالا کوره را ترک می کنند. گرمای همراه مواد خروجی که شامل، فولاد، سرباره و گازهای خروجی می باشند توسط معادله زیر محاسبه می شود:

$$E_{steel} = \int_{298}^{T_m} m.c_{p,s}.dT + \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_{out}} m.c_{p,l}.dT \quad (13)$$

محاسبات برای سرباره و گرد و غبار به صورت مشابه است. در این معادله وابستگی ظرفیت حرارتی به دما بر طبق معادله زیر در نظر گرفته شده است.

$$c_p = a + bT + cT^{-2} \quad (14)$$

در کوره های قوس الکتریک جدید به منظور کاهش هزینه های فرآیند، سقف و دیواره های کوره توسط سیستم آبگرد خنک می شوند بنابراین مقداری از حرارت کوره توسط این سیستم آبگرد به خارج منتقل می شود. حرارت منتقل شده توسط سیستم آبگرد برابر است با:

$$E_{wc} = m_{H_2O}c_{H_2O}\Delta T \quad (14)$$

که در این رابطه  $m_{H_2O}$ ،  $c_{H_2O}$  و  $\Delta T$  به ترتیب عبارتند از جرم آب بکار گرفته شده برای خنک سازی، ظرفیت حرارتی آب، و اختلاف دمای آب ورودی و خروجی به سیستم می باشد. حرارت اتلافی شده از کوره،  $E_{losses}$ ، شامل اتلاف انرژی در سه بخش می باشد:

۱- اتلاف انرژی از طریق تبخیر آهن با توجه به دمای گازهای خروجی و  $C_p$  بخار خروجی با استفاده از رابطه ۴-۱۵ محاسبه می شود.

$$\Delta H_{vap} = m_{Fe,Vap}.C_p.\Delta T \quad (15)$$

که در این رابطه  $\Delta H_{vap}$  اتلاف انرژی الکتریکی از طریق تبخیر،  $m_{Fe,Vap}$  وزن آهن موجود در گازهای خروجی،  $C_p$ ، ظرفیت حرارتی متوسط آهن و  $\Delta T$  اختلاف دمای گاز خروجی از کوره با دمای محیط است.

۲- اتلاف انرژی از بخشهای الکتریکی کوره مانند بستها و بازوهای که انرژی الکتریکی را به الکترود منتقل می کنند و قسمت های الکتریکی کوره که در خارج از کوره واقع هستند مانند کابل های انتقال انرژی الکتریکی به الکترودها و اتلاف انرژی ترانسفورماتورهای کوره که شامل مدار اولیه و ثانویه است. راندمان ترانسفورماتورهای کوره های قوس الکتریکی حدود ۹۰٪ است که کاملاً به مشخصات کوره وابسته است.

۳- اتلاف انرژی از سایر قسمت های کوره شامل انتقال حرارت از بدنه و درب کوره به صورت های مختلف که برای هر کوره متفاوت است و محاسبه آن برای کوره های مختلف با توجه به ابعاد هندسی کوره و نسوز مصرفی در آن انجام می شود. با توجه به نتایج محاسبات عمده حرارت از طریق کف، جداره ها و الکترود کوره تلف می شود [۱۲].

برای محاسبه حرارت جذب شده توسط کف کوره فرض می شود که کف کوره به صورت قسمتی از یک کره با شعاع داخلی  $r_1$  و شعاع خارجی  $r_2$  است. بنابراین:

$$V = \int_0^{2\pi} \int_0^{0.2\pi} \int_{r_1}^{r_2} r^2 \sin \theta \, dr \, d\theta \, d\varphi = 0.4(r_2^3 - r_1^3) \quad (16)$$

$$Q_{abs} = \left( \frac{\rho_{bm} V}{M_{bm}} \right) \bar{c}_p \Delta T \quad (17)$$

در معادلات بالا  $V$  حجم کف کوره،  $\rho_{bm}$  چگالی کف کوره،  $M_{bm}$  جرم مولی متوسط،  $\bar{c}_p$  ظرفیت حرارتی متوسط کف کوره،  $\Delta T$  افزایش دمای کف کوره و  $Q_{abs}$  گرمای جذب شده توسط کف کوره است. حرارت تلف شده بوسیله هدایت از طریق کف کوره به صورت زیر محاسبه می شود:

$$A_{rd} = r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{0.2\pi} \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{cond} = -k A_{rd} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (19)$$

که  $A_{rd}$  مساحت کف کوره،  $k$  ضریب هدایت حرارتی کف کوره و  $\dot{Q}_{cond}$  حرارت منتقل شده از طریق هدایت است.

در حین شارژ کوره که درب کوره باز است حرارت از طریق سطح مذاب فلزی از دو راه اصلی تابش و جابجایی به محیط خارج از کوره منتقل می شود. حرارت اتلاف شده بوسیله تابش برابر است با:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon A_{cov} (T_s^4 - T_0^4) \quad (22)$$

که در این معادله  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن (Stefan-Boltzmann constant)،  $\varepsilon$  ضریب نشر،  $A_{cov}$  مساحت درب کوره،  $T_s$  دمای سطح مذاب،  $T$  دمای محیط و  $\dot{Q}_{rad}$  حرارت تلف شده از طریق تابش است. حرارت تلف شده بوسیله جابجایی توسط معادله زیر محاسبه می شود.

$$\dot{Q}_{conv} = c(Gr.Pr)^m \left( \frac{k}{L} \right) h A_{cov} \Delta T \quad (23)$$

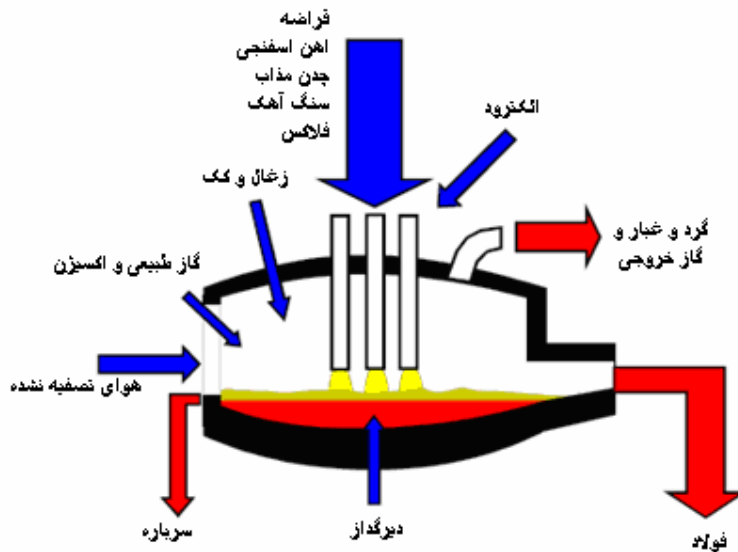
که در این معادله  $Gr$  عدد گراشف (Grashof number)،  $Pr$  عدد پرانتل (Prandtl number)،  $h$  ضریب انتقال حرارت می باشد.

در اثر عبور جریان الکتریکی بسیار شدید از الکترودها به منطقه ذوب، الکترودها که به عنوان منبع تولید انرژی کوره عمل می کنند، خودشان گرمای زیادی جذب می کنند. حرارت جذب شده هنگامی که الکترودها به هردلیلی از مذاب بیرون کشیده می شوند، به محیط منتقل می شود و به عنوان حرارت تلف شده محسوب می شود [۱۳ و ۱۴]. حرارت توسط تابش و جابجایی بوسیله الکترودها اتلاف می شود. حرارت تلف شده توسط تابش و جابجایی به ترتیب توسط معادلات زیر محاسبه می شود.

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon A_{electrodes} \times (T_s^4 - T_0^4) \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{conv} = c(Gr.Pr)^m \left(\frac{k}{L}\right) h A_{electrodes} \cdot \Delta T \quad (25)$$

برای تعیین مقدار مورد نیاز از هر یک از شارژها، و نیز تعیین میزان انجام واکنشهای شیمیایی مختلف، نوشتن معادلات موازنه جرم برای کوره ضروری است. در شکل ۲ به صورت مواد ورودی و خروجی به کوره به صورت شماتیک نشان داده شده اند. شارژ ورودی به کوره عبارت است از آهن قراضه، آهن اسفنجی، چدن خام، زغال سنگ (کک)، آهک، دولومیت، مواد افزودنی، آجر منیزیا، آستر کوره و سرباره سازها و مواد خروجیاز کوره عبارتند از فولاد مذاب، سرباره و گرد و غبار.



شکل ۲) شماتیک جریان مواد ورودی و خروجی به کوره قوس الکتریکی

اهداف موازنه جرمی عبارتند از تعیین میزان واکنش های متالورژیکی عناصر  $Si$ ،  $Mn$ ،  $Fe$  و  $C$ ، جرم هوای نفوذی و گازهای خروجی با دانستن داده هایی نظیر مقدار مواد فلزی ورودی، مقدار مصرف الکتروود، مقدار تولید فلز و سرباره و ... برای انجام این کار، داده های مربوط به ترکیب، حجم، و دمای گاز خروجی مورد نیاز است.

بنابراین با توجه به مجهول بودن میزان قراضه، آهن اسفنجی، چدن، کک یا آنتراسیت، آهک، دولومیت، آجر منیزیتی، خاک نسوز مصرفی، سرباره و افزودنی گداز آور نیاز به ۱۰ معادله می باشد. موازنه جرمی  $Fe$  به صورت زیر است:

$$\sum_{in} X_i \% Fe_i = \sum_{out} X_i \% Fe_i \quad (26)$$



در سمت چپ رابطه بالا کلیه منابع ورود آهن به کوره و در سمت راست رابطه بالا کلیه منابع خروج آهن از کوره در نظر گرفته می شود. عمده ترین منابع ورود آهن به کوره آهن اسفنجی، قراضه و چدن می باشد ولی در صورتی که سایر مواد ورودی به کوره مقدار آهن قابل توجهی داشته باشند می توان ضرایب مربوط به آنها را نیز در نظر گرفت. موازنه جرمی برای منگنز، سیلیسیم، فسفر، گوگرد و منیزیا نیز به صورت مشابه است. کربن می تواند به دو صورت توده ای و تزریقی به کوره افزوده شود، نحوه افزودن کربن بر نوع مصرف آن در کوره تاثیر گذار است، بنابراین نحوه افزودن کربن (به صورت کپه ای و تزریقی) با اعمال ضریب تاثیر در محاسبات وارد شده است.

با توجه به نسبت وزنی قراضه به شارژ فلزی (*Scrap Rat*) می توان نوشت:

$$\text{Scrap Ratio} = S_R = X_1 / (X_1 + X_2 + X_3) \quad (27)$$

که  $X_1$ ،  $X_2$  و  $X_3$  به ترتیب جرم آهن قراضه، آهن اسفنجی و چدن خام شارژ شده به کوره می باشد. بنابراین

$$(S_R - 1)X_1 + S_R X_2 + S_R X_3 = 0 \quad (28)$$

بازرسیته سرباره  $(\frac{CaO}{SiO_2})$  باید برابر مقداری مطلوب و از پیش تعیین شده باشد، بنابراین باید تساوی های زیر برقرار باشند:

$$\left(\frac{CaO}{SiO_2}\right)_{Required} = \left(\frac{CaO}{SiO_2}\right)_{Calculated} \quad (30)$$

$$\left(\frac{CaO}{SiO_2}\right)_{Required} = \frac{\sum_{i=1}^9 \frac{\% CaO_{inX_i} \times X_i}{\left[\% SiO_{2,inX_i} \times X_i\right] + \left[\left(\frac{60}{28}\right) \times \% Si_{inX_i} X_i\right]}}{\quad} \quad (40)$$

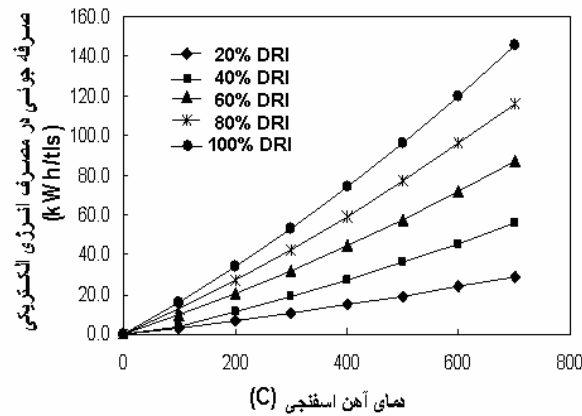
معادلات موازنه جرم با روش کرامر-اولر حل شده و جرم مجهولات مورد نیاز محاسبه می شود.

### ۳- نتایج و بحث

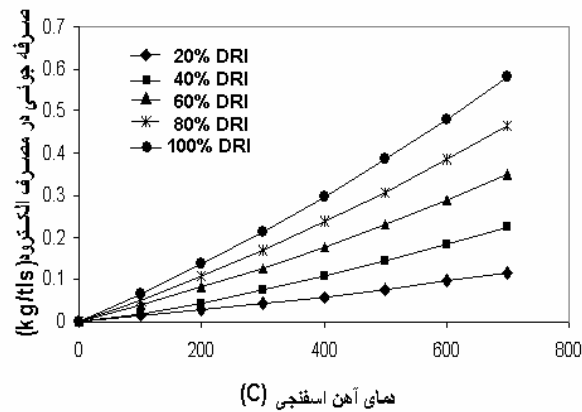
نتایج حاصل از اجرای مدل برای پیش فرضهای از قبل تعیین شده با داده های واقعی کوره های قوس الکتریکی شرکت فولاد خوزستان مقایسه شد. مشاهده شد که در صورت وارد کردن اطلاعات صحیح در مورد درصد وزنی عناصر در شارژهای ورودی از لحاظ موازنه جرمی اختلاف بسیار کمی (کمتر از ۱٪) با داده های واقعی فولاد سازی دارد. تنها در میزان مصرف انرژی الکتریکی حدود ۴/۵٪ تفاوت وجود دارد و انرژی محاسبه شده توسط برنامه مدل سازی مقداری کمتر از نتایج واقعی فولاد سازی را نشان می دهد که علت آن بالاتر بودن میزان تلفات از دیواره ها، کف و سقف کوره نسبت به پیش بینی برنامه می باشد. همچنین تاخیر و توقف های پیش بینی نشده نیز بر روی این اختلاف اثر گذار است.

با استفاده از نرم افزار ارائه شده، اثر شارژ گرم آهن اسفنجی در کوره قوس الکتریکی بررسی شد. شکل ۳

تأثیر افزایش دما و مقدار آهن اسفنجی شارژ شده به کوره بر صرفه جویی انرژی الکتریکی نشان داده شده است. مشاهده شد که در صورتیکه تمام شارژ به صورت آهن اسفنجی داغ باشد، با افزایش هر  $100^{\circ}C$  دمای شارژ، مصرف انرژی الکتریکی برای تولید هر تن فولاد مذاب ۲۰ کیلو وات ساعت کاهش می یابد. در شکل ۴ نیز تأثیر پیشگرم آهن و مقدار آهن اسفنجی بر مصرف الکتروود کوره نشان داده شده است. این نمودار با توجه به این که میزان مصرف الکتروود در کوره برابر  $0.04 \text{ kg/kWh}$  می باشد، محاسبه شده است.



شکل ۳) اثر دما و مقدار آهن اسفنجی بر مصرف انرژی الکتریکی کوره قوسی

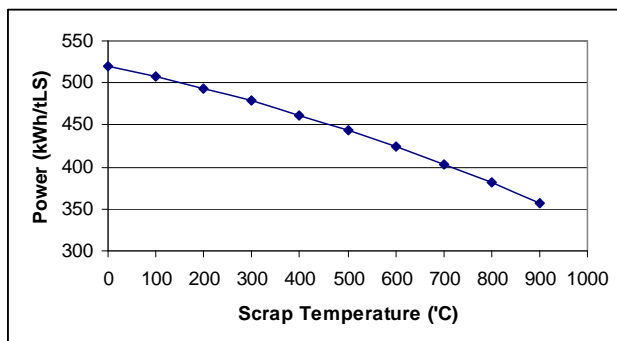


شکل ۴) اثر دما و مقدار آهن اسفنجی بر مصرف الکتروود کوره قوسی

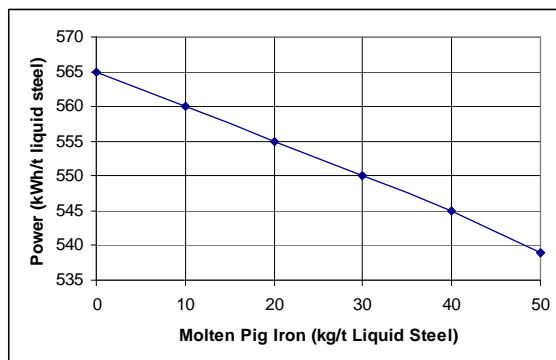
اثر پیشگرم قراضه بر روی انرژی الکتریکی مصرفی کوره قوس الکتریکی بررسی و مشاهده شد که هر چه دمای پیش گرم قراضه افزایش می یابد و مصرف انرژی الکتریکی کوره کمتر می شود، شکل ۵ این مطلب را نشان می دهد. همچنین در بررسی های انجام شده بر روی شارژ چند مذاب به کوره قوس الکتریک ملاحظه شد که با اضافه کردن تقریباً ۵۰ کیلوگرم چند مذاب به ازای هر تن فولاد تولیدی به شارژ ورودی یک کوره با

همایش ملی سوخت، انرژی و محیط زیست

نسبت قراضه ۰/۲، می توان  $26 kWh/ton$  در مصرف انرژی الکتریکی کوره صرفه جویی نمود. در شکل ۶ اثر شارژ چدن مذاب به بر مصرف انرژی کوره قوس الکتریکی نشان داده شده است.

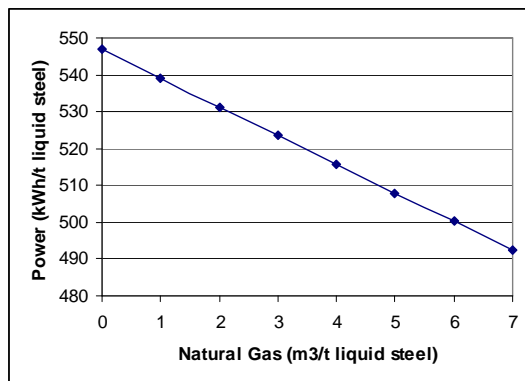


شکل ۶-۵ اثر افزایش دمای قراضه بر انرژی الکتریکی مصرفی در کوره قوسی با ۰/۹۰ قراضه

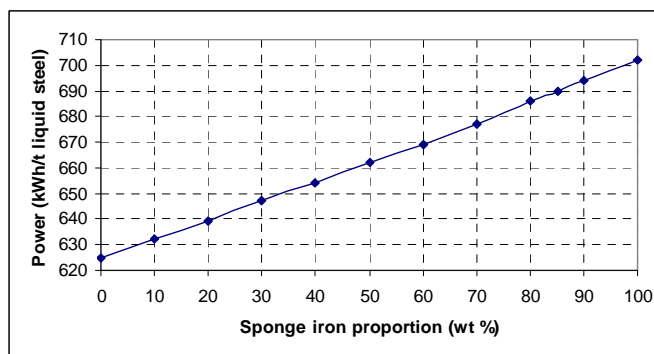


شکل ۶-۹ تاثیر اضافه کردن چدن مذاب بر مصرف انرژی الکتریکی در یک کوره قوس الکتریکی

در شکل ۷ تاثیر مصرف گاز طبیعی بر انرژی الکتریکی مورد نیاز در کوره های قوس الکتریکی نشان داده شده است. استفاده از مشعلهای گاز طبیعی در کوره و سوزاندن گاز طبیعی، به علت گرمای حاصل از احتراق آن، مصرف انرژی الکتریکی را کاهش می دهد به طوریکه در صورتیکه مصرف گاز طبیعی برابر  $1 Nm^3/ton ls$  باشد، در حدود ۱۰ درصد در مصرف انرژی الکتریکی صرفه جویی می شود.

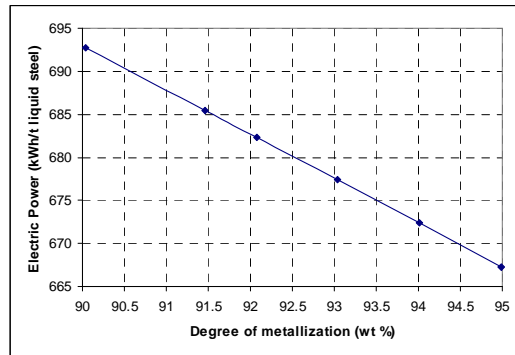


شکل ۵-۱۰) تاثیر مصرف گاز طبیعی بر کاهش انرژی الکتریکی مورد نیاز در کوره های قوس الکتریکی آهن اسفنجی در شارژ کوره می تواند از صفر تا صد در صد تغییر می کند. در مقایسه با شارژ قراضه خالص، هر چه در صد آهن اسفنجی افزایش یابد، به علت افزایش درصد گانگ و اکسید آهن احیا نشده موجود در بار، مصرف انرژی کوره افزایش می یابد. شکل ۵-۱۹ مصرف انرژی با افزایش درصد آهن اسفنجی در شارژ برای کوره قوسی را نشان می دهد. با تغییر آهن اسفنجی موجود در شارژ از صفر تا ۱۰۰ درصد، میزان انرژی الکتریکی مصرفی در حدود ۱۲ درصد افزایش می یابد.



شکل ۵-۱۹) تاثیر درصد آهن اسفنجی بر مصرف انرژی الکتریکی کوره

شکل ۵-۲۰ اثر درجه فلزی آهن اسفنجی بر مصرف انرژی کوره قوس الکتریکی نشان می دهد. با کاهش درجه فلزی آهن اسفنجی، میزان اکسید آهن موجود در پلت های احیا شده افزایش می یابد و برای احیا این اکسید آهن به کربن نیاز است که واکنش گرماگیر انجام می دهند و در نتیجه نیاز به مصرف انرژی اضافه می باشد. از طرف دیگر مقداری از اکسید آهن احیا نشده نیز وارد سرباره می شود و باعث افزایش کمیت سرباره و در نتیجه افزایش مصرف انرژی الکتریکی می گردد. همانطور که شکل نشان می دهد، با افزایش درجه فلزی آهن اسفنجی از ۹۰ درصد به ۹۵ درصد میزان مصرف انرژی در حدود ۴ درصد کاهش می یابد.



شکل ۵-۲) تاثیر درجه فلزی بر مصرف انرژی الکتریکی برای ۱۰۰٪ آهن اسفنجی

#### ۴- نتیجه گیری

یک مدل ریاضی بر اساس اصول اولیه موازنه جرم و انرژی برای کوره قوس الکتریکی فولادسازی ارائه شد و توسط آن اثر متغیرهای مختلف بر مصرف انرژی کوره قوس الکتریک بررسی گردید. مشخص شد که با افزایش دمای پیشگرم آهن اسفنجی و قراضه، شارژ چدن مذاب به کوره، احتراق گاز طبیعی و درجه فلزی آهن اسفنجی، مصرف انرژی الکتریکی کوره کاهش و با افزایش مقدار آهن اسفنجی، افزایش می یابد. میزان و چگونگی تاثیر هر یک از این متغیرها بر مصرف انرژی کوره نیز مشخص شد.

#### تشکر و قدردانی

از مدیریت تحقیق و توسعه و پرسنل شرکت فولاد خوزستان به سبب تصویب و همکاری در اجرای طرح شبیه سازی فولادسازی در کوره قوس الکتریکی قدردانی می شود.

#### مراجع

۱. فرازی، محمود. فولادسازی. اصفهان: جهاددانشگاهی صنعتی اصفهان. ۱۳۷۹.
۲. محمد حسن جولزاده؛ "تحقیق و بررسی مصرف انرژی در صنعت فولاد؛ سمپوزیوم فولاد ۸۵، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اسفند ۱۳۸۵، ۹۳۵-۹۴۴.
۳. U. Camdali and M. Tunc; "Exergy Analysis and Efficiency in an Industrial AC Electric ARC Furnace"; Applied Thermal Engineering; ۲۳ (۲۰۰۳) ۲۲۵۵-۲۲۶۷.
۴. M.Gojic, "Current State and development of steelmaking processes", Metalurgija, Vol.۴۳, No.۳, ۲۰۰۴, pp.۱۶۳-۱۶۸.
۵. S.H. Anderson, "DRI -The EAF Energy Source of The Future" ۵<sup>th</sup> European electric steel congress Proceedings, Orlando (USA), ۱۹۹۵, pp.۵۰-۵۶.
۶. Y.N. Tuluevski, A. Fleisher and I.Y. Zinurov, "Two-stage Fuel Arc Furnace (EAF) a-new concept for energy optimization in electric steelmaking," MPT International, Vol.۵, October ۱۹۹۸.
۷. Stubbles, J. R., "Tonnage Maximization of Electric Arc Furnace Steel Production: The Role of Chemistry in Optimizing Electric Furnace Productivity – Part V." Iron and Steelmaking, Vol.۱۱, ۱۹۸۴, pp. ۵۰- ۵۱.
۸. Sandberg, Bentell, Undvall, "Energy Optimisation of Electric Arc Furnaces by Statistical Process Evaluation", ۷<sup>th</sup> European Electric Steelmaking Conference, Vol. ۱, Italy, ۲۰۰۲, pp. ۴۳۵-۴۴۴.

۱. Ü. Camdali, M. Tunc, "Exergy Analysis and Efficiency in an Industrial AC Electric Arc Furnace", Applied Thermal Engineering, Vol. ۲۳, ۲۰۰۳, p. ۲۲۵۵.
۱۰. Ü. Camdali, M. Tunc, A. Karakas, "Second Law Analysis of Thermodynamics in The Electric Arc Furnace at A Steel Producing Company", Energy Conversion and Management, Vol. ۴۴, ۲۰۰۳, p. ۹۶۱.
۱۱. Pfeifer H., Kirschen M., "Thermodynamic Analysis of EAF Energy Efficiency and Comparison with a Statistical Model of Electric Energy Demand", Elektrowärme Int., Vol. ۴۶, ۱۹۸۸, pp. ۷۱-۷۷.
۱۲. Jonsson P. G., Jonsson L. T., "The Use of Fundamental Process Models in Studying Ladle Refining Operations", ISIJ International, Vol. ۴۱ (۲۰۰۱), No. ۱۱, pp. ۱۲۸۹-۱۳۰۲
۱۳. I. S. Ertesvag and M. Mielnik; "Exergy analysis of the Norwegian society"; Energy ۲۵ (۲۰۰۰) ۹۵۷-۹۷۳.
۱۴. Gensini G., Garzitto V., "New Developments in Electric Arc Furnace Technology", MPT International, ۱۹۹۱, pp. ۵۲-۶۱