

# تأثیر احتراق کربن بر مصرف برق و هزینه تولید فولاد در کوره قوس الکتریکی

هومن فخر نبوی، سید خطیب الاسلام صدرنژاد<sup>۱</sup> و مهران خرم نیا<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی و علم مواد - دانشگاه صنعتی شریف  
[sadrnezh@sharif.edu](mailto:sadrnezh@sharif.edu)

## چکیده

تزریق کربن اضافی به داخل کوره قوس الکتریکی می تواند از طریق واکنشهای شیمیایی و احتراق، بخشی از الکتریسیته مورد نیاز برای ذوب و تصفیه فلز را تامین کرده و مصرف الکتروتود را کاهش دهد. اضافه کردن کربن به بار کوره می تواند سبب افزایش تولید گاز CO، پفکی شدن سرباره، کاهش مصرف برق و افزایش انرژی خروجی از کوره شود. اگر چه احتراق کربن اضافی سبب تولید حرارت و کاهش مصرف برق می شود، اما تلفات انرژی را افزایش داده و تاثیر کاهش مصرف برق بر هزینه ها را تقلیل می دهد. این تحقیق به موازنه جرم و انرژی در کوره قوس الکتریکی پرداخته و تاثیر افزودن کربن بیش از مقدار طبیعی از طریق مواد اولیه و الکتروتود بر اقتصاد عملیات و هزینه های تولید را بررسی می کند. نتیجه محاسبات کاهش تاثیر بر مصرف انرژی الکتریکی تا حد ۰/۶ کیلو وات ساعت بر تن فولاد مذاب علی رغم تولید ۶/۸ کیلو وات ساعت انرژی به ازای هر کیلو گرم کربن را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: کوره قوسی - مصرف الکتریسیته - احتراق کربن - اقتصاد عملیات - فولاد.

## ۱- مقدمه

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. هزینه مواد اولیه و انرژی (برق) معمولاً سهم عمده ای از اقتصاد عملیات را در بر می گیرد. برای کاهش این هزینه ها لازم است تدابیری اندیشیده شود. انتخاب شرایط و نوع مواد در هنگام بار کردن در این راستا از اهمیت ویژه ای برخوردار است. تعیین نسبتهای وزنی مواد برای مثال از دو راه "سعی و خطا" و "محاسبه بر اساس اصول موازنه های جرمی و حرارتی، تعادلات ترمودینامیکی و سینتیک تحولات ذوب و تصفیه" قابل انجام است. کربن نقش مهمی در ایجاد تلاطم و تصفیه فلز در کوره های ذوب و تصفیه دارد. علاوه بر این کربن می تواند با تامین بخشی از انرژی مصرفی، الکتریسیته لازم برای عملیات ذوب در کوره های EAF را کاهش دهد. با توجه به اهمیت مصرف انرژی در کاهش هزینه ها، مدل های مختلفی برای کوره های قوس الکتریک ساخته شده است. از جمله مدل سازی هایی که توسط مورالس و همکاران [۱] و بکر [۲] انجام شده است. با کاهش انرژی الکتریکی، مصرف الکتروتود ها و نسوزها نیز کاهش می یابد که تا حدی در کاهش هزینه ها تاثیر دارند. کربن اضافی با تولید گاز CO باعث تلاطم

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد (دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف)

۲- استاد (دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف)

۳- مدیر فناوری تولید فولادسازی (شرکت فولاد خوزستان)

مذاب و در نتیجه یکنواختی دما و ترکیب می شود. از سوی دیگر با پفکی شدن سرباره سرعت ذوب شدن گندله های آهن اسفنجی افزایش یافته [۳-۵] ، در مصرف انرژی الکتریکی و خورده شدن دیر گداز کوره صرفه جوئی می شود [۶]. همچنین پفکی شدن سرباره باعث می شود که از آسیب دیدن نسوزهای جداره کوره جلوگیری شود.

نمونه دیگری از نرم افزارهای ساخته شده برای محاسبه سرعت تولید فولاد در کوره های قوس الکتریکی و تاثیر طرح و مشخصات آهن اسفنجی بر زمان ذوب و راندمان تولید در مراجع ۴ و ۷ تشریح شده است. نرم افزار مشابهی که برای محاسبه بازدهی عملیات در راکتور های ذوب و تصفیه مستقیم ساخته شده در مقاله مرجع ۸ شرح داده شده است. برای بهینه سازی عملیات ذوب و آلیاژسازی و حداقل کردن هزینه های تولید فولاد در کوره های القایی نیز یک برنامه کامپیوتری تحت سیستم عامل DOS قبلاً ساخته شده که شرح مختصر آن در مرجع ۹ آمده است. در زمینه پفکی شدن سرباره با توجه به شرایط کار کوره نیز محققین مختلف مدل هایی تدوین نموده اند [۱۰، ۱۱].

کربن اضافی را از دو طریق می توان وارد کوره کرد: ۱- اضافه کردن بصورت تکه ای (Bulk) ، ۲- اضافه کردن در صد کربن باقیمانده در آهن اسفنجی (DRI). لازم بذکر است که کوره های میدرکس (Midrex) می توانند تا ۵/۵ درصد کربن در آهن اسفنجی تولید کنند که مقدار درصد کربن آن به تولید کننده بستگی دارد. تاثیر درصد کربن موجود در آهن اسفنجی در هزینه ها توسط سمت [۱۲] بررسی شده است.

در این مقاله، اثرات افزایش کربن بصورت تکه ای بر مصرف انرژی الکتریکی و کاهش هزینه ها بررسی می شود. مبنای محاسبات ، موازنه جرم و انرژی از طریق شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره قوس الکتریکی است.

## ۲- نقش کربن اضافی

یک نمونه از ترکیب مواد مورد استفاده به عنوان بار ورودی کوره قوسی و مقدار کربنی که برای تولید یک تن فولاد از طریق هر یک وارد حمام مذاب می شود در جدول ۱ ارائه شده است. فلز حاصل دارای ۰/۰۴ درصد کربن است.

جدول ۱ - مقادیر بار دارای کربن برای تولید یک تن فولاد مذاب.

Material	Weight(Kg)	%C	Kg Carbon
DRI	۵۳۷/۸۹	۲/۸	۱۵/۰۶
Pit Scrap	۵۱/۵	۰/۱۵	۰/۰۸
Plate & Struct.	۳۴۶/۶	۰/۱۵	۰/۵۲
Heads & Tails	۷۳/۱	۰/۰۵	۰/۰۴
HRM Rejects	۱۴۱/۵۸	۰/۰۵	۰/۰۷
Anthracite	۱	۸۶/۶۴	۰/۸۷
Steel	۱۰۰۰	۰/۰۴	۰/۴

طبق قانون بقا جرم داریم:

$$\text{جرم تلف شده} + \text{جرم خروجی} = \text{جرم ورودی}$$

برای کربن خواهیم داشت:

$$C_{\text{Charged}} + C_{\text{Anthracite}} = C_{\text{Steel}} + C_{\text{Combusted}} \quad (۱)$$

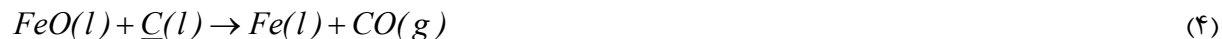
در رابطه ۱ مقدار کربن وارد شده توسط بارهای ورودی بدون در نظر گرفتن کربن اضافه شده بصورت تکه ای توسط  $C_{\text{Charged}}$  بیان شده است. با جایگزینی داده های جدول ۱ در رابطه ۱ خواهیم داشت:

$$C_{\text{Charged}} = 15.06 + 0.08 + 0.52 + 0.04 + 0.07 = 15.76 \text{ Kg} \quad (۲)$$

$$C_{\text{Combusted}} = 16.23 \text{ Kg} \quad (۳)$$

کربن تلف (مصرف) شده بصورت CO و CO<sub>2</sub> اکسید می شود و از مذاب خارج می شود. خروج این گاز سبب ایجاد تلاطم در کوره می شود. هر قدر مقدار کربن ورودی بیشتر باشد، اکسیداسیون آن هم بیشتر خواهد بود. کربن مصرف شده صرف انجام دو کار می شود:

الف - احیاء اکسید آهن:



ب - واکنش با اکسیژن و تولید انرژی شیمیایی:



مقداری از کربن اضافه شده هم ممکن است قبل از حل شدن در فلز مذاب به صورت جامد با گاز اکسیژن ترکیب شدن و تولید گاز در اکسید کربن و مقداری حرارت کند:



بنابراین با توجه به اینکه مقدار کربن لازم برای احیاء اکسید های آهن موجود در بار مقدار مشخصی است، می توان پیش بینی کرد که کربن اضافی صرف انجام واکنشهای مختلف احتراق (مانند واکنشهای ۴ تا ۸ فوق) شده و بخشی از انرژی سیستم را تامین کند.

### ۳- اضافه کردن کربن بصورت تکه‌ای

همانطور که گفته شد، بخشی از کربن اضافه شده صرف احیاء و بخشی صرف انجام واکنش احتراق می شود. با اضافه کردن هر کیلو گرم آنتراسیت مقداری انرژی تولید می شود که در زیر محاسبه می شود. بخشی از کربن که صرف انجام واکنش می شود:

$$C_{\text{Combusted}} = 0.47 \text{ Kg} \quad (۷)$$

در کوره قوسی، حدود ۸۵ درصد کربن بصورت CO می سوزد و بقیه در اثر احتراق بعدی به CO<sub>2</sub> تبدیل می شود. در اثر احتراق و واکنش با اکسیژن، ۹/۲۴ KWh/KgC انرژی تولید می شود. بنابراین میزان انرژی تولید شده در اثر احتراق برابر است با:

$$E_{\text{Combustion}} = 0.85 \times 0.47 \times 9.24 = 3.66 \frac{\text{KWh}}{\text{KgC}} \quad (۸)$$

با اضافه شدن ۲ کیلو آنتراسیت خواهیم داشت:

$$C_{\text{Charged}} = 15.76 \text{ Kg} \quad (۹)$$

$$C_{\text{Combusted}} = 17.1 \text{ Kg} \quad (۱۰)$$

بخشی از کربن که صرف انجام واکنش می شود:

$$C_{\text{Combusted}} - C_{\text{Charged}} = 1.34 \text{ Kg} \quad (۱۱)$$

$$E_{\text{Combustion}} = 0.85 \times 1.34 \times 9.24 = 10.46 \text{ Kwh} \quad (۱۲)$$

با اضافه شدن هر کیلو گرم آنتراسیت (دارای ۸۷ درصد کربن)، ۰/۸۷ کیلوگرم کربن بیشتر محترق می شود و در نتیجه ۶/۸ کیلو وات ساعت انرژی بیشتر تولید می شود (بازاء هر کیلوگرم آنتراسیت). از سوی دیگر با بر هم خوردن موازنه، انرژی ورودی باید افزایش یابد. زیرا انرژی خروجی افزایش می یابد، که این افزایش انرژی خروجی بشرح زیر است:  
انرژی خروجی شامل انرژی خارج شده توسط فولاد، سرباره، گازها، گرد و غبار، ارزش حرارتی گاز و گرمای لازم برای

احیاء آهن و تلفات حرارتی است. با افزایش میزان کربن ورودی، این افزایش انرژی تنها روی انرژی خارج شده توسط سرباره، گازهای خروجی و گازها و گرد و غبار خروجی می شود.

$$CO \text{ ارزش حرارتی گاز} = M_{CO} \times \frac{3026}{860} \quad (13)$$

که در آن CO شاندهنده مقدار گاز منو اکسید کربن بر حسب متر مکعب تولید شده به ازای هر تن فولاد است. از هر کیلو گرم کربن، ۱/۹۹ کیلو گرم گاز CO تولید می شود. از طرفی در اثر اضافه کردن هر کیلو گرم آنتراسیت، ۰/۸۷ کیلو گرم تلفات عنصر کربن افزایش می یابد و در نتیجه میزان CO تولید شده ۱/۷۳ کیلو گرم (۱/۳۷ متر مکعب) افزایش می یابد. بنابراین ۴/۸ KWh/Ton انرژی که مربوط به ارزش حرارتی گاز CO است، خارج می شود. گازهای خروجی و گرد و غبار:

$$Out \text{ Gas Energy} = \sum M_i \times (Enthalpy)_i \quad (14)$$

که در آن  $M_i$  شاندهنده جرم مولکولی گاز خروجی و گرد و غبار با دمای ۱۸۲۳ K مشتمل بر CO، CO<sub>2</sub>، N<sub>2</sub>، H<sub>2</sub>O، ... است که اضافه شدن کربن فقط بر افزایش انرژی CO و CO<sub>2</sub> تاثیر دارد.

جدول ۲- انتالپی گازهای خروجی در دمای ۱۸۲۳ K.

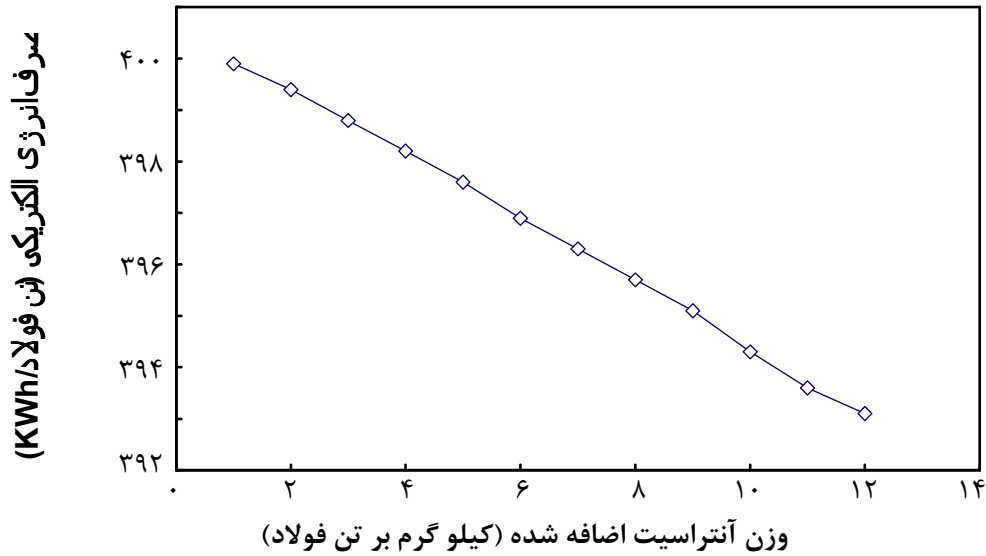
Gas	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	LOI	DUST
Enthalpy (KWh/Ton)	۴۹۵	۵۰۲	۴۹۰	۱۶۵۲	۴۵۹	۷۲۵	۴۶۱

همانطور که محاسبه شد با افزایش هر کیلوگرم کربن، ۱/۷۳ کیلوگرم CO خروجی افزایش خواهد داشت. بنابراین ۰/۹ KWh/Ton انرژی خروجی توسط گاز CO افزایش می یابد. در مورد گاز دی اکسید کربن، بازاء هر کیلو کربن، ۰/۵۵ کیلوگرم گاز تولید می شود و با اضافه شدن هر کیلو آنتراسیت، ۰/۸۷ کیلو گرم تلفات کربن بیشتر می شود. بنابر این ۰/۴۹ کیلو گرم تولید CO<sub>2</sub> افزایش می یابد. در نتیجه انرژی خروجی ۰/۳ KWh/Ton افزایش می یابد. بنابراین بطور کلی انرژی خروجی توسط گازهای خروجی و گرد و غبار ۱/۲ KWh/Ton افزایش می یابد. با ورود یک سری مواد موجود در آنتراسیت به سرباره، مقداری ظرفیت حرارتی تغییر کرده و انرژی خروجی افزایش می یابد. این افزایش انرژی خروجی بازاء هر کیلو آنتراسیت ۰/۲ KWh/Ton می باشد. پس بطور کلی با افزایش هر کیلوگرم آنتراسیت، در موازنه انرژی ۶/۲ KWh/Ton افزایش انرژی خروجی را خواهیم داشت. انرژی ورودی نیز باید بهمین میزان افزایش پیدا کند. از سوی دیگر ۶/۸ KWh/Ton انرژی شیمیائی بازاء هر کیلو گرم آنتراسیت وارد می شود و با ترکیب این نتایج ملاحظه می شود که بازاء هر کیلو گرم آنتراسیت، مصرف انرژی الکتریکی تنها ۰/۶ KWh/Ton کاهش می یابد.

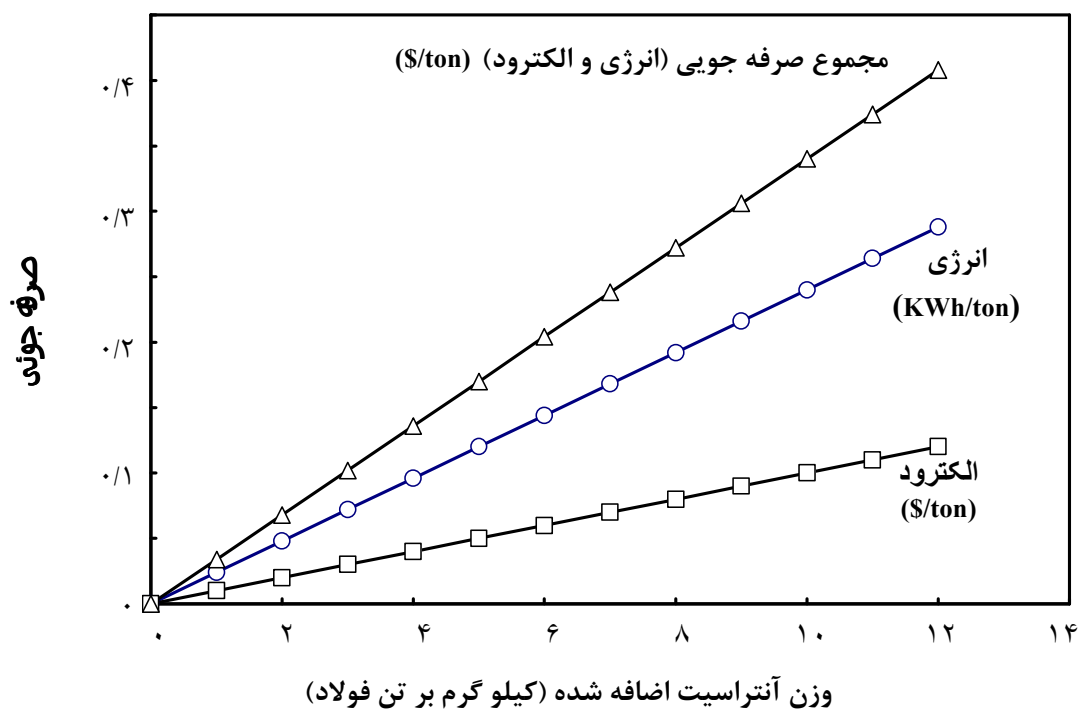
#### ۴- نتایج

شکل ۱ تاثیر افزودن زغال سنک بر مصرف انرژی الکتریکی در کوره قوسی را نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست میزان مصرف انرژی الکتریکی با افزودن آنتراسیت کاهش می یابد. حال اگر قیمت هر KWh انرژی الکتریکی ۰/۱۳۶۴ دلار بر کیلو وات ساعت در نظر گرفته شود و فرض کنیم که مصرف الکترودها ۰/۰۰۴ Kg/KWh و قیمت هر کیلو گرم الکترودها ۳/۴۱ \$/Kg باشد، مقدار صرفه جوئی در هزینه ها بدست خواهد آمد [۱۳، ۱۴]. قیمت انرژی الکتریکی ۰/۰۴ دلار بر کیلو وات ساعت فرض شده است [۱۳، ۱۴].

شکل ۲ میزان صرفه جوئی در مصرف الکترودها و انرژی الکتریکی را در اثر افزایش آنتراسیت به صورت تکه ای به داخل کوره نشان می دهد. همانطور که از داده های شکل بر می آید، افزایش آنتراسیت سبب کاهش مجموع هزینه های مربوط به

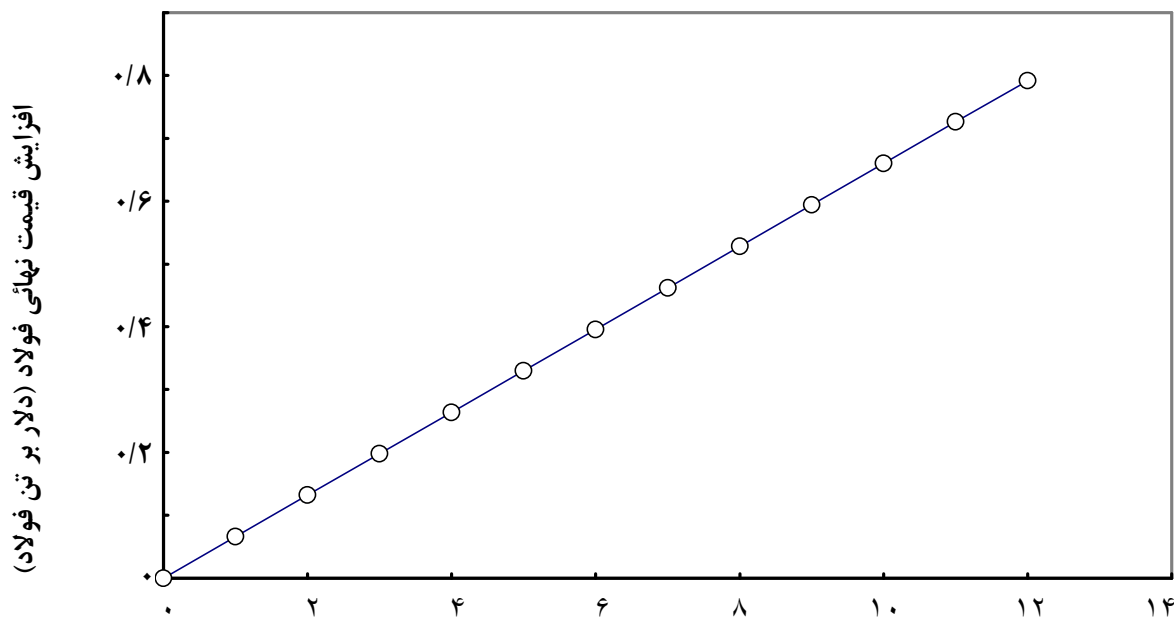


شکل ۱ - تاثیر افزودن زغال سنگ بر مصرف انرژی الکتریکی در کوره قوسی.



شکل ۲ - صرفه جویی در مصرف انرژی و الکترود بر پای ۰/۰۰۴ Kg/KWh مصرف الکترود و ۳/۴۱ \$/Kg قیمت الکترود.

انرژی الکتریکی و الکترود می شود. اما با وجود کاهش مصرف انرژی الکتریکی و الکترود، محاسبات نشان می دهد که کل هزینه تولید به سبب خروج بخش عمده ای از انرژی از کوره در اثر تولید گازهای ناشی از احتراق افزایش خواهد یافت و قیمت نهایی فولاد بیشتر خواهد شد. این تغییرات در شکل ۳ نشان داده شده است.



وزن آنتراسیت اضافه شده (کیلو گرم بر تن فولاد)

شکل ۳ - تاثیر آنتراسیت بر تغییر قیمت نهائی فولاد.

#### ۴- نتیجه گیری

انرژی شیمیائی تولید شده توسط هر کیلوگرم آنتراسیت اضافه شده می تواند انرژی الکتریکی را تا حدودی کاهش دهد. اما این افزایش کربن ورودی، موازنه انرژی را نیز بر هم می زند. بنابراین کل انرژی ورودی به سیستم افزایش می یابد و تاثیر انرژی شیمیائی تولید شده کاهش می یابد. با توجه به قیمت هر کیلو گرم آنتراسیت که حدود  $0.11 \text{ \$/Kg}$  است، کاهش هزینه ای که در اثر تولید انرژی شیمیائی و متعاقباً کاهش مصرف انرژی الکتریکی و الکتروودها ایجاد می شود چشم گیر نیست و نمی تواند هزینه آنتراسیت اضافه شده را جبران کند. لذا قیمت فولاد تولید شده افزایش می یابد. با توجه به اینکه کفی شدن سرباره اهمیت زیادی دارد و کربن با تولید گاز CO در این کار تاثیر دارد، بنابراین کربن باید در حدی اضافه شود که حد اقل بتوان سرباره کفی بدست آورد. اما اضافه کردن بیش از حد مورد نیاز بصره نیست.

#### قدردانی

بدینوسیله از مدیریت تحقیق و فناوری شرکت فولاد خوزستان به سبب تصویب طرح شبیه سازی فولاد سازی در کوره قوس الکتریکی قدردانی می شود.

#### مراجع

1. 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.
2. Bekker, J.G., "Modeling and control of an Electric Arc Furnace Off-gas Process", Master's Dissertation, University of Pretoria, South Africa, 1998.
3. Kimihisa, I., and Fruehan, R.J., "Slag foaming in electric furnace steelmaking", Electric Furnace Proceedings, Iron and steel Society, pp. 345-351, 1981.
4. Sadrnezhaad, K., and Elliott, J. F., "The Melting Rate of DRI Pellets in Steelmaking Slags", Iron and Steel International, pp 327-339, 1980

5. Marique, C., Nyssen, P., and Salamone, P., "On-line control of foamy slag in EAF", Proceedings of the 6<sup>th</sup> European Electric Steelmaking Conference, Dusseldorf, pp. 154-161, June 1999.
6. Sadnezhaad, K., "Effect of Impurities on Energy Requirements in Electric Steelmaking with DRI", Scientia Iranica, Vol. 3, Nos. 1,2&3, pp. 113-119, 1996.
7. Sadnezhaad, K., "Continuous Melting of Metallized Ore Pellets", Iron and Steel International, pp 309-314, 1981.
8. Sadnezhaad, K., and Simchi, A., "Simulation of the Iron Smelting-Reduction Process", Journal of Materials Science and Technology, Vol. 15, No. 2, pp 121-127, 1999.
۹. صدرنژاد، س. خ. و سرکمری، م.، "شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القایی"، سمپوزیوم فولاد ۷۹، ۳ - ۴ اسفند ۱۳۷۹، اهواز، شرکت فولاد خوزستان، ۱۱۳-۱۲۳، ۱۳۷۹.
10. 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 pp 1054-1062 2001.
11. 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, pp. 287-296, 1994.
12. Sammt, F.L., "The pros and cons of high carbon DRI as EAF feed", Steel Times, Vol. 222, No. 10, pp. 398-399, Oct. 1994.
13. <http://www.hbia.org/Technical/technical-electricarc.cfm> (Sited at Dec. 24 2005).
14. <https://engineering.purdue.edu/IIES/SUFG/PUBS/1999-Forecast/Chapter7.pdf> (Sited at Dec. 24, 2005).