سمپوزیوم فولاد ۸۵
۸ و ۹ اسفندماه ۸۵
تهران – دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بررسی اثر افزایش شارژ گرم و چدن مذاب بر روی کاهش مصرف انرژی الکتریکی و افزایش راندمان کوره های قوس الکتریکی

سروش پرویزی[1]، هومن فخرنبوی[2]، سیدخطیب الاسلام صدرنژاد[3]، مهران خرم نیا[4]، مرتضی رستی[5]*

۱ و۲- کارشناس ارشد ، دانشگاه صنعتی شریف،۳- استاد، دانشکده مهندسی وعلم مواد ، دانشگاه صنعتی شریف، ٤- مدیر فناوری تولید فولاد سازی ، شرکت فولاد خوزستان، ٥- مدیر تحقیقات وفناوری ، شرکت فولاد خوزستان

چکیده

در سال های اخیر تغییرات زیادی در طراحی کوره های قوس الکتری‌کی برای کاهش هزینه ها انجام شده است که بخش عمده آنها توسط استفاده از انرژی شیمیایی وبا هدف کاهش مصرف انرژی الکتریکی صورت پذیرفته است. شارژ گرم، روشی نوین و موثر در کاهش مصرف انرژی الکتریکی و افزایش قابلیت تولید می باشد. برای انتقال شارژ گرم آهن اسفنجی به کوره نمی توان همانند قراضه از گرمادهی توسط گازهای خروجی کوره استفاده کرد. از حمل و نقل مکانیکی، سیستم های پنوماتیکی و یا ریلی برای انتقال شارژ گرم از کوره احیا مستقیم به کوره قوس الکتریکی، استفاده می شود ودر این زمینه هنوز مشکلات تکنولوژیکی وایمنی وجود دارد. شرکت میدرکس به منظور کاهش این مشکلات سیستمی بر مبنای استفاده ازجاذبه برای جابجایی مستقیم شارژگرم از کوره تولید آهن اسفنجی به کوره قوس الکتری‌کی طراحی کرده است، که Hot Link نام دارد. در این مقاله روش Hot Link مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده می شود که با افزایش هر۱۰۰ درجه سانتیگراد دمای شارژ، تقریبا kWh/tLS ۲۰ صرفه جوئی در مصرف انرژی الکتریکی انجام می شود و در نتیجه راندمان تولید افزایش می یابد. علاوه بر این مصرف الکترود نیز که رابطه خطی با مصرف انرژی الکتریکی دارد ($۰/۰۰۴ kg/kWh$)، کاهش می یابد. پیش گرم کردن قراضه و افزایش چدن مذاب به شارژ ورودی نیز به عنوان روش های متداول شارژگرم مورد بررسی قرار گرفته اند. برای بررسی این روش ها از موازنه جرم و انرژی استفاده شده است و مشاهده می شود که نتایج محاسبات با نتایج مقالات در زمینه های مرتبط مطابقت دارد.

واژه های کلیدی: کوره قوس الکتریکی، بهینه سازی انرژی، آهن اسفنجی، موازنه انرژی، موازنه جرم

---

[1] soroush.parvizi@gmail.com

مقدمه

در این قسمت به طور خلاصه روند و نتیجه محاسبات که بر اساس روابط بالانس جرم و انرژی و اعمال فرضیات منطقی انجام شده مورد بررسی قرار می گیرند.

به طور کلی برای ذوب و تصفیه آهن اسفنجی با دمای معین (T_{DRI}) نسبت به آهن اسفنجی با دمای محیط (T_{AMB}) به میزان Q انرژی صرفه جویی می گردد که Q بر اساس رابطه زیر تعیین می گردد:

$$Q = L_t + \int_{T_{AMB}}^{T_{DRI}} C_p^{DRI} \partial T \;\&\; C_p^{DRI} = \sum f_i C_p^i \qquad (۱)$$

که در این رابطه :

L_t: گرمای نهان تغییر فاز اجزای آهن اسفنجی در دماهای بین T_{AMB}وT_{DRI}

C_p^{DRI}: ظرفیت حرارتی متوسط آهن اسفنجی

f_i: کسر مولی جز i در آهن اسفنجی

C_p^i: ظرفیت حرارتی جز i در آهن اسفنجی

بالانس جرم وانرژی

دراین پژوهش با استفاده ازنرم افزار Microsoft Excel برقرار شده است. برای این امر ۶ برگه با موضوعات Data ، Mass Balance ، Energy Balance ، Slag Composition و Practical Calculation طراحی شده است که توضیحات مفصل آن درپایان نامه نویسنده آمده است[۱].

با ورود کامل اطلاعات مربوط به شارژ جداول ۱و۲ درنرم افزار مقدارانرژی الکتریکی موردنیاز ۶۷۸ kWh/tLS بدست آمد که ملاحظه می شود، اختلاف خروجی نرم افزار با واقعیت کمتر از ۱٪ می باشد.

جهت شارژآهن اسفنجی داغ به کوره قوس الکتریکی، باید سه عمل مجزای تخلیه آهن اسفنجی داغ از مدول احیا، حمل آهن اسفنجی به واحدهای ذوب و شارژ آن به درون کوره قوس الکتریکی انجام شود. واحد میدرکس در نزدیک کوره قوس الکتریکی و در بالای آن قرار می گیرد به طوری که آهن اسفنجی با نیروی وزن خود و از مسیری کوتاه به کوره قوس الکتریکی منتقل می شود.

کارخانه هایی که امکان تخلیه آهن اسفنجی داغ را دارند از محفظه ای به نام انتقال داغ استفاده می کنند. این محفظه از افت حرارت و اکسید اسیون مجدد آهن اسفنجی جلوگیری می کند. این محفظه روی کامیون های خاص واحد ذوب فرستاده می شوند و با دمای ۶۵۰-۶۰۰ درجه سانتیگراد شارژ می شود[۲].

در کارخانه هیلسا، آهن اسفنجی با دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد تخلیه می شود و پس از آن وارد سیستم حمل پنوماتیک شده و توسط گاز حامل(گاز خنثی یا گاز احیا) به مخازن تغذیه کننده کوره قوس الکتریکی منتقل می شود و با دمای حدود ۶۵۰ درجه سانتیگراد به کوره شارژ می شود[۳].

شکل(۱) اثر دما و میزان شارژ گرم وردی به کوره را بر میزان انرژی صرفه جویی شده در فرآیند فولاد سازی در کوره قوس الکتریک را نشان می دهد. ملاحظه می شود که با افزایش میزان شارژ داغ ورودی به کوره و افزایش دمای شارژ میزان انرژی صرفه جویی شده افزایش می یابد.

هزینه الکترود در کوره های قوس الکتریکی بسیار بالاست. افزایش شارژ داغ، زمان فولادسازی را کاهش داده و از سوی دیگر، میزان انرژی الکتریکی مصرفی برای تولید فولاد کاهش می یابد، کاهش مصرف انرژی الکتریکی منجر به کاهش مقدار الکترود مصرفی در تولید فولاد می شود. در شکل(۲) اثر دما و مقدار شارژ داغ بر میزان مصرف الکترود در کوره های قوس الکتریکی نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش دما و مقدار شارژ داغ مصرف الکترود به ازای هر تن فولاد مذاب کاهش می یابد.

در این قسمت هدف محاسبه تغییرات انرژی الکتریکی مورد نیاز سیستم، برای درصدهای مختلف آهن اسفنجی و در دماهای مختلف آهن اسفنجی داغ می باشد. انرژی الکتریکی مورد نیاز برای شارژ فلزی بدون آهن اسفنجی داغ، به عنوان انرژی پایه مفروض است و تغییرات انرژی مورد نیاز سیستم نسبت به انرژی پایه محاسبه می شود.

$$\Delta E_{Electric\ En.} = \Delta E_{Exit} - \Delta E_{Chemical} - \Delta E_{HDRI} \qquad (۲)$$

$\Delta E_{Electric\,En.}$: تغییر در انرژی الکتریکی مصرفی کوره نسبت به حالت پایه.

ΔE_{Exit} : تغییر در انرژی خروجی(تلف شده) از کوره نسبت به حالت پایه.

$\Delta E_{Chemical}$: تغییر در انرژی شیمیائی تولید شده حاصل از احتراق کربن، اکسیداسیون سیلیسیم و احیاء آهن.

ΔE_{HDRI} : تغییر در انرژی وارد شده به سیستم توسط آهن اسفنجی داغ.

هدف این قسمت معرفی عوامل موثر بر روی انرژی الکتریکی می باشد و نحوه محاسبه تغییرات آنها با تغییر شارژ ورودی نشان داده شده می شود. در بخش اول اجزاء وعوامل موثر در انرژی خروجی (ΔE_{Exit}) معرفی می شوند.

وزن شارژ فلزی (آهن اسفنجی و قراضه) برای تولید ۱ تن فولاد از رابطه زیر بدست می آید:

$$m_i = \frac{1000}{\frac{Fe_{tot}}{100} \times \frac{yield}{100}} \times \%m_i \qquad (۳)$$

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

$$\Delta E_i = \sum \int_{298}^{T} (\%\, j) \times \frac{m_j}{M_j} \times C_p^j dT \qquad (۴)$$

C_P^j: ظرفیت حرارتی جزءj در شارژ i

مقادیر مربوط به ظرفیت حرارتی عناصر مورد نظر را می توان از روی جداول ترمودینامیکی استخراج کرد. میزان تولید سرباره بازاء هر تن شارژ فلزی (دارای ٪۲۰ آهن اسفنجی)، ۶۵kg در نظر گرفته شده است. و این مقدار با افزایش در صد آهن اسفنجی تا ٪۱۰۰ به ۱۲۰ Kg بر تن شارژ فلزی می رسد. انرژی خروجی بر حسب ژول بدست می آید که باید به کیلووات ساعت تبدیل شود.

امروزه ثابت شده است که یکی از مهمترین بخش های تامین کننده انرژی ورودی به سیستم، انرژی ورودی توسط آهن اسفنجی داغ می باشد که انرژی آن را می توان از روی ظرفیت حرارتی عناصر و اکسید های تشکیل دهنده در دمای مورد نظر (دمای شارژورودی به کوره قوس الکتریکی) محاسبه کرد.

با استفاده از اطلاعات بالا و محاسبه تغییرات انرژی الکتریکی با درصد و دمای شارژ، نمودارصرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی بدست می آید. با توجه به اینکه مصرف الکترود ۰/۰۰۴ kg/kWh می باشد، می توان نمودار مربوط به کاهش مصرف الکترود را نیز رسم کرد.

با انجام محاسبات بالا مشاهده می شود هنگامی که ٪۱۰۰ شارژ آهن اسفنجی داغ انجام شود، با افزایش هر $۱۰۰^{o}C$، بطور متوسط ۲۰kWh/tLS انرژی الکتریکی کاهش می یابد. با کاهش در صد شارژ داغ فلزی به کوره قوس الکتریکی، صرفه جوئی انجام شده نیز مقداری کاهش می یابد. برای مثال با شارژ ٪۸۰ آهن اسفنجی داغ، به کوره قوس الکتریکی، با افزایش هر $۱۰۰^{o}C$، بطور متوسط ۱۶kWh/tLSانرژی الکتریکی کاهش می یابد. این روند برای بقیه درصد های شارژ داغ نیز وجود دارد[۴ و۵].

قیمت هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی $ ۰/۰۲۲ و قیمت هر کیلوگرم الکترود مصرفی نیز $۳ فرض شده است(اطلاعات قیمت ها مربوط به کارخانه فولاد خوزستان هستند).

پیش گرم کردن قراضه

پیش گرم کردن قراضه نه تنها جهت کاهش مصرف انرژی بلکه برای خروج آلودگی هایی نظیر روغن یا خشک کردن قراضه و کاهش مصرف الکترود و نسوز و زمان ذوب و کاهش گرد وغبار خروجی از کوره به کار می رود.

درگذشته پیش گرم قراضه توسط سوخت خارجی تا ۸۰۰-۶۰۰ درجه سانتیگراد انجام می گرفت ولی اخیرا برای صرفه جویی در مصرف انرژی، از گاز خروجی کوره جهت پیش گرم استفاده می شود. ارتباط دمای پیش گرم کردن قراضه و زمان تخلیه تا تخلیه مجدد ومیزان مصرف انرژی الکتریکی کوره درشکل های زیرآورده شده است. همچنان که در این شکل دیده می شود، هر چه دمای پیش گرم قراضه افزایش می یابد، زمان تخلیه تا تخلیه مجدد کاهش می یابدومصرف انرژی الکتریکی کوره کمتر می شود[۶ و۷].

در شکل(۶) اثر افزایش دمای قراضه بر انرژی الکتریکی مصرفی در یک کوره ۱۵۰تنی که ۹۰٪ شارژ آن قراضه است، نشان داده شده است. واضح است که با افزایش دمای قراضه، میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز برای ذوب قراضه کاهش می یابد.

شارژ چدن مذاب

با به کارگیری فن آوری شارژ چدن مذاب در کوره های قوس الکتریکی، میزان مصرف انرژی الکتریکی ۳۰۰ kWh/t گزارش شده است. بسته به شرایط و امکانات و نیازهای فولاد سازی دو روش شارژ از طریق سقف کوره و شارژ از طریق سرباره مورد استفاده قرار می گیرد.

محدودیت مصرف اکسیژن و راندمان اکسیژن تزریقی، مقدار چدن مذاب در شارژ را محدود می کند. کارخانه cockerill با شارژ چدن مذاب کاهش مصرف انرژی حدود ۲۰kWh/t را به دست آورده است[۸ و۹].

همانطور که نمودار بر گرفته از نرم افزار نشان می دهد، می توان با اضافه کردن تقریبا ۵۰ کیلوگرم چدن مذاب به ازای هر تن فولاد تولیدی به شارژ ورودی یک کوره ۱۸۰ تنی با نسبت قراضه۰/۲، ۲۶ kWh/ton در مصرف انرژی الکتریکی کوره صرفه جویی نمود. با استفاده از ظرفیت گرمایی چدن مذاب وروابط ترمودینامیکی نیز نتیجه مشابهی خواهیم گرفت.

در شکل(۷) اثر شارژ کردن چدن مذاب به یک کوره قوس الکتریکی نشان داده شده است. با افزایش چدن مذاب به علت دمای بالای آن و نیز گرمای حاصل از اکسیداسیون سیلیس، منگنز وکربن موجود در آن، میزان انرژی الکتریکی لازم در فرآیند فولادسازی کاهش می یابد.

نتیجه گیری

- با توجه به این موضوع که تغییر سیستم شارژ کوره قوس الکتریکی از آهن اسفنجی به شارژ گرم، تنها ٪۳ هزینه سرمایه گذاری را افزایش می دهد، می توان این هزینه را در مدت کوتاهی توسط کاهشی که در هزینه های تولید ایجاد می شود، جبران کرد.

- با انجام محاسبات مربوط به موازنه انرژی مشاهده می شود که در ٪۱۰۰ شارژ گرم، با افزایش هر ^{o}C ۱۰۰ دمای شارژ ،۲۰ کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی کاهش می یابد. این نتایج با نتایج مقالاتی که در این زمینه چاپ شده است همخوانی دارد. با توجه به اینکه قیمت انرژی الکتریکی در ایران $ ۰/۰۲۲ می باشد و اینکه در کارخانه ای همانند فولاد خوزستان که در هر سال ۲,۰۰۰,۰۰۰ تن فولاد می کند با اجرای فرایند شارژ داغ صرفه جوئی انرژی الکتریکی سالانه بمیزان $۶,۱۶۰,۰۰۰ ایجاد می شود.

- با احتساب kg/kWht ۰/۰۰۴ مصرف الکترود صرفه جوئی مصرف الکترود سالانه بمیزان $۳,۳۶۰,۰۰۰ ایجاد می شود.

- علاوه بر مزایای ذکر شده در بالا قابلیت تولید نیز افزایش می یابد ،برای کوره های ۱۵۰ تنی که دارای توان ۱۱۰MW هستند ،با کاهش هر ۲۰kWh/tls در انرژی الکتریکی ، ۱/۵ دقیقه زمان ذوب کاهش می یابد. برای مثال در شارژ ٪۱۰۰ شارژ گرم ، با دمای ^{o}C ۷۰۰، حدودا ۱۰ دقیقه زمان ذوب کاهش می یابد.

- افزایش دمای قراضه و اضافه کردن چدن مذاب به شارژ ورودی کوره نیز با توجه به نتایج حاصل از موازنه جرم و انرژی اثری مشابه افزایش دمای آهن اسفنجی داشته و انرژی الکتریکی ورودی به کوره را کاهش می دهد.

- با توجه به اینکه هدف صنعت فولاد در ایران رسیدن به تولید سالانه ۱۰,۰۰۰,۰۰۰ تن می باشد، و مصرف بالای انرژی الکتریکی در این صنعت ،استفاده از این تکنولوژی و موارد مشابه ان روی اقتصاد عملیات تاثیر بسزائی دارد.

مراجع

[1] پرویزی، سروش، "بررسی روش های بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی در کوره قوس الکتریکی" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، پاییز ۱۳۸۵.

[2] R.A. Heard, P. Wurth, "Optimization of Energy in Electric Furnace Steelmaking" ,Iron and Steel Engineer, No. 4, pp.36-40.

[3] Sanjay Sengupa ,"Indian Iron Industry in Global Perspective", Midrex Technologies ,Inc,In Press.

[4] Brian voelker ,Russ Bailey ."Benefits of Hot DRI Charge to the EAF", Midrex Operations Seminar,2000.

[5] J.A.T. Jones, "Increased EAF Productivity through Improved Operating Efficiency" ,Electric Furnace Conference Proceeding, 1993, pp.97_106.

[6] Robert M. Klawonn ,Director – Sales, MIDREX Direct Reduction Corporation ,"Competitive Liquid Steel from HOTLINK ™ and Scrap".

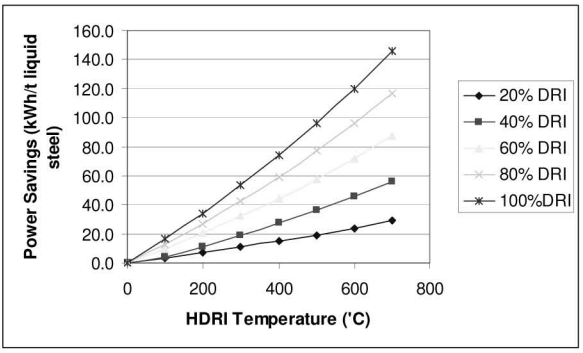
[7] Sara Hornby Anderson Product Manager.Steelmaking/ Melting Midrex Direct Reduction Corporation ,"DRI-The EAF Energy Source of the Future?"

[8] Gilbert Whitten ,"Hot Transport-Midrex Style Midrex Technologies,Inc,In Press.
[9] Winston L.Tennies ,Garry E.Metius,John T.Kopfle,"Breakthrough Technologies for the new Millennium"Midrex Technologies ,Inc.

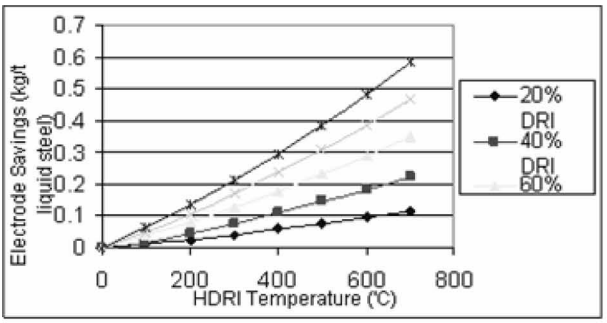
.جداول ۱و۲. مشخصات کلی یک نمونه از شارژ فولاد خوزستان

	Total Fe	Yield	%C
DRI	90. 15	94	1.76
Scrap	95. 34	92. 5	0.15

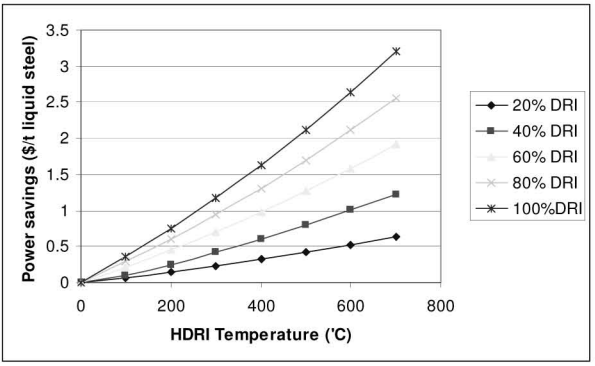
TTT (min)	Power (kWh/t)	Power (MWh)	Oxygen (m^3)	DRI (ton)	Scrap (ton)	Molten (ton)	Lime (kg)	Coke (kg)
135	683	112	1000	144	25	163.772	9100	50



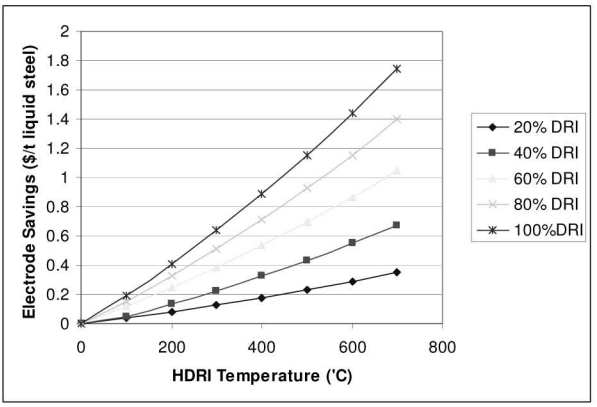
شکل ۱. صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی با تغییر پارامترهای دما ودرصد آهن اسفنجی.



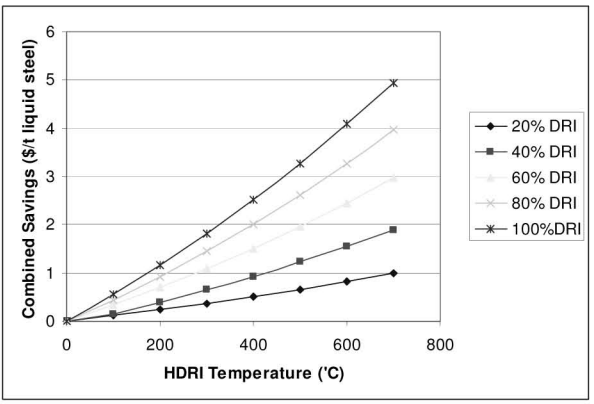
شکل ۲. صرفه جویی در الکترود مصرفی با تغییر پارامترهای دما و درصد آهن اسفنجی.



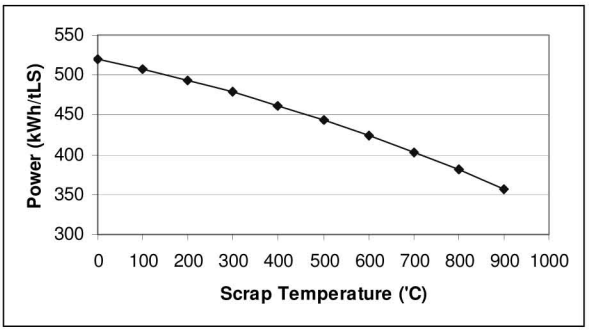
شکل ۳. صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی با تغییر دما ودرصد آهن اسفنجی.



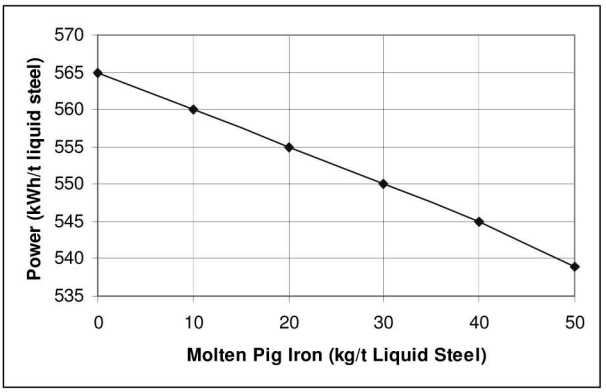
شکل ٤. صرفه جویی درالکترود مصرفی با تغییر دما ودرصد آهن اسفنجی.



شکل۵. صرفه جوئی در هزینه تولید فولاد با تغییر دما ودرصد آهن اسفنجی



شکل٦. اثر افزایش دمای قراضه برانرژی ا لکتریکی مصرفی در کوره ۱۵۰تنی با ۹۰٪ قراضه.



شکل ۷. تاثیر اضافه کردن چدن مذاب بر مصرف انرژی در یک کوره قوس الکتریکی ۱۵۰تنی.