بررسی اثر افزایش شارژ داغ برروی مصرف انرژی الکتریکی و هزینه های تولید کوره های قوس الکتریک

هومن فخرنبوی[a] ، سروش پرویزی[b]،سید خطیب الاسلام صدرنژاد[c]، مهران خرم نیا[d]

چکیده– شارژ داغ، روشی نوین و موثر در کاهش مصرف انرژی الکتریکی و افزایش قابلیت تولید می باشد. شرکت میدرکس سیستمی بر مبنای استفاده ازجاذبه برای جابجایی مستقیم شارژداغ از کوره تولید آهن اسفنجی به کوره EAF طراحی کرده است، که HOT LINK نام دارد.در این مقاله روش HOT LINK به وسیله موازنه جرمی و حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده می شود که با افزایش هر ۱۰۰ درجه سانتیگراد دمای شارژ،تقریبا $20\,kWh/TLS$ 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 ($0.004\,kg/\ kWh$)، کاهش می یابد نتایج این بررسی با نتایج مقالات چاپ شده در این زمینه مطابقت دارد.

واژه های کلیدی– انتقال شارژ داغ،کوره قوس الکتریک ، بهینه سازی انرژی

مقدمه

در سال ۱۹۹۹ برای اولین بار فولاد اسار (Essarr Steel) ،واقع درایالت گاجارای هند غربی، استفاده از انتقال شارژ داغ را در مقیاس کوچک شروع کرد(1) وبتدریج آنرا گسترش داد.در سال ۲۰۰۰ شارژ کوره های قوس الکتریک این کارخانه شامل ٪۷۱/۲آهن اسفنجی داغ(HDRI)،و مابقی قراضه بوده است وتا سال ۲۰۰۱ به ٪۷۵ رسیده است(۲و۳).تا پایان ماه اوریل سال ۲۰۰۱ ، شرکت اسار ماهانه ۴۴۶۷۱ تن HDRI استفاده کرده است و هدف شرکت تا پایان سال بعد رسیدن به شارژ ۱/۲ میلیون تن در سال است(۳).هم

[a]: کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف hooman_fn@Gmail.com

[b]: کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف

[c]:استاد ، دانشکده مهندسی مواد ، دانشگاه صنعتی شریف

[d]:کارشناسی ارشد متالورژی ، مدیر فناوری تولید فولاد سازی ، شرکت فولاد خوزستان

اکنون کارخانه تولید آهن و فولاد شدید (SHADEED Iron & Steel)، در عمان قصد دارد تا نیمه اول سال ۲۰۰۸ بخش HOTLINK را با ظرفیت تولید یک میلیون و پانصد هزار تن HDRI آغاز کند ، که پیش بینی می شود سالانه ، ۸/۳۶ میلیون دلار در مصرف انرژی الکتریکی و الکترود صرفه جوئی شود(۴و۸).

در روش HOTLINK ، شارژ داغ مستقیما با استفاده از نیروی جاذبه توسط یک دستگاه آب بندی شده از کوره احیا مستقیم به کوره قوس الکتریک(EAF) منتقل می شود .دمای HDRI خروجی از کوره احیا مستقیم ،۷۰۰–۶۵۰ درجه سانتیگراد می باشد و افت دمائی در حدود ۵۰ درجه سانتیگراد در طول مسیر تا کوره EAF ایجاد می شود(۵).در حالیکه در سیستم پنوماتیک انتقال شارژ، دما از ۷۰۰ به ۵۲۵ درجه سانتیگراد می رسد(۶).

شرکت فولاد اسار در بررسی های خود،مزاایای استفاده از شارژ داغ را بشرح زیر اعلام کرد(۱):

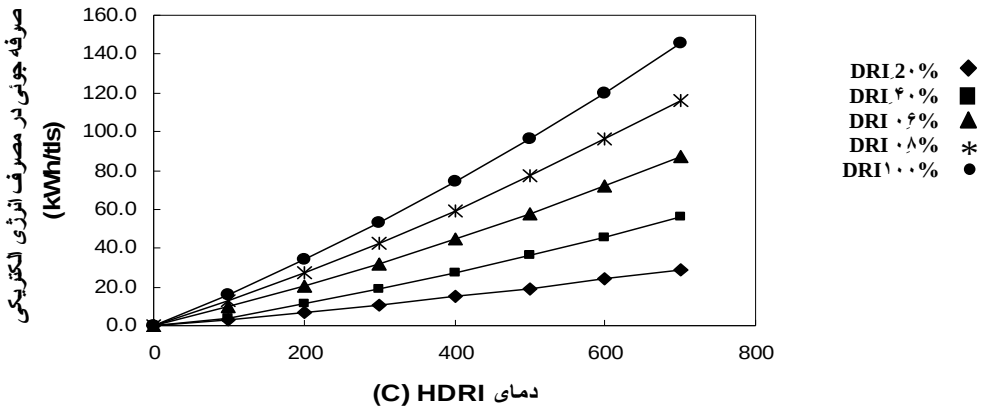
۱. یک درصد افزایش در درصد فلزی شدن
۲. عدم وجود رطوبت در DRI
۳. تلفات حرارتی کم(کمتر از $5\,^{O}C/\ hr$)
۴. کاهش ۰.۶٪ درصد در تولید ذرات ریز
۵. صرفه جوئی انرژی در بریکت ها بمیزان $8–10\ kWh/ton$

در بین روشهای انتقال شارژ داغ ، روش HOTLINK بیشترین مزایا را دارا می باشد که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد(۵):

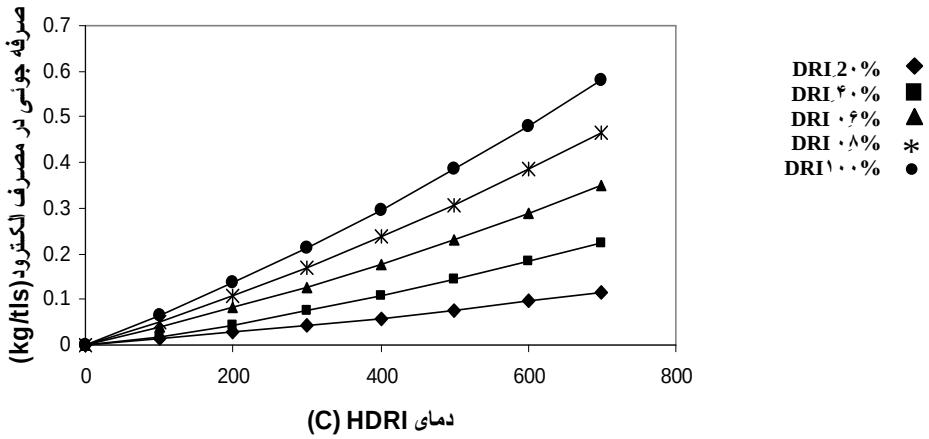
۱. کمترین کاهش درجه حرارت بخاطر کوتاه بودن مسیر انتقال
۲. کمترین کاهش در خواص DRI بخاطر سرعت انتقال مناسب و آهسته شارژ
۳. عدم وجود اکسیداسون مجدد بخاطر آب بندی بودن سیستم و نگهداری آن در اتمسفر گاز خنثی
۴. نگهداری کم و قابلیت اعتماد بالا برای انتقال
۵. مصرف کمتر انرژی الکتریکی و الکترود

در بررسی های انجام شده مشاهده شده است که با افزایش هر ۱۰۰ درجه سانتیگراد دردمای شارژ HDRI ، $20\ kWh/tls$ صرفه جوئی در مصرف انرژی الکتریکی ایجاد می شود(۵و۹و۱۰) که در بخشهای بعدی محاسبه خواهد شد.

علاوه بر مزایای ذکر شده در بالا ، گازهای گلخانه ای تصاعد شده در این روش نسبت به بقیه روشهای فولاد سازی کمتر می باشد(۸).



شکل1:صرفه جوئی در مصرف انرژی الکتریکی(kWh/tls).



شکل۲:صرفه جوئی در مصرف الکترود(kg/tls)

تشریح فرایند HOTLINK:

فرایند HOTLINK نیازمند یک سری تجهیزات اضافی می باشد که هزینه های سرمایه گذاری اولیه را بالا می برد،اما از سوی دیگر یک سری صرفه جوئی ها انجام می شود که می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عدم احتیاج به سیستم تغذیه DRI سرد
- $۱۰۰۰M^2$ کاهش در مساحت زمین مورد نیاز ،بخاطر مجاورت کوره احیا مستقیم و کوره قوس الکتریک

در کل می توان گفت هزینه های سرمایه گذاری نسبت به تغذیه آهن اسفنجی سرد ، تنها ٪۳ افزایش می یابد درحالیکه در EAF با استفاده از HDRI صرفه جوئی عظیمی انجام می شود(۵).

از آنجائی که کوره های احیا مستقیم بر خلاف EAF بصورت پیوسته کار می کنند بنابراین هماهنگ کردن آنها مشکل می باشد.بطور متوسط هر کوره احیا مستقیم ۸۰۰۰ ساعت در سال و هر کوره قوس الکتریک ،۷۲۰۰ ساعت در سال کار می کنند . درساعاتی که کوره قوس الکتریک خاموش می باشد ،HDRI پس از خنک شدن ذخیره می شود و در ساعاتی که کوره احیا مستقیم خاموش باشد ،کوره قوس الکتریک از ذخیره سرد DRI استفاده می کند(۵و۷و۱۰).هنگامیکه شارژ آهن اسفنجی سرد زیاد می شود می توان آن را با HDRI مخلوط کرده و به کوره قوس الکتریک شارژ کرد، که دمای مخلوط کاهش می یابد، یا می توان آنرا مجددا به کوره احیا مستقیم فرستاد تا گرم شود(حداکثر ٪۱۰ شارژ کوره DR).از آنجائی که آهن اسفنجی سرد قبلا احیا شده است ، بنابراین به احیا کننده نیازی ندارد و تنها مقداری انرژی مصرف می شود.

ظرفیت منبع ذخیره سرد معمولا در حد شارژ یک ذوب کوره قوس الکتریک میباشد و سایزهای بزرگتر مطلوب نیستند زیرا می توان شارژ سرد را در انبار ذخیره کرد و بعدا از آن استفاده کرد.اما ظرفیت منبع HDRI باید در حدی باشد که بتواند فرایند پیوسته احیا مستقیم و فرایند غیر پیوسته ذوب در کوره قوس الکتریک را هماهنگ کند.

محاسبات مربوط به HOTLINK :

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

$$\Delta E_{\text{Electric en}} = \Delta E_{\text{Exit}} - \Delta E_{\text{Chemical}} - \Delta E_{\text{HDRI}} \qquad \textbf{(1)}$$

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

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

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

ΔE_{HDRI} : تغییر در میزان انرژی وارد شده به سیستم توسط HDRI.

هدف این قسمت از مقاله معرفی عوامل موثر بر روی انرژی الکتریکی می باشد و نحوه محاسبه تغییرات انها با تغییر شارژ ورودی نشان داده شده می شود.در بخش اول اجزاء و عوامل 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:

$$m_{i=}1000\times\%m_i/(\%Fe_{tot}\times\%Yield) \quad (2)$$

m_i٪:درصد قراضه و یا آهن اسفنجی در شارژ فلزی

m_i:وزن شارژ فلزی

$\%Fe_{Tot}$:در صد آهن موجود در شارژ فلزی

$\%Yield$:درصد از آهن شارژ که قابلیت تولید فولاد دارد

جدول۱: ترکیب کربن و آهن شارژهای فلزی پایه آهن

	Total Fe	Given Yield	%C
DRI	90.36	94	1.76
Scrap	95.24	92.5	0.15

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

$$\Delta E_i=\Sigma \int (\%j)\times m_J/M_{J\times}C_p^j\times dT \quad (3)$$

C_P^j: ظرفیت حرارتی عنصر j 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 ٪20 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 اید که باید به کیلووات ساعت تبدیل شود.

اگر احتراق بعدی (Post Combustion)، ٪۱۰ فرض شود،در اثر احتراق هر کیلوگرم کربن ، ۱/۹۸ کیلوگرم گاز مونوکسید کربن و ۰/۵۵ کیلوگرم گاز دی اکسید کربن تولید می شود.مقدار کربن محترق شده را می توان از روی قانون بقای جرم محاسبه کرد:

$$C_{Charged}+C_{Anthracite}= C_{Steel}+C_{Burned} \quad (4)$$

با توجه بمیزان کربن سوخته شده مقدار مونوکسید و دی اکسید کربن تولید شده محاسبه شده و انرژی خروجی توسط آنها تعیین می شود.در اثر تغییر شارژ ورودی ،مقدار گازهای خروجی مونوکسید و دی اکسید کربن تغییر کرده و در نتیجه ،انرژی خروجی از سیستم نیز تغییر می کند.

جدول۲:آنتالپی گازهای خروجی

Gas	CO	CO_2
Enthalpy(kWh/ton)	495	502

$$\text{Out Gas Energy}= \Sigma m_i \times (\text{Enthalpy})_i \quad (5)$$

تغییرات انرژی شیمیائی که تامین کننده بخشی از انرژی مورد نیاز سیستم می باشد ، در اثر تغییر در میزان کربن سوخته شده،سیلیسیم اکسید شده و یا تغییر در مقدار آهن احیا شده ایجاد می شود.مقدار عنصر اکسیده شده و یا احیا شده را می توان از قانون بقاء جرم محاسبه کرد.

در اثر احتراق کربن و مواد کربنی ، ٪۹۰ کربن به مونوکسید کربن و مابقی به دی اکسید کربن تبدیل می شود که انرژی این واکنش ها بصورت زیر هستند:

$$C+1/2O_2 \rightarrow CO \quad ۲/۵۴ \text{ kWh/kg} \quad (6)$$

$$C+O_2 \rightarrow CO_2 \quad 9.1 \text{ kWh/kg} \quad (7)$$

کل سیلیسیم وارد شده توسط شارژهای فلزی به دی اکسید سیلیسیم تبدیل شده و به سرباره می رود انرژی اکسیداسیون سیلیسیم ،kWh/kg ۷/۹۱ می باشد. DRI بدون سیلیسم می باشد و قراضه مصرفی درای ٪۰/۱۵ سیلیسیم فرض شده است .

سرباره دارای ٪۱۹/۵ اکسید آهن فرض شده است.بنابر این میزان آهن احیاشده را از رابطه زیر تعیین کرد:

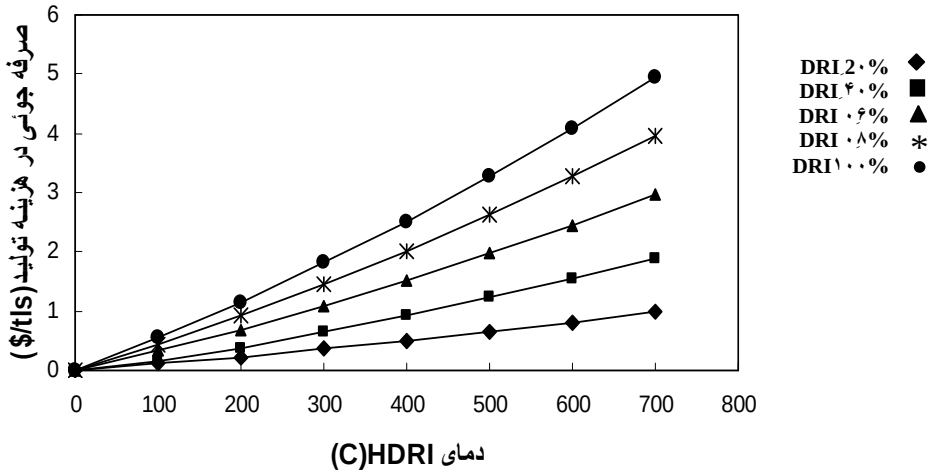
$$m^{Fe}(\text{Reduced})=m^{Fe}(\text{Charged})-m^{Fe}(\text{Slag}) \quad (8)$$

انرژی احیاء FeO، kWh/kg ۱/۰۳ می باشد(واکنش گرماگیر و انرژی واکنش منفی است).

و در نهایت آخرین بخش تامین کننده انرژی ورودی به سیستم که مورد بحث این مقاله می باشد، انرژی ورودی توسط HDRI می باشد که انرژی آن را می توان از روی ظرفیت حرارتی عناصر و اکسید های تشکیل دهنده در دمای مورد نظر (دمای شارژ به EAF) محاسبه کرد.

با استفاده از اطلاعات بالا و محاسبه تغییرات انرژی الکتریکی با درصد و دمای شارژ، نمودار ۱ بدست می اید. با توجه به اینکه مصرف الکترود بمیزانkg/kWh ۰/۰۰۴ می باشد،می توان نمودار مربوط به کاهش مصرف الکترود را نیز رسم کرد(نمودار ۲).

با انجام محاسبات بالا مشاهده می شود هنگامیکه ٪۱۰۰ شارژ HDRI انجام شود ، با افزایش هر ^{o}C۱۰۰،بطور متوسط ۲۰kWh/tls انرژی الکتریکی کاهش می یابد. با کاهش در صد شارژ داغ فلزی به کوره قوس الکتریک ، صرفه جوئی انجام شده نیز مقداری کاهش می یابد.برای مثال با شارژ ٪۸۰HDRI به کوره قوس الکتریک ،با افزایش هر ^{o}C۱۰۰،بطور متوسط ۱۶kWh/tls انرژی الکتریکی کاهش می یابد.این روند برای بقیه درصد های شارژ داغ نیز وجود دارد. قیمت هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی $ ۰/۰۲۲ و قیمت هر کیلو گرم الکترود مصرفی نیز $۳ فرض شده است.



شکل۳:صرفه جوئی در هزینه تولید فولاد ($/tls)

نتیجه گیری

با توجه به این موضوع که تغییر سیستم شارژ کوره قوس الکتریک از DRI به HDRI،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.

معمولا شارژ HDRI در دمای ^{o}C۷۰۰ انجام می شود ، اما در فرایند های جدید سعی شده است که با استفاده از تخلیه شارژ از منطقه مناسب کوره احیا بتوان شارژ را در دمای بالا تری نیز انجام داد.با انجام یک سری محاسبات مربوط به موازنه انرژی مشاهده می شود که در شارژ ٪۱۰۰ HDRI، با افزایش هر ^{o}C۱۰۰ 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 می توان به صرفه جوئی تنها در انرژی الکتریکی،سالانه بمیزان $۶,۱۶۰,۰۰۰ دست پیدا کرد.علاوه بر این در مصرف الکترود نیز صرفه جوئی بمیزان $۳,۳۶۰,۰۰۰ ایجاد می شود و در کل می توان سالانه بمیزان۹/۵ میلون دلار صرفه جوئی انجام داد.

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.بعبارت دیگر در شارژ ۱۰۰٪ HDRI ، با دمای $۷۰۰^{o}C$،حدودا ۱۰ دقیقه زمان ذوب کاهش می یابد.

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.

منابع:

[1] Sanjay Sengupa ,"Indian Iron Industry in Global Perspective"; Midrex Technologies ,Inc,In Press.
[2] Sara Hornby Anderson Product Manager.Steelmaking/ Melting Midrex Direct Reduction Corporation ,"DRI-The EAF Energy Source of the Future?"
[3] Brian voelker ,Russ Bailey ."Benefits of Hot DRI Charge to the EAF", Midrex Operations Seminar,2000.
[4] http://www.mesteel.com/countries/oman/Shadeed_Iron_Steel.pdf. (Dated by 7/11/2006)
[5] Stephen C.Montague,Dr,W.Dieter Hauser,"HOTLINK,Hot charging dri for lower cost and higher productivity",Iron & Steel Society's 57th Electric Furnace Conference ,Pittsburgh,PA,Nov.,1999,3-7.
[6] Ignacio S.Alvarez,Jose G.Guzman,"Hot-Charged DRI/EAF/Thin Slab Casting:The Mini Mill of the Future",Future of Flat Rolled Steel Production Conference ,Association of Iron And steel Engineers,Chicago,IL.June 11-15,1995.
[7]Gilbert Whitten ,"Hot Transport-Midrex Style Midrex Technologies,Inc,In Press.
[8] Robert M.Klawonn ,Director – Sales, MIDREX Direct Reduction Corporation ,"Competitive Liquid Steel from HOTLINK ™ and Scrap".
[9] Winston L.Tennies ,Garry E.Metius,John T.Kopfle,"Breakthrough Technologies for the new Millennium"Midrex Technologies ,Inc.
[10] Frank N. Griscom - Vice President, Marketing & Sales Midrex Direct Reduction Corporation ,Gary E. Metius – Manager of Technical Sales Midrex Direct Reduction Corporation, John T. Kopfle – Director Marketing & Sales Midrex Direct Reduction Corporation.,"IronMaking Technology For the new Millenium".

Investigation of HOTLINK Method on Electrical energy consumption & costs of electric arc furnace steel making

Hooman Fakkhr Nabavi[a*], Soroush Parvizi[b], K.Sadr Nezhad[c],Mehran Khorramnia[d]
*** Hooman_fn@Gmail.com**

Abstract- HOTLINK is one such improvement that can reduce operating cost & increase EAF productivity.Midrex direct reduction corporation has designed a system to transport hot DRI to an EAF using gravity. This system, called HOTLINK.In this work HOTLINK method was investigated & observed that by 100 ° C increasing in charge temperature, the required electrical energy decreased 20 kWh/TLS & subsequently the efficiency of production increased.Beside that consumption of electrode has linear relationship with electrical energy (0.004kg/kWh) in the results. In this paper mass & energy balance is used & observed that the results from calculations validate the experimental results.

Key Words-HOTLINK,Electric Arc Furnace,Energy optmization

a: M.Sc. of materials engineering, Sharif University of Technoloy
b: M.Sc. of materials engineering, Sharif University of Technoloy
c: Professor, Sharif University of Technoloy
d:MSc.of Metallurgy,Management of Steel processing ,Khouzestan Steel.