

بررسی اثر افزایش شارژ داغ بر روی 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 از جاذبه برای جابجایی مستقیم شارژ داغ 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 100 درجه سانتیگراد دمای شارژ، تقریباً 20 kWh/TLS صرفه جوئی در مصرف انرژی الکتریکی انجام می شود و در نتیجه راندمان تولید افزایش می یابد. علاوه بر این مصرف الکتروود 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 1999 برای اولین بار فولاد اسار (Essar Steel)، واقع در ایالت گاجارای هند غربی، استفاده از انتقال شارژ داغ را در مقیاس کوچک شروع کرد (1) و بتدریج آنرا گسترش داد. در سال 2000 شارژ کوره های قوس الکتریک این کارخانه شامل $71/2\%$ آهن اسفنجی داغ (HDRI)، و مابقی قراضه بوده است و تا سال 2001 به 75% رسیده است (2 و 3). تا پایان ماه آوریل سال 2001، شرکت اسار ماهانه 44671 تن HDRI استفاده کرده است و هدف شرکت تا پایان سال بعد رسیدن به شارژ $1/2$ میلیون تن در سال است (3). هم اکنون

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

^b: دانشجوی 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

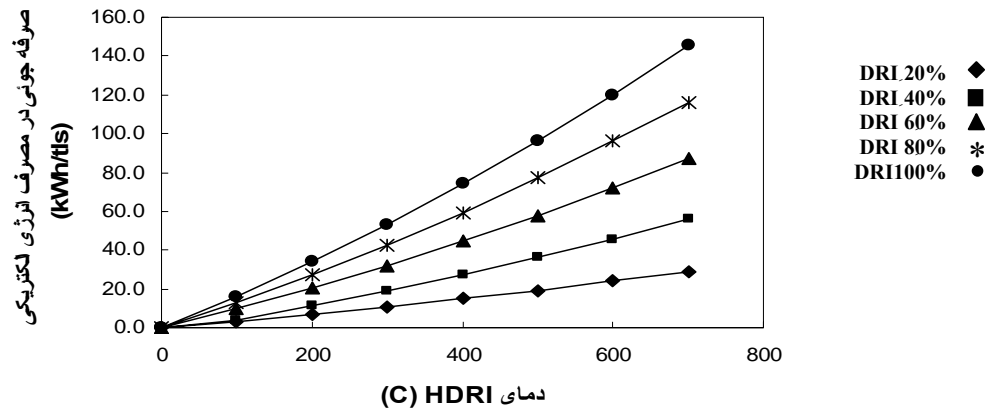
کارخانه تولید آهن و فولاد شدید (SHADEED Iron & Steel)، در عمان قصد دارد تا نیمه اول سال 2008 بخش HOTLINK را با ظرفیت تولید یک میلیون و پانصد هزار تن HDRI آغاز کند، که پیش بینی می شود سالانه، 8/36 میلیون دلار در مصرف انرژی الکتریکی و الکتروود صرفه جوئی شود (4 و 8).

در روش HOTLINK، شارژ داغ مستقیماً 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، 650-700 درجه سانتیگراد می باشد و افت دمائی در حدود 50 درجه سانتیگراد در طول مسیر تا کوره EAF ایجاد می شود (5). در حالیکه در سیستم پنوماتیک انتقال شارژ، دما از 700 به 525 درجه سانتیگراد می رسد (6).

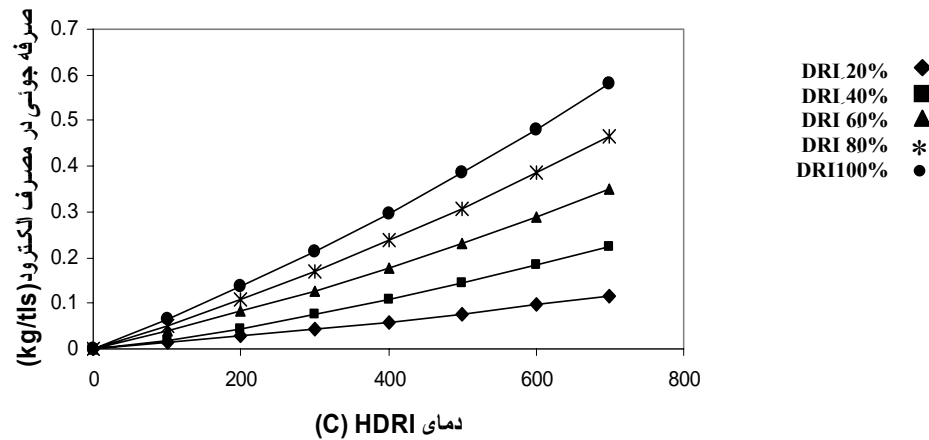
شرکت فولاد اسار در بررسی های خود، مزایای استفاده از شارژ داغ را بشرح زیر اعلام کرد (1):

1. یک درصد افزایش در درصد فلزی شدن
 2. عدم وجود رطوبت در DRI
 3. تلفات حرارتی کم (کمتر از 5°C/hr)
 4. کاهش 0.6% درصد در تولید ذرات ریز
 5. 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 می توان به موارد زیر اشاره کرد (5):

1. کمترین کاهش درجه حرارت بخاطر کوتاه بودن مسیر انتقال
 2. کمترین کاهش در خواص DRI بخاطر سرعت انتقال مناسب و آهسته شارژ
 3. عدم وجود اکسیداسون مجدد بخاطر آب بندی بودن سیستم و نگهداری آن در اتمسفر گاز خنثی
 4. نگهداری کم و قابلیت اعتماد بالا برای انتقال
 5. مصرف کمتر انرژی الکتریکی و الکتروود
- در بررسی های انجام شده مشاهده شده است که با افزایش هر 100 درجه سانتیگراد در دمای شارژ HDRI، 20 kWh/tls صرفه جوئی در مصرف انرژی الکتریکی ایجاد می شود (5 و 9 و 10) 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 (8).



شکل 1: صرفه جوئی در مصرف انرژی الکتریکی (kWh/tls).



شکل 2: صرفه جوئی در مصرف الکتروود (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
- 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 3% افزایش می یابد درحالیکه در EAF با استفاده از HDRI صرفه جوئی عظیمی انجام می شود (5).

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 8000 ساعت در سال و هر کوره قوس الکتریک ، 7200 ساعت در سال کار می کنند . در ساعاتی 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 (5 و 7 و 10). 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 مجدداً به کوره احیا مستقیم فرستاد تا گرم شود (حداکثر 10% شارژ کوره DR). از آنجائی که آهن اسفنجی سرد قبلاً احیا شده است ، بنابراین به احیا کننده نیازی ندارد و تنها مقداری انرژی مصرف می شود.

ظرفیت منبع ذخیره سرد معمولاً 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 بعداً 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.

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

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

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

$\Delta E_{\text{Chemical}}$: تغيير در انرژی شیمیائی تولید شده حاصل از احتراق کربن، اکسیداسیون سیلیسیم و احیاء آهن.
 ΔE_{HDRI} : تغيير 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 آنها 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 1 تن فولاد از رابطه زیر بدست می آید:

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

$\%m_i$: درصد قراضه و یا آهن اسفنجی در شارژ فلزی
 m_i : وزن شارژ فلزی

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

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

جدول 1: 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:

$$\Delta E_i = \sum_j (\%j) \times m_j / M_j \times C_p^j \times dT \quad (3)$$

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 بازااء هر تن شارژ فلزی دارای 20% آهن اسفنجی، 65kg در نظر گرفته شده است. و این مقدار با افزایش در صد آهن اسفنجی تا 100% به 120 Kg بر تن شارژ فلزی می رسد. انرژی خروجی بر حسب ژول بدست می آید که باید به کیلووات ساعت تبدیل شود.

اگر احتراق بعدی (Post Combustion)، 10% فرض شود، در اثر احتراق هر کیلوگرم کربن، 1/98 کیلوگرم گاز مونوکسید

کربن و 0/55 کیلوگرم گاز دی اکسید کربن تولید می شود. مقدار کربن محترق شده را می توان از روی قانون بقای جرم محاسبه کرد:

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

با توجه به میزان 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.

جدول 2: آنتالپی گازهای خروجی

Gas	CO	CO ₂
Enthalpy(kWh/ton)	495	502

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

تغییرات انرژی شیمیایی 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 بقای جرم محاسبه کرد. در اثر احتراق کربن و مواد کربنی، 90% کربن به مونوکسید کربن و مابقی به دی اکسید کربن تبدیل می شود که انرژی این واکنش ها بصورت زیر هستند:



کل سیلیسیم وارد شده توسط شارژهای فلزی به دی اکسید سیلیسیم تبدیل شده و به سرباره می رود انرژی اکسیداسیون سیلیسیم، 7/91 kWh/kg می باشد. DRI بدون سیلیسیم می باشد و قراضه مصرفی دارای 0/15% سیلیسیم فرض شده است.

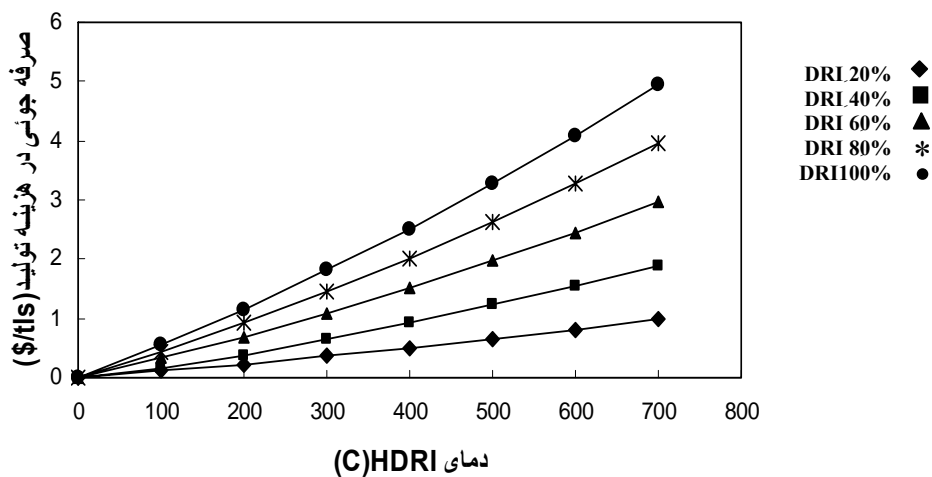
سرباره دارای 19/5% اکسید آهن فرض شده است. بنابراین این میزان آهن احیاشده را از رابطه زیر تعیین کرد:

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

انرژی احیاء FeO، 1/03 kWh/kg 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 1 بدست می آید. با توجه به اینکه مصرف الکتروود بمیزان $0/004 \text{ kg/kWh}$ می باشد، می توان نمودار مربوط به کاهش مصرف الکتروود را نیز رسم کرد (نمودار 2).

با انجام محاسبات بالا مشاهده می شود هنگامیکه 100% شارژ HDRI انجام شود، با افزایش هر 100°C ، بطور متوسط 20kWh/tls انرژی الکتریکی کاهش می یابد. با کاهش درصد شارژ داغ فلزی به کوره قوس الکتریک، صرفه جوئی انجام شده نیز مقداری کاهش می یابد. برای مثال با شارژ 80% HDRI، به کوره قوس الکتریک، با افزایش هر 100°C ، بطور متوسط 16kWh/tls انرژی الکتریکی کاهش می یابد. این روند برای بقیه درصد های شارژ داغ نیز وجود دارد. قیمت هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی $\$ 0/022$ و قیمت هر کیلو گرم الکتروود مصرفی نیز $\$ 3$ فرض شده است.



شکل 3: 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 3% هزینه سرمایه گذاری را افزایش می دهد، می توان این هزینه را در مدت کوتاهی توسط کاهش که در هزینه های تولید ایجاد می شود، جبران کرد.

معمولا شارژ HDRI در دمای 700°C انجام می شود ، اما در فرایندهای جدید سعی شده است که با استفاده از تخلیه شارژ از منطقه مناسب کوره احیا بتوان شارژ را در دمای بالاتری نیز انجام داد. با انجام یک سری محاسبات مربوط به موازنه انرژی مشاهده می شود که در شارژ 100% HDRI، با افزایش هر 100°C دمای شارژ، 20 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 \$ 0/022 می باشد و اینکه در کارخانه ای همانند فولاد خوزستان که در هر سال 2,000,000 تن فولاد می کند با اجرای فرایند شارژ داغ می توان به صرفه جوئی تنها در انرژی الکتریکی، سالانه بمیزان \$ 6,160,000 دست پیدا کرد. علاوه بر این در مصرف الکتروود نیز صرفه جوئی بمیزان \$ 3,360,000 ایجاد می شود و در کل می توان سالانه بمیزان 9/5 میلیون دلار صرفه جوئی انجام داد. علاوه بر مزایای ذکر شده در بالا قابلیت تولید نیز افزایش می یابد، برای کوره های 150 تنی که دارای توان 110MW هستند، با کاهش هر 20kWh/tls در انرژی الکتریکی، 1/5 دقیقه زمان ذوب کاهش می یابد. بعبارت دیگر در شارژ 100% HDRI، با دمای 700°C ، حدودا 10 دقیقه زمان ذوب کاهش می یابد.

با توجه به اینکه هدف صنعت فولاد در ایران رسیدن به تولید سالانه 10,000,000 تن می باشد، و مصرف بالای انرژی الکتریکی در این صنعت، استفاده از این تکنولوژی و موارد مشابه آن روی اقتصاد عملیات تاثیر بسزائی دارد.

منابع:

- [1] Sanjay Sengupta, "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 TM 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. student of materials engineering, Sharif University of Technoloy

b: M.Sc. student of materials engineering, Sharif University of Technoloy

c: Professor, Sharif University of Technoloy

d:MSc.of Metallurgy,Management of Steel processing ,Khouzestan Steel.