

بررسی اثر تغییرات درصد کربن آهن اسفنجی بر روی مصرف انرژی کوره‌های قوس الکتریکی

هومن فخرنوبی^۱، سروش پرویزی^۲، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^۳، مهراڻ خرم نیا^۴

چکیده- در این مقاله اثر افزایش درصد کربن آهن اسفنجی در شارژ کوره های قوس الکتریک، بر روی هزینه های فولاد سازی بررسی شده است. شارژ ورودی به کوره دارای 90٪ آهن اسفنجی فرض شده است و در صد کربن آهن اسفنجی بین 1/5٪ تا 3٪ متغیر گرفته شده است، همچنین کوره قابلیت تزریق nm^3/tIs 15 اکسیژن را دارد. علاوه بر این مقداری کربن نیز بصورت آنتراسیت به کوره تزریق یا افزوده می شود. در هر دو حالت افزایش مواد کربن ده با افزایش درصد کربن اسفنجی کاهش قیمت را خواهیم داشت اما در شرایط برابر چنانچه از تزریق به جای شارژ توده ای استفاده شود قیمت تمام شده پایینتر خواهد بود. رونداخت قیمت فولاد، با افزایش در صد کربن آهن اسفنجی، در روش تزریق، کندتر می باشد. در درصدهای بالاتر آهن اسفنجی مشاهده می شود که، مینیمم هزینه های تولید فولاد در درصدهای پائین تر آهن اسفنجی بدست می آید.

واژه های کلیدی- کوره قوس الکتریک، بهینه سازی انرژی، آهن اسفنجی، مواد کربن ده

مقدمه:

صنایع آهن و فولاد یکی از پر مصرف ترین صنایع مصرف کننده انرژی در جهان می باشند. مصرف انرژی جهانی این صنایع در سال 1990، 18-19 اگزا ژول بوده است (10-15٪ مصرف سالانه انرژی در صنعت) [1]، و پیش بینی می شود که تا سال 2020 به 25 اگزا ژول برسد [1]. تولید فولاد در سال 1945، 100 میلیون تن بوده است و تا سال 1990 به 770 میلیون تن رسیده است [2 و 3] و پیش بینی می شود که با روند رو به رشد سالانه 1/7٪ در سال 2020 به 1280 میلیون تن در سال برسد [1]. بهینه سازی انرژی تنها راه جلوگیری از روند رو به رشد مصرف انرژی در این صنعت می باشد و مطالعات زیادی در زمینه

^۱: کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف hooman_fn@gmail.com

^۲: کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف

^۳: استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف

^۴: کارشناسی ارشد متالورژی، مدیر فناوری تولید فولاد سازی، شرکت فولاد خوزستان

بهینه سازی انرژی در کوتاه مدت ، تا 15-10 سال آینده انجام شده است [4-7] و پیش بینی می شود که با تکنیک های مناسب می توان مصرف انرژی در سال 2020 را به 20 اگراژول کاهش داد (کاهش در حدود 20%) [1].

انرژی الکتریکی حدود 65% انرژی ورودی کوره های قوس الکتریکی را تامین می کند و روشهایی که بتوانند با تنظیم بهینه شارژ ورودی یا تکنیکهای جانبی دیگری که علاوه بر کاهش هزینه های تولید ، مصرف انرژی الکتریکی را نیز کاهش دهند اهمیت زیادی دارند. استفاده از انرژی شیمیایی واکنش های درون کوره می تواند راه حل مناسبی برای این مساله باشد. در زمینه کاهش مصرف انرژی با استفاده از احتراق بعدی (Post combustion) تکنیک های مختلفی گسترش یافته است [8-12]. همچنین یک سری مدل سازی برای کفی شدن سرباره انجام شده است که میزان کفی شدن را با توجه به ترکیب سرباره و دما و مواد افزودنی بررسی می کند [13-15]. کفی شدن سرباره علاوه بر کاهش صدای قوس ، از تلفات انرژی قوس نیز جلوگیری می کند.

در تحقیقات بعدی اثر شارژ DRI داغ (HDRI) بررسی شده است و این روش با وارد کردن مقداری انرژی به سیستم ، انرژی الکتریکی مصرفی را کاهش می دهد [16].

برای بهینه کردن عملیات ذوب و آلیاژسازی و حد اقل کردن هزینه های تولید فولاد در کوره های القائی نیز یک برنامه کامپیوتری تحت برنامه DOS، قبلا ساخته شده که شرح آن در مرجع 17 آورده شده است. در این مقاله از یک برنامه کامپیوتری مورد استفاده در شرکت فولاد خوزستان استفاده شده است. این برنامه یک مدل استاتیک می باشد که با وارد کردن اطلاعات ورودی ، رفتار بعدی کوره ، ترکیب و مقدار سرباره ، انرژی الکتریکی مورد نیاز ، هزینه ها و... را محاسبه می کند. مبنای کاری این برنامه موازنه جرمی و حرارتی می باشد. با کمک این برنامه و مبنای محاسباتی آن ، تاثیر درصد کربن شارژ آهن اسفنجی بر روی مصرف

انرژی و هزینه تولید بررسی شده است. شارژ فلزی ورودی به کوره دارای 90% آهن اسفنجی با درصد کربن متفاوت در نظر گرفته شده است. همچنین تا ثیر دو روش تزریق کربن و افزایش کربن بصورت توده ای (در هنگام شارژ قراضه) که معمولا استفاده می شوند نیز بررسی شده اند.

فرضیات:

1. آهن اسفنجی ورودی می تواند بین 1/5 تا 3٪ درصد کربن داشته باشد و با زیاد شدن درصد کربن آهن اسفنجی به کوره ، مقدار آهن موجود در آهن اسفنجی کاهش می یابد که رابطه آنها بصورت زیر می باشد:

$$\%Fe_{tot} = 92 - 0.93 \times \%C_{DRI} \quad (1)$$

درصد فلزی شدن (Metallization) ثابت و برابر 91/5 درصد می باشد. فولاد تولیدی دارای 0/08٪ کربن است.

2. کربن ورودی به سیستم آنتراسیت و دارای 87٪ کربن می باشد.
3. نرخ بازیابی کربن اضافی (Excess Carbon) موجود در آهن اسفنجی 100٪ می باشد.
4. نرخ بازیابی برای اضافه کردن کربن بصورت توده ای (Bulk) ، 25٪ و برای تزریق کربن (Injection) 80٪ می باشد. این کربن به محلول فولاد مذاب می رود و می تواند بعنوان سوخت برای اکسیژن تزریق شده عمل کند [18].
5. کوره قابلیت تزریق 15 متر مکعب اکسیژن بازا هر تن مذاب تولیدی را دارد. کربن تزریقی به کوره 85٪ به CO و ما بقی به CO₂ تبدیل می شود.
6. میزان تولید سرباره بازا هر تن شارژ فلزی (دارای 85٪ آهن اسفنجی) ، 107Kg در نظر گرفته شده است. و این مقدار با افزایش درصد آهن اسفنجی تا 95٪ به 116 Kg بر تن شارژ فلزی می رسد. این فرض برای سهولت درک مطلب می باشد و با محاسبات برنامه مورد استفاده تا حدود زیادی منطبق است.
7. سرباره دارای 19/5٪ FeO، می باشد.
8. قراضه و آهن اسفنجی با ترکیب زیر وارد کوره قوس الکتریک می شوند.

جدول 1: ترکیب کربن و آهن شارژهای فلزی پایه آهن

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

در صد فلزی شدن آهن اسفنجی ، 91/5٪ می باشد.
2٪ اکسید آهن در قراضه وجود دارد.

مقادیر آنها را در شارژ از رابطه زیر محاسبه می کنیم:

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

٪ درصد قراضه و یا آهن اسفنجی در شارژ فلزی

m_i : وزن شارژ فلزی

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

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

جدول 2: محاسبه هزینه آهن اسفنجی، قراضه و آنتراسیت با توجه به درصدهای متفاوت کربن در آهن اسفنجی (شارژ دارای 90% آهن اسفنجی فرض شده است)

% C in DRI	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9
Kg DRI	1056.7	1058.9	1061.08	1063.3	1065.48	1067.7	1067	1072.13
Cost of DRI 160\$/t	169.1	169.4	169.8	170.1	170.5	170.8	171.2	171.5
%FeO	9.9	9.88	9.87	9.84	9.82	9.8	9.78	9.76
Kg FeO from DRI	104.7	104.7	104.7	104.7	104.7	104.7	104.7	104.7
Kg Scrap	113.51	113.51	113.51	113.51	113.51	113.51	113.51	113.51
Cost of Scrap 145\$/t	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46
%FeO in Scrap	2	2	2	2	2	2	2	2
Kg FeO from Scrap	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27
Total input FeO	106.97	106.97	106.97	106.97	106.97	106.97	106.97	106.97
Kg Slag	133.41	133.65	133.9	134.15	134.4	134.66	134.9	135.16
Kg FeO in slag	26	26.06	26.11	26.16	26.2	26.26	26.31	26.06
Kg FeO reduced to Fe	80.97	80.91	80.86	80.81	80.76	80.71	80.66	80.6
Kg Oxygen Free from FeO	18.02	18.01	18	17.99	17.98	17.97	17.96	17.95
Kg C from DRI	15.85	18	20.16	26.16	26.2	26.7	28.88	31.1
Kg C from scrap	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Kg C in Steel	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Kg C Burned	15.16	17.31	19.47	21.64	23.82	26	28	30.4
Kg Oxygen needed for C combustion	23.2	26.48	29.8	33.2	36.45	39.7	42.84	46.5
Kg Oxygen injection	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42	21.42
Bulk Carbon addition								
Kg Oxygen Remained from injection	16.24	12.95	9.62	6.21	2.95	none	None	none
Kg Anthracite from addition at 25% recovery	44.4	34.65	24.9	14.9	4.85	none	None	none
Cost of Anthracite at 0.1\$/Kg	4.44	3.46	2.5	1.5	0.48	none	None	none
Carbon injection								
Kg Oxygen Remained from injection	18.03	14.74	11.43	8.12	4.8	none	None	none
Kg Anthracite from addition at 80% recovery	13.87	10.82	7.8	4.66	1.5	none	None	none
Cost of Anthracite at 0.1\$/Kg	1.39	1.08	0.78	0.46	0.15	none	None	none

بحث و بررسی:

همانطوری که می دانیم ، مقداری از اکسید آهن ورودی به سیستم به سر باره می رود و بقیه آن احیا می شود ، که مقداری اکسیژن از این احیا آزاد می شود.

$$\text{Oxygen form Iron Reduction} = (\text{FeO}_{\text{Charged}} - \text{FeO}_{\text{Slag}}) \times 0.22 \quad (3)$$

این اکسیژن در اثر واکنش با کربن موجود در شارژ بخشی از این کربن را می سوزاند و بقیه کربن از طریق تزریق اکسیژن از لنسها سوزانده می شود. حد اکثر قابلیت تزریق اکسیژن از طریق لنسها به کوره $15 \text{ Nm}^3/\text{t}$ (21/4 kg/tls) می باشد که مقداری از آن صرف احتراق کربن شارژ می شود و مقداری دیگر نیز باقی می ماند که قابلیت سوزاندن آنتراسیت را دارد. از روی این میزان اکسیژن می توان حد اکثر مقدار آنتراسیتی را که می توان به کوره شارژ کرد، مشخص نمود.

اکسیژن، 85٪ کربن را به CO و بقیه را ابتدا به CO و سپس به CO₂ تبدیل می کند.

$$\text{O}_2(\text{kg}) = C_{\text{Burned}} \times 28/12 \times 0.85 + C_{\text{Burned}} \times 44/12 \times 0.15 \quad (4)$$

بنابراین هر کیلوگرم اکسیژن می تواند تقریباً ، 0.65 کیلوگرم کربن را بسوزاند.

اکسیژنی که از تزریق برای سوزاندن آنتراسیت باقی می ماند عیار تست از:

$$\text{O}_2^{\text{Anth}}(\text{kg}) = 21.42 - \text{O}_{\text{Reduced}}^{\text{Fe}} - \text{O}_{\text{Burned}}^{\text{C}} \quad (5)$$

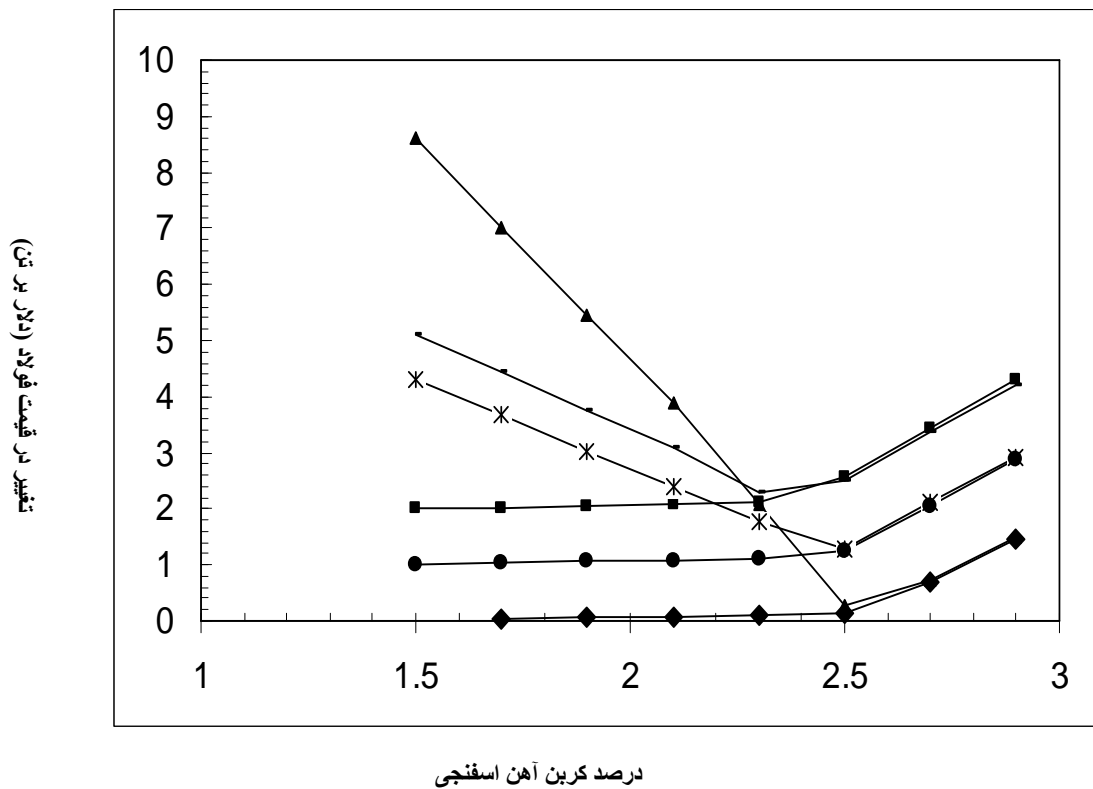
$\text{O}_2^{\text{Anth}}(\text{kg})$: وزن بخشی از اکسیژن تزریق شده که صرف سوزاندن آنتراسیت می شود.

در اثر تغییر درصد کربن DRI ورودی، مقدار شارژ DRI لازم برای تولید 1 تن فولاد تغییر می کند ، زیرا با افزایش هر درصد کربن ، یک کاهش درصد ، در چیزی دیگر که عمدتاً آهن است اتفاق می افتد. بنابراین ضرر و زیان افزایش ارزش سوختی کربن ، کاهش بازدهی فولاد است. و لازم است تا شارژ DRI به کوره افزایش یابد تا آهن مورد نیاز سیستم تامین شود. البته برای حل این مشکل در روش های جدید کوره های میدرکس راههای جدیدی برای افزایش درصد کربن ، بدون کاهش درصد آهن ابداع شده است .

مصرف انرژی الکتریکی در حالت تزریق و افزایش کربن و در درصدهای مختلف کربن آهن اسفنجی ، تغییر زیادی نمی کند زیرا مجموع کربن ورودی به سیستم ثابت بوده و انرژی شیمیائی تولید شده حاصل از احتراق کربن ، تغییری نکرده و بنابراین مصرف انرژی الکتریکی ثابت است.

این محاسبات را می توان برای شارژهای با درصدهای متفاوت آهن اسفنجی انجام داد.

تفاوت هزینه تولید فولاد در تزریق و افزایش توده ای فولاد شارژ آهن اسفنجی با 1/5% کربن (کربن پایه): با توجه به یکسان بودن مصرف انرژی الکتریکی و مقدار آهن اسفنجی شارژ شده ، تفاوت در هزینه های تولید در مقدار شارژ آنتراسیت می باشد که در حالت افزایش توده ای شارژ با 1/5% کربن قیمت از حالت تزریق ، 3\$ گران تر است. قیمت آنتراسیت بازا هر کیلوگرم ، 0/1\$ در نظر گرفته شده است.



شکل 1: تفاوت هزینه های تولید برای شارژ فلزی با درصد های مختلف آهن اسفنجی در حالت های تزریق کربن و افزایش توده ای کربن

◆ 80% آهن اسفنجی، تزریق کربن ▲ 80% آهن اسفنجی ،افزایش کپه ای کربن
 ● 85% آهن اسفنجی، تزریق کربن * 85% آهن اسفنجی ،افزایش کپه ای کربن
 ■ 90% آهن اسفنجی، تزریق کربن — 90% آهن اسفنجی ،افزایش کپه ای کربن

مشاهده می شود که در حالت افزایش توده ای کربن (با راندمان 20%) با افزایش درصد کربن اسفنجی ، به دلیل کاهش مقدار شارژ آنتراسیت کاهش قیمت را خواهیم داشت . در شرایط برابر چنانچه از تزریق به جای

شارژ توده ای استفاده شود به دلیل راندمان بالاتر تزریق (80٪) قیمت تمام شده پایینتر خواهد بود. در روش تزریق، با افزایش درصد کربن آهن اسفنجی، روند کاهشی کم و تقریباً ثابتی در قیمت فولاد تولیدی مشاهده می شود. در درصدهای بالای کربن، در آهن اسفنجی، با توجه به محدودیت کوره در تزریق اکسیژن از طریق لنسها، شارژ آنتراسیت به کوره قطع می شود زیرا تمام اکسیژن باید صرف سوختن کربن موجود در شارژ شود. در غیر این صورت آنتراسیت محترق نشده، همراه با سرباره خارج شده و در خارج از کوره باعث پفکی شدن سرباره می شود. برای شارژ باید، درصد کربن بگونه ای انتخاب شود که امکان تزریق مقدار کافی از مواد کربن ده (مانند آنتراسیت) به کوره باشد، تا بتوان سرباره پفکی ایجاد کرد (سرباره پفکی از احتراق مواد کربن ده در مرز بین سرباره و مذاب و تولید گاز CO ایجاد می شود). لازم بذکر است در حالت تزریق کربن، افت قیمت شدیدی در درصدهای بالای کربن نسبت به درصد های پائین تر کربن مشاهده نمی شود ولی مواردی را که در بالا ذکر شد باید رعایت شوند.

با توجه به مفروضات بالا، تغییرات قیمت فولاد برای شارژهای با درصد های مختلف آهن اسفنجی بررسی شده است و مشاهده می شود که با افزایش در صد آهن اسفنجی در شارژ، نقطه مینیمم به سمت درصدهای پائین تر کربن می رود و همچنین قیمت فولاد نیز افزایش می یابد، بنابر این می توان برای شارژهای با آهن اسفنجی بیشتر از درصد کربن کمتر در آهن اسفنجی استفاده کرد. انتخاب در صد آهن اسفنجی در شارژ علاوه بر قیمت قراضه و آهن اسفنجی به مقدار قراضه در دسترس و ظرفیت تولید آهن اسفنجی بستگی دارد. کلیه اطلاعات این مقاله بصورت مطالعه موردی و بر مبنای محاسبات تئوریک می باشد و می توان برای حالتهای دیگر آنرا گسترش داد.

مراجع

- [1]WEC. 1995. *Energy Efficiency Improvement Utilizing High Technology— An Assessment of Energy Use in Industry and Buildings*. London: World Energy Council.
- [2]Int. Iron Steel Inst. 1992. *Steel Statistics Yearbook 1992*. Brussels: IISI
- [3]Int. Iron Steel Inst. 1996. *Statistics on Energy in the Steel Industry (1996 Update)*. Brussels: IISI.
- [4]E, Beer J de, Blok K. 1993. Energy conservation in the iron and steel industry. In *Energy Efficiency in Process Technology*, pp. 91– 100. Amsterdam: Elsevier .
- [5]Faure H. 1993. *The new technologies for iron and steelmaking*. Presented at 27th IISI Annual Meeting and Conference, Paris
- [6]Maier W, Angerer G. 1986. *Rational Energy Use by New Technologies (Rationelle Energieverwendung durch neue Technologgien)*. Köln: Verlag Töub Rheinland GmbH(In German).
- [7]Int. Iron Steel Inst. 1982. *Energy and the Steel Industry*. Brussels: IISI

- [8] Manfred Reinhardt, Dieter W. Reiber: "Practice of ALARC-PCTM post-combustion at Von Roll Ltd., Gerlafingen," 5th European electric steel congress Proceedings, 1995, p117-125.
- [9] D.S. Gregory, D.K. Ferguson, F. Slooman, et al: "Results of ALARC-PCTM post-combustion at Cascade steel rolling mills," Iron and Steelmaking, May 1996, p49-56.
- [10] D. Koncsics, P. Mathur, D. Engle: "Results of oxygen injection in the EAF with Praxair Coherent Jet Injectors – a novel technology," Electric Furnace Conference Proceedings, vol. 55(1997), Iron and Steel Society, p305-314.
- [11] Frank A. Vonesh, Nicolas G. Perrin: " Post- combustion for the electric arc furnace," Iron and Steel Engineer, June 1995, p30-32.
- [12] G. Daughtridge, P. Mathur: "Recent developments in post-combustion technology at Nucor Plymouth," Electric Furnace Conference Proceedings, vol. 52(1994), Iron and Steel Society, p135-138.
- [13] J. J. KERR and R. J. FRUEHAN,"Additions to Generate Foam in Stainless Steelmaking", METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B. VOLUME 35B, AUGUST 2004— 643.
- [14] Lan HONG. Masahiro HIRASAWA¹) and Masamichi SANO , "Behavior of Slag Foaming with Reduction of Iron Oxide in Molten Slags by Graphite" ,ISIJ International, Vol. 38 (1998), No.2, pp.1339- 1345 .
- [15] 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.
- [16] Gilbert Whitten , "Hot Transport-Midrex Style Midrex Technologies, Inc, In Press.
- [17] [صدر نژاد، س.خ. و سرکمری، م. "شبیه سازی فرایند تولید فولاد در کوره القائی"، سمپوزیوم فولاد 3، 79-4 اسفند 1379، شرکت فولاد خوزستان، 123-113، 1379.
- [18] Sammt, F.L., "The pros and cons of high carbon DRI as EAF feed", Steel Times, Vol. 222, No. 10, pp. Oct. 1994. 398-399, Oct. 1994.
- [19] M. J. Thomson, N. G. Kournetas, E. Evenson, I. D. Sommerville, A. McLean, and J. Guerard," Effect of oxyfuel burner ratio changes on energy efficiency in electric arc furnace at Co- Steel Lasco", Ironmaking and Steelmaking 2001 Vol. 28 No. 3.

Investigation of Carbon percentage in DRI & method of Carbonous materials addition , on Electric Arc Furnace Steel making costs

Hooman Fakkhr Nabavi^{1*}, Soroush Parvizi², K.Sadr Nezhad³, Mehran Khorramnia⁴
*** Hooman_fn@Gmail.com**

Abstract- In this paper ,effect of increasing carbon percentage in DRI on the cost of produced steel is investigated. For calculation we use mass balance & some assumptions that simulate the operation of EAF.Specification of input charge as follows:90% DRI,1.5_3% Carbon in DRI, 15 Nm³/TLS Oxygen injection.Further more bulk Anthracite injected to the EAF is possible.In the case of added & injected carbon because of the lower price of Anthracite, total cost was decreased but in other condition if we use injection instead of bulk added, because of the higher efficiency of injection the final price decreased.We can understand from this work that decreasing the cost of the produced steel in the case of injection Anthracite was slower than the carbon added in DRI.If we use this calculation for other percent of DRI in charge we consider that we can use lower carbon percent in charges that contain higher percent of DRI.

Key Words-Electric Arc Furnace,Energy Optimization,Direct Reduced Iron ,Carbonous materials

1: M.Sc. student of materials engineering, Sharif University of Technology

2: M.Sc. student of materials engineering, Sharif University of Technology

3: Professor, Sharif University of Technology

4:M.Sc. of Metallurgy ,Manager of Steel processing ,Khuzestan Steel.