

تولید آهن اسفنجی از احیاء مستقیم کانه‌های آهن با گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی نفت

نوشته:

ناصر توحیدی

دکتر مهندس در متالورژی و گداز فلزات - دانشیار دانشکده فنی
دانشگاه تهران

چکیده:

تولید آهن خام و فولاد بروش سنتی (کوره بلند/کنورتور) بدلائل اقتصادی در سطح جهان پیشتاز بوده و هست. در این روش کک بعنوان عامل احیاء کننده و گرمازا برای احیاء اکسیدهای آهن بکار میرود. در تکنولوژی مدرن تولید فولاد، از کوره بلند، کنورتور و کک صرف نظر کرده و در بعضی از روشهای احیاء مستقیم کانه‌های آهن از گاز طبیعی برای گرم کردن واحیاء استفاده میگردد.

گرایش به ساختمان واحدهای احیاء مستقیم جهت تولید آهن اسفنجی در کوره‌های تنوره‌ای با ظرفیت ۱۰۰۰ تن در روز و فولادسازیهای متوسط در کوره‌های قوس الکتریکی در سطح جهان و مسابقه اقتصادی آنها با واحدهای تولید فولاد بروش سنتی، دلیل قانع کننده‌ای برای توجیه اقتصادی بودن روشهای احیاء مستقیم در آینده میباشد.

علت اصلی توسعه چشمگیر واحدهای تولید آهن اسفنجی را باید در افزایش سرسام آور قیمت کک در مقایسه با گاز طبیعی و سرمایه گذاری نسبی برای احداث واحدها جستجو کرد.

تولید آهن اسفنجی بروش احیاء مستقیم از نظر آلوده نکردن محیط زیست نسبت بروش سنتی تولید آهن خام برتر میباشد، لذا هرگاه هزینه تولید آهن اسفنجی نسبت به آهن خام کوره بلند (چدن) در آینده مقرون بصرفه گردد، ممکن است که احیاء مستقیم کانه‌های آهن با گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی ترجیح داده شود.

در مقاله منتشره در شماره ۲۹ اساس احیاء کانه‌های آهن با گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی از نظر ترمودینامیکی و سینتیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

در این مقاله کوشش میگردد تا بکمک پیلان انرژی و کنشهای اساسی احیاء مستقیم، میزان گاز لازم جهت تولید آهن اسفنجی را محاسبه کرده و نقش عمده:

— درجه حرارت در سرعت احیاء و اثرات جنبی آن،

— درجه حرارت و کیفیت گاز احیاء کنند و رودی به راکتور احیاء،

— بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده و گرایش به تعادل ترمودینامیکی بعزت آرایش بار کوره ، ابعاد تیله ، قطعات کانه و غیره در میزان مصرف گاز طبیعی آورده شده است .
 ضمناً اهمیت ویژه ، ناخالصی ها و اثر آنها در میزان برق مصرفی جهت فرایند پالایش و فولادسازی در کوره الکتریکی اشاره شده است . در پایان مقایسه هزینه تولید آهن بروش سنتی (کوره بلند/ کثورتور) و احیاء مستقیم و تابعیت آن از قیمت کک و گاز طبیعی نیز ذکر گردیده است .

پیشگفتار

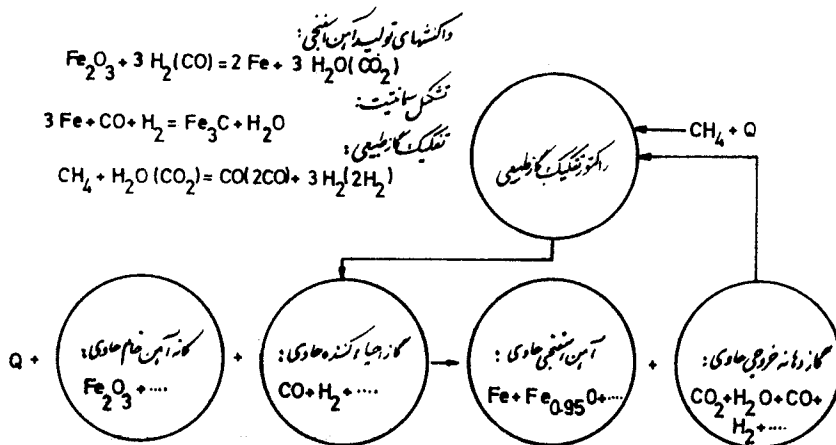
احیاء اکسیدهای آهن و عناصر همراه آن بوسیله کربن جامدرا احیاء مستقیم مینامیدند . اما امروز احیاء مستقیم کانه های آهن بروشهایی اطلاق میشود که اکسیژن کانه در درجه حرارتی کمتر از دمای ذوب ویانرم شدن کانه ویاپلت ها (تیله Pellets) بوسیله کربن جامد ویاز گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی حذف گردد .

ویژگیهای آهن اسفنجی که بروش احیاء مستقیم تولید میگردد عبارتند از:

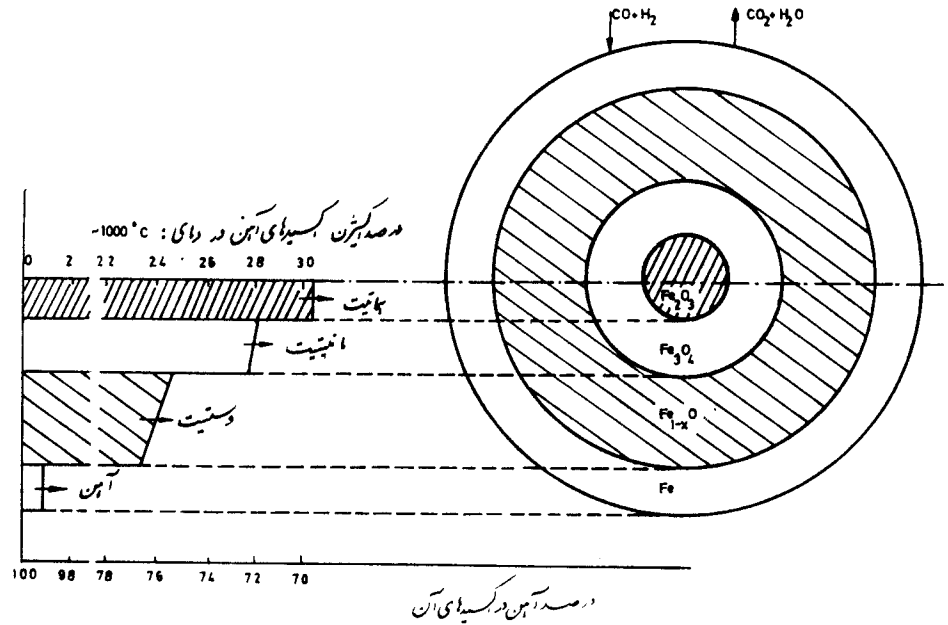
- تخلخل زیاد بعزت قسمت اعظم اکسیژن کانه بوسیله عوامل احیاء کننده ذغال ، منواکسید کربن ، هیدروژن ویامخلوط گازهای احیاء کننده ،
- ثابت ماندن فرم پلتها ، ذرات ویاقطعات کانه ،
- وعدم احیاء اجزاء غیر آهنی وباقی ماندن آنها بصورت ناخالصی ها .

کانه های آهن را میتوان بوسیله هیدروکربورها ، هیدروژن ، منواکسید کربن ویامخلوط آنها احیاء کرد . بدلائل اقتصادی مخلوطی از هیدروژن و منواکسید کربن که مثلاً از تفکیک گاز طبیعی بدست میآید در اغلب روشهای احیاء مستقیم بکار میرود .

در شکل ۱ واکنشهای شیمیائی اساسی ودر شکل ۲ مکانیسم احیاء تیله های هماتیت در روند احیاء مستقیم آورده شده است .



شکل ۱- واکنشهای شیمیائی اساسی در تولید آهن اسفنجی بروش احیاء مستقیم



شکل ۲- مکانیسم احیاء تیله‌های هماتیت در روند احیاء مستقیم

انتالپی شیمیائی ، انبالی حرارتی و انتالپی کل .

در جدول ۱ آنتالپی احیاء کانه آهن هماتیت بوسیله مخلوط گازهای احیاء کننده هیدروژن و منواکسید

کربن به نسبت‌های مختلف برای تولید یک تن آهن اسفنجی آورده شده است .

محاسبه این اعداد بر پایه داده‌های زیر استوار است:

الف - ترکیب کانه آهن طبیعی: آهن ۷۰ درصد، ناخالصیها ۳۰ درصد، اکسیژن ۰۹ درصد،

ب - ترکیب آهن اسفنجی: آهن فلزی ۸۲٫۸ درصد، ناخالصیها ۱۷٫۲ درصد، وستیت ۰٫۲ درصد

(از کمیت سمانتیت در آهن اسفنجی چشم‌پوشی شده است) .

ج - درجه فلزشدن (Metallisation) آهن اسفنجی طبق تعریف برابر:

$$R = \frac{\text{آهن فلزی}}{\text{کل آهن}} 100 = \frac{\text{فلزی Fe}}{\text{فلزی Fe} + \text{Fe}_{\text{Fe}_{0.95}\text{O}}} 100 = \frac{828}{828 + \frac{125 \times 0.95 \times 56}{69.2}}$$

$$R = \frac{828}{924} 100 \approx 89.5 \quad [\%]$$

د - درجه احیاء آهن اسفنجی طبق تعریف برابر:

$$R' = \frac{\text{اکسیژن کاهش یافته}}{\text{اکسیژن کانه}} 100 = \frac{\text{O کانه} - \text{O}_{\text{Fe}_{0.95}\text{O}}}{\text{O کانه}} 100$$

$$R' = \frac{\frac{0.29 + 924}{0.675} - \frac{125 \times 17}{69.2}}{0.29 \times 924} 100 \approx 93 \quad [\%]$$

۵- حداقل میزان گاز احیاء کننده بایه‌ره شیمیائی . . . درصد بازاا یک‌تن آهن اسفنجی را میتوان بکمک واکنشهای ۱ و ۲ محاسبه نمود.

حجم گاز لازم جهت حذف اکسیژن واکنش ۱ و تولید یک‌تن آهن اسفنجی با آنالیز داده شده طبق واکنش ۱ برابر است با:

$$(1) \quad 2/3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{CO}(\text{H}_2) = 2 \text{CO}_2(\text{H}_2\text{O}) + 4/3 \text{Fe}$$

$$V_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}} = \frac{828 \times 2 \times 22.4}{9 \times 56} = 497 \quad [\text{Nm}^3/\text{t} \text{ گاز آهن اسفنجی}]$$

حجم گاز لازم برای حذف اکسیژن واکنش ۲ و تولید یک‌تن آهن اسفنجی با آنالیز فوق طبق واکنش ۲ برابر است با:

$$(2) \quad 2/3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2/3 \text{CO}(\text{H}_2) = 2/3 \text{CO}_2(\text{H}_2\text{O}) + 4/3 \text{FeO}$$

$$V_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}} = \frac{125 \times 2 \times 22.4}{4 \times 69.2} = 20.2 \quad [\text{Nm}^3/\text{t} \text{ گاز آهن اسفنجی}]$$

بنابراین حجم کل گاز احیاء کننده جهت تولید یک‌تن آهن اسفنجی بایه‌ره شیمیائی . . . درصد از گاز بدون در نظر گرفتن گاز لازم جهت تولید سماتیت و غیره برابر است با:

$$V_{\text{گاز}} = 497 + 20.2 = 517.2 \quad [\text{Nm}^3/\text{t} \text{ گاز آهن اسفنجی}]$$

درمآخذ ۳۰ کمیت گاز مصرفی ۳۷ مترمکعب بازاا یک‌تن آهن اسفنجی داده است.
 حرارت لازم جهت تولید یک‌تن آهن اسفنجی با ترکیب فوق با استفاده از توابع ترمودینامیکی مآخذ ۴۴ دردمای . . . ۸۰۰ درجه سانتیگراد برابر است با:

$$(3) \quad 4/3 \text{Fe} + \text{O}_2 = 2/3 \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad \Delta H_3^0 = -129.19 \text{ [Kcal/واکنش]}$$

$$(4) \quad 2 \text{Fe} + \text{O}_2 = 2 \text{FeO} \quad \Delta H_4^0 = -130.46 \text{ [Kcal/واکنش]}$$

$$(5) \quad 4/3 \text{FeO} + 1/3 \text{O}_2 = 2/3 \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\Delta H_5^0 = \Delta H_3^0 - 2/3 \Delta H_4^0 = -129.19 + 2/3 \times 130.46 = -41.99 \quad \text{»} \quad \text{»}$$

$$Q_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}} = \frac{828 \times 10^3 \times 129.10}{4 \times 56} \times 10^{-6} = 1.432 \quad [\text{Gcal}/\text{t} \text{ آهن اسفنجی}]$$

$$Q_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}} = \frac{125 \times 41.99 \times 10^3}{4 \times 72} \times 10^{-6} = 0.055 \quad \text{»} \quad \text{»} \quad \text{»}$$

بنابراین انرژی حرارتی جهت تولید یک‌تن آهن اسفنجی بدون در نظر گرفتن حرارت مصرف شده برای ناخالصی‌ها و غیره برابر است با:

$$\sum Q_i = 1.432 + 0.055 = 1.487$$

[آهن اسفنجی Gcal/t]

این انرژی را میتوان بکمک گازهای احیاء کننده: منواکسید کربن، هیدروژن و یا مخلوط آنها تأمین کرد. در جدول ۱ آنتالپی شیمیائی و آنتالپی حرارتی برای تولید یک تن آهن اسفنجی با ترکیب فوق بکمک گازهای منواکسید کربن و هیدروژن با نسبتهای مختلف آورده شده است.

جدول ۱- آنتالپی شیمیائی و حرارتی برای تولید یک تن آهن اسفنجی در صورت کاربرد مخلوط گازهای منواکسید کربن و هیدروژن با نسبتهای مختلف

مأخذ: صفحه ۳

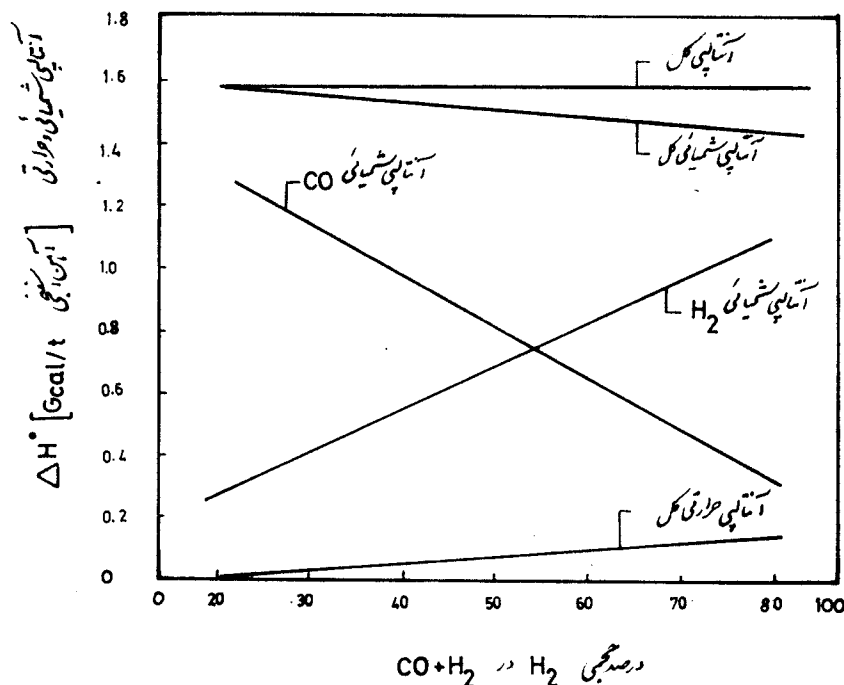
80	70	60	50	40	30	20	درصد حجمی CO
20	30	40	50	60	70	80	درصد حجمی H ₂
1.30	1.13	0.97	0.81	0.65	0.49	0.33	آنتالپی شیمیائی CO [آهن اسفنجی Gcal/t]
0.27	0.42	0.56	0.69	0.83	0.97	1.11	آنتالپی شیمیائی H ₂
1.57	1.55	1.53	1.50	1.48	1.64	1.44	آنتالپی شیمیائی کل
-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	آنتالپی حرارتی CO
+0.04	+0.05	+0.07	+0.10	+0.11	+0.13	+0.15	آنتالپی حرارتی H ₂
+0.01	+0.03	+0.05	+0.08	+0.10	+0.12	+0.14	آنتالپی حرارتی کل
1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	آنتالپی کل

جالب توجه اینکه مقدار آنتالپی کل طبق جدول ۱ و آنتالپی محاسبه شده بکمک مأخذ ۴ در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد (۱.۶ × ۱۰^{۸۷} کیلوکالری بازا یک تن آهن اسفنجی) تقریباً یکسان میباشند. در شکل ۱ آنتالپی شیمیائی و حرارتی برای نسبتهای مختلف هیدروژن به منواکسید کربن برای تولید یک تن آهن اسفنجی آورده شده است.

میزان گاز ضروری در روشهای احیاء مستقیم

میزان مصرف گاز احیاء کننده در روشهای احیاء مستقیم اساساً تابع آنتالپی شیمیائی، آنتالپی حرارتی و بالاخره آنتالپی کل و اکشن احیاء میباشد. میزان مصرف گاز احیاء کننده ضروری بجز آنتالپی کل و اکشن، تابع ویژگیهای زیر نیز میباشد:

- ۱- بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده
- ۲- انرژی حرارتی گاز احیاء کننده و گاز خروجی



شکل ۳- آنتالپی شیمیائی و آنتالپی حرارتی برای نسبت‌های مختلف هیدروژن به منواکسید کربن جهت تولید یک‌تن آهن اسفنجی با ترکیب آهن فلزی ۰.۸۲۸، وستیت (FeO_{۰.۹۵}) و ناخالصی‌ها ۱۲۰ درصد

بأخذ ۳۶ صفحه ۶

۱- بهره شیمیائی از گاز کننده

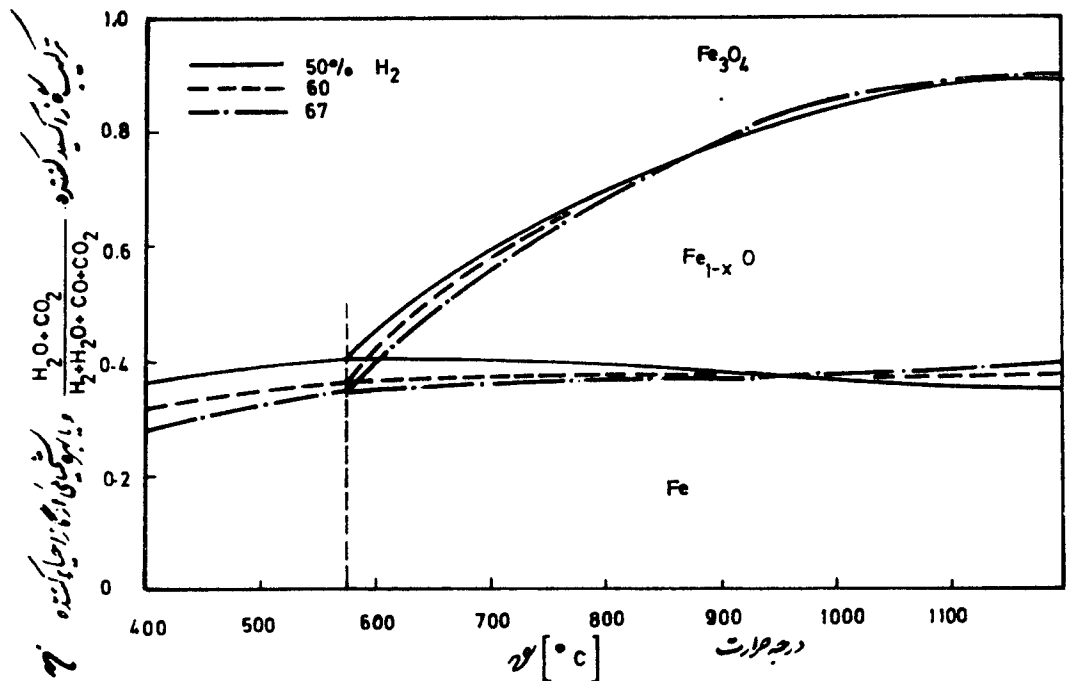
بر اساس دیاگرام‌های تعادلی احیاء اکسیدهای آهن با عوامل احیاء کننده، فقط قسمتی از گازهای احیاء کننده در مبادله و عملکرد احیاء سهم می‌باشند (شکل ۴). یعنی مطابق دیاگرام‌های تعادلی مقداری هیدروژن و منواکسید کربن اضافی باید در گاز احیاء کننده وجود داشته باشد تا اصولاً عملکرد احیاء بر اساس قوانین ترمودینامیک امکان‌پذیر گردد.

بنابراین گاز احیاء کننده نمیتواند کلاً مورد استفاده قرار گیرد بدینجهت بهره شیمیائی از گاز احیاء- کننده علیرغم محاسبات قسمت قبل صد درصد نیست. بعبارت دیگر کمیت ۱۷۲.۵ مترمکعب گاز احیاء کننده برای تولید یک‌تن آهن اسفنجی با ترکیب داده شده کافی نیست.

حدود بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده جهت احیاء بوسیله قوانین ترمودینامیک و بکمک دیاگرام های حالت تعادل تعیین میگردد.

مثلاً از تعادل بین آهن و اکسیدهای آن با گازهای اکسید کننده (شکل ۴)، استنباط میگردد که در محدوده حرارتی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در مورد گازهای نیکه حاوی ۰.۵ تا ۷ درصد حجمی هیدروژن در کنار ۰.۵ تا ۳ درصد منواکسید کربن می‌باشند، بهره شیمیائی قابل دسترسی از گاز احیاء کننده در مرز آهن/ وستیت تقریباً مستقل از درجه حرارت و در حدود ۰.۳ تا ۰.۴ درصد می‌باشد. بدینجهت بهره شیمیائی در

هر صورت برای تخمینهای عملی میتواند ثابت فرض شود. واضح است که باقیمانده عوامل احیاء کننده در کار خروجی مجدداً یافت میشوند.



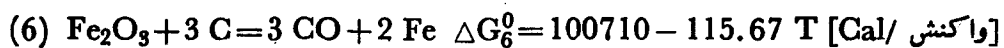
شکل ۴- دیاگرام تعادل Fe-O-C-H

مأخذ ۲۶ شکل ۲

گرایش به تعادل ترمودینامیکی در عمل ایده آل بوده و غیرقابل دسترسی است. عملاً هدف فقط کم و بیش در حد امکان نزدیک شدن به حالت تعادل میباشد. دلایل دور بودن از حالت تعادل مختلف بوده که در زیر مورد تجزیه و تحلیل قرار میگیرد.

۱-۱ - سرعت احیاء

دمای شروع واکنشها را میتوان در صورت چشم پوشی از موانع سینتیکی بکمک معادله آنتالپی آزاد واکنشها حدس زد. مثلاً واکنش احیاء مستقیم هماتیت به آهن و یا وستیت به آهن را که طبق واکنشهای ۶ و ۷ انجام گشته و معادله تقریبی آنتالپی آزاد آنها برای ما معلوم است در نظر میگیریم:

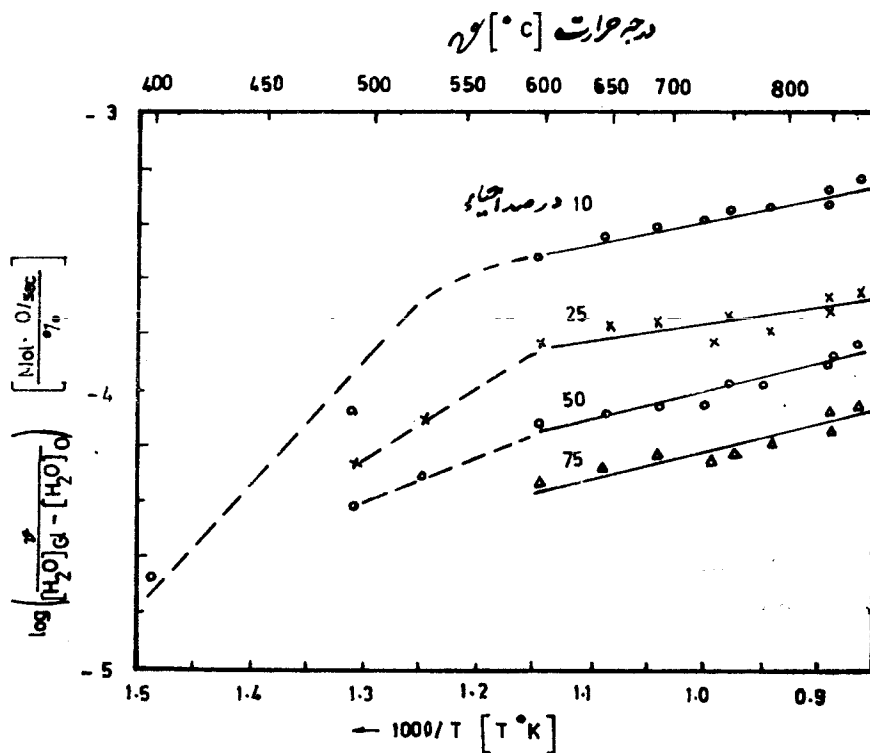


عملکرد احیاء طبق واکنشهای فوق در صورتی امکان پذیر است که آنتالپی آزاد واکنشهای مذکور منفی باشد. لذا هرگاه فشار منواکسید کربن و واکنشهای فوق برابر یک اتمسفر فرض گردد در این صورت دمای شروع واکنش ۶ و ۷ به ترتیب برابر است با:

$$T_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}} = \frac{100710}{115.67} \approx 867 \quad [^{\circ}\text{K}] \hat{=} 594 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{\text{FeO/Fe}} = \frac{57840}{63.56} \approx 910 \quad [^{\circ}\text{K}] \hat{=} 637 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

لازم بتذکر است که هرگاه عملکرد احیاء هماتیت، مانیتیت و وستیت با ترکیبهای مخلف H_2 ، CO_2 ، CO و H_2O انجام گردد نیز میتوان دمای تقریبی شروع واکنش را براساس ضوابط ترمودینامیکی حدس زد. تابعیت سرعت و یانابث سرعت واکنشها از دما طبق قانون Arrhenius تعیین میگردد که تابع ضوابط سینتیکی زیادی میباشد. هر کانه یک حد اقل (مینیم) و یک حداکثر (ماکزیمم) دمای احیاء منحصر بخود دارد. مینیم دمای احیاء کانه ها درجه حرارتیست که عملکرد احیاء با سرعت قابل لمس شروع می شود. افزایش دمای احیاء تأثیر شدیدی در افزایش سرعت احیاء دارد (شکل ۵).

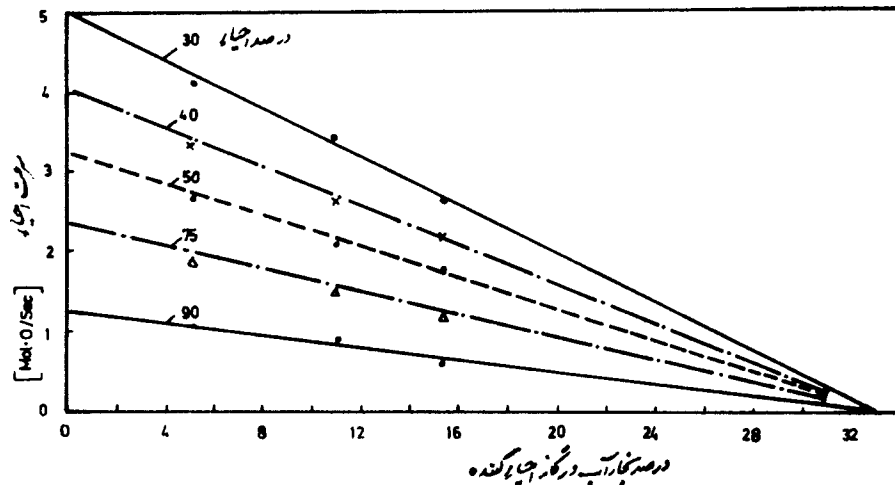


باخذ ۳ شکل ۳

هرگاه دمای احیاء پائین باشد، بعلت کمی سرعت احیاء باید جهت حذف اکسیژن کانه انرژی بیشتری نسبت به شرایط تعادل مصرف کرد. ماکزیمم درجه حرارت احیاء بوسیله ویژگیهای تکنیکی محدود میگردد. مثلاً دمای احیاء در روش احیاء مستقیم با در نظر گرفتن دمای سینتر شدن کانه و پالنتها بیکدیگر و همچنین دمای تشکیل فایرلیت ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) انتخاب میشود که از واکنش بین اکسیدهای آهن و نسوز دیواره کوره ویانا خانصی های کانه تولید میگردد. چسبیدن پلنتها بیکدیگر و به دیواره کوره باعث ممانعت جریان یکنواخت گاز شده و سرعت احیاء شدیداً کاهش می یابد.

سرعت احیاء تابع ترکیب لعظه ای گاز احیاء کننده (H_2 ، CO_2 ، CO و H_2O) در مقایسه با

ترکیب آن گاز در حالت تعادل با گازهای مربوطه می باشد. با افزایش میزان فرآورده های واکنش (بخار آب و گاز کربنیک)، سرعت احیاء بشدت کاهش می یابد (شکل ۶). قسمت عمده اجسامیکه در گاز طبیعی وجود دارند در صورت تفکیک به گاز احیاء کننده میروند. بجز این مواد، چون فرایند تفکیک گاز طبیعی بدلائل ترمودینامیکی صد درصد کامل نیست، قسمتی از عوامل اکسید کننده (H_2O ، CO_2 و غیره) در گاز باقی می ماند که با کاهش دمای تفکیک، میزان آنها افزایش می یابد. ضمناً میزان آنها تابع تکنولوژی تفکیک نیز می باشد. بعنوان مثال میزان انیدرید کربنیک در آنالیز یک گاز تفکیک شده بروشی ۸ درصد حجمی و در روشی دیگر ۲ درصد می باشد. همچنین باید تذکر داده شود که شسته شوی عوامل اکسید کننده (گاز کربنیک و بخار آب) جهت بهبود سینتیک احیاء بععل اقتصادمی نمی تواند از نظر کمی صد درصد انجام گیرد، بطوریکه همیشه باید درصدی از این عوامل اکسید کننده در نظر گرفته شود. بوسیله عرضه زیاد میزان گاز احیاء کننده، اثر نامطلوب، انیدرید کربنیک و بخار آب را می توان پائین نگه داشت و بدینوسیله گرایش (نزدیکی) به حالت تعادل پیشتر می گردد.



شکل ۶- تأثیر بخار آب در مخلوط هیدروژن و بخار آب بر سرعت حذف اسیژن تیله های هماتیت در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد

مأخذ ۲ شکل ۲

۱۲- حذف غیر یکنواخت اسیژن

اکسیژن کانه باید در تمام مقاطع کوره و همچنین در قطعات کانه بطور یکنواخت کاهش باید. احیاء یکنواخت در تمام مقاطع کوره تابع توزیع یکنواخت گاز احیاء کننده در مقاطع کوره و در قطعات کانه می باشد که خود تابع درشتی، درجه تخلخل و ساختمان منیرالوژیک کانه هاست. در صورت عدم پخش یکنواخت جریان گاز در راکتورهای تنوره ای، فقدان و یا افزایش عرضه گاز بصورت موضعی بوجود می آید. در این صورت واکنش احیاء نیز بصورت موضعی از حالت تعادل دور شده و در نتیجه فرآورده های واکنش کاهش می یابد. در این شرایط بهره شیمیائی مؤثر از گاز احیاء کننده نیز کاهش می یابد.

اغلب در قطعات کانه، احیاء هماتیت به مانیٲیت، مانیٲیت به وستیت و وستیت به آهن در هر حال پشت سر هم انجام نشده بلکه واکنشها بموازات یکدیگر نیز بوقوع می‌پیوندد. یعنی هنگامیکه هنوز در مغز قطعه کانه، مانیٲیت و یا حتی هماتیت وجود دارد، در مواضع مناسب تر قطعات کانه بخصوص در سطح خارجی آن فلز آهن میتواند تولید گردد (شکل ۲).

قطعات هر کانه اندازه بهرانی منحصر به خود دارد که در صورت بزرگتر بودن قطعات، وجود مانیٲیت (بعضی اوقات هماتیت)، وستیت و آهن فلزی میتواند همزمان مشاهده گردند. ساختمان مینرالوژیک کانه و میزان تخلخل در این امر اثر تعیین کننده دارند.

برای قطعات کانه، تعیین مناسب ترین شرایط فقط با انتخاب ابعاد قطعه امکان پذیر است. در صورتی که در مورد پلت های برشته شده می‌توان ساختمان مینرالوژیک و قابلیت احیاء را بر حسب ضرورت تعیین کرد. معمولاً برای محاسبه میزان گاز احیاء کننده فرض میگردد که آهن از وستیت با در نظر گرفتن بهره شیمیائی گاز در مرز آهن/ وستیت تولید میگردد. اما نظر باینکه تولید وستیت از مانیٲیت و هماتیت خود نیز مقداری گاز مصرف میکند، بنابراین میزان گاز ضروری بدین دلیل به تناسب بیشتر میباشد. بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده تابع ویژگیهای روش عمل احیاء بوده و تقریباً بین ۲۸ تا ۴ درصد تغییر میکنند. میزان گاز احیاء کننده ضروری تابع قابلیت احیاء کانه، ترکیب گاز احیاء کننده و حرارت ضروری واکنش می‌باشد.

قابلیت احیاء کانه‌ها از جمع خواص کیفی احیاء اجزاء کانه‌ها تشکیل میگردد. هر چه قابلیت احیاء کانه‌ها نامطلوبتر باشد احتمال حذف غیر یکنواخت اکسیژن کانه بیشتر بوده و سیستم از حالت تعادل آهن/ وستیت دورتر میگردد. عبارت دیگر می‌توان گفت، دوری از حالت تعادل ترمودینامیکی معلول قابلیت احیاء نامطلوب کانه می‌باشد که باعث افزایش میزان گاز ضروری جهت احیاء میگردد (شکل ۷). خطوطی که گرایش به حالت تعادل آنها یکسان باشد متعلق به کانه هائیسست که قابلیت احیاء آنها برابر است. این خطوط حداقل میزان گاز ضروری جهت حذف اکسیژن کانه را با در نظر گرفتن کیفیت گاز احیاء کننده تعیین میکنند.

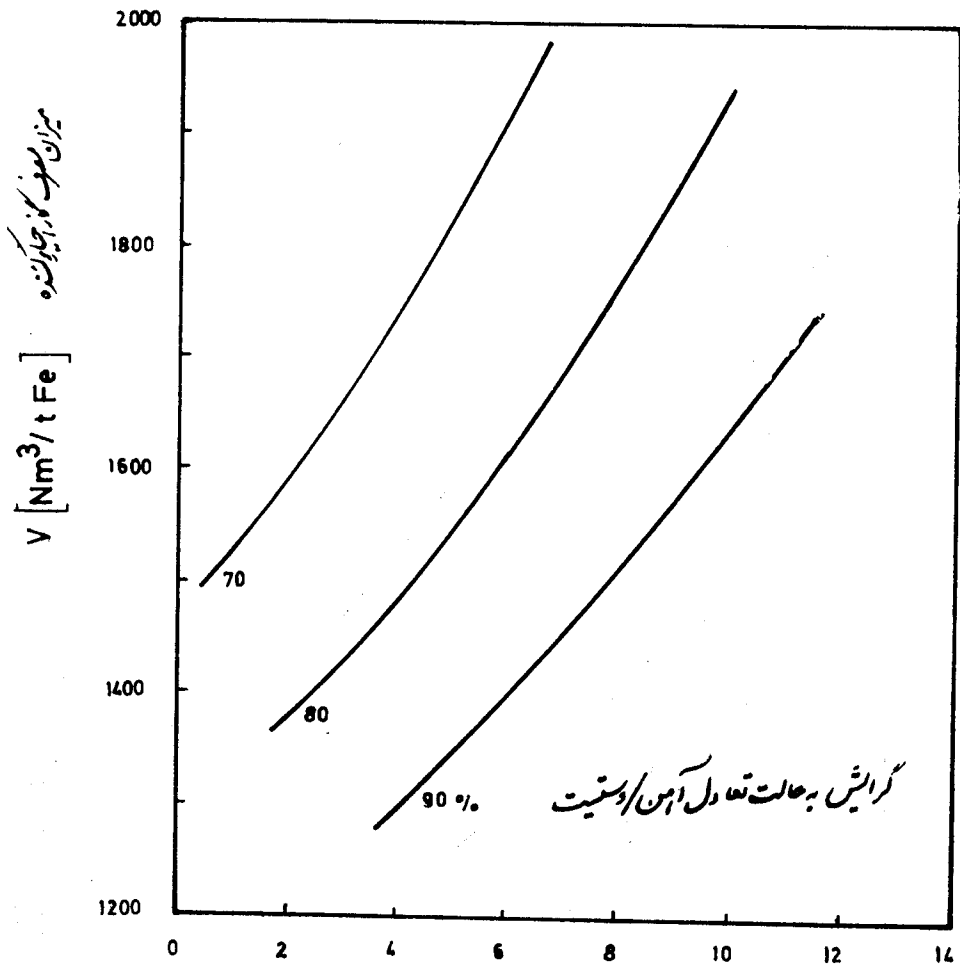
در واحد آزمایشی Purofer که قطعات کانه و پلت های مختلف احیاء گشته، مشخص شده است که دمای گاز خروجی تابعی از قابلیت احیاء کانه‌ها می‌باشد. هر چه کانه مانیٲیت، احیاء مطلوبتری داشته باشد، دمای گاز خروجی کمتر بوده است. پس درجه حرارت گاز خروجی علاوه بر دوری و یا نزدیکی بودن گاز احیاء کننده از حالت تعادل آهن/ وستیت، خود میتواند معیاری برای قابلیت احیاء کانه‌ها باشد. بنابراین جهت احیاء یک کانه کمیتهای زیر بایکدیگر در رابطه می‌باشند:

درجه حرارت و ترکیب گاز احیاء کننده،

درجه حرارت گاز خروجی،

گرایش (نزدیکی) به حالت تعادل،

و میزان مصرف گاز احیاء کننده (شکل ۸).



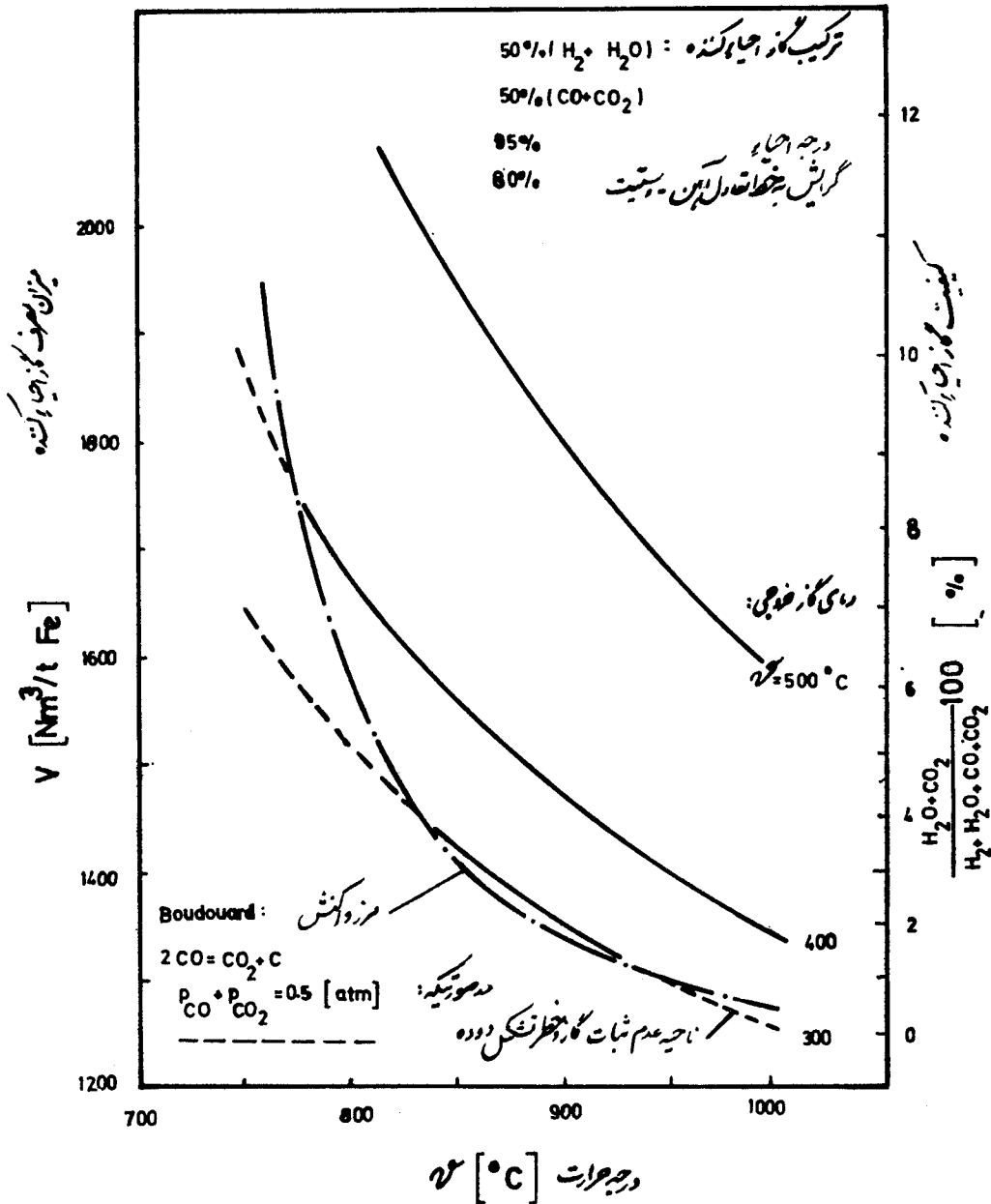
$$\frac{H_2O+CO_2}{H_2+H_2O+CO+CO_2} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{ترکیب گازی احیاء کننده}$$

شکل ۷- میزان گاز ضروری برای احیاء مستقیم کانه های آهن با گرایشهای مختلف به تعادل آهن/وستیت
برحسب ترکیب گاز احیاء کننده
مأخذ ۳۶ شکل؛

شکل ۸ برای گاز احیاء کننده ای که از گاز طبیعی و گاز خروجی برگشتی بدست آمده و میزان $H_2 + H_2O$ و $CO + CO_2$ یکسان است، صادق می باشد. اشاره میگردد خطوطی که دمای گاز خروجی برابری دارند، قابلیت احیاء کانه هایشان یکسان است. درجه حرارت گاز خروجی در شکل ۸ برای کانه خشک در نظر گرفته شده و بدلیل سهولت ترمسیم، برای تمام کانه ها گرایش ۸ درصد بتعادل آهن/ وستیت فرض شده است. از شکل ۸ چنین برداشت میگردد که:

- با افزایش دمای احیاء،
- با افزایش کیفیت گاز احیاء کننده یعنی کاهش میزان بخار آب و انیدرید کربنیک در گاز احیاء - کننده ورودی به رآکتور احیاء کنند،

- با کاهش دمای گاز خروجی یعنی بالا بودن سرعت احیاء در درجه حرارت های پائین ، میزان مصرف گاز احیاء کننده می یابد .



شکل ۸- تأثیر دما، ترکیب گاز احیاء کننده و دمای گاز خروجی در میزان مصرف گاز احیاء کننده

مأخذ ۳۶ شکل ۸

در این بررسی مدت زمان لازم جهت گرایش ۸۰ درصد به تعادل که در دمای بالا کمتر از دمای پائین است، در نظر گرفته نشده است. با افزایش دمای احیاء قسمت زیادتری از حرارت محسوس گاز مصرف می گردد. برای شرایطی که در شکل ۸ ذکر گردیده است منحنی Boudouard حدود کار را مشخص میکند. مثلاً احیاء کانه هماتیت در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و گاز خروجی با دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد امکان پذیر نیست، چه احتمال تفکیک منواکسید کربن و تشکیل دوده طبق واکنش Boudouard وجود دارد.

هرگاه عملکرد احیاء در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد انجام گردد با در نظر گرفتن عملکرد واکنش Boudouard ، درجه اکسیداسیون اولیه گاز باید حداقل ۶ درصد باشد، تا منواکسید کربن تجزیه نگردد. در این صورت دمای گاز خروجی ۳۷۰ درجه سانتیگراد بوده و مصرف گاز احیاء کننده بیشتر میگردد. هرگاه قابلیت احیاء کانه‌ای در دمای بالا امکان پذیر باشد (چنانچه در مورد خیلی از کانه‌ها بدون سینتر شدن صادق است)، باید تفکیک گازهای بامیزان کمتری انیدرید کربنیک و بخار آب تولید کرده تا نتیجتاً مصرف گاز احیاء کننده جهت تولید آهن اسفنجی کاهش یابد (شکل ۸).

در روش Purofer میتوان درجه اکسیداسیون گاز احیاء کننده را تا ۴ درصد کاهش داد، بطوریکه استفاده از گاز احیاء کننده در هر صورت تضمین شده است.

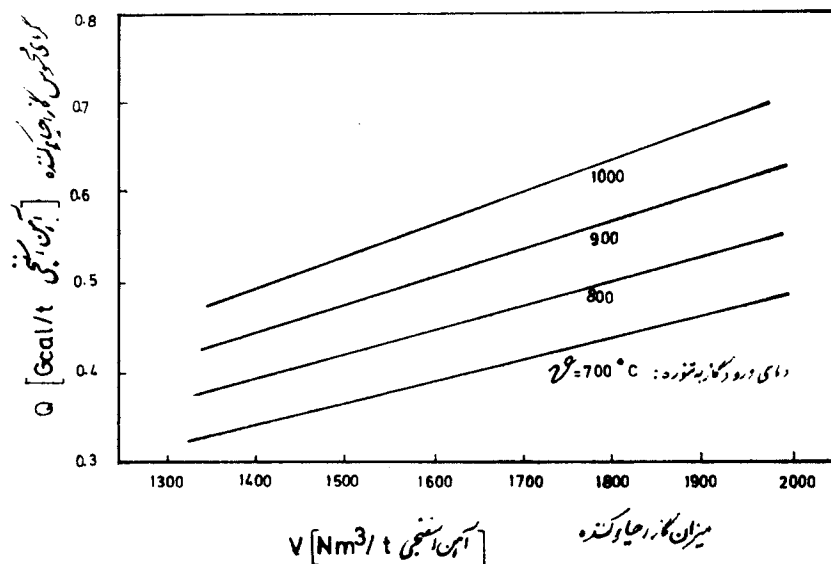
۲- آنتالپی گاز احیاء کننده و گاز خروجی

۲/۱- گرمای محسوس، آنتالپی شیمیایی و کل آنتالپی حرارتی گاز احیاء کننده

معمولاً در روشهای احیاء مستقیم کانه‌های آهن که بر اساس احیاء توسط گاز استوار میباشند، گرمای محسوس گاز احیاء کننده، حرارت لازم جهت گرم کردن اجزاء کانه تا دمای واکنش (۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد)، حرارت ضروری برای واکنشهای گرماگیر از جمله رطوبت، تفکیک کربناتها، حرارت‌های تلف شده بوسیله تشعشع، انتقال حرارت و غیره را تأمین میکند.

گرمای محسوس گاز، مسلماً تابع میزان کمیت گاز بوده و در بعضی حالات اهمیت ویژه‌ای برای میزان مصرف گاز لازم دارد.

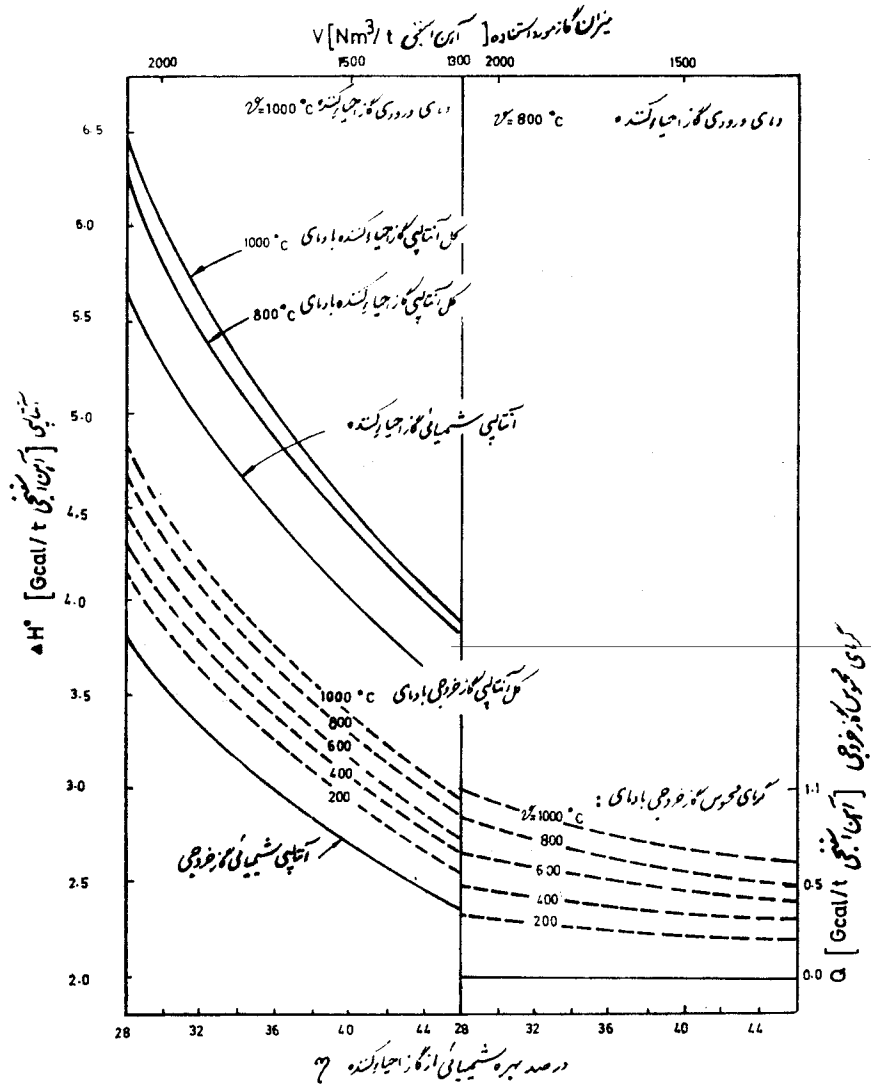
در شکل ۹ میزان گرمای محسوس گاز احیاء کننده با ترکیب معمولی و دمای ورودی ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بر حسب مقادیر مختلف گاز احیاء کننده برای یک تن آهن اسفنجی آورده شده است.



شکل ۹- گرمای محسوس گاز احیاء کننده با ترکیب معمولی و دمای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

بناخده ۳ صفحه ۱۱

در شکل ۱۰ آنتالپی شیمیائی و کل آنتالپی حرارتی گاز احیاء کننده بادمای ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد محاسبه و ترسیم گردیده است.



شکل ۱۰- تغییرات آنتالپی شیمیائی، کل آنتالپی حرارتی گاز احیاء کننده بادمای ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و همچنین تغییرات گرمای محسوس و کل آنتالپی حرارتی گاز خروجی با درجه حرارت‌های مختلف برحسب درصد بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده

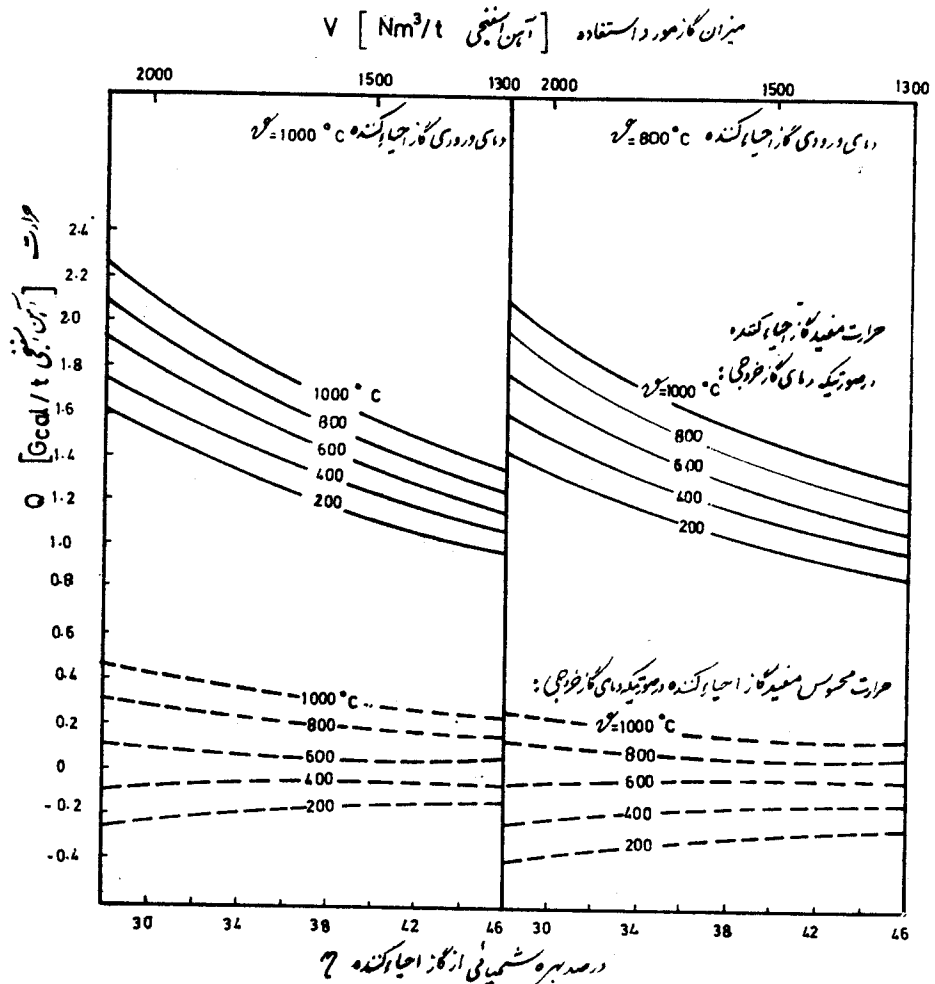
ماخذ ۳۶ صفحه ۱۳

۲/۲- گرمای محسوس، شیمیائی و کل آنتالپی حرارتی گاز خروجی

در شکل ۱۰ آنتالپی شیمیائی، گرمای محسوس و کل آنتالپی گاز خروجی بادمای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد آورده شده است در صورتیکه دمای گاز احیاء کننده ورودی ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد باشد.

از دیاگرام شکل ۹ برداشت میگردد که مقدار معتناهی حرارت و در درجه اول حرارت نهان گاز خروجی که تابع بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده است بوسیله گاز خروجی از فرایند احیاء خارج میگردد.

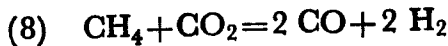
در شکل ۱۱ میزان حرارت مفید گاز احیاء کننده که در تنوره کوره احیاء مورد استفاده قرار میگیرد، یعنی عملاً تفاوت آنتالپی گاز احیاء کننده ورودی و آنتالپی گاز خروجی آورده شده است. از این دیاگرامها دیده میشود که مقدار زیادی انرژی حرارتی (آنتالپی شیمیائی و گرمای محسوس) بوسیله گاز خروجی از رآکتور خارج میگردد. مناسبترین شرایط جهت احیاء مستقیم در صورتیست که دمای گاز خروجی کمتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد باشد. از نکات بالا نتیجه گیری میگردد که استفاده از انرژی گاز خروجی تا چه حد در مصرف کل انرژی برای روشهای تولید آهن اسفنجی مهم میباشد.



شکل ۱۱- تغییرات حرارت مفید و همچنین حرارت محسوس مفید گاز احیاء کننده با دمای اولیه ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و دمای مختلف گاز خروجی بر حسب درصد بهره شیمیائی از گاز

باخذ ۲۶ صفحه ۱۳

بدینجهت در بعضی از روشهای احیاء مستقیم با اضافه کردن قسمتی از گاز خروجی به گاز طبیعی، قسمت اعظم انرژی حرارتی ضروری جهت تفکیک گاز طبیعی و همچنین گاز کربنیک ضروری بعنوان عامل اکسید کننده، تأمین میگردد. نظر باینکه تفکیک گاز طبیعی که قسمت اعظم آن متان میباشد طبق واکنش ۸:



انجام گشته وازیک مول انیدرید کربنیک، چهارمول منواکسید کربن و هیدروژن تولید میگردد و بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده هیدروژن و منواکسید کربن در خط تعادل $\text{Fe}/\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ در دمای ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، حدود ۳۰ درصد است (شکل ۷)، لذا طبق محاسبات ذیل برای بدست آوردن یک مول گاز کربنیک لازم از گاز خروجی بازا یک مول متان حدود ۷ درصد از گاز خروجی ضروری میباشد:

$$4n(\text{CO} + \text{H}_2) \times 0.7 (\text{درصد گاز خروجی}) \times 0.35 (\text{درصد } \text{H}_2, \text{CO}_2 \text{ در گاز خروجی}) = 1 \text{ [mol CO}_2\text{]}$$

بدلیل کاربرد قسمت عمده گاز خروجی افت کل آنتالپی باقیمانده گاز خروجی (آنتالپی شیمیائی و گرمای محسوس) بعلت کمی میزان گاز و کمی انیدرید کربنیک نسبت به منواکسید کربن و هیدروژن جزئی است.

بر اساس استفاده از گاز خروجی جهت تفکیک گاز طبیعی در روشهای زیادی از جمله Purofer و Midrex گاز احیاء کننده تولید کرده و حدود ۷ درصد گاز خروجی را جهت تفکیک گاز طبیعی، مجدداً مصرف میکنند.

کارآور آهن اسفنجی

مطابق تعریف احیاء مستقیم کانه های آهن، ناخالصی کانه ها در آهن اسفنجی باقی میماند. بدین جهت کمیت آن ها یک فاکتور تعیین کننده برای تبدیل مستقیم آهن اسفنجی ب فولاد میباشد. در فرایند تولید فولاد از آهن اسفنجی باید ناخالصی های نامطلوب در کانه اولیه که برای تولید آهن اسفنجی بکار رفته از جمله سیلیس، آلومین، اکسید آهن و دیگر ناخالصی ها و از همه مهمتر فسفر و گوگرد که اهمیت زیادی دارند حذف گردد.

با توجه به تأثیر نامطلوب ناخالصی در فرایند تولید آهن اسفنجی از نظر میزان عامل احیاء کننده و گرمای محسوس، وجود آنها در فرایند پالایش که باید آنها را حذف کرد، حائز اهمیت زیادی است. بویژه اگر ناخالصیها اسیدی باشند، برای تولید سرباره بازی با درجه بازی ۲ ($\text{CaO}:\text{SiO}_2 = 2$) به زمان، درجه حرارت و سرباره بیشتری جهت حذف آنها احتیاج است.

اکسیژن باقیمانده در آهن اسفنجی باید با مصرف کربن جامد احیاء و مقدار کربن اضافی بصورت سمانتیت که برای فولاد سازیها حائز اهمیت خاصی است در فرایند تولید فولاد تأمین گردد. قابل تذکر اینکه ممکن است سمانتیت در فرایند تولید آهن اسفنجی نیز تشکیل گردد.

حذف فسفر و گوگرد در فرایند تولید آهن اسفنجی امکان پذیر نبوده و پالایش آنها گران تمام میشود لذا مناسبتر است که کانه های اولیه انتخاب شده حاوی مقدار کمتری از عناصر مذکور باشند.

روش متداول برای پالایش و کارآوری آهن اسفنجی بطرق مختلف انجام گرفته از جمله تولید فولاد از آهن اسفنجی در کوره های قوس الکتریکی تا به حال نتایج مطلوبی داده است. بعلت خصوصیات فیزیکی و شیمیائی آهن اسفنجی پالایش آن در کوره قوس الکتریکی با قراضه آهن انجام میگردد.

در شکل ۱۲ میزان اکسیژن آهن اسفنجی، ناخالصیها و سرباره بر حسب درصد آهن خام آورده شده

است. درجه فلزشدن (متالیزاسیون) آهن اسفنجی در روشهای صنعتی مختلف میباشد. با کاهش درجه فلزشدن آهن اسفنجی میزان برق مصرفی در کوره الکتریکی افزایش می یابد. مثلاً هرگاه نسبت آهن اسفنجی به آهن قراضه بکار رفته ۷ به ۳ باشد با کاهش یک درصد متالیزاسیون آهن اسفنجی، مصرف برق ۱ تا ۱ کیلووات افزایش می یابد.

بافرض ۶۵ کیلووات ساعت بازاء یک تن سرباره و ۳ کیلووات ساعت بازاء یک کیلوگرم اکسیژن در شکل ۱۲ میزان برق مصرف شده برحسب درجه احیاء آهن اسفنجی و درصد آهن کانه آورده شده است.

در مورد کانه های فقیر (با ناخالصی های زیاد) باید به مشکلات روند کار بعلت حجم زیاد سرباره (حجم سرباره به حجم فولاد ۲ بیک) و مصرف زیاد نسوزها اشاره کرد.

از طرف دیگر با امکان بارگیری مداوم (Continous charging) آهن اسفنجی، صرفه جوئیهای سرشاری از نظر زمان بارگیری و جلوگیری از تلفات حرارتی بعلت تشعشع و غیره نسبت به بارگیری غیرمداوم با ۱۰ درصد آهن قراضه و بارگیریهای متعدد آن بخصوص در مورد آهن قراضه های نامرغوب، میتوان بعمل آورد. هم اکنون در این مورد تحقیقات وسیعی انجام میگردد.

با بارگیری مداوم میتوان از تشکیل ستاره (جرقه = Spark) های نامطلوب که در هنگام ذوب آهن قراضه بوجود میآید جلوگیری بعمل آورده و بدینوسیله مصرف برق را کاهش داد.

اشاره میگردد که با در نظر گرفتن آهن قراضه های نامطلوب اسروزی با آنالیز شیمیائی متفاوت، کاربرد آهن اسفنجی با آنالیز شیمیائی مشخص، برتریهای خیلی زیاد داشته و بخصوص برای تولید فولادهای مخصوص اهمیت ویژه ای دارد.

گرچه چندین واحد احیاء مستقیم جهت تولید آهن اسفنجی سالها مشغول بهره برداری میباشد ولی هنوز اعداد قابل مقایسه در مورد میزان کاربرد آهن اسفنجی در بار کوره الکتریکی وجود ندارد. میزان آهن اسفنجی در بار کوره های قوس الکتریکی:

واحد HYL در مکزیک	قط	۶۰ تا ۷۰ درصد،
واحد SL/RN در برازیل	»	»
واحد Midrex در Georgetown	»	»
واحد Armco در Houston	»	» با آهن خام مذاب،
و واحد Midrex در Hamburg	»	» ۸۰ تا ۹۰ درصد

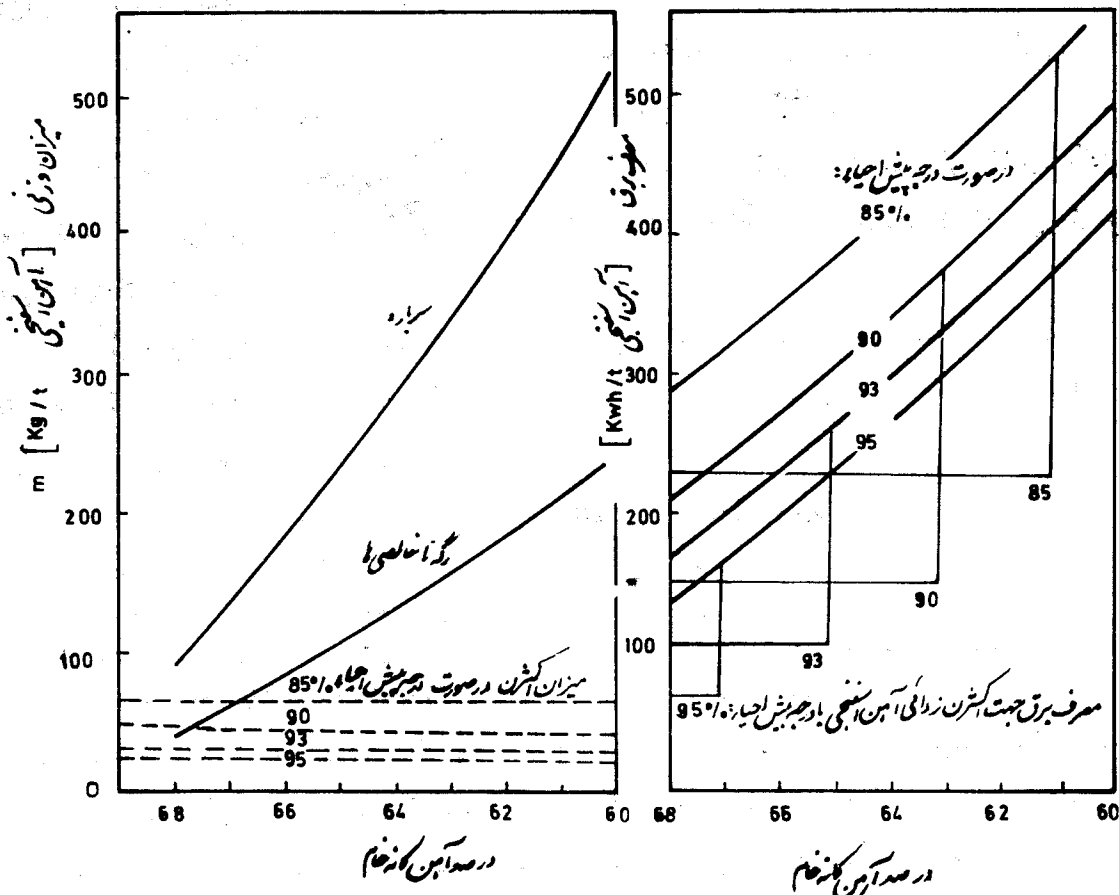
میباشد. در هر صورت با شرایط مناسب و کاربرد ۷ تا ۸ درصد آهن اسفنجی با ارزش میتوان بازاء یک تن فولاد، کمتر از ۶ کیلووات ساعت برق مصرف کرد. اما در صورت کاربرد آهن اسفنجی فقیر با درجه احیاء کم، مصرف برق بمراتب بیشتری را باید انتظار داشت. با امکان بارگیری آهن اسفنجی داغ مستقیماً از واحدهای احیاء مستقیم میتوان بیش از ۱ کیلووات ساعت برق بازاء یک تن آهن اسفنجی صرفه جوئی کرد، بدین منظور میتوان از اکسیداسیون مجدد آهن اسفنجی با اقدامات مناسب از جمله تراوری آهن اسفنجی داغ با محفظه های مخصوص و گازهای محافظ جلوگیری بعمل آورد.

برای تولید آهن اسفنجی با ارزش بعنوان بار، وجود تیله های خوب گداخته شده غنی، اجباری است. کسانیکه واحدهای جدیدی میسازند باید امکان رساندن کانه های مناسب را با قرارداد های دراز مدت تضمین کنند. قطعات کانه با قابلیت احیاء مناسب و عدم تمایل به خرد شدن (Cracking) نیز میتواند همراه با تیله ها در بعضی از روشهای احیاء مستقیم بکار برده شوند. اما عملکرد آنها باید با آزمونهای کافی بدقت سنجیده شود. در عمل قطعات کانه بیش از ۳ درصد بار کوره را تشکیل نمیدهد.

جهت کاربرد تیله های خام در بعضی از روشهای احیاء مستقیم آزمایشهای زیادی انجام شده اما نتایجی تا بحال منتشر نشده است.

بازاء یک تن آهن اسفنجی با ۸ تا ۹ درصد احیاء، ۲ تا ۴ کیلوگرم اکسیژن در تیله های احیاء شده باقی میماند (شکل ۱۲)، که جهت احیاء آنها ۱۰ تا ۵ کیلوگرم کربن ضروری است.

آهن اسفنجی بجز در کوره قوس الکتریکی در کوره های اندوکسیون، در کنورتور اکسیژن (فولاد سازی)، در کوره بلند، در کوره کوپل و غیره نیز میتواند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۲- تأثیر ناخالصی ها در کانه خام و درجه پیش احیاء بر روی میزان برق مصرفی بازاء یک تن آهن اسفنجی در صورتیکه ناخالصی ها حاوی ۶۰ درصد سیلیس آزاد بوده و درجه بازی سرباره $CaO : SiO_2 = 6$ باشد

بررسی اقتصادی روشهای احیای مستقیم

گرایش به ساختمان واحدهای احیاء مستقیم در چهارچوب مجتمع های کوچک تولید آهن اسفنجی و فولادسازی های کوچک (Small Scale) و یاصحیح تر فولادسازی های متوسط (Medium Scale) در سطح جهان و مسابقه اقتصادی آنها با واحدهای تولید آهن خام بروشی سنتی (کوره بلند/کنورتور) میتواند دلیل قانع کننده ای برای توجیه روشهای احیاء مستقیم بشمار آید. هزینه تولید فولاد دپروش احیاء مستقیم تابع عوامل زهادی از جمله :

قیمت کانه آهن و درجه خلوص آن ،

قیمت آهن قراضه و درجه خلوص آن،

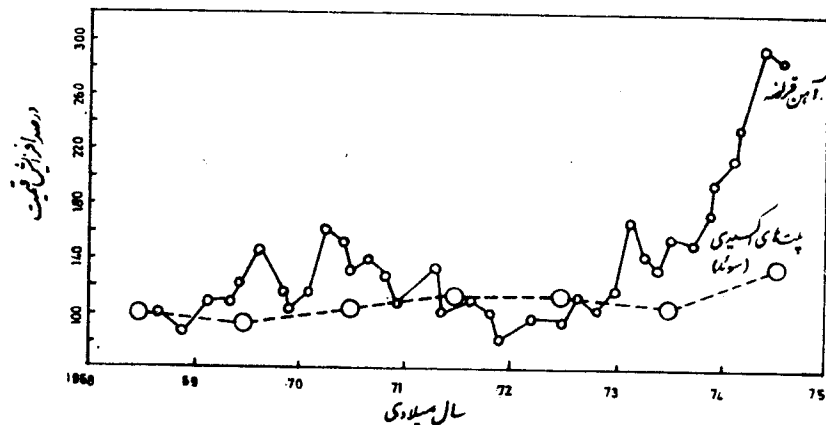
قیمت وارزش حرارتی و درجه مرغوبیت گاز طبیعی،

قیمت انرژی الکتریکی،

درجه فلزشدن آهن اسفنجی،

و بالاخره نوع فولاد مورد نظر میباشد. در شکل ۱۳ درصد افزایش قیمت تیله هانسی و آهن قراضه آورده

شده است.



شکل ۱۳- افزایش نسبی قیمت تیله ها (Pellets) و آهن قراضه هرگاه سال ۱۹۶۸ میلادی مبدأ فرض گردد

مأخذ ۳ صفحه ۲

از آنجائیکه عامل تعیین کننده در اقتصادی بودن روشها، قیمت انرژی عرضه شده میباشد، لذا این سؤال مطرح است که آیا نسبت افزایش قیمت انرژی برای کک، گاز طبیعی و انرژی الکتریکی پایدار میماند (شکل ۱۴). در زیر باختصار مقایسه روش سنتی تولید آهن خام (کوره بلند/کنورتور) و احیاء مستقیم ازدید اقتصادی آورده شده است.

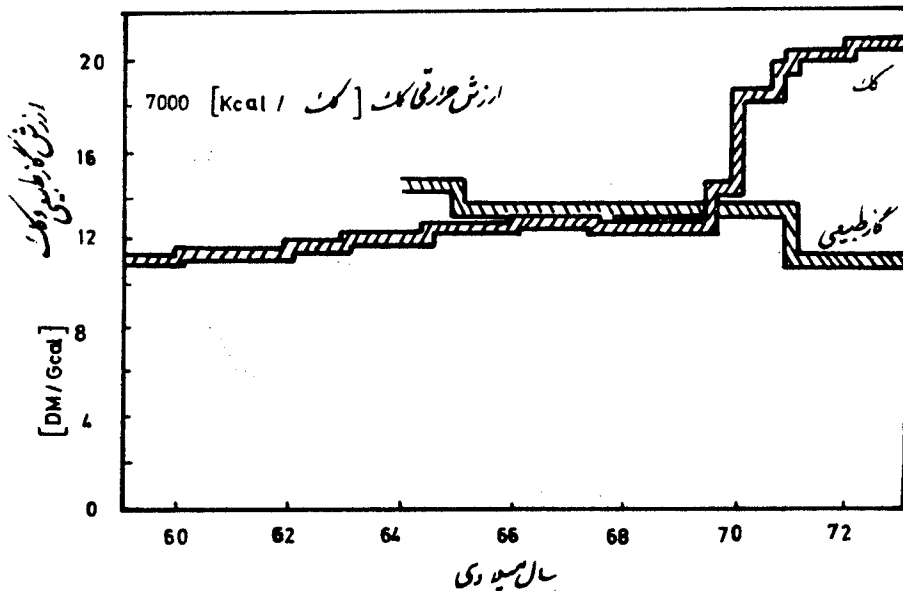
جدول ۲- ارزیابی اقتصادی روش تولید آهن خام (کوره بلند/کنورتور) واحیاء مستقیم

مأخذ ۲۶ صفحه ۵۷

فولادسازی کوچک (Small Scale)	واحدهای کوره بلند/کنورتور	ظرفیت فولاد خام بر حسب تن در سال تجهیزات:
۵۰۰،۰۰۰ یک واحد احیاء مستقیم دو کوره قوس الکتریکی ۱۰۰ تنی ۲۷۵ مارک آلمان فدرال	۵۰۰،۰۰۰،۰۰۰ ۲ کوره بلند ۲ کنورتور ۲۰۰ مارک آلمان فدرال	یک تن در سال قیمت واحدهای اصلی برای تولید یک تن در سال
» » » ۱۲۰	» » » ۱۴۰	قیمت واحدهای فرعی برای تولید یک تن در سال
» » » ۲۹۵	» » » ۲۴۰	هزینه کل تجهیزات برای تولید یک تن در سال
۳۰ مارک برای یک تن آهن اسفنجی	۲۵ مارک برای یک تن چدن	هزینه کارآوری آهن خام برای تولید یک تن در سال
۱۲۰ مارک برای یک تن آهن اسفنجی	» » » ۱۰۰	هزینه کانه آرایش شده

اعداد ممکن است مورد سؤال باشند ولی گرایش مطمئناً صحیح است (یک مارک آلمان فدرال در هائیز سال ۱۹۷۵ معادل ۲۶ ریال می باشد).

شکل ۱۵ تغییرات هزینه تولید یک تن آهن خام (کوره بلند) در صورت مصرف 4×10^6 کیلوکالری (معادل ۵۷ کیلوگرم که بازاء یک تن آهن خام) و یا 300×10^6 کیلوکالری (معادل ۵۰۰ کیلوگرم کک بازاء یک تن آهن خام) انرژی و همچنین برای تولید یک تن آهن اسفنجی در صورت مصرف 4×10^6 و یا 300×10^6 کیلوکالری انرژی بر حسب افزایش قیمت انرژیهای کک و گاز طبیعی محاسبه شده است.



شکل ۱۴- منحنی تغییرات قیمت کک و گاز طبیعی

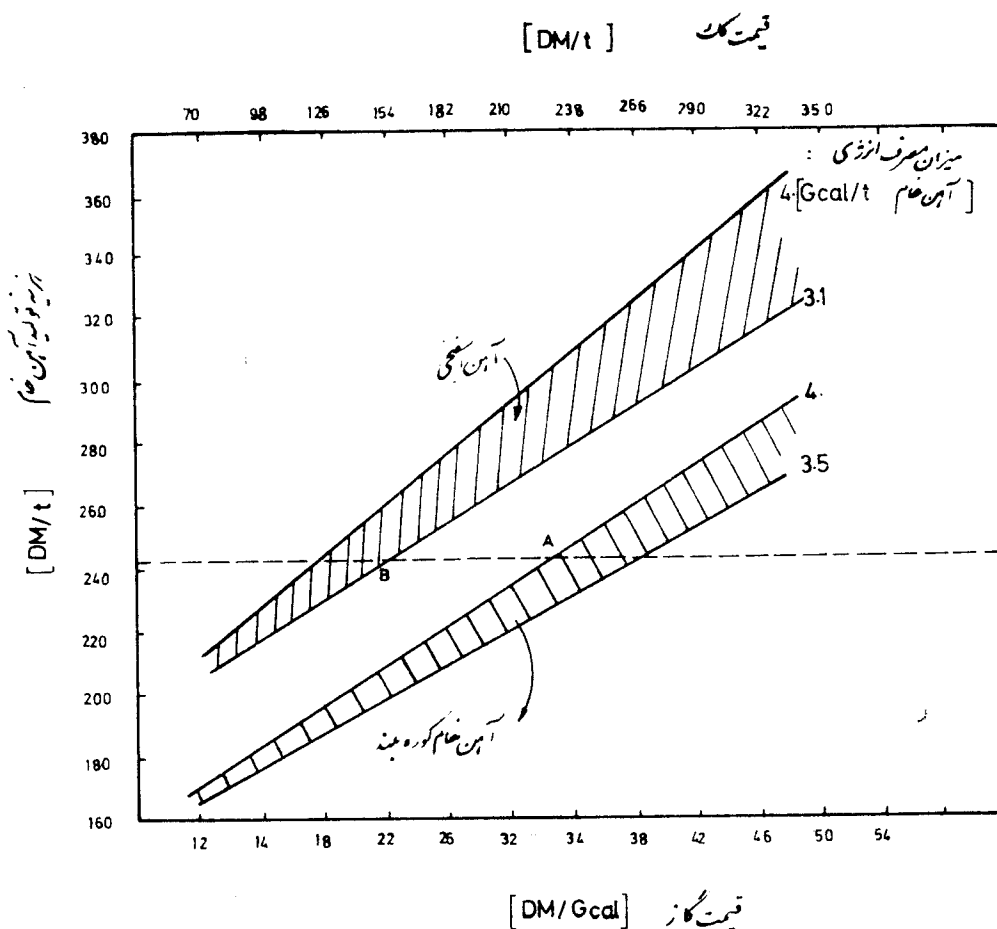
مأخذ ۳۲ شکل ۲

هزینه تولید آهن خام در کوره بلند بعلت عظمت واحد تولید و اهتمیم شرایط کار اساساً مناسبتر از هزینه تولید آهن اسفنجی میباشد. از شکل ۱۰ میتوان شرائطی که قیمت تمام شده برای تولید آهن خام و آهن اسفنجی یکسان گردند را برداشت کرد.

هزینه تولید آهن اسفنجی و آهن خام کوره بلند در صورتی بایکدیگر برابر خواهند شد که قیمت انرژی عرضه شده (بازاء واحد کالری) برای گاز طبیعی خیلی کمتر از کک باشد.

مثلاً هرگاه کوره بلندی ۰۷ کیلو گرم کک (معادل 4×10^6 کیلو کالری) بازاء یک تن آهن خام (نقطه A شکل ۱۰) و روش احیاء مستقیمی 231×10^6 کیلو کالری و بازاء یک تن آهن اسفنجی مصرف کنند (نقطه B شکل ۱۰)، هرگاه قیمت کک در حدود ۲۳ مارک بازاء یک تن (معادل ۳۳ مارک بازاء ۱ کیلو کالری) و گاز طبیعی در حدود ۲۲ مارک بازاء ۱ کیلو کالری می بود، هزینه تولید آهن خام بدو روش (چدن و آهن اسفنجی) یکسان در حدود ۲۴ مارک بازاء یک تن می شد.

بکمک شکل ۱۰ و ۱۱ می توان قیمت تمام شده برای تولید یک تن آهن خام کوره بلند و آهن اسفنجی



شکل ۱۰- تابعیت هزینه تقریبی تولید آهن خام در کوره بلند و آهن اسفنجی از قیمت کک و گاز طبیعی با پارامتر مصرف انرژی در دو روش مذکور

مأخذ ۲۶ شکل ۲۳

را برحسب قیمت انرژی کک، گاز طبیعی تخمین زد. بوضوح دیده می‌شود که تغییر قیمت انرژی های عرضه شده چه تأثیری در قیمت تولید آهن خام و آهن اسفنجی دارد.

آهن خام با گرمای محسوس مفید و آنتالپی شیمیائی کرین محلول در آن طبیعتاً قابل مقایسه با آهن اسفنجی نیست مع الوصف، تغییر قیمت انرژیهای عرضه شده در سطح بین المللی برای کک و گاز طبیعی چشم انداز جالبی دارد (شکل ۱۴).

قابل تذکر اینکه قیمت گاز طبیعی عرضه شده در بازارهای بین المللی هم اکنون آنقدر پائین است که دولت آلمان فدرال با حفر چاههای عمیق زیرزمینی در معادن نمک گاز طبیعی را برای روز مبادا ذخیره میکند. میتوان حدس زد که قیمت تولید آهن اسفنجی با در نظر گرفتن میزان سرمایه گذاری، هزینه تولید و گرایش واحدها با افزایش تولید (یک میلیون تن در سال) در آینده ارزاتر خواهد شد.

بر اساس قیمت آهن اسفنجی و آهن قراضه نتیجه گیری میگردد که برای فولاد سازیهای کوچک (Small Scale) آهن اسفنجی حتی با قیمت انرژی گاز طبیعی در سطح ۲۶ مارک بازا ۱.۶ کیلو کالری و مصرف $10^6 \times 4$ کیلو کالری بازا تولید یک تن که ۲۷۰ مارک تمام میشود اساساً ارزاتر از آن آهن قراضه می باشد.

از ارزیابی اقتصادی کاربرد آهن اسفنجی در کوره بلند، کوره الکتریکی تولید آهن خام و غیره چشم پوشی میگردد.

منابع

فهرست منابع ۱ تا ۲۷ در ماخذ ۲۸ آورده شده است.

۲۷- ناصر توحیدی

روند تکاملی روشهای متالورژی (تولید فولاد)

نشریه دانشکده فنی شماره ۲۰ (اسفند ۵۱) صفحه ۲۲ تا ۳۶

۲۸- ناصر توحیدی

دیدنی کوتاه بروشهای تولید آهن خام و چدن

نشریه دانشکده فنی شماره ۲۷ (دیماه ۱۳۵۲) صفحه ۳۹ تا ۲۷۰

۲۹- ناصر توحیدی

فیزیکوشیمی و تئوری احیاء کانه های آهن با گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی نشریه دانشکده

فنی شماره ۲۷ (دیماه ۱۳۵۲) صفحه ۷۸ تا ۱۱۷

۳۰- ناصر توحیدی

بررسی خواص کانه های آهن ایران از نقطه نظر قابلیت احیاء مستقیم پژوهنده (مهندسی) شماره ۱۰

(شهریور ۵) صفحه ۹ تا ۹

- 31 – W. Maschlanka, H. Knapp and U. Kohl
 Use of the Midland Ross direct reduction process.....
 International Symposium on Direct Reduction in Bucharest Sep. 1972.
- 32 – E. Steinmetz, J. Kuhn
 Kontinuierliche Stahlerzeugung.....
 Umschau 75 (1975) S. 412 – 416
- 33 – H. Jockel, F.W. Müller und K.H. Gründler
 Erzeugung von Reduktionsgasen..... S. 1 – 17
- 34 –
 The Purofer Process
 Oberhausen June 1972 S. 1 – 28
- 35 –
 Direktreduktion von Eisenerze, Verfahren, Verarbeiten,...
- 36 – H.D. Pantke, U. Pohl u. H. Kropla
 Purofer Verfahren
 Internationaler Eisenhüttentechnischer Kongress Düsseldorf 1974
- 37 – C.G. 'Sada
 The HYL Iron Ore Direct Réduction Process
 International Iron and Steel Institute Brussels (Belgium)
 IISI/E/715S. 1 – 11
- 38 – W. Korf
 The Midrex Direct Reduction Process
 International Iron and Steel Institute Brussels
 IISI/E/780 S. 1 – 13
- 39 – M.H. Philipp
 The Purofer Process
 International Iron and Steel Institute Brussels
 IISI/E/713 S. 1 – 12
- 41 –
 Midrex Process
 Battel Institut E.V. Frankfurt Am Main VII 48 – 71
- 42 – H.D. Pantke, U. Pohl
 Purofer Industrial Application of Reduktion
 Düsseldorf 1973 S. 1 – 21
- 43 –
 HYL Process
 Battel Institut E.V. Frankfurt Am Main VII 102 – 120
- 44 – Barin I., O. Knacke, N. Towhidi
 Rechnung Thermodynamisches Funktionen der Reaktionsgleichgewichte
 Aachen 1970