

تکنولوژی تولید آهن اسفنجی به روش‌های احیاء مستقیم*

نوشته :

ناصر توحیدی

دانشوار دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده :

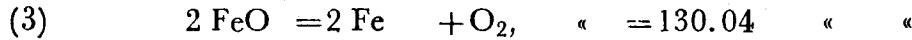
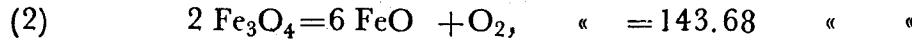
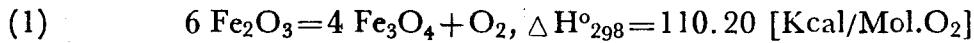
امروزه صد ها روش تولید آهن خام در سطوح آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی وجود دارد که آنها براساس پیشرفت علم و امکانات محلی کشورها از نقطه نظرهای نوع انرژی و عامل احیاء کننده در دسترس، تولید آهن مورد نیاز، میزان سرمایه‌گذاری، مواد مصرفی (آب، برق...) وغیره ابداع - گشته‌اند. هدف کلیه روشها جدا کردن اکسیژن اکسیدهای آهن و پلاسیش ناخالصی‌های کانه میباشد. ارزیان انواع روشها، تولید آهن خام (چدن) در کوره‌بلند توسعه چشمگیری پیدا کرده است بطوریکه آهن خام تولید شده در هیچ روشی تابحال از نظر اقتصادی قابل رقابت با آهن تولید شده در کوره بلند نیست. پیشرفت و تکامل کوره بلند با این علت بوده است که ذغال سنگ مرغوب ککده یعنی ماده اولیه برای تولید آهن خام که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است در کشورهای پیشرفته صنعتی بوفوریافت می‌شده و دانشمندان آن کشورها تولید آهن خام را براساس این ماده اولیه بنا نهادند. درجه گذشته از طرفی بعلت افزایش قیمت فراینده کک و بالعکس عرضه زیادگاز طبیعی در بازارهای بین‌المللی واژ طرف دیگر برتری گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی نسبت به کک از نظر سرعت احیاء، آلوده‌نگردن محیط زیست و ضمناً مرغوبیت آهن خام حاصل از روش‌های احیاء مستقیم نسبت به آهن قراضه برای کاربرد دریخش فولادسازی، روش‌های زیادی براساس کاربرد گاز طبیعی مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. مقایسه انواع مختلف روش‌های تولید آهن خام نسبت به یکدیگر بادر نظر گرفتن پارامترهای متعدد کاری بس دشوار و متضمن سالها مطالعه می‌باشد (شکل ۱۲). در این مقاله کوشش شده است که بعضی از پارامترهای تعیین کننده سرعت احیاء مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار گیرد تا دامنه امکانات متعدد برای مهندسین متالورژی جهت تغییر پارامترها و ابداع روش‌های نوین بیش از پیش روشن گردد.

بنظر می‌رسد که کمبود مواد نفتی در دوده‌های تأثیر تعیین کننده‌ای در نحوه تولید آهن خام بگذارد.

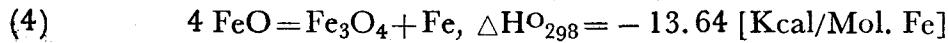
*-قسمتی از این مقاله در جلسه سخنرانی دانشکده فنی در ۲۸ فروردین ۱۳۹۵ به بحث گذاشته شد.

بورسی ترمودینامیکی احیاء اکسیدهای آهن

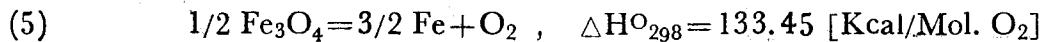
تولید آهن خام از احیاء کانه های هماتیتی (Fe_2O_3) و مانیتیتی (Fe_3O_4) بروشهای مختلف انجسام میگیرد که اساس همگی آنها احیاء هماتیت به مانیتیت، مانیتیت به وستیت و وستیت به آهن طبق واکنشهای زیر میباشد:



در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد وستیت پایدار نبوده و طبق واکنش ع به مانیتیت و آهن تجزیه میشود:

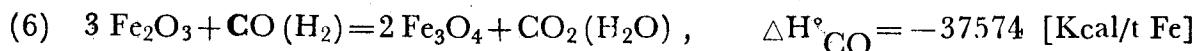


بعارت دیگر مانیتیت تاحدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد مستقیماً احیاء میگردد:



فرمول شیمیائی وستیت در واکنشهای سوء از نظر سهولت بصورت FeO نوشته شده و همانطوریکه بعداً خواهیم دید باید بعلت کمبود آهن در شبکه وستیت بصورت $O_{Fe_{1-x}}$ نوشته شود (شکل ۱، ۲، ۳، ۴). در شکل ۱ حدود پایداری اکسیدهای مختلف آهن از درجه حرارت پتانسیل اکسیژن آورده شده است.

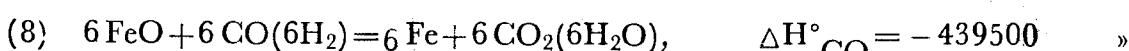
باتوجه به واکنشهای اتاہ برای احیاء اکسیدهای آهن به عوامل احیاء کننده و گرمای نیاز است. عوامل احیاء کننده در صنعت متالورژی استخراجی آهن میتوانند گاز طبیعی، گازهای هیدروژن، منواکسید کربن و یامخلوط آنها و همچنین کک ذغال وغیره و عوامل گرمای علاوه بر اینها میتواند انرژی الکتریکی، نفت وغیره نیز مورد استفاده قرار گیرند. براساس - کاربرد عوامل مختلف احیاء کننده، واکنشهای اکسیدهای آهن میتوانند گرمای بی گرمای و یا گرمای گیر باشند. در واکنشهای ۶ تا ۹ عملکرد احیاء اکسیدهای آهن با منواکسید کربن و هیدروژن و همچنین تغییرات انتالپی آنها در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و در شکل ۲ خطوط تعادل آنها آورده شده است:



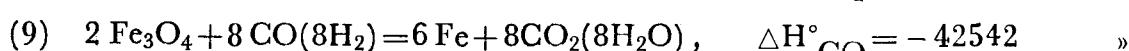
$$\Delta H^\circ_{H_2} = -8263 \quad "$$



$$\Delta H^\circ_{H_2} = 221200 \quad "$$



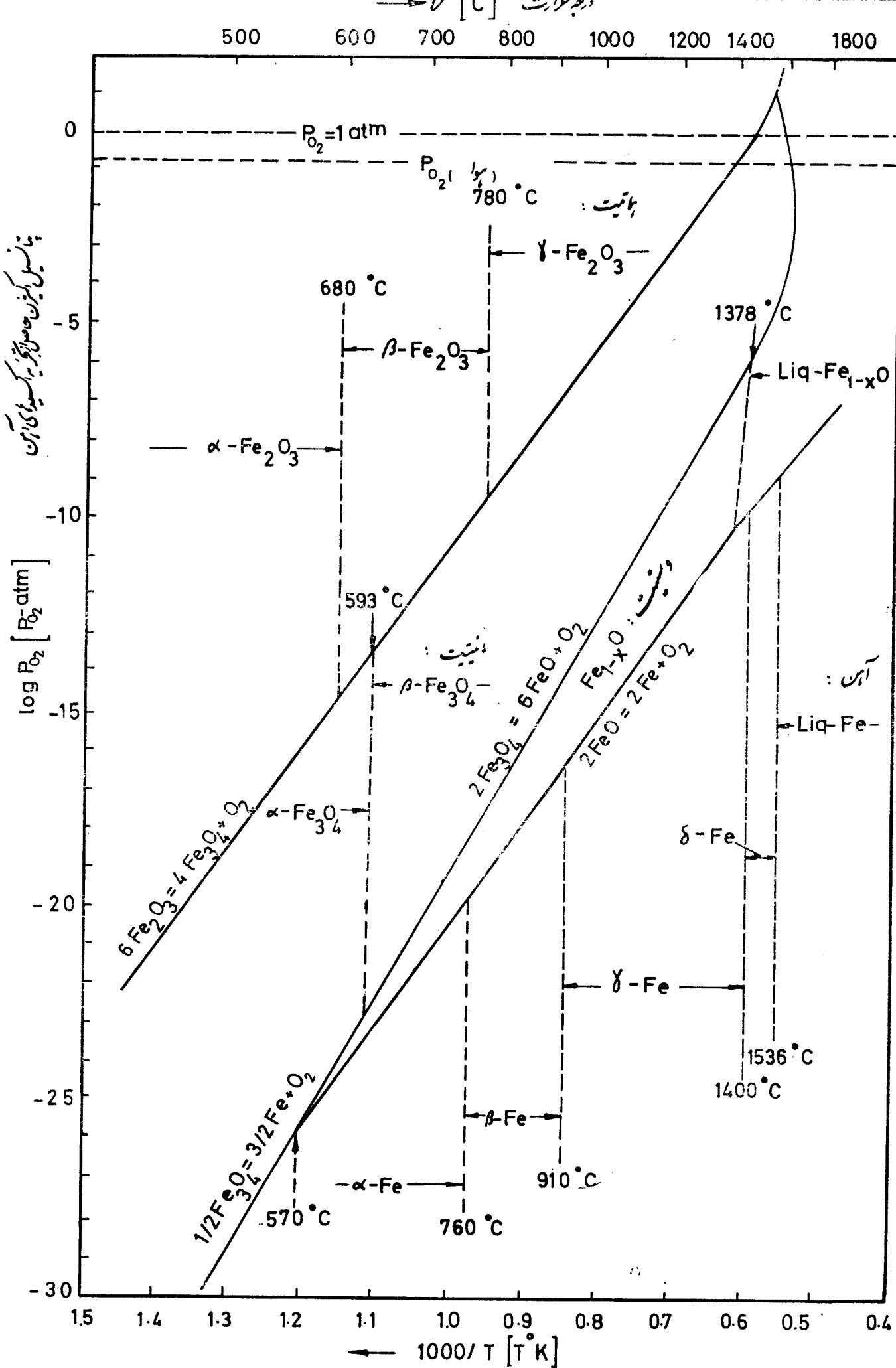
$$\Delta H^\circ_{H_2} = 615684 \quad "$$



$$\Delta H^\circ_{H_2} = 626428 \quad "$$

برای تولید آهن خام در فرایند کوره بلند به عوامل احیاء کننده و گرمای نیاز است، کک در کوره بلند میتواند اکسیدهای آهن را بطور مستقیم احیاء کرده و یا اینکه با تشکیل منواکسید کربن از احتراق ناقص آن (کک) در منطقه دمنده ها، احیاء غیرمستقیم اکسیدهای انجام میگردد.

تکنیک احیاء مستقیم کانه های آهن خارج از کوره بلند از اسالهای پیش حتی برای پشتاولیه معلوم بوده است. دردهه گذشته روش های صنعتی احیاء مستقیم کانه های آهن جهت تولید آهن خام بخصوص براساس کاربرد گاز طبیعی توسعه چشم - گیری پیدا کرده است. چه علاوه بر سهولت استخراج وحمل ونقل گاز طبیعی نسبت به کک، بعلت غنی بودن هیدروژن در گازهای



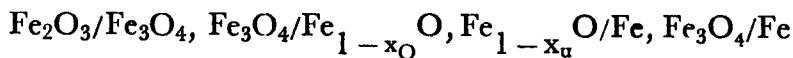
شکل ۱ — دیاگرام حالت پایداری اکسیدهای آهن

حاصل از تفکیک گاز طبیعی و نظر باینکه قابلیت احیاء هیدروژن نسبت به کربن، منواکسید کربن وغیره برتر است بدین علت روشهای احیاء مستقیم اکسیدهای آهن براساس کاربرد گاز طبیعی افزونتر گشته است.

از آنجائیکه میزان هیدروژن و منواکسید کربن در گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی برحسب کاربرد عوامل - اکسید کننده وسایر ضوابط ترمودینامیکی فرق کردولی در هر صورت تعیین کننده میباشد، لذا حدود پایداری اکسیدهای آهن با گازهای منواکسید کربن و هیدروژن مورد تجزیه و تحلیل قرار میگیرد.

دیاگرام حالت پایداری سیستم $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}-\text{H}$

نظر باینکه گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی بطور عمدۀ از هیدروژن و منواکسید کربن تشکیل شده است لذا خطوط تعادل اکسیدهای آهن:



با هیدروژن خالص، منواکسید کربن خالص و مخلوط هیدروژن و منواکسید کربن به نسبت یک به یک محاسبه و در شکل ۲ رسم گردیده است. ملاحظه میگردد که احیاء همایت به مانیتیت با کمترین مقدار هیدروژن و یا منواکسید کربن امکانپذیر بوده و گرماده میباشد (واکنش ۶). احیاء مانیتیت و سنتیت با هیدروژن (واکنشهای ۷ و ۸) گرمگیر است، بنابراین میزان مبالغه هیدروژن به بخارآب با افزایش درجه حرارت برای این واکنشها بیشتر شده و بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده بهتر میباشد. بعارت دیگر عملکرد احیاء مانیتیت و سنتیت با هیدروژن در صورت افزایش درجه حرارت اقتصادی تر خواهد بود. احیاء مانیتیت به سنتیت با منواکسید کربن مبالغه طبق واکنش ۷ گرمگیر بوده بدینجهت بهره شیمیائی از گاز منواکسید کربن مبالغه واکنشهای ۸ و ۹ گرماده و در نتیجه میزان مبالغه منواکسید کربن به گازکربنیک با افزایش درجه حرارت کمتر انجام گرفته و یا بعارت دیگر بهره شیمیائی از گاز منواکسید کربن با افزایش درجه حرارت کاهش میباشد.

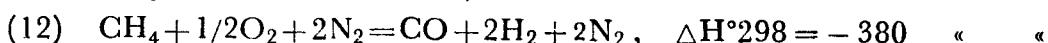
هرگاه حالت پایداری اکسیدهای آهن با مخلوطی از هیدروژن و منواکسید کربن محاسبه گردد ملاحظه میشود که خطوط تعادل اکسیدهای آهن بین دو سیستم $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}-\text{H}$ و $\text{Fe}-\text{O}-\text{H}$ بوده بطوریکه مثلاً خط تعادل آهن/سنتیت با مخلوط H_2 درصد هیدروژن و O_2 درصد منواکسید کربن ازدیای ۸۰ درجه سانتیگراد بالا تقریباً بیگرما میباشد.

ملاحظه میگردد که افزایش میزان هیدروژن در مخلوط هیدروژن و منواکسید کربن بعلت گرمگیر بودن عملکرد احیاء سنتیت با هیدروژن باعث افزایش حرارت ضروری جهت احیاء و سنتیت به آهن میشود، ولی در عوض با افزایش میزان هیدروژن در مخلوط گاز احیاء کننده از دمای ۸۲ درجه بالا بعلت بهره شیمیائی برتر هیدروژن نسبت به منواکسید کربن میزان گاز ضروری جهت احیاء و سنتیت به آهن کمتر خواهد بود.

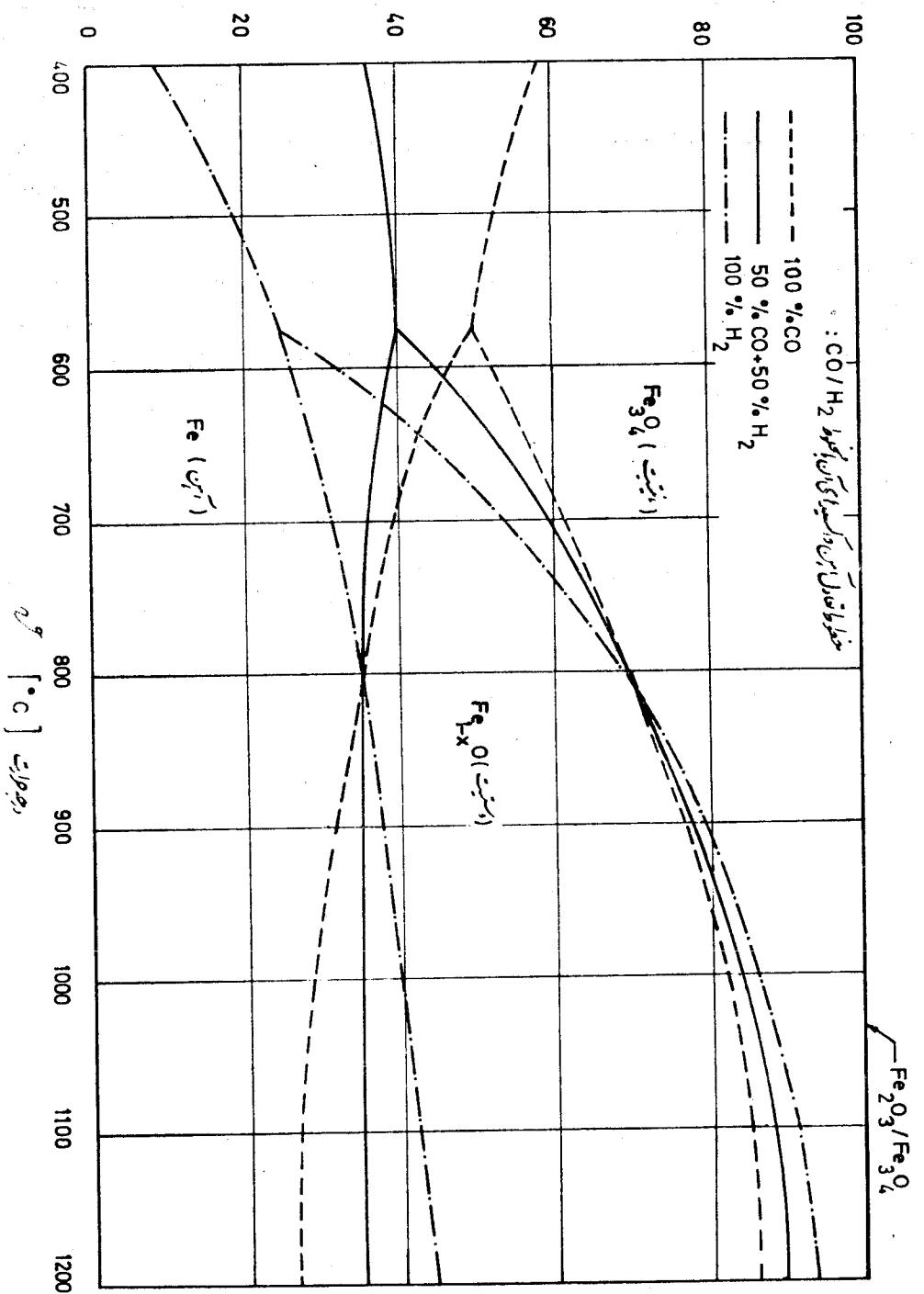
همانطور که ملاحظه گردید ترکیب گاز احیاء کننده از نظر میزان انرژی ضروری، بهره شیمیائی از گاز احیاء کننده و چنانچه خواهیم دید از نظر سرعت احیاء رل عدهای را بازی می کند. بدینجهت ترکیب گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی که قسمت عده آن متان میباشد برحسب درجه حرارت و کیفیت عامل اکسید کننده مورد بحث و تجزیه و تحلیل قرار میگیرد.

بررسی ترمودینامیکی تبدیل گاز طبیعی به گازهای احیاء کننده

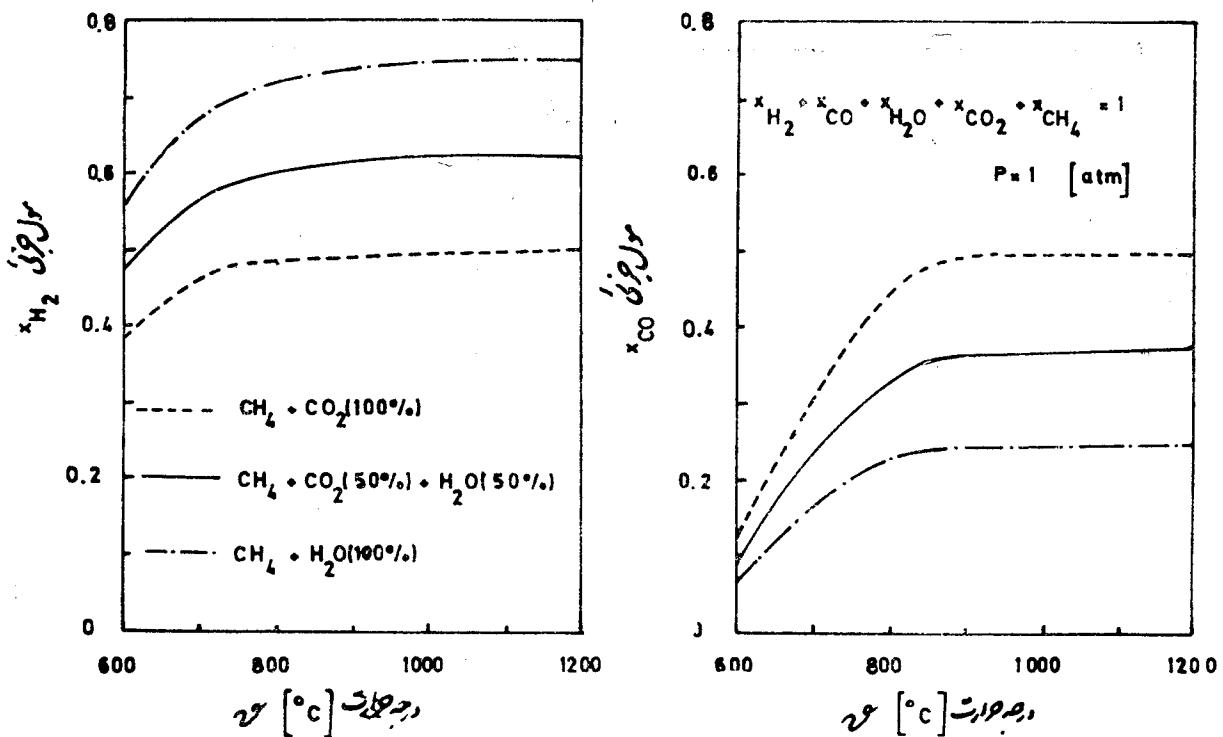
احیاء اکسیدهای آهن با گاز طبیعی علی الاصول امکانپذیر میباشد، اما خطر تشکیل دوده وجود داشته‌است. درجه احیاء نیز محدود وغیرکافی میباشد. بدینجهت، گاز طبیعی در صنعت بكمک عوامل اکسید کننده تفکیک میگردد. عوامل اکسید کننده میتوانند گازکربنیک، اکسیژن، هوا، بخارآب و یا مخلوطی از گازهای نامبرده باشند:



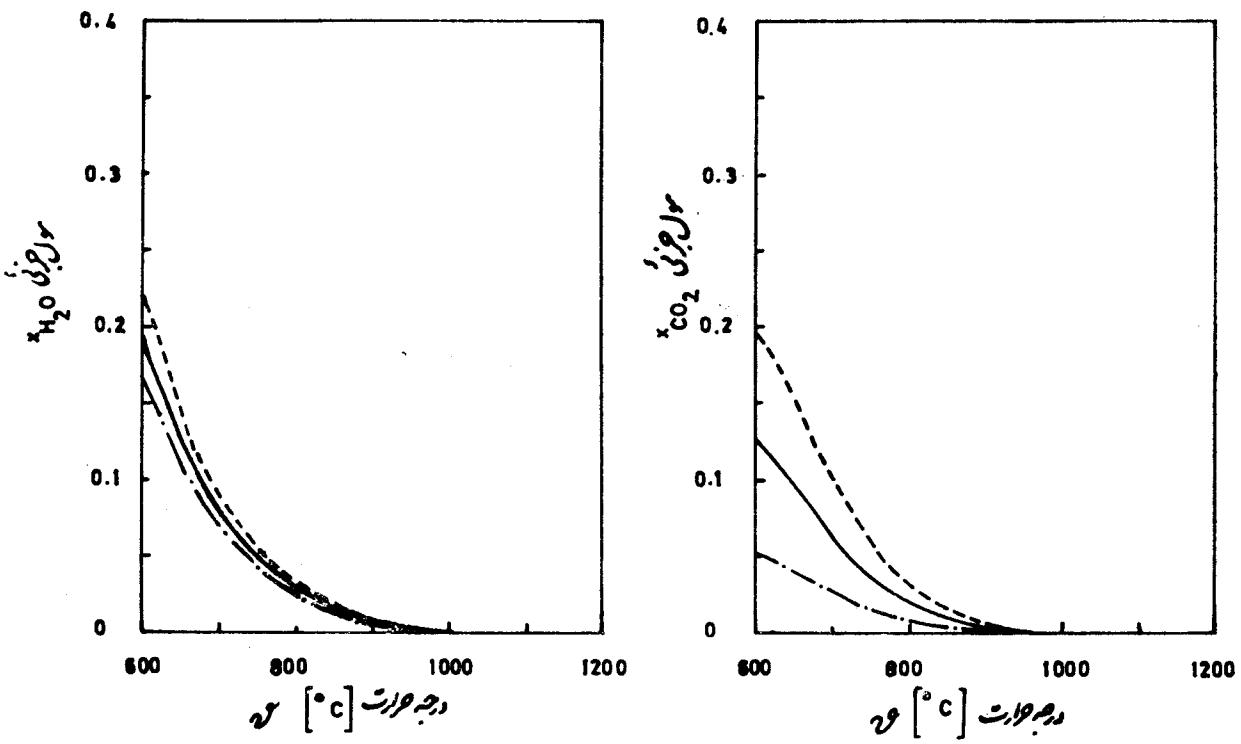
رسانی دزگیر کارکرد و دا بروش بی از جا کند



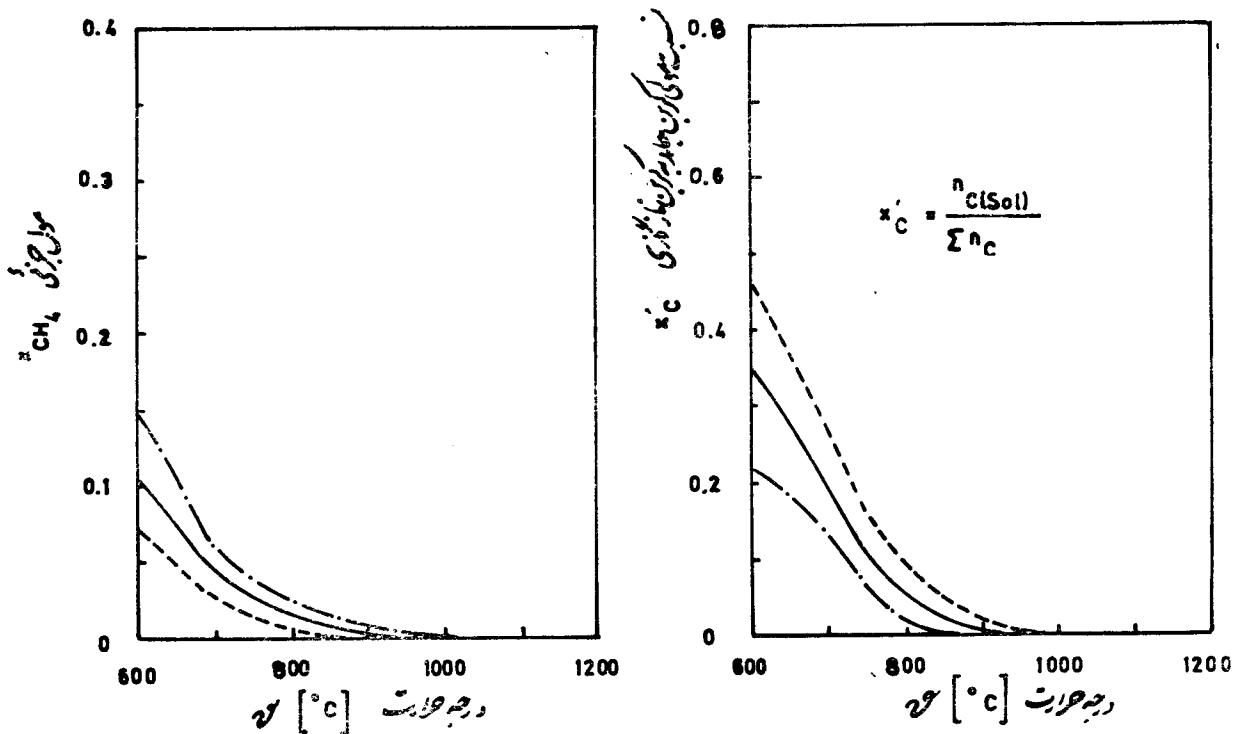
شکل ۲ — سرزمای پایداری سیستم $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}-\text{H}$ و با تغییرات بهره شیمیائی از هیدرژن، متراکسید کردن و پا



شکل ۳ الف - تابعیت میزان هیدروژن و منواکسید کربن در گازهای حاصل از تفکیک متان با گاز کربنیک، بخار آب و مخلوطی از گاز کربنیک و بخار آب به نسبت ۵۰ درصد و فشار یک آتمسفر بر حسب مأخذ ۲



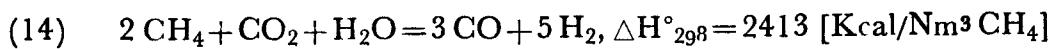
شکل ۳ ب - تابعیت میزان بخار آب و گاز کربنیک بر حسب درجه حرارت



شکل ۳ ج - تابعیت میزان متان و دوده بر حسب درجه حرارت

همانطور که از شکل ۲ دیده میشود بهره شیمیائی از گازهیدروژن، منواکسیدکربن یا مخلوطی از آنها در مرز آهن/وستیت صدر صد نیست بدینجهت همیشه در گازهای خروجی راکتور احیاء علاوه بر گازهای حاصل از احیاء اکسیدهای آهن از جمله گاز کربنیک و بخارآب وغیره مقداری هیدروژن و منواکسید کربن وجود دارد. لذا در بیشتر روشهای احیاء مستقیم، گاز خروجی راکتور احیاء پس از شستشو مجددًا بعنوان عامل اکسیدکننده جهت تفکیک گاز طبیعی بکار میرود.

نظرباینکه عوامل اکسیدکننده این گازها از بخار آب و گاز کربنیک تشکیل شده است لذا در شکل ۳ ترکیب گازهای حاصل از تفکیک متان با گاز کربنیک (واکنش ۱)، بخار آب (واکنش ۱۳) و ترکیبی از گاز کربنیک و بخارآب به نسبت درصد (واکنش ۱۴) :



در فشار یک آنسفر بر حسب درجه حرارت آورده شده است. اشاره میگردد که عملکرد گاز مشروط بر وجود کاتالیزورهای مناسب میباشد.

مالحظه میگردد که چه امکانات متعددی در جهت تفکیک گاز طبیعی برای مهندس متالورژی وجود دارد. تابحال امکانات احیاء اکسیدهای آهن و تفکیک گاز طبیعی از دید ترمودینامیکی مورد بحث قرار گرفت. بادرنظر گرفتن این موضوع که عوامل تعیین کننده برای مبدله واکنشهای خیلی پیچیده میباشد معهدا برای روشن شدن مطلب فرایند احیاء یک قطعه کلوخه هماتیت با هیدروژن را مورد تجزیه و تحلیل قرار بیند هیم.

بررسی مکانیسم احیاء کلوخه‌ای از هماتیت

در فرایند احیاء، واکنشهای متعددی میتواند بموازات و پشت سرهم انجام گشته و تعیین کننده سرعت باشند. مراحل زیر میتوانند در روند احیاء یک کانه متخلخل هماتیت و یا مانیتیت با هیدروژن وجود داشته باشد که شما آن در شکل ۴ آورده شده است:

۱- عبور هیدروژن از قشر مرزی

۲- عبور هیدروژن از خلل و فرج ماکروسکوپی به خلل و فرج میکروسکوپی

۳- عبور هیدروژن از خلل و فرج میکروسکوپی به محل واکنش

۴- جذب فیزیکی و شیمیائی هیدروژن در سطح کانه، حذف اکسیژن و تشکیل بخارآب

۵- عبور بخارآب از خلل و فرج میکروسکوپی به خلل و فرج ماکروسکوپی

۶- عبور بخارآب از خلل و فرج ماکروسکوپی به قشر مرزی

۷- عبور بخارآب از قشر مرزی به خارج

جوانه‌اهن خلل و فرج میکروسکوپی خلل و فرج ماکروسکوپی

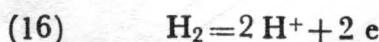


شکل ۴- شماتیک مکانیسم احیاء کلوخه هماتیت متخلخل با گاز هیدروژن

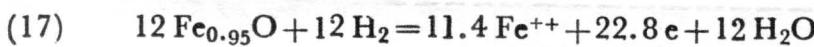
نظریه اینکه احیاء هماتیت به مانیتیت، مانیتیت به وستیت و وستیت به آهن پشت سرهم انجام گشته (۱ و ۲ و ۵ و ۶ و ۹) و طبق تحقیقات انجام شده سرعت احیاء وستیت به آهن از سایر اکسیدها کمتر است لذا این عملکرد تعیین کننده میباشد (شکل ۱۳ و ۱۴). جذب شیمیائی هیدروژن در محدوده یکنواخت وستیت با گرفتن دقیقت الکترونها (\oplus) و مصرف جاهای خالی آهن (Fe_{\square}) در شبکه وستیت (Fe_{1-x}O) طبق واکنش ۱۵ :



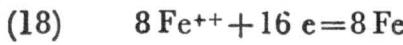
در محدوده آهن / وستیت ($\text{Fe}/\text{Fe}_{0.95}\text{O}$) باز دست دادن الکترونها طبق واکنش ۱۶ انجام میگردد :



احیاء وستیت با کمترین مقدار اکسیژن ($\text{Fe}_{0.95}\text{O}$) به آهن با هیدروژن براساس واکنش ۱۷ :



انجام میپذیرد. تشکیل جوانه‌های آهن ورشد آنها با قسمتی از یونهای آهن تولید شده در واکنش ۱۷ انجام میگردد :



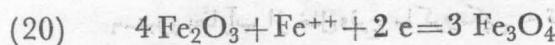
پس از حذف اکسیژن سطوح خارجی کانه، وستیت، خلل و فرجهای ماکروسکوپی و میکروسکوپی، قسمتی از یونهای آهن حاصل از

واکنش ۱۷ به مرز وستیت/مانیتیت نفوذ کرده (شکل ۵) وستیت مصرف شده در واکنش ۱۷ طبق واکنش ۱۹:



مجدداً تولید میگردد.

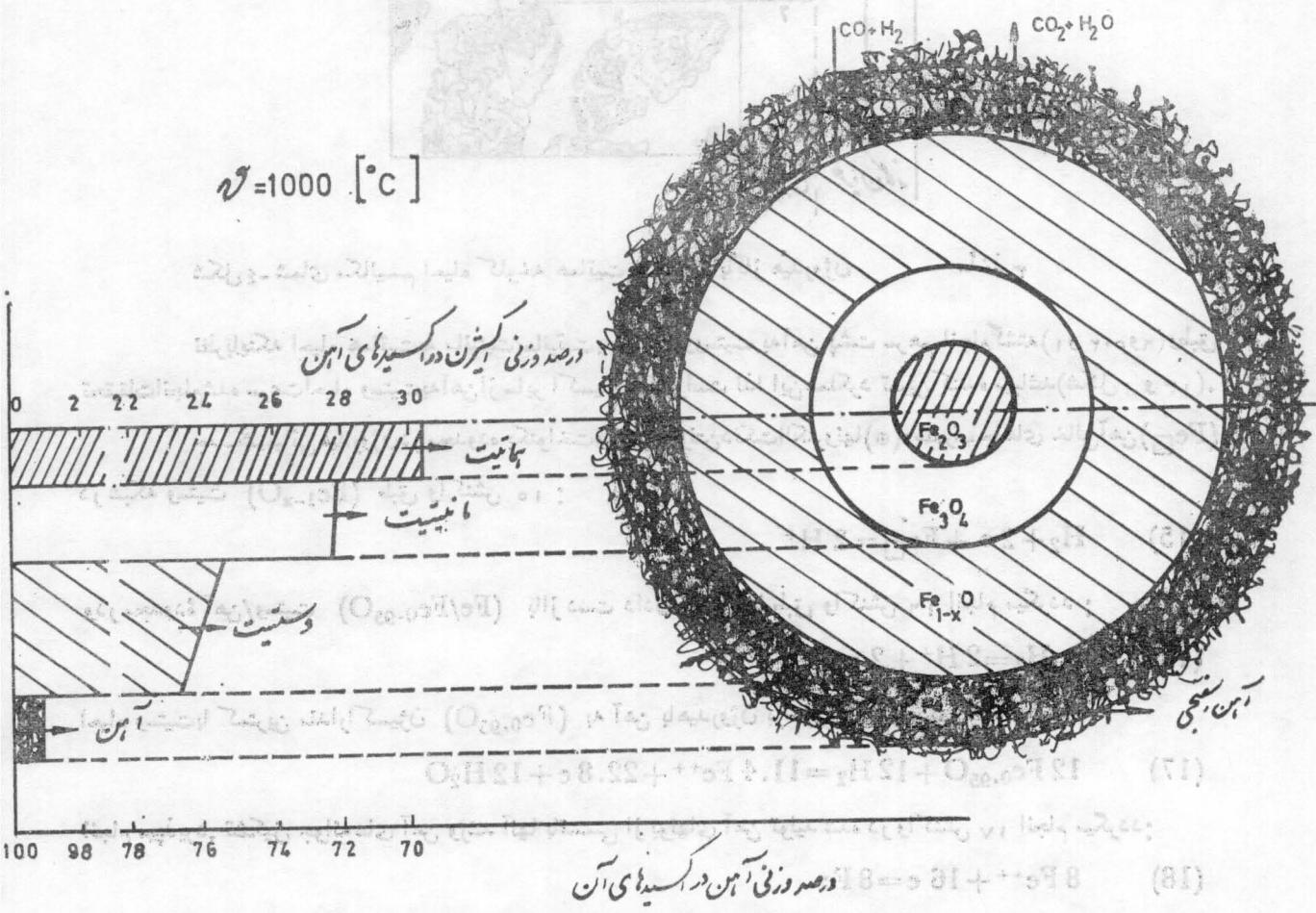
قسمت دیگری از یونهای آهن حاصل از واکنش ۱۷ به مرز مانیتیت/هماتیت نفوذ کرده و مانیتیت مصرف شده در واکنش ۱۹ طبق واکنش ۲۰:



مجدداً تولید میگردد. بدین ترتیب با ادامه عملکرد احیاء مرزهای $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ، $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_{1-x}\text{O}$ ، $\text{Fe}_{0.95}\text{O}/\text{Fe}$ و موازات یکدیگر بسمت مرکز تیله تغییر مکان میدهند (واکنشهای توپوشیمیائی). هرگاه اکسیدهای وستیت و مانیتیت متراکم نیز باشند، با دیفوزیون آهن از آنها، احیاء هماتیت به مانیتیت، مانیتیت به وستیت و سنتیت به آهن اسکان پذیر بوده، اما سرعت احیاء ممکن است کاهش یابد.

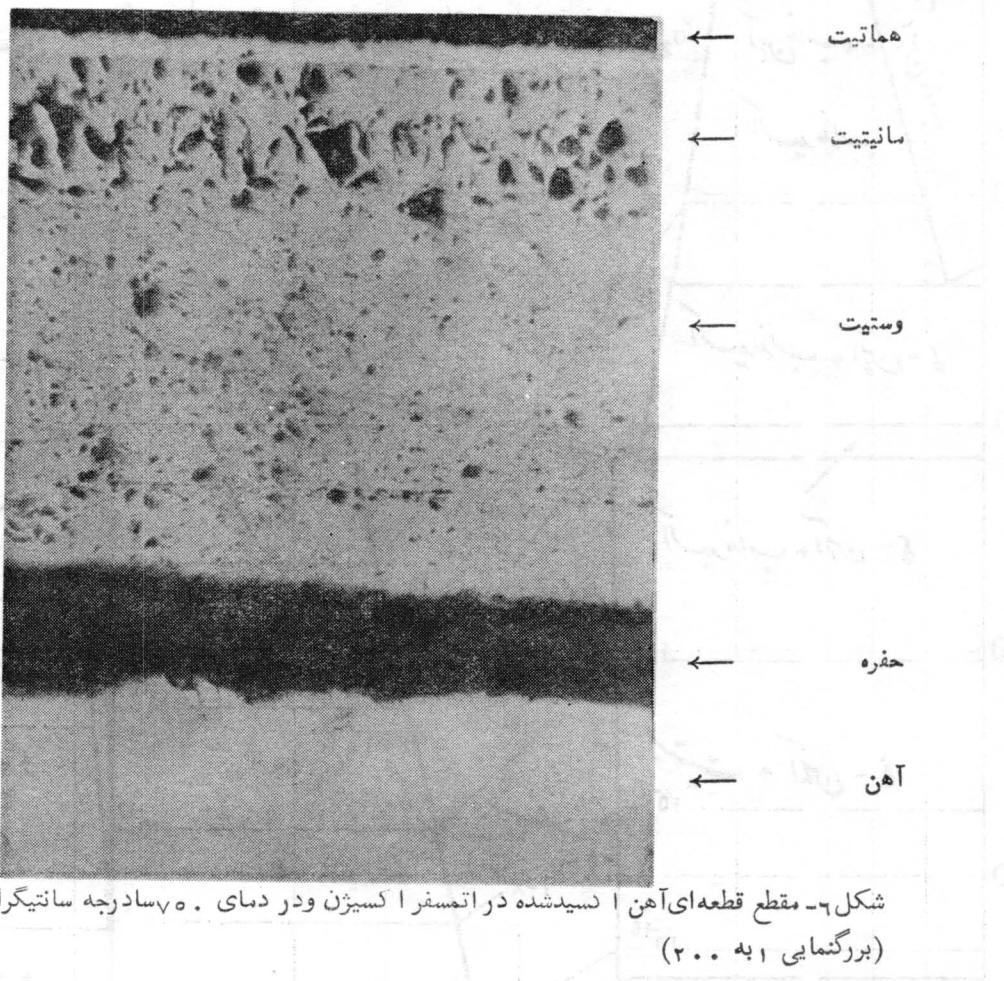
گرچه مانیتیت نیز همانند وستیت از دمای ۰۰۹ درجه سانتیگراد ببالا منطقه همگنی دارد که با افزایش دما گسترش میابد (شکل ۵ و ۷) ولی بعلت سهولت در واکنشهای ۰۱۹ و ۰۲۰ فرمول شیمیائی آن بصورت Fe_3O_4 نوشته شده است. بدین ترتیب هماتیت با حدود ۰۳ درصد و زنی اکسیژن با مانیتیت با حدود ۰۶ درصد اکسیژن وبالاخره وستیت با حدود ۰۴۳ درصد اکسیژن احیاء شده است.

شکل ۵ شمای اکسیدهای مختلف آهن که در حین احیاء تیله‌ای (Pellet) از هماتیت بامنواکسید کردن و هیدروژن در دمای ۰۰۰ درجه سانتیگراد بوجود آمده را نشان میدهد.



شکل ۵- شمای مقطع تیله‌ای (Pellet) از هماتیت در حین احیاء از سنتیت آهن

فراینداکسیداسیون آهن مشابه مکانیسم احیاء و درجه عکس میباشد. شکل ۶ مقطع قطعه‌ای آهن اکسید شده در آتمسفر اکسیژن و دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد را نشان میدهد.



شکل ۶- مقطع قطعه‌ای آهن اسیدشده در آتمسفر اکسیژن و در دمای ۷۵۰ سارجه سانتیگراد
(برگنمایی ۱ به ۲۰۰)

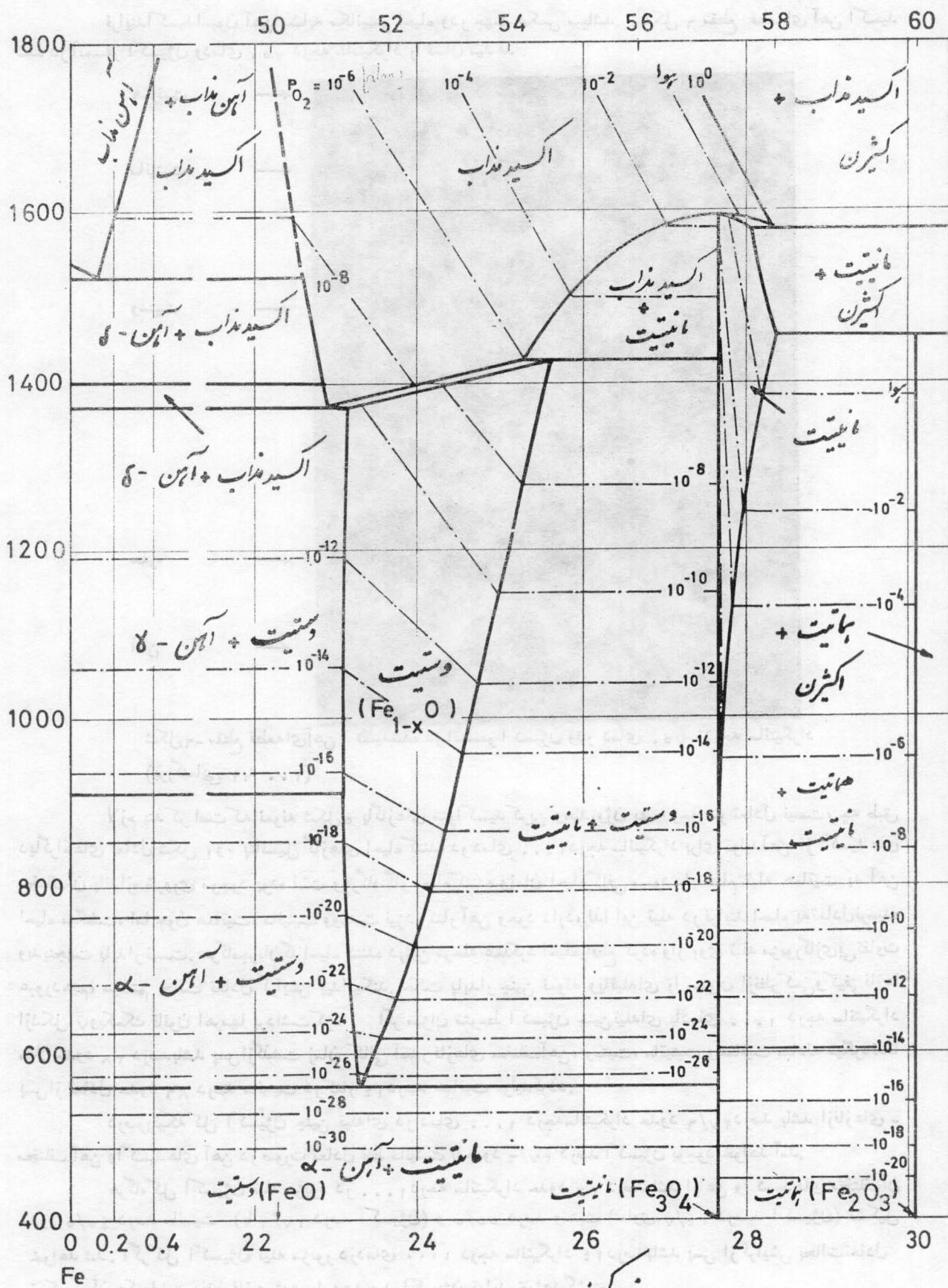
لازم بتدکر است که نمونه شکل ۶ باگاههای منواکسیدکربن و هیدروژن بهیچ وجه در تعادل نیست، چه طبق دیاگرام‌های تعادل شکل ۱ و ۲ پتانسیل گازهای احیاء کننده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد برای تولید آهن از اکسیدهای مختلف آن باندازه ضروری موجود بوده است و هرگاه گاز احیاء کننده و زمان احیاء کافی مباید بايد تمام تیله هماتیت به آهن احیاء میگشت، اما چون هماتیت، مانیتیت و وستیت نیز در کنار آهن وجود دارد، لذا این تیله در فرایند احیاء به تعادل نرسیده و بدینجهت پایدار نیست. هرگاه جریان گاز احیاء کننده در این مرحله عملکرد احیاء راقطع کرده واژ روی تیله مزبور گازی به تفاوت عبوردهیم، سیستم بحال تعادل گرایش پیدا میکند. حالت پایدار چنین نمونه ویاتیله‌ای را میتوان از نظر کمی و کیفی فازها از شکل ۷ و بکمک قانون اهرمها برداشت کرد. اگر میزان متوسط اکسیژن چنین تیله‌ای بادمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد مثلا حدود ۲۸ درصد باشد پس از گذشت زمان کافی آقدر فازهای مختلف آهن، وستیت، مانیتیت و هماتیت مبادله میگردند تا پس از تعادل حدود ۸۶ درصد مانیتیت در کنار ۴ درصد هماتیت تولید گردد.

- در صورتیکه کل اکسیژن چنین تیله‌ای در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد حدود ۲۷ درصد باشد از فازهای

مختلف آهن و اکسیدهای آهن در صورت تعادل فقط مانیتیت باحدود ۲۷ درصد اکسیژن بوجود خواهد آمد.

هرگاه کل اکسیژن تیله مزبور در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد حدود ۲۷ درصد باشد از آهن و اکسیدهای مختلف آن حدود ۵۰/۴ درصد مانیتیت (با ۲۷/۶ درصد اکسیژن) و ۵۰/۰ درصد وستیت (حاوی ۷/۴ درصد اکسیژن) تشکیل خواهد شد. اگر کل اکسیژن تیله مزبور در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد ۴۲ درصد باشد پس از گرایش بحال تعادل ترکیب آن یکنواخت و فقط فاز وستیت با ۲۴ درصد اکسیژن تولید خواهد گشت.

درصد ذوب کشیدن

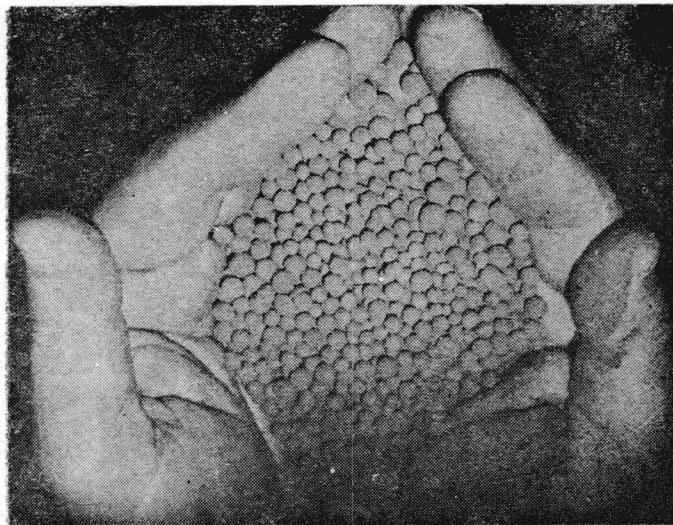


درصد ذوب کشیدن

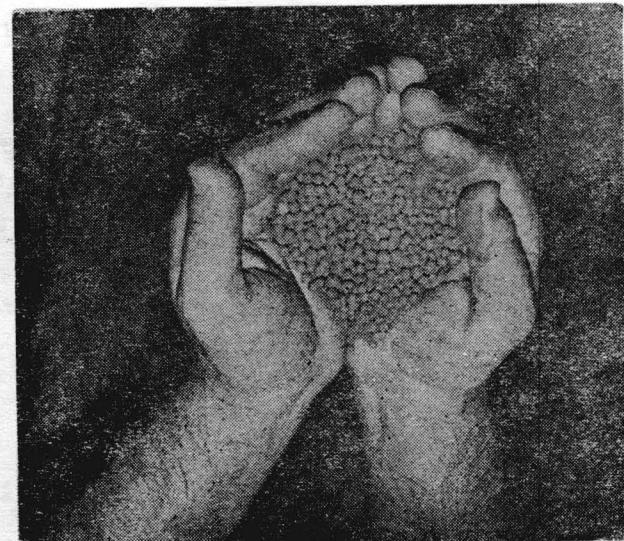
مأخذ :

شکل ۷ - دیاگرام فازهای سیستم $Fe-O$

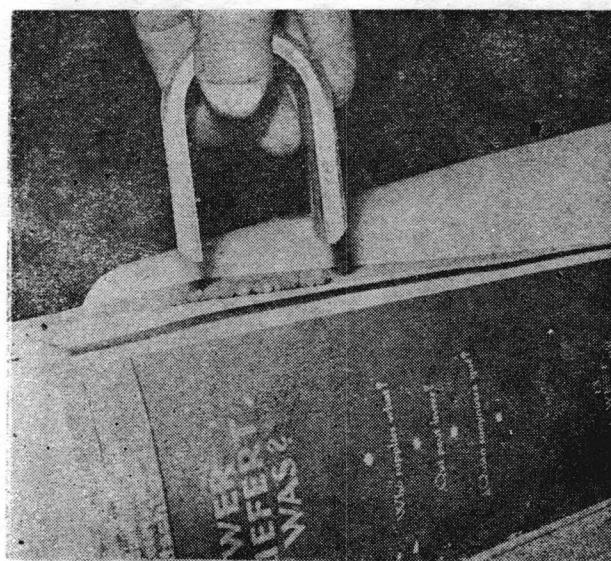
در شکل ۸ پلتهای خام و در شکل ۹ پلتهای سینتر شده از کانه های آهن باقی مشاهده میگردد . صورت ظاهر این پلتها کاملا مشابه میباشد . در شکل ۱۰ پلتهای مذکور که بوسینه گازهای حاصل از تفکیک متان احیاء گشته را نشان میدهد . از مقایسه شکل ۹ ب.و. ۱ ملاحظه میگردد که کانه هماتیت قبل از احیاء خاصیت مغناطیسی نداشت ولی پس از احیاء جذب آهن را میگردد .



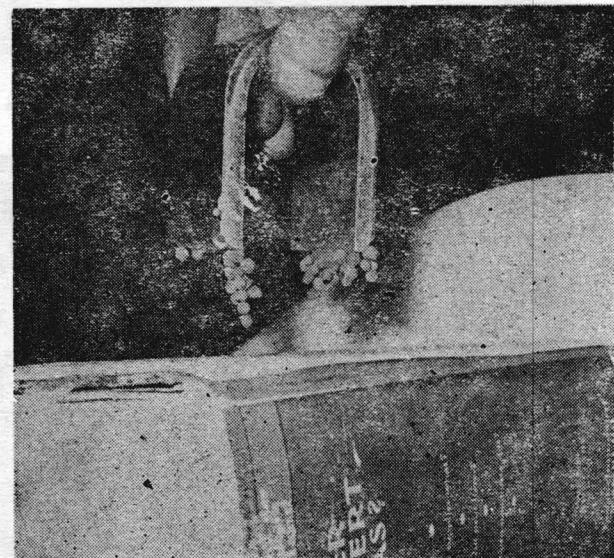
شکل ۹ الف - صورت ظاهر پلتهای سینتر شده



شکل ۸ - صورت ظاهر پلتهای خام



شکل ۱۰ - پلتهای احیاء شده از نقطه خاصیت مغناطیسی

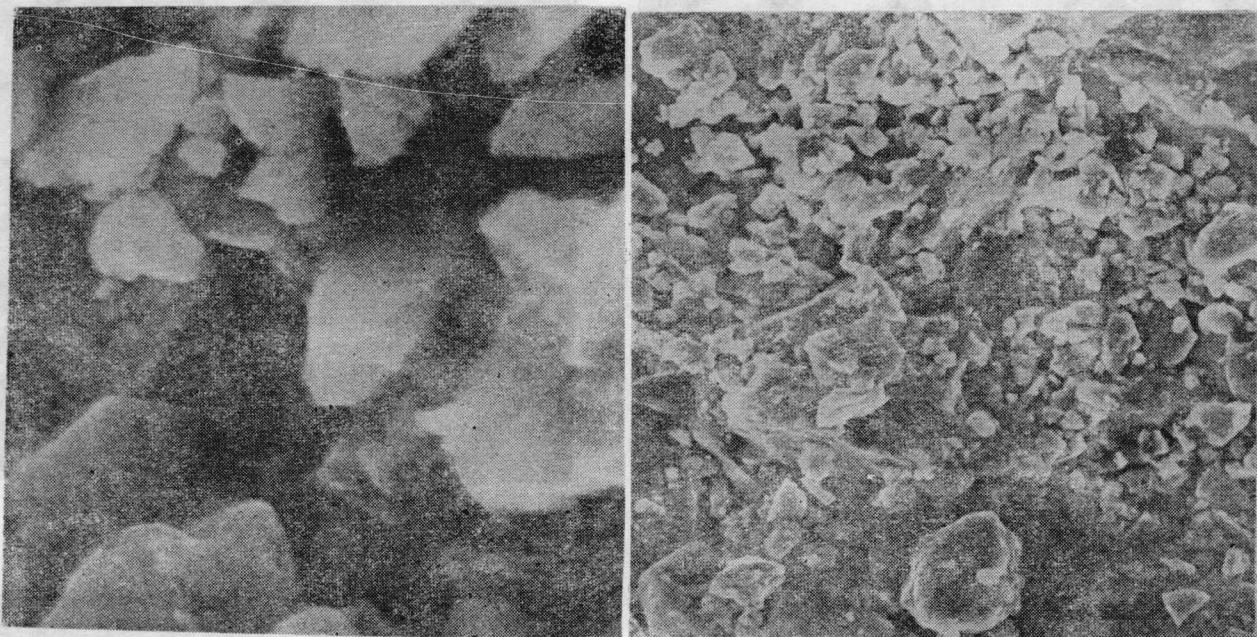


شکل ۹ ب - پلتهای سینتر شده از نقطه خاصیت مغناطیسی

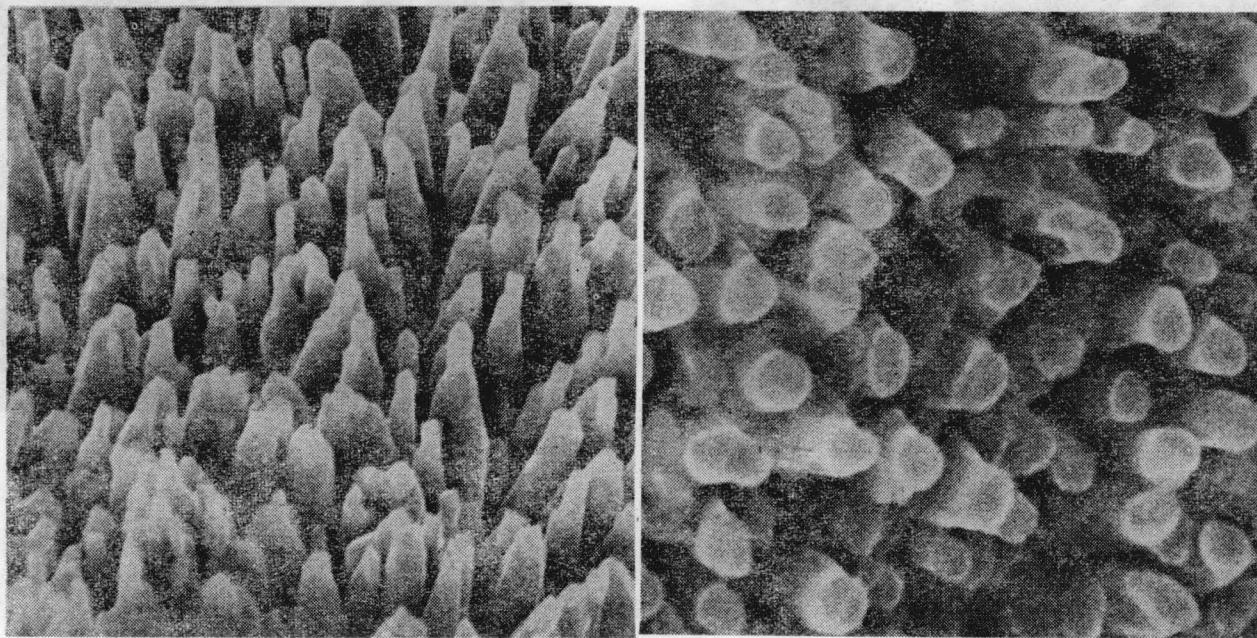
از شکل ۱۱ وضعیت قرار گرفتن ذرات کانه سیتر شده قبل از احیاء و از شکل ۱۲ بافت‌های آهن اسفنجی پس از حیاء که بوسیله میکروسکپ الکترونی رویدنی:

Scanning Electron Microscope Hitachi HHS-2R

عکس برداری شده را نشان میدهد. از شکل ۱۱ دیده میشود که ذرات کانه قبل از احیاء با عاد متفاوت بصورت مجزا در کنار یکدیگر انباسته شده، در صورتیکه پس از احیاء (شکل ۱۲)، بافتهای آهن در سطح میکروسکوپی اسفنج مانند میباشند.



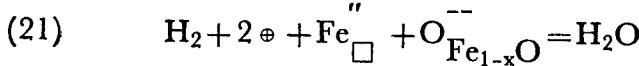
شکل ۱۱ - وضعیت قرار گرفتن ذرات کانه سیتر شده قبل از احیاء (بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ...)



شکل ۱۲ - بافتهای آهن اسفنجی پس از احیاء (بزرگنمایی ۴۰۰۰)

بررسی سرعت احیاء اکسیدهای آهن با هیدروژن

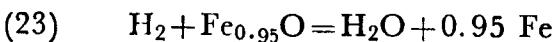
طبق قانون **Oswald** در صورت عدم شرائط ترمودینامیکی، اکسیدهای هماتیت، سانیت و سیت پشتسرهم بوجود می‌آیند. براساس تحقیقات انجام شده تابحال عملکرد احیاء وستیت در منطقه همگنی آن (Fe_{1-x}O) طبق واکنش ۱ تعیین کنند سرعت کل احیاء میباشد. عامل تعیین کننده سرعت این واکنش که میتوان آنرا در صورت حذف بخار آب از درجه یک فرض کرد، جذب شیمیائی هیدروژن در مرز فازهای هیدروژن و وستیت در سطح کانه طبق واکنش ۵ میباشد. همانطور که اشاره شد حذف اکسیژن در منطقه همگنی وستیت با مصرف دفتک الکترونها وجاهاي خالي شبکه وستیت همراه میباشد:



سرعت احیاء وستیت در منطقه همگنی آن اندازه گیری شده که از اینقرار است:

$$(22) \quad i_{\text{Fe}_{1-x}\text{O}/\text{H}_2} = k C_{\text{H}_2} = k^0 e^{-E_A/RT} C_{\text{H}_2} \\ = 1.64 \times 10^7 e^{-45700/RT} C_{\text{H}_2} [\text{Mol/Cm}^2\text{sec}]$$

اگر در کنار وستیت، سانیتیت وجود داشته باشد سرعت احیاء تقریباً ۰.۱ درصد بیشتر میباشد (شکل ۳). هرگاه در اثر عملکرد احیاء وستیت با کمترین مقدار اکسیژن ($\text{Fe}_{0.95}\text{O}$)، آهن ظاهر گردد در آن صورت نیز جذب شیمیائی هیدروژن تعیین کننده میباشد. امادراين شرایط هیدروژن بازدست دادن الکترونها در مرز فازهای هیدروژن، وستیت و آهن طبق واکنش ۶، یونیزه شده و با حذف اکسیژن وستیت ($\text{Fe}_{0.95}\text{O}$) آهن طبق واکنش ۲ تولید میگردد:



چون سرعت نفوذ الکترونها بیش از حرکت جاهای خالی آهن در شبکه وستیت و دقت الکترونها میباشد، لذا بمحض ظاهر شدن آهن و با افزایش آن در سطح کانه سرعت احیاء و یا حذف اکسیژن دائم افزایش میباشد (شکل ۱۳). در صورتیکه تمام سطح نمونه از آهن پوشیده شد در آنصورت کمیت سرعت تقریباً ثابت میماند. سرعت احیاء در این شرایط برابر است با:

$$(24) \quad i_{\text{Fe}_{0.95}\text{O}/\text{Fe}/\text{H}_2} = 1.39 \times 10^3 e^{-14700/RT} C_{\text{H}_2} [\text{Mol/Cm}^2\text{sec}]$$

در شکل ۳، تابعیت ثابت سرعت و یا ضریب مبادله اکسیژن اکسیدهای آهن با هیدروژن آورده است. مکانیسم احیاء اکسیدهای آهن بامنواکسید کردن و هیدروژن مشابه است. طبق تحقیقات انجام شده سرعت احیاء وستیت در دمای ۰...۱ درجه سانتیگراد با هیدروژن ۰.۱ برابر مونواکسید کردن کردن میباشد (مأخذه تا).

از این بررسی ترمودینامیکی وسیطیکی میتوان نتیجه گرفت که:

— دریک دمای معین با افزایش میزان هیدروژن در گاز احیاء کننده سرعت احیاء افزایش میباشد.

— دریک دمای معین با افزایش میزان هیدروژن در گاز احیاء کننده حرارت ضروری جهت احیاء بیشتر میشود.

— با افزایش دما و بیزان هیدروژن در گاز احیاء کننده میزان مصرف گاز کمتر میگردد. لازم بیاد آوری است که

عوامل مؤثر دیگری نیز وجود دارد که در سرعت احیاء، در بیزان عوامل احیاء کننده ضروری و در توان را کنترولات تولید میکند.

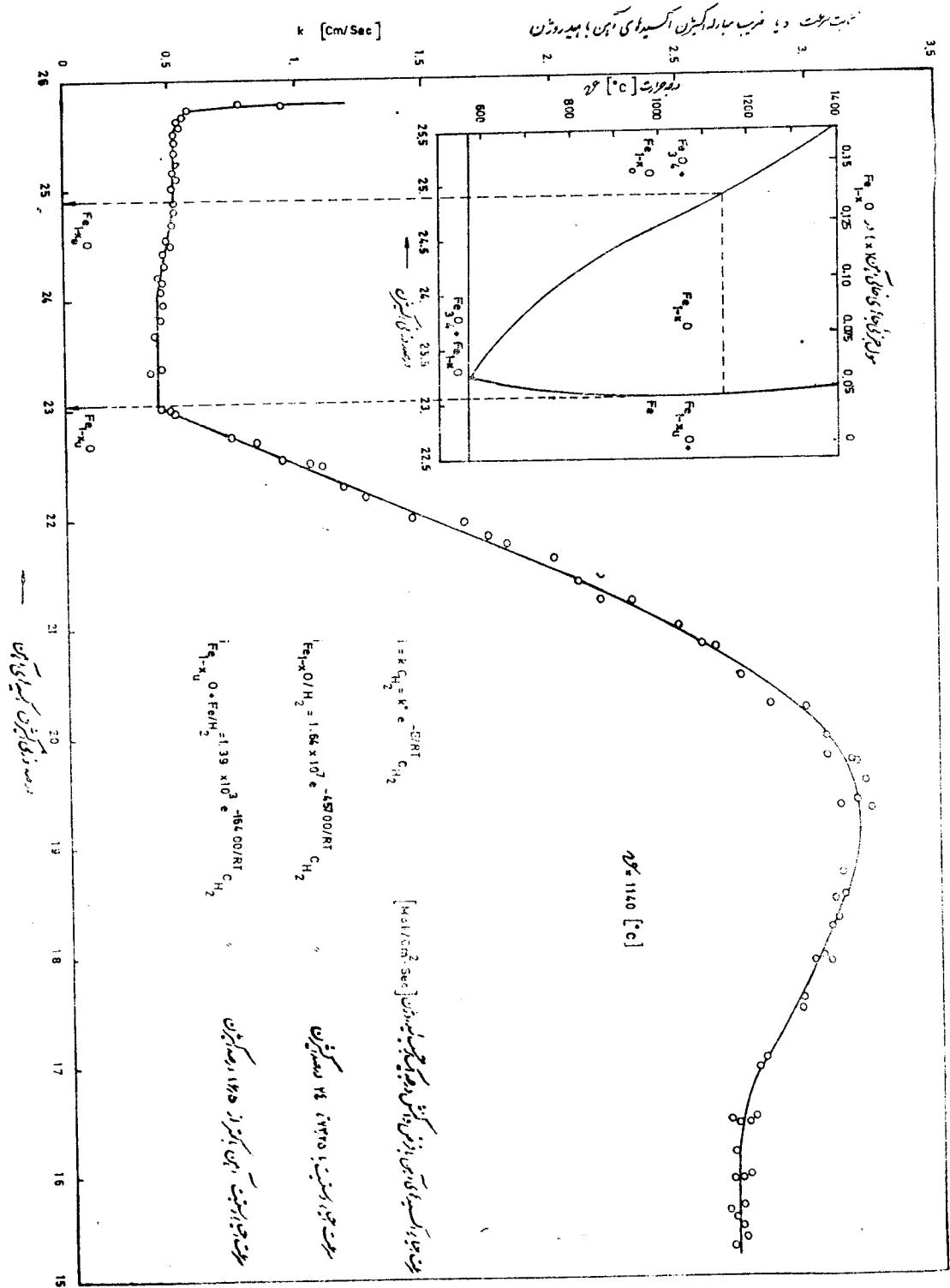
تأثیر دارند که از جمله میتوان قابلیت احیاء کانه ها، وجود کاتالیزورها، روش حذف اکسیژن کانه با گاز احیاء کننده، نوع کوره

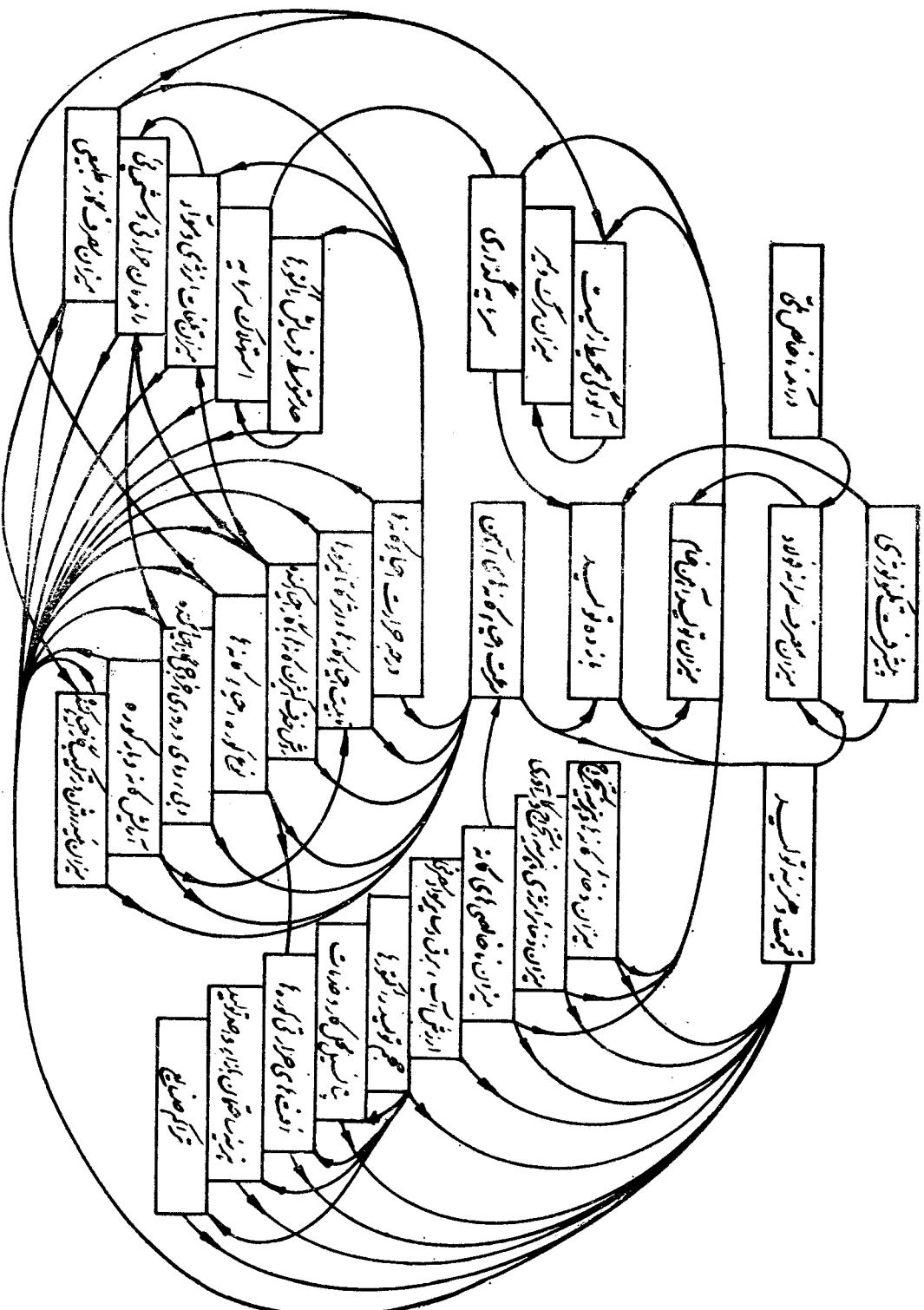
و یا راکتور احیاء، دمای ورودی و خروجی گاز احیاء کننده، آرایش کانه و بارکوره، تلفات حرارتی، درجه خلوص کانه وغیره را نام برد که از بحث درباره آنها صرفنظر میگردد. در شکل ۴، اثر متقابل بعضی از متغیرها بر یکدیگر و برمیزان تولید آهن خام آورده شده است.

براساس تغییر پارامترها که بعضی از آنها در شکل ۴ آورده است، روشهای متعددی در سطوح مختلف از طرف محققین ابداع شده است (مأخذ ۱۱). لازم بیاد آوری است که هزینه تولید آهن خام از جمله بالافرایش میزان تولید کاهاش میباشد آنچه حائز اهمیت است افزایش چشمگیر توان تولید بروشهای **Purofer**، **Midrex** و **Armco** نسبت به

مأخذ

سکل ۱۳ - یادیت یافت اکتشاف اینجا که ساختار اصلی آن را بازگشایی کرده است - ۱۳

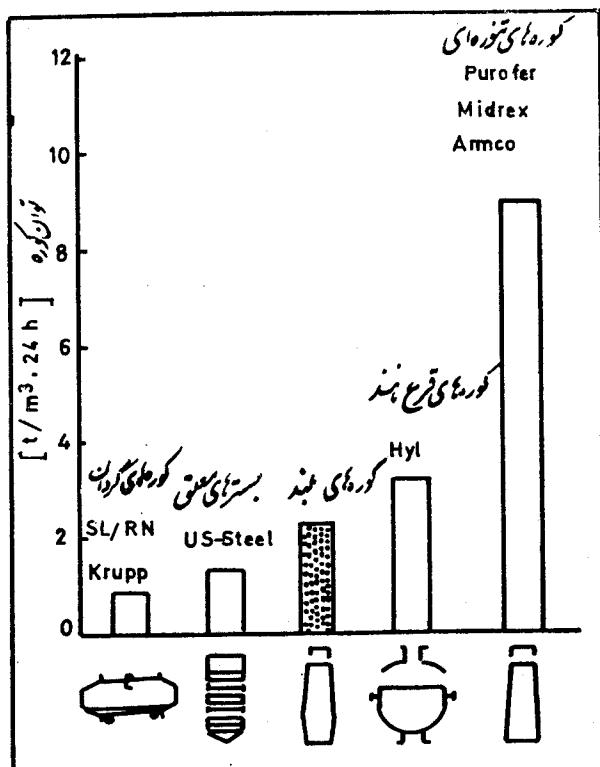




شکل ۱۴ - اثر متقابل بعضی از استیغیرها بر پیداگرجهت تولید آهن خام

کوره بتند میباشد. با در نظر گرفتن اینکه درجه حرارت احیاء در کوره بلند بمراتب از دمای احیاء در روشهای مذکور بیشتر بوده و متغیرهای تعیین کننده در سرعت احیاء از جمله روش مبادله اکسیژن کانه با گاز احیاء کننده، کانه آرائی وغیره تقریباً یکسان است، لذا فرایش چشمگیر توان راکتورهادر روشهای Midrex ، Armco و Purofer را باید در ترکیب گاز احیاء کننده غنی از هیدروژن جستجو کرد .

نظریابینکه همکنون در کشور ماذغال سنگ مرغوب ککده برای تولید آهن خام در کوره بلند کافی نبوده و ما مجبوریم برای کارخانه ذوب آهن آریامهر با تولید کم (۰.۴۰ تن در روز) مقدار معتبرابهی کک از خارج وارکنیم ولی بالعکس گاز طبیعی در کشورها بفوریافت شده و با در نظر گرفتن برتریهای که گازهای حاصل از تفکیک طبیعی نسبت به کک و گازهای آن جهت احیاء دارد لذا برای ایران در شرائط کنونی کاربرد گاز طبیعی جهت تولید آهن خام حائز اهمیت شایان توجهی است .



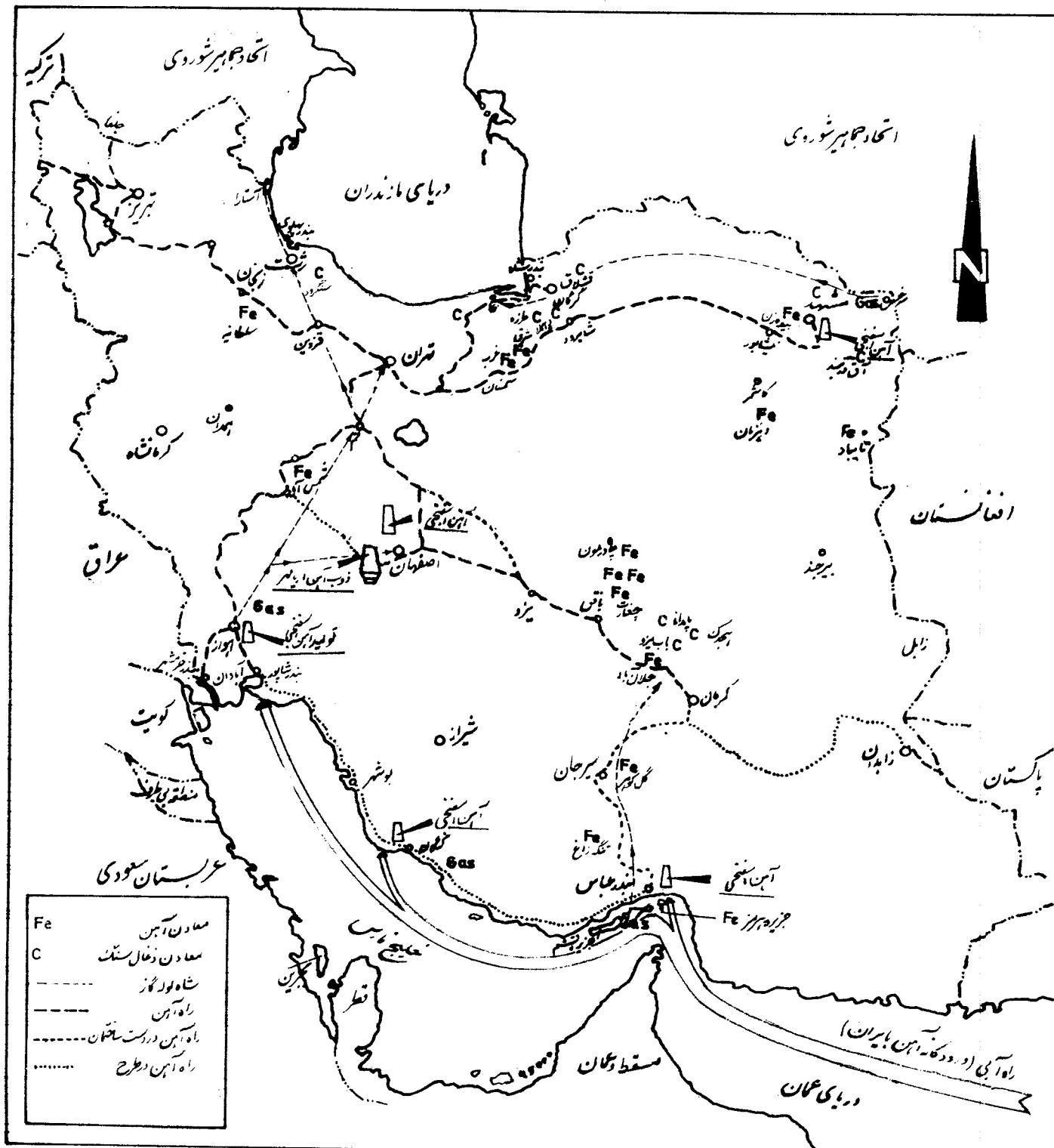
شکل ۱۵ - توان تولید ویژه آهن خام در چند روش مأخذ ۸

نگارنده از پنج سال پیش تابحال مقالات متعددی در نشریات علمی ایران نوشته (مأخذ ۱۱ تا ۱) و ضمن تشریح انواع مختلف روشهای تولید آهن خام واساس آنها بارها باین موضوع اشاره کرده که: «هرگاه ایران بخواهد از نظر اقتصادی و با دیدی درازمدت آهن خام تولید کند باید تولید آهن اسفنجی بر روشهای احیاء مستقیم با گاز طبیعی را مورد توجه خاص قرار دهد» .

ضمناًگروه مهندسی متالورژی و گداز فلزات با همکاری وزارت علوم و آموزش عالی توانست در ایران برای اولین بار در سطح آزمایشگاهی چندین روش احیاء مستقیم را پیاده کرده و قابلیت احیاء کانه های آهن ایران را از قطه نظر احیاء مستقیم مورد آزمون قرار دهد (مأخذ ۳) . قابل تذکر اینکه این تحقیقات ادامه دارد .

خوبیختانه مسئولین مملکت در سالهای اخیر بد اهمیت تولید آهن اسفنجی بر این روش احیاء مستقیم و براساس کاربرد گاز طبیعی توجه کرده و قرار داده ای را برای پیاده کردن برخی از روشهای احیاء مستقیم بسته و یا مذاکراتی را انجام داده اند . ایران در نظردارد در آیندهای نه چندان دور حدود ۵ میلیون تن فولاد در سال بر اساس احیاء مستقیم کانه های آهن با گاز طبیعی تولید کند .

هم اکنون در نزدیکی اهواز چندین واحد تولید آهن اسفنجی بروشهای مختلف احیاء مستقیم در حال پیاده شدن بوده و حتی بروزدی یکی از آنها که بروش Purofer آهن اسفنجی تولید میکند، مورد بهره برداری کامل قرار خواهد گرفت.



شکل ۱۶ - مراکز احتمالی احداث واحدهای آهن اسفنجی و معادن آهن، ذغال سنگ و گاز طبیعی مأخذ

در نظر است که بغيراز مجتمع فولاد پهلوی دراها زد شهرهای گاز خیز و با شهرهای که در مسیر خط شاهله گاز قرار دارند از جمله بندرعباس، بندر کنگان، اصفهان، مشهد و شاید آذربایجان نیز واحدهای براساس ارجحیت واحدهای آزمایشی و شاید واحدهای دیگری پیاده گردد.

در شکل ۱ معادن آهن، ذغال ستک و گاز طبیعی ایران، خط شاهله گاز طبیعی، خطوط آهن، و برآکز احتمالی جهت احداث واحدهای آهن اسننجی آورده شده است.

بدون شک تأمین نیروی انسانی متخصص، کانه آهن مرغوب، آب و برق، آهن قراصه ضروری جهت پالایش آهن اسننجی در فرایند فولادسازی^۲ وغیره در ایران مشکل بنظر میرسد.

هرگاه پروژه صنایع تولید آهن اسننجی و تولید فولاد پیاده گردد این صنعت مادر عمده ترین رکن صنایع ایران را تشکیل خواهد داد و ایران از نظر تولید آهن اسننجی در دنیا مقام اول را بدست خواهد آورد.

نتیجه گیری

افزایش بی رویه کک در دوده گذشته مهندسین متالورژی را و دار به کشف روش‌های جدید جهت تولید آهن اسننجی بر اساس کار برد گاز طبیعی کرده است.

نظریابنکه هنوز تمام ویژگیهای متداول ترین روش‌های تولید آهن اسننجی منتشر نشده لذا انتخاب مناسبت‌ریس روشها بادر نظر پارامترهای متعدد و اثر متقابل آنها بر یکدیگر علی اصول مشکل و متضمن مطالعات تئوریک و علمی زیادی از طرف مهندسین متالورژی میباشد (شکل ۱).

بنظر میرسد که علت انتخاب روش‌های HYL، Purofer، Midrex... جهت تولید آهن اسننجی در ایران با آگاهی از مشکلات ناشی از کمبود کادر فنی و متخصص، عدم آگاهی دقیق از میزان مصرف انرژی، آب، برق، مرغوبیت آهن اسننجی، هزینه تولید و مشکلات ناشی از روند کار در مرحله اول آزمایشی میباشد که برای برنامه‌های عظیم ایران در زمینه تولید آهن اسننجی ضروری بنظر میرسد.

با توجه به بحران مواد نفتخی در آینده‌ای نه چندان دور در سطح بین‌المللی، برنامه‌ریزی‌های دراز مدت برای ساخت مادر زمینه تولید آهن اسننجی براساس گاز طبیعی شایان مطالعه بیشتری می‌باشد.

بدینوسیله از شورای توسعه و تشویق پژوهش‌های علمی کشور بخاطر تأسین هزینه این طرح و تشویق پژوهشگران، سپاسگزاری می‌شود.

از مرکز بین‌المللی تحقیقات پیوشهای و بیوفیزیک وابسته به دانشکده علوم دانشگاه تهران بهجهت درسترس قراردادن میکروسکوپ‌های الکترونیک آن مؤسسه تشکر می‌شود.

از مسئولین مجتمع فولاد پهلوی بمناسبت همکاری پیدربین با گروه مهندسی متالورژی و گداز فلزات دانشکده فنی نیز قدردانی می‌گردد.

فهرست مأخذ

1- I. Barin, O.Knacke u.N. Towhidi , Berechnung Thermodynamischer Funktionen der Reaktions Gleichgewichte , RWTH Aachen 1970

2- I. Barin, O. Knacke u. D. Neuschütz , Thermodynamische Gleichgewichte bei der Erzeugung von Reduktionsgasen , Verein Deutscher Eisenhüttenleute , (BFI) Bericht No. 166 1971.

3- L. Von Bogdandy, H. j. Engell , Die Reduktion von Eisenerz , Springer Verlag Düsseldorf 1967

۴- با استفاده از:

- 4.1- L. Darken, R. Gurry , Physical Chemistry of Metals , Mc Graw-Hill Book Company, INC 1953
- 4.2- A . Muan, E. F. Osborn , Phase Equilibrium among Oxides in Steelmaking, Amer . Iron and - Stell Inst. , 1965.
- 5- N. Towhidi , Kinetik des Sauerstoffabbaus und elektrische Leitfähigkeit von Wüstite innerhalb seines Homogenitätsbereiches , Dissertation RWTH Aachen 1969
- 6- D. Neuschütz, N. Towhidi , kinetik des Sauerstoffabbaus aus Wüstite innerhalb seines Homogenitätsbereiches und bei beginnender Eisenausscheidung, Archive für das Eisenhüttenwesen 41 (1970) s. 421-426
- 7- D. Neuschütz, N. Towhidi , Die elektrische Leitfähigkeit von Wüstite , Archive für Eisenhüttenwesen 41 (1970) s. 303-307
- ۸- از متن کنفرانس L. Von Bogdandy در دانشگاه فنی راینیش وستفالن آخن (آلمان فدرال) ۱۹۷۰ .
۹- با استفاده از مقاله دکتر محمد رضا امین :
- Der Aufbau der Stahl Industrie in Iran International Iron and Steel Institute IISI/G/808/0
- و اطلاعات شخصی آقای دکتر محمد بصیر دانشیار دانشکده فنی دانشگاه تهران
- ۱۰- ناصر توحیدی
روند تکاملی روشاهای متالورژی (تولید فولاد)
نشریه دانشکده فنی شماره ۲۵ (اسفند ۱۳۵۱) صفحه ۲۲۴ تا ۲۳۶
- ۱۱- ناصر توحیدی
دیدی کوتاه بروشهای تولید آهن خام و چدن
نشریه دانشکده فنی شماره ۲۷ (دی ۱۳۵۲) صفحه ۲۲۹ تا ۲۸۲
- ۱۲- ناصر توحیدی
فیزیکوشیمی و تئوری احیاء کانه های آهن با گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی
نشریه دانشکده فنی شماره ۲۷ (دیماه ۱۳۵۲) صفحه ۷۷۸ تا ۱۱۷
- ۱۳- ناصر توحیدی
بررسی خواص کانه های آهن ایران از نقطه نظر قابلیت احیاء مستقیم، پژوهش مهندسی ، شماره ۱۰ (شهریور ۱۳۵۴) صفحه ۹ تا ۴۹
- ۱۴- ناصر توحیدی
تولید آهن اسفنجی از احیاء مستقیم کانه های آهن با گازهای حاصل از تفکیک گاز طبیعی
نشریه دانشکده فنی شماره ۳۴ (فروردین ۱۳۵۵) صفحه ۲۰۳۵ تا ۱۵۸
- ۱۵- ناصر توحیدی
بحran انرژی در جهان و رابطه آن با تکنولوژی تولید آهن خام در آینده
نشریه دانشکده فنی شماره آینده

**Die Technologie der Eisenschwammproduktion mit
Direktreduktionsverfahren**

von

N. Towhidi

Es gibt hunderte Methoden für Roheisenproduktion im Labor, im halbtechnischem und technischem Maßstab.

Diese sind aufgrund der Fortschritte in der Technik, der lokalen Rohstoffe und der Energie Vorkommen, dem Kapitalinvestition, dem produktionsbedarf u.s.w. entwickelt worden.

Das Ziel aller dieser Methoden ist das trennen von Sauerstoff der Eisenoxide und deren Raffination. Unter allen dieser Methoden ist die Produktion des Roheisens im Hochofen sehr stark entwickelt worden, so dass keine andere Methode mit dieser konkurrieren kann.

Die starke Entwicklung der Hochofen ist wahrscheinlich auf das Vorkommen der Steinkohle in Industrieländern zurückzuführen.

In den letzten Jahren ist auf Grund der Kokspreissteigerung im Gegensatz zu Erdgas und die Vorteile des Eisenschwamm gegenüber Schrotteisen für Stahlproduktion, die Eisenschwammproduktion auf Erdgasbasis in den Vordergrund getreten.

Das Vergleich dieser Methoden unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren ist sehr schwierig.

In diesem Artikel ist versucht worden einige wichtige Parameter die auf der Reduktionsgeschwindigkeit Einfluss haben, zu erwähnen damit Ingenieure feststellen können welche Möglichkeiten Sie zur Änderung der Methoden besitzen.