

\* مقاله کوتاه \*

## تکنولوژی احیای مستقیم کانه‌های آهن به روشی نو

ناصر توحیدی\*

### چکیده

برای احیای مستقیم کانه‌های آهن ده‌ها روش هریک با ویژگی منحصر بخود وجود دارد. متداولترین روش تجاری براساس مصرف گاز طبیعی، روش میدرکس است که در تمام جهان به طور گسترده‌ای در صنعت مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. روش نوین اچ. وای. ال سه از جهاتی با روش میدرکس شباهت و از دیدگاههایی نسبت بدان برتری دارد، ولی به دلایل فنی درجه فلزی آهن اسفنجی تولید شده در این روش پائین است. روش پیشنهادی احیای مستقیم کانه‌های آهن طوری طراحی شده است که نه تنها مزیت‌های هر دو روش را داراست بلکه درجه فلزی آهن اسفنجی آن نیز بالاتر است.

### مقدمه

اکسیدهای آهن بصورت هماتیت ( $Fe_2O_3$ )، ماگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) و وستیت ( $Fe_{1-x}O$ ) وجود داشته و پایدار هستند. تاکنون صدها روش برای تولید آهن از این اکسیدها ابداع شده است که فهرست تعدادی از آنها که در صنعت کاربرد داشته‌اند در مراجع [۱] تا [۶] ذکر گردیده است.

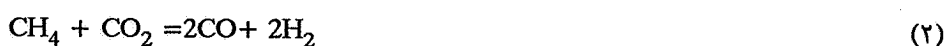
---

\* استاد انستیتوی متالورژی و مواد دانشکده فنی - دانشگاه تهران

هدف کلی این روشها جدا کردن اکسیژن از اکسیدهای آهن است که با توجه به روند زیر تحقق می‌یابد:

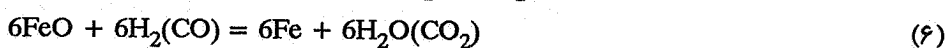
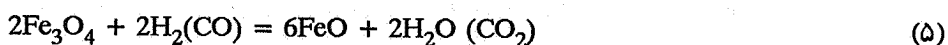
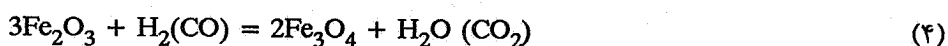


برای احیای اکسیدهای آهن می‌توان از زغال، گاز طبیعی و انرژی الکتریکی استفاده کرد. در روش ابداعی، عامل احیا کننده و تأمین کننده حرارت گاز طبیعی است. این گاز با بیش از ۸۵ درصد متان به ضرورت‌هایی با بخار آب و گاز کربنیک ترکیب شده، به هیدروژن و اکسید کربن تبدیل می‌شود:

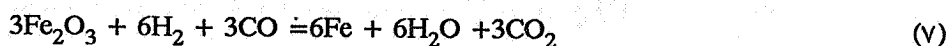


البته با تغییر نسبت گاز کربنیک و بخار آب در مخلوط گاز طبیعی، ترکیب گاز حاصل نیز تغییر خواهد کرد.

هرگاه احیای اکسیدهای آهن با هیدروژن و اکسید کربن در زیر دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد صورت گیرد، واکنشهای (۴) تا (۶) (همچنین (۲۰) تا (۲۲)) انجام خواهد شد:



اگر گاز احیا کننده مخلوطی از هیدروژن و اکسید کربن باشد، واکنشهای احیا براساس موازنه مولی قابل تنظیم است. مثلاً هرگاه نسبت هیدروژن به اکسید کربن در گاز دوه یک باشد واکنش به ترتیب زیر خواهد بود:



در شرایط خاص اکسید کربن و متان می‌توانند بر طبق واکنشهای (۸) و (۹) به کربن تبدیل شوند.

کربن تولید شده با آهن اسفنجی ترکیب شده (واکنشهای (۱۰) تا (۱۲))، سمانتت تولید می‌کند:



آخرین و مشکوکترین مرحله، احیای وستیت است و لذا باید پتانسیل احیاکنندگی گاز احیاکننده مورد نیاز حداکثر باشد.

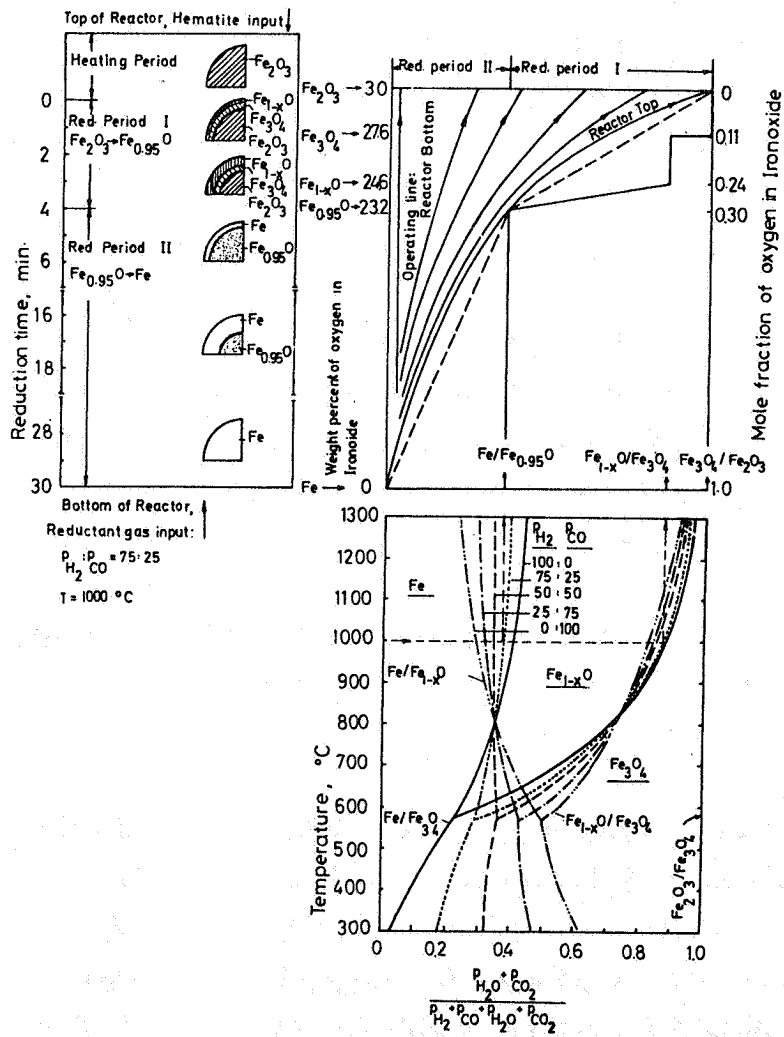
برای احیای اکسیدها همواره باید ترکیب گاز احیاکننده از ترکیب گاز تعادلی غنی تر باشد. نمودار تعادلی سیستم آهن - اکسیژن - کربن - هیدروژن در شکل ۱ نشان داده شده است. از روی این شکل حالت پایدار آهن و اکسیدهای آن در درجه حرارت‌های مختلف و نیز ترکیب گاز احیاکننده به دست می‌آید. به عنوان مثال در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد احیای هماتیت برحسب ترکیب گاز احیاکننده مرکب از هیدروژن و اکسیدکربن (به نسبت ۷۵ به ۲۵) تا حد اعلام شده ممکن است:

-	اگر گاز احیاکننده بین	۰ تا ۱۸	درصد هیدروژن	بعلاوه بخار آب	داشته باشد تا حد	ماگنتیت،
-	" " " "	۱۸ تا ۶۳	" " " "	" " " "	" " " "	وستیت،
-	" " " "	۶۳ تا ۱۰۰	" " " "	" " " "	" " " "	آهن

توضیح اینکه تولید آهن از کلیه اکسیدهای آن با گازی حاوی ۶۳ درصد هیدروژن بعلاوه اکسید کربن در این درجه حرارت ممکن است، ولی چون پتانسیل احیاکنندگی گاز از خط تعادلی دور نیست، زمان احیا زیاد خواهد بود. به عبارت دیگر اگر ترکیب گاز احیاکننده به اندازه کافی غنی نباشد مقداری وستیت احیا نشده از کوره خارج می‌شود. برعکس هرچه گاز احیاکننده از هیدروژن و اکسیدکربن غنی تر باشد، حذف اکسیژن در مرحله نهایی احیا از وستیت به دلایل سینتیکی سریعتر انجام می‌شود. زیرا تحت شرایط خاصی، سرعت احیا با هیدروژن و اکسیدکربن از روابط زیر تبعیت می‌کند:

$$r = k (P_{H_2} - P_{H_2}^*) \quad (15)$$

$$r' = k' (P_{CO} - P_{CO}^*) \quad (16)$$



شکل ۱- نمودار تعادلی سیستم آهن-اکسیژن-کربن-هیدروژن

در روابط فوق  $P_{CO}$  و  $P_{H_2}$  فشار جزئی گاز احیاکننده در عمل و  $P_{CO}^*$  و  $P_{H_2}^*$  فشار جزئی آن در تعادل با اکسیدهاست. بدیهی است هرچه اختلاف فشار جزئی بین گاز احیاکننده در عمل و در تعادل با اکسیدها بیشتر باشد سرعت احیا بیشتر و در مقابل نیاز به گاز احیاکننده که باید به کوره فرستاده شود هم بیشتر می‌گردد.

در واحدهای تولید آهن، هدف همواره مصرف گاز (انرژی) کمتر و سرعت تولید بالاتر است. به این ترتیب تولید افزایش و هزینه آن کاهش می‌یابد. هدف از ارائه طرح حاضر برای احیای کانه‌های آهن، بالا بردن درجه احیای اکسیدهای آهن (R) و در نتیجه درجه فلزی آهن اسفنجی تولید شده (M) با تعاریف:

$$R \triangleq \frac{O_{Fe_2O_3} - O_{Fe_xO_y}}{O_{Fe_2O_3}} \times 100 = \frac{\text{اکسیژن اکسید آهن} - \text{اکسیژن هماتیت}}{\text{اکسیژن هماتیت}} \times 100 \quad (17)$$

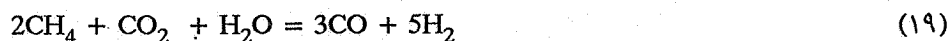
$$M \triangleq \frac{Fe \text{ (فلزی)}}{Fe \text{ (کل)}} \times 100 = \frac{\text{وزن آهن فلزی در آهن اسفنجی}}{\text{وزن آهن کل در آهن اسفنجی}} \times 100 \quad (18)$$

ضمن ثابت نگهداشتن مقدار گاز احیاکننده مصرفی و نیز سایر شرایط احیا، و یا ثابت نگهداشتن درجه احیا و سایر شرایط و کاهش مصرف گاز مورد نظر است.

#### روشهای متداول احیای مستقیم کانه‌های آهن

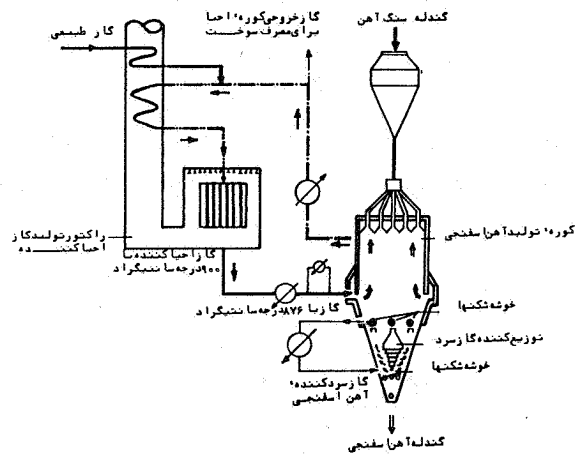
در کلیه روشهای مداومی که برای تولید آهن از سنگ آنها بوسیله گاز طبیعی ابداع شده‌اند، گاز احیاکننده همواره در خلاف جهت سقوط بار سنگ آهن و یا گندله در کوره جریان می‌یابد. طرح احیای مستقیم کانه‌های آهن، براساس روش میدرکس و اچ. وای. ال سه که از جمله مرغوبترین روشهای تولید آهن اسفنجی به کمک گاز طبیعی است، بنا شده است. گردش گاز در این روشها در شکل‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود.

در روش میدرکس چون گاز احیاکننده پس از خروج از کوره احیا در کنار گاز کربنیک و بخار آب مقداری اکسید کربن و هیدروژن نیز دارد، مقداری از آن بعنوان سوخت و باقیمانده برای اکسایش جزئی متان مصرف می‌شود:

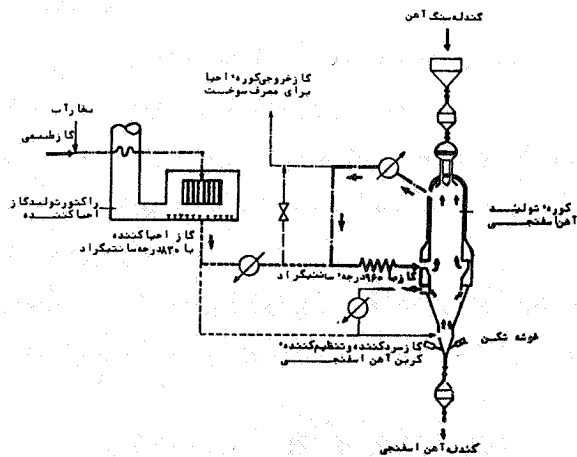


در روش اچ. وای. ال سه، قسمتی از گاز خروجی به عنوان سوخت مصرف و باقیمانده آن با گاز

احیا کننده مخلوط و مجدداً برای احیای اکسیدهای آهن به کوره برگردانده می شود. برتری استفاده از گاز خروجی کوره احیا به روش اچ. وای. ال سه نسبت به روش میدرکس در این است که آن قسمت از



شکل ۲- طرح نحوه تولید آهن اسفنجی و نیز گردش گاز به روش میدرکس



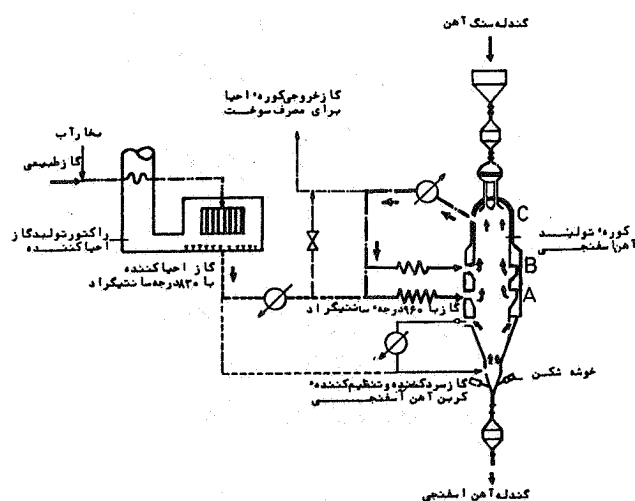
شکل ۳- طرح نحوه تولید آهن اسفنجی و نیز گردش گاز به روش اچ. وای. ال سه

گاز خروجی کوره احیا که بصورت چرخه‌ای در کوره احیا جریان دارد، باعث مسمومیت کاتالیزورهای راکتور تولید کننده گاز نمی‌شود. اما عیب روش مذکور در این است که قابلیت احیاکنندگی گاز تولیدی برای احیا و در نتیجه سرعت احیا کاهش می‌یابد و این باعث کاهش درجه احیای اکسیدهای آهن در زمان توقف در کوره می‌شود.

### روش جدید احیای اکسیدهای آهن با گاز طبیعی

در روش جدید نیز همانند روش اچ. وای. ال. سه، قسمتی از گاز خروجی برای تأمین سوخت و قسمت دیگر به صورت چرخه‌ای در کوره احیا جریان دارد، با این تفاوت که بخش اخیر در شکم کوره دمیده می‌شود.

طرح روش جدید تولید آهن با گاز طبیعی و نیز نحوه گردش گاز در شکل ۴ نشان داده شده است.

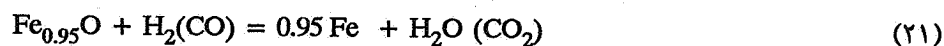
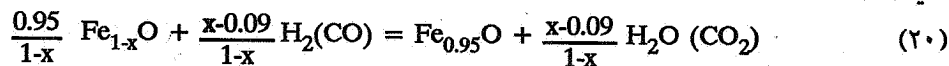


شکل ۴- طرح نحوه تولید آهن اسفنجی و نیز گردش گاز به روش جدید

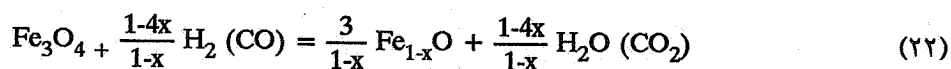
در این روش گاز احیا کننده تولید شده در راکتور تولید کننده گاز احیایی بدون اینکه با گازی مخلوط و رقیق شود در سطح A، پایین ترین منطقه احیا در کوره تزریق می‌شود و قسمتی از گاز خروجی کوره احیا در شکم کوره و در ارتفاع B از محل خروج آهن اسفنجی تزریق می‌شود. بدین ترتیب

انتظار می رود روش ابداعی از امتیازات زیر نسبت به دو روش فوق الذکر برخوردار باشد:

- ۱- قسمتی از گاز خروجی که بصورت چرخه‌ای در کل فرایند جاری است نه باعث مسمومیت کاتالیزورهای راکتور تولید کننده گاز می شود و نه قابلیت احیای گاز احیا کننده را کاهش می دهد.
- ۲- گاز احیا کننده با گاز خروجی کوره احیا رقیق نشده و همواره با قابلیت احیا کننده گی بالا در کوره تزریق می شود، لذا می تواند در فاصله AB از کوره وستیت باقیمانده را سهلتر و سریعتر احیا کند:



- ۳- گاز احیا کننده تمیز در حین صعود در کوره احیا در فاصله AB وستیت را احیا می کند. این گاز در ارتفاع B از کوره با گاز خروجی تزریق شده در کوره رقیق شده ولی گاز تولیدی هنوز می تواند هماتیت را طبق واکنش (۴) و ماگنتیت را طبق واکنشهای (۵) و (۲۲) در فاصله BC از کوره احیا کند:



#### نتیجه گیری

ویژگیهای شیوه پیشنهادی تولید آهن اسفنجی بشرح زیر است:

- ۱- قسمتی از گاز خروجی کوره احیا پس از شستشو، تنظیم درجه حرارت و فشار در فاصله بین محل ورود گاز احیا کننده تمیز و محل خروج گاز از کوره تزریق و بصورت چرخه‌ای بطور دائم در کوره گردش می کند.
- ۲- از گاز دهانه کوره پس از شستشو و تنظیم درجه حرارت و فشار و تزریق در شکم کوره (بین دو نقطه A و B) برای احیای هماتیت و ماگنتیت استفاده می شود.
- ۳- استفاده مجدد از گاز دهانه کوره به این شیوه از نظر مصرف انرژی نیز برتریهایی دارد، زیرا حرارت لازم برای گرم کردن آن کمتر از حرارتی است که برای گرم کردن آن جهت تزریق در ته کوره لازم است و این کاهش مصرف انرژی را موجب می شود.
- ۴- استفاده از گاز دهانه خروجی پس از شستشو و بالا بردن درجه حرارت و تنظیم فشار و تزریق



## تکنولوژی احیای مستقیم کانه‌های ...

۱۰۳

آن در شکم کوره به این جهت ارجحیت دارد که قدرت احیاکنندگی و سرعت احیای گاز احیاکننده تزریقی در کوره را مانند روش اچ. وای. ال سه نمی‌کاهد و به این ترتیب درجه فلز شدن گندله سنگ آهن بالاتر می‌رود.

## مراجع

- ۱- ناصر توحیدی، سیر تکاملی تولید آهن و فولاد در ایران و جهان، انتشارات امیرکبیر، تهران، ۱۳۶۰.
- ۲- ناصر توحیدی، احیای مستقیم، جلد اول، تئوری تولید آهن اسفنجی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۷.
- ۳- ناصر توحیدی، احیای مستقیم، جلد دوم، تکنولوژی احیای مستقیم، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۸.
- ۴- ناصر توحیدی، تولید چدن و فولاد از آهن اسفنجی، انتشارات مجتمع فولاد اهواز، انتشارات مجتمع فولاد اهواز با همکاری انتشارات انقلاب اسلامی، ۱۳۶۹.

5. McGannon, H.E., *The Making, Shaping and Treating of Steel*, 10 th Edition, United States Steel, 1986.

6. R. Steffen, "Direct Reduction & Smelting Reduction-An Overview", *Steel Research*, 60 (1989), 3+4 , PP. 96-103.