

روش های تولید فولاد در ایران (قسمت دوم احیای مستقیم)

معرفی فرآیند احیای مستقیم در تولید فولاد  
پایگاه خبری تحلیل فولاد مرکز آهن

اصفهان - خیابان امام خمینی - چهار راه شریف - مجتمع الماس - طبقه ۵ - واحد ۵۱۵ | مرکز آهن

## روش های تولید فولاد در ایران (قسمت دوم احیای مستقیم)



## معرفی فرآیند احیای مستقیم در تولید فولاد

فرآیند احیای مستقیم در طی چند دهه اخیر، یکی از فرایندهای بسیار مهم در جهت تولید آهن آلات به شمار می رود. تقریباً ۷۵ درصد از کل آهن اسفنجی تولیدی در جهان با دو روش میدرکس و اچ وای ال تولید می شود. امروزه بیشتر تولید فولاد در دنیا اختصاص به دو روش کوره بلند- کنورتور و احیای مستقیم - ذوب الکتریکی دارد که روش دوم به طور قابل توجهی در حال توسعه و پیشرفت می باشد. فرایند تولید فولاد بر پایه احیای مستقیم - ذوب الکتریکی شامل دو مرحله تولید آهن اسفنجی و سپس تبدیل آن به فولاد در کوره قوس الکتریکی می باشد. در روش احیای مستقیم، ذرات اکسیدی آهن در تماس با گازهای احیاکننده شامل  $H_2$ ،  $CO$  و  $CH_4$  در دمای ۷۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد احیا شده و به آهن اسفنجی تبدیل می گردند. آهن اسفنجی معمولاً دارای بیش از ۹۰ درصد آهن به صورت فلزی می باشد که میل زیادی به ترکیب شدن با اکسیژن دارد.

صنایع مبتنی بر تولید آهن خام و فولاد از جمله صنایع جامع و زیربنایی کشورها هستند. با توجه به مشکلات فرآیندها و روش های سنتی تولید آهن و همچنین در جهت بهینه سازی فرآیندهای صنعتی، در چند دهه اخیر روش های نوین در این صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این روش ها، فرآیندهای احیای مستقیم است. در فرآیند احیا مستقیم با زغال سنگ در طی یک مجموعه واکنش های شیمیایی ناهمگن جامد-گاز احیا می شود. در طی این واکنش ها، اکسیدهای آهن در طی چند مرحله از هماتیت به مگنتیت، از مگنتیت به وستیت و در نهایت از وستیت به آهن احیا می شوند.

اگرچه تولید فولاد را می توان به ۴۰۰۰ سال پیش و به عصر آهن مربوط دانست اما دوران مدرن صنعت فولادسازی در سال های پایانی دهه ۱۸۵۰ میلادی آغاز شد و از آن زمان به بعد، فولاد به بخش مهمی از اقتصاد صنعتی جهان تبدیل شده است. امروزه تولید آهن و فولاد، یکی از اساسی ترین پایه های فعالیت های اقتصادی و صنعتی هر کشوری را تشکیل می دهد. تعداد زیادی از صنایع پایه از قبیل حمل و نقل، ساختمان، ساخت ماشین آلات، معدن و دیگر صنایع مرتبط با تولید و انتقال انرژی به صنعت فولاد وابسته هستند. از این رو، بهبود و توسعه این صنعت از اهمیت ویژه ای در زمینه توسعه اقتصادی در کشورها برخوردار است.



به منظور تهیه آهن، باید ناخالصی هایی مانند اکسیژن را توسط احیای شیمیایی از سنگ آهن حذف کرد. روش های متفاوتی برای تولید آهن وجود دارد. عمده این تولید توسط فرآیند کوره بلند انجام می شود. در کوره بلند سنگ آهن همراه با کک به عنوان عامل احیا کننده پس از طی فرآیندهایی وارد کوره شده و به صورت آهن مذاب کربن دارد خارج می شود که در نهایت این آهن مذاب در کانورتر به فولاد تبدیل می گردد.

برای سال های متمادی کوره بلند یکی از مهم ترین و کارآمدترین روش ها در زمینه تولید آهن بوده و در حال حاضر نیز بیش از ۹۰ درصد آهن مورد نیاز در جهان را تامین می کند. فرآیند تولید آهن توسط کوره بلند از نظر نرخ تولید؛ بازدهی بالایی دارد اما نیازمند مواد خام با کیفیت است. آهن در کوره بلند توسط احتراق کک تولید می شود و با توجه به کاهش منابع زغال سنگ های کک شو، قیمت کک در حال افزایش است. همچنین مراحل آماده سازی مواد اولیه این فرآیند مانند کلوخه سازی، کک سازی و سینترینگ هزینه بالایی را بر صنعت فولاد تحمیل می کنند.

در نتیجه می توان گفت کوره بلند به دلیل مشکلات اقتصادی و زیست محیطی ناشی از بکارگیری کک و سینترینگ در صنعت فولاد آینده نامشخصی خواهد داشت. بنابراین با توجه به وجود منابع عظیم زغال سنگ کک نشو در جهان، هزینه های بالای مراحل آماده سازی و اهمیت روز افزون مسائل زیست محیطی گرایش به سمت روش های جدید و جایگزین در این زمینه روز به روز بیشتر می شود. یکی از این روش ها، تولید آهن توسط فرآیند احیا مستقیم است. در این گونه فرآیندها، تعدادی از مراحل آماده سازی حذف شده و در نتیجه هزینه ها و آلودگی های مربوط به کل فرآیند به صورت قابل توجهی کاهش می یابد.

فرآیند احیا مستقیم یکی از روش های نوین برای تولید آهن است که در آن بدون استفاده از فرآیند کک سازی و یا حتی در برخی موارد بدون کلوخه سازی؛ آهن تولید می شود. احیای مستقیم اکسیدهای آهن توسط کربن در دهه های اخیر به صورت گسترده ای بررسی شده است. هزینه های سرمایه گذاری، راه اندازی و نگه داری فرآیند احیا مستقیم در مقایسه با سایر روش های موجود بسیار کمتر بوده و می توان از آن در واحدهای کوچک فولادسازی با توجیه اقتصادی مناسب استفاده کرد. همچنین این روش برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه که با کمبود منابع زغال سنگ کک شود و با کیفیت روبرو هستند گزینه بسیار مناسبی است.



### تقسیم بندی فرآیند احیای مستقیم

در بیش از سه دهه اخیر، فناوری جدیدی به نام فرآیند احیا مستقیم برای احیای سنگ آهن به فلز آهن با استفاده از زغال سنگ کک نشو یا گاز طبیعی طراحی شده و به طور گسترده ای توسعه پیدا کرده است. مسائل اقتصادی و اثرات زیست محیطی زمینه و انگیزه لازم را برای تحقیق و مطالعه پیرامون این فرآیند به وجود آورده اند. فرآیند احیا مستقیم در دماهای پایین تر از دمای نقطه ذوب، اکسیژن موجود در سنگ آهن را حذف می کند و ساختار آن را به صورت متخلخل اسفنجی شکل در می آورد. به همین دلیل این محصول با نام آهن اسفنجی شناخته می

شود و معمولاً حاوی ۹۲ الی ۹۶ درصد آهن خالص است. از آهن اسفنجی می توان برای مثال به عنوان ماده خام برای تولید فولاد در کوره قوس الکتریکی استفاده کرد.

فرآیند احیا مستقیم براساس نوع احیاکننده مورد استفاده، به طور کلی به دو گروه تقسیم بندی می شود.

فرآیندهای احیا مستقیم بر پایه زغال سنگ که در آن ها از یک احیا کننده کربنی ، معمولاً زغال سنگ استفاده می شود.

فرآیندهای احیا مستقیم بر پایه گاز، که در آن ها از احیا کننده گازی استفاده می شود.

انتخاب یکی از دو روش به محل قرارگیری کارخانه تولیدکننده و منابع موجود در دسترس بستگی دارد. در فرآیندهای نوع اول معمولاً زغال سنگ کک نشو به عنوان عامل احیاکننده به کار می رود. از جمله فناوری هایی که از این روش برای احیا استفاده می کنند می توان به فرآیندهایی بر پایه کوره دوار مانند SL/RN و فرآیندهایی بر پایه کوره بستر دوار نظیر فستمت اشاره کرد. عدم نیاز به استفاده از زغال سنگ کک شو و با کیفیت، هزینه های پایین راه اندازی و نگهداری، دمای پایین عملکرد نسبت به کوره بلند و صرفه جویی در انرژی از جمله مزیت های این روش ها هستند. در فرآیندهای نوع دوم، معمولاً از گاز طبیعی برای جداسازی اکسیژن از اکسیدهای آهن استفاده می شود.

این فرآیندها در مناطقی که منابع گاز طبیعی با قیمت مناسبی وجود دارد نسبت به فرآیندهای بر پایه زغال سنگ ترجیح داده می شوند. همچنین آلودگی ناشی از آن ها کمتر است. از جمله روش های رایجی که در آن ها از احیاکننده گازی استفاده می شود می توان به فرآیندهای میدرکس و اچ وای ال اشاره کرد. جدول زیر تعدادی از کشورهایی که بیشترین میزان تولید آهن را براساس روش های احیا مستقیم داشته اند نشان می دهد.

میزان تولید در سال ۲۰۱۷ (میلیون تن)	نام کشور
۲۲/۳۴	هند
۲۰/۵۵	ایران
۶/۹۹	روسیه
۶/۰۱	مکزیک
۵/۷۴	عربستان سعودی

امروزه بیش از ۸ درصد آهن مورد نیاز در جهان از طریق فرآیند احیای مستقیم به کمک زغال سنگ به دست می آید. با این حال تحقیق و بررسی در این زمینه جهت افزایش بازده، کاهش مصرف انرژی، بهبود کیفیت محصول و در کل ارتقای فرآیند احیا همچنان به صورت گسترده ای ادامه دارد.

یکی از پر طرف دارترین روش های احیای مستقیم که در شرکت فولاد مبارکه اصفهان نیز استفاده می شود، روش میدرکس است. مواد اولیه مورد استفاده در این روش، عموماً گندله اکسیدی می باشد. با توجه به اینکه مرحله تولید گندله یک مرحله هزینه بر است و از طرفی آلودگی محیط زیست را هم به دنبال دارد، می توان در صورت دسترسی به کلوخه سنگ آهن با ترکیب شیمیایی مناسب (عیار آهن بالای ۶۵ درصد و فسفر و گوگرد حداقل) آن را به تنهایی یا همراه گندله اکسیدی به عنوان شارژ کوره های میدرکس استفاده نمود و در بخشی از عملیات از مرحله گندله سازی صرف نظر کرد.

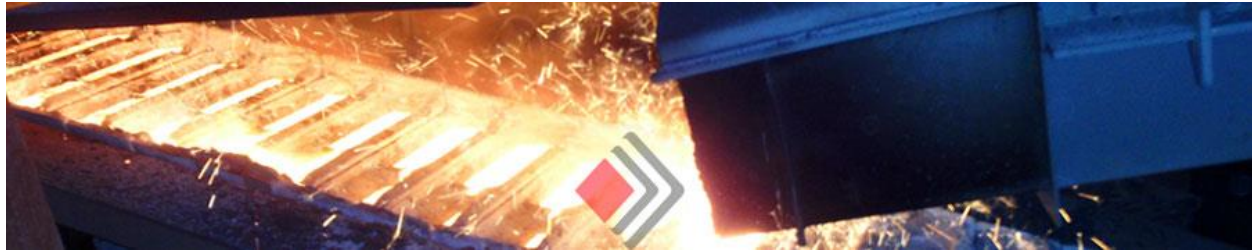
با توجه به مطالعات انجام شده، کشورهای هندوستان؛ آفریقای جنوبی، برزیل و استرالیا از تولیدکنندگان اصلی و مهم کلوخه سنگ آهن در جهان با مشخصات مناسب برای استفاده در روش میدرکس به شمار می روند. در ایران نیز معادنی با مقدار ذخیره مناسب یافت می شوند که قادرند کلوخه سنگ آهن مورد نیاز شرکت فولاد مبارکه را تامین نمایند.

طی چند دهه گذشته صنعت آهن و فولاد توجه زیادی را به توسعه روش های جدید در احیا مستقیم کانه آهن به منظور تولید فولاد معطوف داشته است. هم اکنون در فولادسازی متداول، این روش ها را فرآیندهای احیا



مستقیم) به اختصار (DR) و محصول این روش ها را آهن اسفنجی (به اختصار DRI) می نامند. در قرون وسطی، فرآیندهای فولادسازی شامل احیای کانه های آهن در دماهای زیر نقطه ذوب آهن، همچنین زیر نقطه ذوب ناخالصی های موجود در کانه بود. در این فرآیندها در مرحله احیا، ابتدا اکسیژنی که به صورت ترکیب شیمیایی است، حذف می گردد سپس در یک مرحله حرارت دهی مجدد و کار مکانیکی و فشار دادن، ناخالصی ها جدا می شدند و ذرات آهن مجزا، به همدیگر جوش می خوردند و یک قطعه فلز را به وجود می آوردند.

در سال های بعد با توسعه و بهبود روش هایی مثل کوره بلند و توانایی احیای کانه های آهن در مقادیر زیاد، روش فولادسازی به تدریج تغییر کرد. طی سال های ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۸ روش جدیدی از فولادسازی گسترش پیدا کرد. در این روش برخلاف روش های سنتی، فولادسازی با شارژ قراضه در کوره های قوس الکتریکی انجام می شد. بعدها مشاهده شد که در کوره های قوس، با شارژ مستقیم DRI به جای قراضه می توان راندمان تولید را بالا برد و محصول بیشتری به دست آورد. با جایگزینی قراضه توسط DRI، کیفیت فولاد تولیدی نیز بهبود پیدا کرد.



طی سی سال گذشته پیشرفت های زیادی در زمینه تکنولوژی DR صورت گرفته است که نمونه ای از آن کاهش سوخت مورد نیاز می باشد. همچنین تعدادی از کارخانه های DR در نزدیکی معادن پر عیار و منابع سوخت کم قیمت واقع شده اند. تحت این شرایط قیمت DRI تولیدی افت نموده است. به همین خاطر استفاده از DRI اقتصادی شده و مورد توجه قرار گرفته است. در توسعه احیا مستقیم که مورد توجه صنایع امروزی است، بیشتر از صد روش مختلف به وجود آمده است اما فقط امکان استفاده تعدادی از آن ها در صنعت به شکل اقتصادی وجود دارد. بعضی از آن ها برای استفاده از مواد خام یا سوخت های مخصوص طراحی شده اند که از نظر اقتصادی در دسترس نیستند.

هم اکنون بعضی از فرآیندهایی که در شرایطی اقتصادی هستند در حال کار می باشند زیرا آن ها برای مواد خام و سوخت موجود در محل راه اندازیشان مناسب هستند. در ایران هم به واسطه وجود منابع گازی و ذخائر سنگ معدن مناسب، روش های گازی و به خصوص روش میدرکس مورد توجه قرار گرفته است. یکی از متداول ترین

شیوه های احیا مستقیم سنگ های آهن با گاز طبیعی در سطح جهان روش میدرکس می باشد. در ایران نیز در مجتمع فولاد اهواز سه مدول و در مجتمع فولاد مبارکه پنج مدول احیا مستقیم به این روش وجود دارد.

در روش میدرکس گندله های پخته تولیدی از سنگ آهن و یا کلوخه سنگ آهن توسط گازهای حاصل از اکسایش جزئی گاز طبیعی، در کوره احیا در حالت جامد و به طور مداوم احیا می گردند. کوره احیا در روش میدرکس به شکل استوانه طراحی شده است. به این منظور مواد اولیه خوراک به بالای کوره منتقل و در محفظه قیف ماندی تخلیه می گردند. در این مخزن در مسیر انتقال خوراک به کوره، گاز خنثی دائماً جریان دارد و به این وسیله از نشت گاز احیاکننده سمی و قابل احتراق از کوره به خارج جلوگیری می گردد.

در فرآیند میدرکس مواد خام آهن دار می تواند گندله، نرمه کانه بریکت شده و کلوخه آهن باشد. نوع ماده استفاده شده می تواند روی شرایط انجام کار تاثیر داشته باشد. بعضی از کلوخه ها در حین احیا شکفته و خرد می شوند و نرمه زیادی تولید می کنند که باعث کاهش بازده عملیات شده و بازیافت کل را کم می کند. کارخانه هایی که از ۱۰۰ درصد گندله مرغوب استفاده می کنند مقدار نرمه تولیدیشان کمتر از ۲ درصد است و کارخانه هایی که از کلوخه استفاده می نمایند حدود ۱۵ درصد نرمه تولید می کنند. با این وجود به دلیل وجود بعضی مزیت ها ترجیح داده می شود قسمتی از بار کوره میدرکس کلوخه آهن باشد.