

"کنگره تولید آهن، ۱۹ تا ۲۱ مهر ماه ۱۳۵۹، ذوب آهن، اصفهان، ایران"

## نقد و بررسی روشهای احیاء مستقیم برای تولید آهن و فولاد در ایران

دکتر سید خطیب الاسلام صدر نژاد

دبیر شورای صنایع متالورژی

ستاد هماهنگی توسعه و استقلال صنایع ایران

وزارت صنایع و معادن

### چکیده

لزوم استفاده از منابع انرژی و سنگ آهن به منظور تولید هر چه بیشتر آهن و فولاد مورد تحلیل قرار گرفته، بر ضرورت استفاده از روش سنتی کوره بلند - کنورتر و روشهای مدرن احیاء مستقیم - ذوب الکتریکی تایید و تاکید فراوان رفته است. ضمن یادآوری لزوم در دست گرفتن ابتکار طراحی و برنامه‌ریزی برای افزایش تولیدات آهن کشور توسط متخصصین و محققین ایرانی و حفظ تکنولوژی و تجهیزات موجود و توسعه و تکامل صنایع فولاد سازی کشور، مختصری از خصوصیات مهم روشهای احیاء مستقیم و وجوه اشتراک و اختلاف آنها ذکر گردیده است. نقاط قوت و ضعف روشهای بکار گرفته شده در ایران مورد نقد و بررسی قرار گرفته و نتایج تازه ترین تحقیقات علمی و آزمایشگاهی بر کاربرد آهن اسفنجی برای تهیه فولاد در کوره های الکتریکی مختصراً" باز گو شده است.

### مقدمه

با توجه به نیاز فوق العاده کشور به مواد اولیه فلزی علی الخصوص آهن و فولاد، استفاده از تمام روشها و امکانات موجود برای تولید هر چه بیشتر مواد اولیه مصرفی صنایع داخلی بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در حالی که کشور ما در سال به حدود ۶ میلیون تن آهن، چدن و فولاد نیاز دارد، چگونه می‌تواند به استقلال اقتصادی، فرهنگی و سیاسی نائل آید در حالی که کل تولید آهن و فولاد کشور در

حال حاضر کمتر از یک میلیون تن در سال بوده و اکثر واحدهای تولیدی داخلی اعم از صنایع مونتاژ و یا مادر، مواد خام آهنی خود را از خارج تهیه می‌نمایند. لازم به یاد آوری است که واردات آهن، چدن و فولاد در سال ۱۳۵۶ حدود ۴/۷ میلیون تن و در سه ماهه اول ۱۳۵۷ حدود ۹۰۰ هزار تن بوده است.<sup>۱</sup> یکی از مهمترین اقلام این واردات ورق فولاد بوده که با توسعه صنایع فولادسازی به سهولت می‌توان به تولید آن در داخل کشور پرداخت.

با توجه به وفور ذخایر آهنی غنی در کشور<sup>۲</sup> و وجود منابع وسیع انرژی و نیروی انسانی، کلیه امکانات لازم برای بکار انداختن و توسعه صنایع آهن و فولاد در کشور فراهم بوده و توسعه و تکامل تکنولوژی استخراج و تصفیه آهن توسط کلیه روشهایی که با شرایط کشور وفق می‌دهند، بیش از هر زمان دیگر لازم و بلکه واجب به نظر می‌رسد. تولید مواد اولیه آهنی در داخل کشور چه از روش سنتی تهیه آهن و فولاد یعنی کوره بلند و کنورتر و چه از روش احیاء مستقیم و ذوب الکتریکی کمکی است به خودکفایی صنعتی و نیل به استقلال اقتصادی، فرهنگی و سیاسی کشور.

محصولات روشهای احیاء مستقیم که به صورت آهن اسفنجی به بازار عرضه می‌گردند تقریباً قابل استفاده در تمام روشهای تولید آهن و فولاد بوده و می‌توانند در بعضی موارد حتی تا بیش از ۵۰٪ جایگزین آهن خام و قراضه گردند. امکان استفاده از آهن اسفنجی در کوره‌های الکتریکی تصفیه فولاد توسط بسیاری از محققین بررسی شده و استفاده موفقیت آمیز از این مواد تا حدود صد در صد در کوره های قوس الکتریکی گزارش شده است.<sup>۳</sup> به علت سهولت استفاده از این مواد علی‌الخصوص در کارگاههای کوچک ذوب و ریخته‌گری که در کشور ما بسیار مرسوم و متداول می‌باشند و عدم نیاز به سرمایه‌گذاری های وسیع به میزانی که در روش سنتی تولید آهن و فولاد لازم است، استفاده از روشهای احیاء مستقیم برای تهیه مواد خام بسیار عاقلانه و ضروری به نظر می‌رسد.

روش فولاد سازی سنتی، شامل کوره بلند و کنورتر، برای تولید آهن و فولاد در مقیاسهای بسیار بزرگ مناسب و اقتصادی می‌باشد. تنها یک کوره بلند که بتواند ۷۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تن آهن خام در روز تولید نماید، سرمایه‌گذاری عظیمی حدود ۷۰ میلیون دلار (در سال ۱۹۷۶) و برابر آن برای احداث کوره‌های کک سازی و سایر تجهیزات نیاز دارد.<sup>۴</sup> چنین سرمایه‌گذاری بزرگی را تنها می‌توان برای تولید بسیار زیاد کوره بلند توجیه نمود. در صورتی که کارخانه‌های کوچک فولاد سازی که با واحدهای احیاء مستقیم به تولید آهن اسفنجی پرداخته و سپس آنرا تبدیل به فولاد می‌نمایند، ممکن است با ظرفیت ۱۰۰۰۰۰ تن و یا کمتر با مخارجی به همان نسبت کمتر نیز تاسیس شوند.

در کشور پهناوری مانند ایران که معادن متعدد آهن و زغال آن با کیفیتهای مختلف و دور از هم قرار گرفته‌اند، ایجاد واحدهای بزرگ و سنتی تهیه آهن و فولاد که بتواند از نظر اقتصادی با سایر روشها رقابت نماید مستلزم ایجاد یک سیستم بسیار مجهز حمل و نقل برای اتصال معادن سنگ آهن و معادن زغال سنگ به قطبها و مجتمع‌های صنعتی می‌باشد. با توجه به شرایط خاص جغرافیایی و کوهستانی بودن کشور ایجاد خطوط آهنی که بتواند معادن کشور را که در مناطقی مانند بافق، بندرعباس، کرمان، اراک، کاشان، مشهد، طبس، سمنان<sup>۵</sup> و گیلان توزیع شده‌اند به مجتمع‌های صنعتی

کشور وصل نماید، با امکانات فنی موجود در کوتاه مدت میسر نمی باشد. نیاز کمتر روش احیاء مستقیم به سیستم حمل و نقل و امکان پراکنده ساختن واحدهای کوچک در نقاط مختلف کشور و امکان طراحی آنها بر اساس ترکیب شیمیایی و کیفیت سنگ آهن مناطق مختلف از مزایای استفاده از این روشها محسوب می گردد.

با توجه به وفور منابع گاز طبیعی در کشور و قطع صدور آن به کشورهای خارج، توسعه روش احیاء گازی سبب امکان استفاده بیشتر از منابع گاز طبیعی شده و کشور را در جهت استفاده از منابعی که قبلاً بصورت خام صادر می شده است، کمک خواهد نمود. در عین حال به منظور استفاده از سایر منابع انرژی مانند زغال سنگ و سوختهای مایع و جلوگیری از وابسته شدن صنایع سنگین کشور منحصراً به منابع گاز طبیعی، لازم است در طرحهای جدید نسبت به افزایش تولید آهن خام از طریق کوره بلند و همچنین امکان استفاده از سوختهای جامد و مایع در روشهای احیاء مستقیم بکار گرفته شده در کشور نیز توجه کافی مبذول گردد. به دلیل وجود ذخایر فراوان زغال سنگ چه آنها که تا کنون شناخته شده و چه آنها که ناشناس باقی مانده و لزوم توسعه کلیه روشهای ممکن برای تولید آهن و فولاد، توسعه روشهای سنتی و احداث کوره های بلند جدید به منظور افزایش تولید آهن خام و فولاد تا حداکثر ظرفیت ممکن توصیه می گردد. علی الخصوص که پس از چندین سال فعالیت، مجتمع ذوب آهن اصفهان اکنون تجهیزات و نیروی انسانی لازم برای ادامه کار و احداث کوره های بلند جدید را دارا می باشد. در اینجا ضمن تاکید بر لزوم توسعه روشهای تهیه آهن و فولاد از تمام طرق ممکنه، بعضی از دلایل لزوم استفاده از روشهای احیاء مستقیم به قرار زیر خلاصه می گردند:

الف: نیاز مبرم مملکت به مواد اولیه آهنی اعم از فولادهای ساده و آلیاژی.

ب: وجود معادن نسبتاً غنی مگنتیت دارای حدود ۶۰ درصد آهن<sup>۱</sup>.

ج: امکان توسعه واحدهای احیاء مستقیم همراه با کوره های قوس الکتریکی تصفیه فولاد با سرمایه گذاری کم و تکنیک نسبتاً ساده این واحدها که امکان ساختن آنها را در کشور ممکن می سازد.

د: مزایای استفاده از گاز طبیعی بجای فروش آن بصورت ماده خام.

ه: سهولت استفاده از آهن اسفنجی در کارگاههای کوچک ذوب و امکان بسط این نوع کارگاهها.

و: امکان استفاده از آهن اسفنجی در کوره های فولادسازی بعنوان جانشین قراضه و آهن خام.

ز: دشواریهای توسعه سیستم حمل و نقل داخلی.

## روشهای احیاء مستقیم آهن

در خلال چند سال گذشته، روش احیاء مستقیم که در آن اکسیژن بدون ذوب سنگ از آهن خارج می گردد توسعه یافته و به عنوان یکی از مهمترین روشهای تهیه آهن مورد استقبال صنایع فولاد سازی قرار گرفته است. در روش کوره بلند، سنگ آهن ضمن حرکت تدریجی به طرف اجاق کوره، توسط

گازهای احیائی که به طرف بالا صعود می‌نمایند گرم شده و در درجه حرارت ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد در اجاق کوره ذوب می‌گردد. در آنجا بار مذاب به دو بخش تقسیم می‌شود: سرباره مذاب شامل ترکیبات اکسیدی مانند اکسیدهای کلسیم، سیلیسیم، آلومینیوم، منگنز و آهن که روی آهن خام قرار گرفته و عناصر احیاء شده‌ای مانند کربن، منگنز، سیلیسیم، گوگرد و فسفر که در آهن خام مذاب حل شده‌اند. آهن خام کوره بلند هنگام خروج از کوره دارای ۹۰ تا ۹۵ درصد آهن و ۳/۵ تا ۴/۳ درصد کربن بوده و برای تصفیه در یک کوره فولاد سازی یعنی جایی که ناخالصی‌ها و عناصر ناخواسته تا بدست آوردن کیفیت لازم از آن خارج می‌گردند، آماده می‌شود.

در روش احیاء مستقیم سعی بر آن است که قبل از ذوب، اکسیژن سنگ آهن تقریباً بطور کامل خارج گردد. با توجه به این حقیقت که آهن اسفنجی حاصل دارای مقداری از مواد سنگی *Gangue* و همچنین سایر ناخالصی‌ها می‌باشد، سنگ معدن مورد استفاده در این روش باید سنگ معدنی مرغوب بوده و دارای مقادیر کم فسفر و گوگرد باشد. بعلاوه بعلت استفاده از نیروی الکتریسیته در کوره الکتریکی ذوب، برق ارزان نیز مورد نیاز می‌باشد. در تمام روشهای احیاء مستقیم، تبدیل سنگ آهن به آهن اسفنجی با زدودن اکسیژن از اکسیدهای آهن صورت می‌گیرد. این اکسیدها که در سنگ معدن قرار دارند با جریان گاز احیائی مانند مخلوط هیدروژن و منو اکسید کربن و یا کربن جامد واکنش داده و از سنگ آهن بدون ذوب شدن خارج می‌شوند.

در فاصله سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۵ که تولید جهانی فولاد از ۱۹۰ میلیون تن به ۶۵۰ میلیون تن در سال افزایش یافت، حدود ۱۰۰ روش احیاء مستقیم توسط تولید کنندگان آهن و فولاد مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت که بیش از ۱۰ تای آنها از آزمایشهای مقدماتی در سطح *Pilot Plant* موفق بیرون آمدند. تا کنون مقالات علمی متعددی برای تحلیل مراحل تکامل، بکارگیری و مزایای این روشها به چاپ رسیده است<sup>۵،۶،۷</sup>

در این روشها معمولاً احیاء مستقیم سنگ آهن یا توسط جریانی از یک گاز احیائی و یا توسط تماس سنگ معدن با کربن جامد صورت می‌پذیرد. گاز احیائی مورد استفاده در غالب پروسسها مخلوطی از هیدروژن و منو اکسید کربن می‌باشد که از تغییر فرم گاز طبیعی توسط بخار آب یا هوا در مجاورت یک کاتالیزور بدست می‌آید. این گاز ممکن است توسط واکنش زغال و بخار آب یا هوا نیز تولید گردد. در سالهای اخیر مطالعات فراوانی برای تولید گاز احیائی از سوختهای مایع و جامد صورت گرفته و در استفاده از گازهای باطری‌های کک سازی، کوره‌های بلند و کوره‌های الکتریکی تولید کننده آهن مذاب پیشرفتهای موفقیت آمیزی حاصل گردیده است. خصوصیات سوختهایی که ممکن است در احیاء مستقیم آهن مورد استفاده قرار گیرند توسط جمعی از محققین مورد بررسی قرار گرفته است<sup>۷،۸</sup>.

اکثر پروسسهای احیاء مستقیم شامل احیاء گازی سنگ آهن اگلومره شده در درجه حرارتی حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد یا کمتر می‌باشد. در اینگونه روشها سنگ آهن در یک و یا چند محفظه توسط جریان گازی احیاء گرم شده و احیاء می‌گردد. محفظه‌های مورد استفاده دارای انواع گوناگونی مانند

محفظه ساکن Retorte، تنوره Shaft و یا محفظه سیال Fluidized Bed می‌باشند. در بیشتر روشهای احیاء جامد، مخلوطی از زغال سنگ و سنگ آهک یا دلومیت همراه با سنگ معدن تغلیظ شده به داخل محفظه شیب دار دوازی هدایت می‌شود. درجه حرارت محفظه توسط یک سری جت‌های هوا که در امتداد محفظه نصب شده‌اند در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد تثبیت می‌گردد. مشخصات اصلی مشهورترین روشهای احیاء روشهای احیاء مستقیم آهن که در صنایع فولاد سازی عملاً مورد استفاده موفقیت آمیز قرار گرفته همراه با نام و ظرفیت کارخانه‌های تولید آهن اسفنجی که از این روشها استفاده نموده‌اند در جدولهای ۱ و ۲ آمده است.

### روشهای مورد استفاده در ایران

سه نوع پروسس احیاء مستقیم در ایران مورد استفاده قرار گرفته که تاسیسات مربوط به همه آنها در اهواز قرار دارد:

الف - Purofer، ب - Midrex و ج HYL. مشخصات هر سه روش در جدول ۱ آمده است. روش Purofer در اواسط ژانویه ۱۹۷۸ با ظرفیتی حدود ۱۱۰۰ تن در روز شروع به تولید بریکت نمود. لکن پروژه های Midrex و HYL هنوز به اتمام نرسیده و تا کنون تولیدی نداشته‌اند. پروژه Midrex قرار بوده در ۱۹۷۸ با ظرفیت ۱۲۰۰۰۰۰ تن در سال شروع به تولید آهن اسفنجی نماید. پروژه HYL نیز قرار بوده تا ۱۹۷۹ به اتمام رسیده و بهره‌برداری از آن با ظرفیتی معادل ۱۰۰۰۰۰۰ تن در سال آغاز گردد. اتمام کار هر دو پروژه در جریان انقلاب متوقف شده و کمپانیهای سازنده تا کنون علاقه‌ای به شروع مجدد کار از خود نشان نداده‌اند. علاوه بر پروژه‌های فوق کمپانی ایتالیایی Italimpianti نیز طبق قراردادی احداث تاسیسات ذوب الکتریکی و ریخته‌گری پیوسته با ظرفیت ۲/۵ میلیون تن فولاد در سال را در بندر عباس به عهده گرفته است که بررسی‌ها و مذاکراتی به منظور انجام پروژه مزبور در اصفهان بجای بندرعباس صورت گرفته است. ذیلاً به تشریح روشهای احیاء مستقیم مورد استفاده در ایران می‌پردازیم:

**الف: روش PUROFER** - در این روش سنگ آهن غربال شده بصورت Lump و یا پلت از بالا بداخل یک تنوره استوانه‌ای که سطح مقطع آن از بالا به پایین بطور یکنواخت افزایش می‌یابد شارژ شده و توسط جریان گاز احیائی که در جهت مخالف سنگ آهن حرکت می‌نماید احیاء می‌گردد. گاز احیائی از تغییر فرم مخلوطی از گاز طبیعی و گاز استفاده شده در تنوره تولید می‌شود. تغییر فرم دهنده های گاز از دو Regenerator تشکیل شده که هر کدام دارای دو محفظه بوده و یک مشعل برای گرم کردن آنها بینشان قرار گرفته است. در حالی که در محفظه اول تغییر فرم گاز صورت می‌گیرد، در محفظه دوم درجه حرارت گاز احیائی برای ورود به تنوره تنظیم می‌شود. در این روش تا حدود ۹۵

درصد آهن موجود در سنگ معدن تبدیل به آهن آزاد می‌گردد. سنگ آهن در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد احیاء شده و در حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد بصورت آهن اسفنجی از پائین کوره خارج می‌شود. آهن اسفنجی گرم ممکن است یا توسط ظروف عایق بندی شده به کارگاه ذوب حمل و مستقیماً در کوره الکتریکی تغذیه گردد و یا به صورت گرم تبدیل به بریکت شده و سپس توسط آب سرد شود.

اگر چه روش اول در برزیل مورد استفاده قرار گرفته اما توام با مشکلات عملی و مخارج زیادی برای حمل و تغذیه و یا نگهداری آهن اسفنجی تا آماده شدن کوره‌های ذوب می‌باشد. روش دوم نیز که در ایران مورد استفاده قرار گرفته است سبب اتلاف مقدار زیادی انرژی حرارتی می‌گردد. بریکتهای حاصل از این روش باعث ایجاد دشواریهایی در مرحله ذوب نیز گردیده‌اند. این بریکتها که دارای وزن مخصوص زیادی می‌باشند، وقتی برای ذوب در کوره الکتریکی شارژ می‌شوند (بخصوص هنگامی که با آهن قراضه همراهند) بسرعت در مذاب فرو رفته و بکندی ذوب می‌گردند. این عمل باعث طولانی شدن مدت ذوب گردیده، افزایش توان الکتریکی به منظور افزایش درجه حرارت مذاب را ضروری می‌نماید که خود سبب تقلیل عمل فسفر زدایی، فرسایش بدنه کوره و افزایش میزان اتلاف انرژی می‌گردد. بعلاوه ذوب همزمان بریکتها در صورتی که یک باره شارژ شوند سبب ایجاد حجم زیادی گاز گردیده و باعث طغیان و سر رفتن سرباره پیش از آنکه ترکیب شیمیایی تعادلی را یافته باشد می‌گردد.

**ب: روش MIDREX** - این روش علی‌رغم شباهتهای فراوانی که با روش Purofer دارد، بمراتب بیشتر از روش Purofer مورد قبول در سطح جهانی قرار گرفته است. در سطح تجارتي برزیل و ایران تنها کشورهایی هستند که از روش Purofer برای احیاء مستقیم سنگ آهن استفاده نموده‌اند؛ در حالیکه روش Midrex مورد استقبال غالب کشورهای که اقدام به تاسیس کارخانه‌های تولید فولاد نموده‌اند، قرار گرفته است (جدول ۱). در این روش سنگ معدن به داخل یک تنوره Shaft عمودی بطور پیوسته تغذیه شده و توسط جریان گاز احیائی تا حدود ۹۶ درصد به آهن آزاد احیاء می‌گردد. گاز تغییر فرم یافته از نیمه ارتفاع وارد کوره شده و در امتداد ارتفاع صعود می‌کند. احیاء سنگ آهن در بالای کوره صورت گرفته و مواد احیاء شده در پائین تنوره سرد و سپس تخلیه می‌گردد. گاز احیائی از تغییر فرم مخلوط گاز طبیعی و گاز بازگشتی از بالای تنوره، در یک مبادله کننده حرارت بدست می‌آید.

**ج: روش HYL** - این روش بر اساس احیاء سنگ معدن در حالت استاتیک توسط گاز احیائی که از تغییر فرم گاز طبیعی با بخار آب بدست می‌آید، طراحی شده است. در تغییر فرم دهنده‌های گاز، نیکل به عنوان کاتالیزور به صورت استوانه‌های توخالی در داخل لوله‌های فولادی کرم - نیکل پر شده، مخلوط گاز طبیعی و بخار آب از داخل آنها عبور نموده و در درجه حرارتی حدود  $800^{\circ}\text{C}$  به

هیدروژن و اکسید کربن تبدیل می‌گردد. در روش HYL سنگ معدن توسط نوار نقاله به داخل محفظه احیاء تغذیه شده سپس محل ورود شارژ بسته شده و گاز احیائی از بالا بداخل محفظه جریان می‌یابد. روش HYL با سابقه ۲۰ ساله و طراحی قابل اعتمادی که دارد توانسته است شهرت فراوانی کسب نماید. تاسیسات و کارخانه‌های جدید آن غالباً در مدتی بسیار کوتاه به ظرفیت طراحی شده شان رسیده‌اند.

با آنکه روشهای MIDREX و HYL از نظر سیستم احیاء دارای تفاوت‌های اساسی می‌باشند، از نظر میزان قبولی در بازار جهانی تقریباً در یک سطح قرار داشته و توانسته‌اند بیشترین تعداد پروژه‌های احداث کارخانجات احیاء گازی را در سطح بین‌المللی به خود اختصاص دهند. پروسس MIDREX روشی مداوم بوده و از نظر تکنولوژی از سایر روشهای احیاء گازی پیشرفته‌تر و ساده‌تر می‌باشد. این روش نسبت به پروسس HYL که روشی منقطع بوده و در آن سنگ آهن حین احیاء حرکت نمی‌نماید راندمان بیشتری داشته، ترکیب شیمیایی یکنواخت‌تر و درجه احیاء بالاتری نسبت به روش HYL بدست می‌دهد. همانطور که در جدول ۱ آمده است، درصد آهن آزاد شده در روش MIDREX بین ۹۲ تا ۹۶ و در روش HYL بین ۸۳ تا ۹۰ درصد کل آهن می‌باشد.

نتایج تحقیقاتی که توسط صدرنژاد و الیوت<sup>۸</sup> بر سرعت ذوب آهن اسفنجی در یک کوره الکتریکی ۲۵ تنی تصفیه فولاد صورت گرفته نشان داده است که حدود درصد آهن آزاد که سبب ایجاد بیشترین راندمان ذوب می‌گردد، ۹۴ درصد است. این مقداری است که در اجرای نرمال پروسس MIDREX به سادگی قابل بدست آوردن است. ولی پروسس HYL تنها با عدول از شرایط نرمال اقتصادی و تغییر فاکتورهای مانند زمان احیاء، درجه حرارت، فشار و یا ترکیب شیمیایی گازهای احیائی قادر به حصول این مقدار خواهد بود. در عین حال یکی از مزایای عمده روش HYL نسبت به MIDREX عدم حساسیت بیش از حد این پروسس به میزان گوگرد و آرسینک سنگ معدن می‌باشد که امکان استفاده از سنگهای گوناگون را در روش HYL بدست می‌دهد. در روش MIDREX به علت آنکه گازهای احیائی استفاده شده در محفظه احیاء مجدداً به تغییر فرم دهنده‌های گاز باز می‌گردند، وجود بیش از ۰/۰۱ درصد گوگرد و یا آرسینک در سنگ آهن ممکن است سبب مسموم شدن کاتالیزورهای نیکل شود.

در مجموع، روشهای MIDREX و HYL در شمار بهترین روشهای احیاء مستقیم قرار داشته و به عنوان مهمترین روشهای احیاء گازی در جهان پذیرفته شده‌اند. لیکن دشواریهای ناشی از استفاده از روشهای متفاوت احیاء در کشوری که از نظر صنعتی بسیار عقب مانده است نکته‌ای نیست که از دیدگاه هیچ منتقد تیزی‌ینی دور بماند. استفاده از روشهای متنوع احیاء مستقیم اگر چه بهترین روشهای موجود در جهان هم باشند سبب خواهد شد که در عین آنکه گرانترین بها را برای توسعه صنایع مادر خود می‌پردازیم، برای تهیه قطعات از کار افتاده تجهیزات مربوطه که در نوع خود از مدرنترین انواع نیز می‌باشند، وابسته به کمپانی‌های سازنده آنها باشیم.

در اینجا لازم به تذکر است که کمپانی‌های طراح و سازنده صنایع مدرن غالباً رعایت مشکلات و

مسائل منطقه‌ای اقتصادی ما را ننموده و صرفاً با در نظر گرفتن مصالح و منافع مادی خودشان اقدام به تاسیس کارخانجاتی می‌نمایند که عملاً "صنعت و اقتصاد ما را به کمپانی‌های خارجی وابسته می‌نماید. بهر حال تا هنگامی که ما خود دست بکار توسعه صنایع داخلی خویش نشده‌ایم و خود طراح و مبتکر تکنولوژی مورد نیاز کشور خویش نیستیم، دست به گریبان چنین مشکلاتی بوده و مجبور خواهیم بود که برای دست یافتن به خود کفایی و استقلال صنعتی و اقتصادی کشور چنین بهای گزافی را بپردازیم. بهای گزافی که کشورهای پیشرفته صنعتی برای توسعه و تکامل علم و تکنولوژی خویش از ما مطالبه می‌کنند.

در اینجا نقش حیاتی مراکز علمی و تحقیقاتی کشور در رابطه با حصول استقلال صنعتی، اقتصادی و فرهنگی بخوبی آشکار می‌گردد. این مراکز علمی و تحقیقاتی هستند که باید در جهت رشد و شکوفایی استعدادها حرکت نموده و ابتکار طراحی و برنامه‌ریزی صنایع حیاتی و مورد نیاز کشور را در دست گیرند و نه تنها به برنامه‌ریزی‌های دراز مدت برای رسیدن به استقلال و خودکفایی صنعتی کشور اقدام کنند بلکه اهدافشان از آنهم فراتر رفته بر صدور هر سه محصولاتی که تا کنون وارد کننده آنها بوده‌ایم یعنی الف - محصولات ساخته شده صنعتی، ب - تکنولوژی پیشرفته صنعتی و ج - دستاوردهای علمی و تحقیقاتی، قرار گیرد.

### ذوب آهن اسفنجی در کوره الکتریکی

در خلال ۲۰ سال گذشته از کوره‌های قوس الکتریکی برای ذوب قراضه و سنگ‌های تغلیظ شده پر آهن استفاده گردیده است. موفقیت‌آمیزترین کاربرد این کوره‌ها تغذیه پیوسته با مواد مستقیماً احیاء شده به تنهایی و یا همراه با قراضه بدون کاهش توان الکتریکی و در حالی که عملیات تصحیح ترکیب شیمیایی و درجه حرارت بار صورت می‌گرفته بوده است. نتایج تحقیقات Sibakin و همکارانش<sup>۴</sup> حاکی از امکان کاهش خوردگی در جداره کوره تا حدود ۲۷ درصد در شرایطی که آهن اسفنجی بطور پیوسته به کوره تغذیه می‌شده، بوده است. همین نتایج حاکی از آن است که تغذیه مخلوطی از ۷۵ درصد آهن اسفنجی و مابقی قراضه باعث تقلیل زمان ذوب از ۳ ساعت برای صددرصد قراضه به ۱/۵ الی ۲ ساعت گردیده است.

تغذیه پیوسته آهن اسفنجی سبب تولید و خروج حباب‌های گاز و غلیان سرباره مذاب می‌گردد. چنین سرباره‌ای می‌تواند جداره و سقف کوره را در مقابل تشعشع شدید قوس الکتریکی محافظت نماید. بعلاوه جذب پیوسته انرژی تشعشعی توسط آهن اسفنجی می‌تواند سبب کاهش خوردگی و ذوب جداره کوره گردد. ذوب پیوسته آهن اسفنجی سبب کاهش عناصر نامطلوب و تقلیل اتلاف انرژی در اثر جابجا نشدن درب کوره به شناور تغذیه قراضه می‌گردد. بهبودهای فراوانی مانند افزایش توان تولید، افزایش نسبت زمان ذوب به زمان تصفیه و بارگیری،



کاهش مصرف الکتروود و کاهش میزان مصرف آهک در عملیات کوره های الکتریکی Hambrgeer Stahlwerke در اثر تغذیه پیوسته پلت های پر آهن MIDREX توسط Post و Ameling<sup>۹</sup> گزارش شده است. استفاده از آهن اسفنجی به این محققین امکان داده است که در عین استفاده از قراضه ارزان و نامرغوب به تولید فولادهای مرغوب پردازند.

فولادسازی در کوره الکتریکی با استفاده از آهن اسفنجی نسبت به سایر روشهای فولاد سازی چندین مزیت دیگر نیز دارد. میزان بسیار کم عناصر نامطلوب برای مثال امکان تولید انواع فولادها را فراهم می سازد. در عین حال محدودیتهایی در استفاده از آهن اسفنجی به جهت محدود بودن منابع گاز طبیعی و نیروی الکتریکی و سنگ آهن غنی که بتواند حداقل شرایط لازم برای تولید آهن اسفنجی برای ذوب در کوره های قوسی را ارائه دهد، نیز وجود دارد. گزارش Hill و Robinson<sup>۱</sup> حاکی از آنست که امکان احداث و استفاده موفقیت آمیز از کوره های قوس الکتریکی با توان بسیار زیاد و ظرفیتی معادل ۴۰۰ تن و یا بیشتر به خوبی وجود دارد. شرایط ایده آل ذوب در چنین کوره هایی تنها با تغذیه مداوم آهن اسفنجی حاصل می گردد. گزارش فوق نشان می دهد که بغیر از محدودیت در سرعت استفاده از فولاد مذاب، محدودیت دیگری برای ساختن کوره های الکتریکی حتی بزرگتر از ۴۰۰ تن هم وجود ندارد.

### خلاصه و خاتمه

به علت اهمیت فراوان محصولات آهنی و نیاز شدید کشور به فولادهای ساده و آلیاژی، استفاده از کلیه روشهای موجود به منظور افزایش تولید آهن، چدن و فولاد تا حداکثر میزان ممکن ضروری به نظر می رسد. روش احیاء مستقیم و ذوب الکتریکی به عنوان یکی از روشهای عمده تولید فولاد و به عنوان وسیله ای برای جلوگیری از خروج گاز طبیعی کشور به صورت ماده خام توصیه می گردد. علی الخصوص که برای ایجاد واحدهای کوچک تولیدی مخارج سرمایه گذاری این روش برای هر تن فولاد به مراتب کمتر از روش کوره بلند می باشد. خریدن پروسس های گوناگون احیاء گازی برای تولید محصولاتی کاملاً مشابه که نه از نظر خواص و نه از نظر موارد استفاده اختلاف عمده و اساسی با هم ندارند عمل صحیحی به نظر نمی رسد. لیکن در شرایط حاضر که بیشتر بهای احداث کارخانجات مربوطه پرداخت شده و بیشتر دستگاهها و تجهیزات مربوط به آنها نصب گردیده، لزوم حفظ و حراست از تجهیزات و تکنولوژی های مربوطه احساس و اکیداً توصیه می گردد. از وظایف عمده مراکز صنعتی، تحقیقاتی و علمی کشور است که به بررسی و طرح روشهای جدید تولید آهن و فولاد پرداخته و با همکاری و مشارکت کلیه نیروها و استعدادهای خلاق داخلی به تاسیس واحدهای صنعتی برای استفاده هر چه بیشتر از منابع زیر زمینی در جهت رفع نیازها و توسعه و استقلال کشور اقدام نمایند.

جدول ۱ - مشخصات اصلی مهم‌ترین روش‌های احیای گازی . ۶.۲

HIB	FIOR	PUROFER	MIDREX	HYL	پروسس	مشخصه
۱ محفظه سیال	۴ محفظه سیال	۱ تنوره مدارم	۱ تنوره با جریان دائمی مواد	۴ محفظه استاتیک		تعداد و نوع محفظه
فولاد آمریکا	EXXON آمریکا	Thyssen-Profer آلمان	Midland - Ross آمریکا	Hyl مکزیک		کیمیای سازنده یا مینیتر پروسس
۱۹۷۳	۱۹۷۶	۱۹۷۶	۱۹۶۹	۱۹۷۵		زمان شروع بهره برداری
گاز	گاز	گاز	گاز	گاز		نوع احیاء کننده
۷۰-۷۵	۵۰	۱۰۰۰	۸۷۵	۱۰۵۰		درجه حرارت احیاء °C
بریکت	بریکت	بریکت	پلت و لامپ	پلت		محصول
۷۰-۷۵	۸۸-۹۳	۹۵-۹۲	۹۲-۹۶	۸۳-۹۰		درصد آهن آزاد (نسبت به کل آهن)
۱/۰	≤ ۲/۰	۱/۴	۰/۷- ۲/۰	۱/۵- ۲/۲		درصد کربن
< ۹۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۷۹۰۰۰۰	۲۷۸۵۰۰۰	۲۷۹۰۰۰۰		کل ظرفیت در حال تولید، تن در سال
ونزوئلا	ونزوئلا	آلمان (Pilot Plant)، برزیل،	آمریکا، آلمان، کانادا، آرژانتین و ونزوئلا	مکزیک، برزیل، ونزوئلا		کشور استفاده کننده
۹۹۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰۰	-	۱۳۳۰۰۰۰۰	۷۱۹۰۰۰۰		کل ظرفیت طرح‌های جدید (تن در سال)
-	آمریکا	-	آرژانتین، ونزوئلا، برزیل، انگلستان، اسکاتلند، ایران، قطر، آمریکا، آلمان، شوروی و نیجریه	اندونزی، عراق، ایران، ونزوئلا، زامبیا		کشور
-	اوایل دهه ۱۹۸۰	-	۱۹۷۹، ۱۹۷۸	۱۹۷۹ و ۱۹۷۸		زمان طرح شده برای شروع بهره برداری

جدول ۲ - مشخصات اصلی مهم‌ترین روش‌های احیاء جامد ۲.۱

KINGLOR METOR	HOCKIN	ACCAR	KRUPP	SL/RN	پروسس	مشخصه
توره عمودی	استوانه ای دوار	استوانه ای دوار	استوانه ای دوار	استوانه ای دوار		نوع محفظه
کینگلورمتور، ایتالیا	تیتانیوم غربی - استرالای غربی	الیس چالمرز - کانادا	کروپ، آفریقای جنوبی	فلاد آمریکا		کمپانی سازنده
۱۹۷۶	۱۹۷۷	۱۹۷۶	۱۹۷۳	۱۹۷۰		زمان شروع بهره برداری
زغال سنگ	زغال سنگ	زغال - نفت - گاز	زغال سنگ	زغال سنگ		نوع احیاء کننده
-	-	۱۰۰۰	۹۵-۱۰۵۰	۱۰۰۰		درجه حرارت احیاء، °C
پلت و لامپ	پلت	پلت و لامپ	پلت و لامپ	پلت و نرمه سنگ معدن		محصول
-	۹۶.۶	۹۲-۹۵	۹۸	۹۳-۹۵		درصد آهن آزاد (نسبت به کل آهن)
-	-	۰-۱	-	کم		درصد کربن
۴۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۵۹۵۰۰۰		کل ظرفیت در حال تولید، تن در سال
ایتالیا	آمریکا	کانادا	آفریقای جنوبی	زلاندر نو، برزیل، کانادا، آمریکا		کشورهای استفاده کننده
-	-	-	۶۰۰۰۰	۱۴۲۰۰۰۰		کل ظرفیت های جدید (تن در سال)
-	-	-	هند	آمریکا، برزیل، آفریقای جنوبی، آلمان، زلاندر نو		کشور
-	-	-	۱۹۸۰	۱۹۷۹ - ۱۹۸۰		زمان شروع بهره برداری

## ماخذ

- ۱- وزارت امور اقتصاد و دارایی : آمار بازرگانی خارجی ایران، صفحه ۱۳، سال ۱۳۵۶ و سه ماهه اول ۱۳۵۷.
2. Battile - Institut e. v. Frankfurt: Report / Iron Ore for Direct Reduction, pp. 117 - 118, 1977.
3. J. G. Sibakin, et al.: J. of Iron & Steel Inst., 1967, pp. 1005-1017.
4. Jack R. Miller: Scientific American, 1967, Vol. 235, pp. 68 -80.
5. W. Pietsh: Iron Making Proceedings, 1978. Vol. 37, pp. 112 - 121; N. T. Evans: ibid, pp. 122-136; R. G. Quintero: ibid, Tbid, pp. 137 - 148; H. D. Pantke: ibid, pp. 149 - 158.
6. K. Sadrnezhad: Ph. D. Thesis, Mass. Inst. Tech., pp. 231 - 236, 1979.
7. J. F. Elliott: Proceedings 34<sup>th</sup> Iron Making Conf., AIME, Toronto, Canada, 1975, 216-227; A. Chatterjee, et al.: Iron & Steel Inst., 1977, pp. 245 - 252; J. Machenzie: J. of Iron & Steel Inst., 1969, pp. 765 - 771.
8. K. Sadrnezhad and J. F. Elliott, Iron and Steel International, 1980, pp 327-339.
9. G. Post and D. Ameling: I&SM., 1975, pp. 43 - 51.
10. O. K. Hill and C. G. Robinson: Iron & Steel Engineer, 1979, pp. 33 - 36.