IMIDRO
IRANIAN MINES AND MINING INDUSTRIES DEVELOPMENT AND RENOVATION ORGANIZATION
سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران

IMPRC

بررسی فناوری‌های فرآوری و استحصال سنگ آهن از منظر صنعت فولاد

« مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران »

« آذرماه ۱۳۹۳ »

به نام خدا

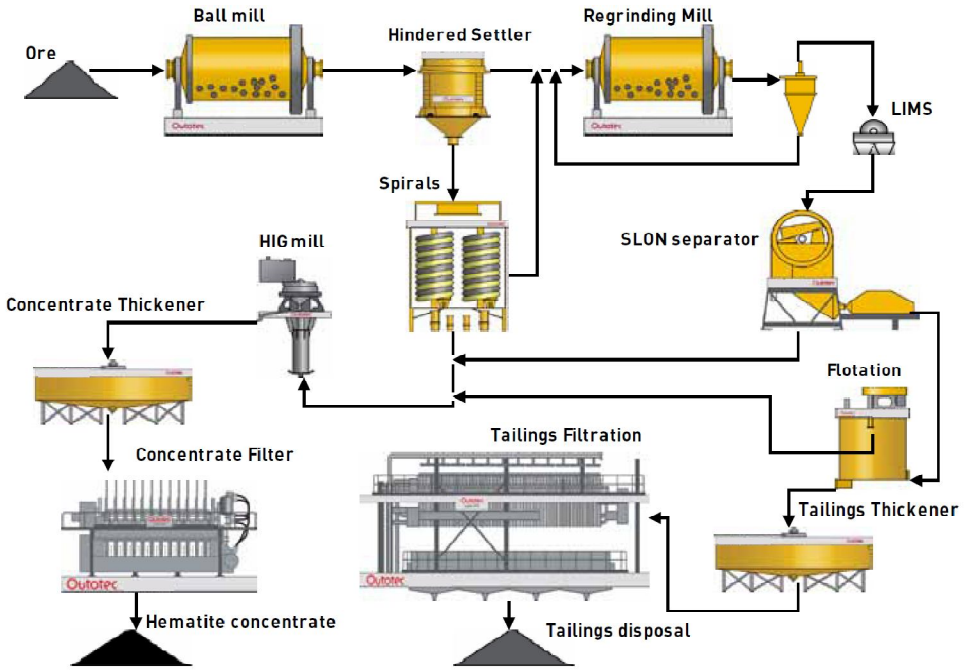
مقدمه

آهن یکی از فراوان‌ترین عناصر در پوسته زمین بوده و به طور متوسط حدود ۵ درصد آن از عنصر آهن تشکیل شده است (عدد کلارک).به طور کلی بیش از ۳۰۰ کانی حاوی عنصر آهن هستند؛ ولی معمولاً پنج کانی هماتیت[۱] (Fe_2O_3)، مگنتیت[۲] (Fe_3O_4)، گوتیت[۳] (FeOOH)، سیدریت[٤] ($FeCO_3$) و پیریت[٥] (FeS_2) به عنوان کانی‌های اصلی سنگ آهن شناخته می‌شوند. در بین کانسارهای جهان در بیشتر موارد سه کانی اول به ویژه هماتیت از نظر اقتصادی در اولویت استخراج می‌باشند. البته کانی‌های دیگری همچون لیمونیت[٦] ($FeOOH.nH_2O$)، ایتابیریت[۷]، تاکونیت[۸] و غیره نیز ممکن است در برخی کشورها دارای عیار بالایی باشند. حداقل عیار (عیار حد) اقتصادی برای کانسارهای سنگ آهن ۲۵ درصد می‌باشد. این در حالی است که با توجه به شرایط اقتصادی کنونی جهان کنسانتره سنگ آهن بایددارای عیاری بیش از۶۰درصد باشد.

به طوری کلی برای فرآوری دو کانی اصلی سنگ آهن به نام‌های مگنتیت و هماتیت روش‌های متداول زیر استفاده می‌شود: (۱) برای کانسنگ‌های مگنتیتی مراحلی شامل جدایش مغناطیسی با شدت کم و فلوتاسیون برای حذف ترکیبات سولفور[۹]، فسفر و سیلیکات[۱۰] استفاده می‌شود؛ (۲) برای کانسنگ‌های هماتیتی مراحل مختلفی شامل جدایش ثقلی، جدایش مغناطیسی با شدت بالا، سایش به منظور تمیز کردن[۱۱]،نرمه‌گیری[۱۲]و فلوتاسیون برای حذف ترکیبات سولفور، فسفر و سیلیکات و رس مورد استفاده قرار می‌گیرند.

---

[1] Hematite
[2] Magnetite
[3] Goethite
[4] Siderite
[5] Pyrite
[6] Limonite
[7] Itabirite
[8] Taconite
[9] Sulphides
[10] Silicates
[11] Scrubbing
[12] Desliming



نمودار مراحل مختلف فرآوری سنگ آهن هماتیتی

در سال ۲۰۰۶ میلادی منابع سنگ آهن جهان بیش از ۸۰۰ میلیارد تن و ذخایر سنگ آهن جهان حدود ۱۸۰ میلیارد تن تخمین زده شده است. در همین سال حدود ۱۶۹۰ میلیون تن و در سال ۲۰۰۷ حدود ۱۸۲۰ میلیون تن سنگ آهن از معادن سراسر جهان استخراج شده است.ایران با داشتن بیش از ۵ میلیارد تن سنگ آهن، از نظر میزان ذخایر سنگ آهن جزو ده کشور اول جهان می‌باشد.

در سال ۲۰۱۳سنگ آهن استخراج شده از معادن سراسر جهان حدود ۲۹۵۰ میلیون تن بوده است که ۱۳۲۰ میلیون تن آن فقط توسط چین تولید شده است. در همین سال حدود ۱۱۷۰ میلیون تن آهن خام[1] در جهان تولید شده که ۷۲۰ میلیون تن آن مربوط به چین بوده است.

بیشترین ذخایر هماتیتی سنگ آهن در کشورهای استرالیا، برزیل، هند، آفریقای جنوبی، روسیه، اوکراین، آمریکا و سوئد قرار دارد. البته کشور چین در چند سال اخیر بزرگترین تولیدکننده و مصرف‌کننده سنگ آهن در جهان بوده است. به طوری که بیش از ۴۵ درصد سنگ آهن تولید شده در جهان توسط کارخانه‌های فولاسازی این کشور مصرف شده است.در سال‌های اخیر پس از چین کشورهای ژاپن، کره جنوبی، آلمان و هلند بیشترین حجم واردات سنگ آهن

[1]Pig Iron

را داشته‌اند. در میان کشورهای منطقه نیز عربستان، ترکیه و قطر بیشترین حجم واردات سنگ آهن را به خود اختصاص داده‌اند.

پس از چین کشورهای ژاپن، آمریکا و روسیه در رتبه‌های بعدی تولیدکنندگان فولاد می‌باشند. براساس برنامه‌ریزی‌های بلند مدت در هند، قرار است تا سال ۲۰۲۰ میلادی ظرفیت سالانه تولید فولاد در این کشور به میزان ۱۸۰ میلیون تن افزایش یابد.در میان کشورهای منطقه نیز ایران پس از ترکیه در جایگاه دوم تولید فولاد قرار دارد و کشورهای عربستان و قطر در رتبه‌های بعدی هستند.

علی‌رغم کمبود ذخایر سنگ آهن در کشور ترکیه، میزان فولاد تولید شده در این کشور در سال ۲۰۱۰ حدود ۳۰ میلیون تن بوده است، این میزان حدود دو برابر بیشتر از فولاد تولید شده در کشور ما است. در کشور ترکیه به علت استفاده از فناوری‌های نوین در بازیابی فلز آهن از آهن قراضه، ارزش افزوده بیشتری کسب می‌شود؛ این در حالی است که در کشور ما به علت عدم فرآوری سنگ آهن و فروش بخشی از آن به صورت خام از یک سو و عدم توازن بین بخش‌های مختلف صنعت فولاد، مجبور به واردات برخی از مواد اولیه صنایع فولادسازی هستیم.

به طور کلی کانسارهای اصلی سنگ آهن در ایران به چهار گروه تقسیم می‌شوند: (۱) ایران مرکزی به ویژه منطقه بافق؛ (۲) زون سنندج-سیرجان شامل مناطق گل‌گهر سیرجان، شمس‌آباد اراک و محدوده همدان؛ (۳) کانسارهای شرق ایران شامل سنگان، ده‌زمان و غیره؛ (۴) کانسارهای غرب ایران شامل آهن شهرک، ظفرآباد، آسن‌آباد و غیره.

بر اساس نتایج اکتشافات انجام شده تاکنون منابع سنگ آهن کشور حدود ۵/۱ میلیارد تن و ذخایر قابل استخراج کشور حدود ۲/۷۹ میلیارد تن برآورد شده است و هم‌اکنون بیش از ۱۵۶ معدن سنگ آهن با ذخیره قطعی کمتر از ۱ میلیون تن تا بیش از ۵۰ میلیون تن در کشور فعال می‌باشد. در مجموع شش معدن چغارت، چادرملو، جلال‌آباد، سه‌چاهون، گل-گهرسیرجان و سنگان در استان‌های یزد، کرمان و خراسان بیشترین نقش را در تولید این ماده معدنی بر عهده دارند.

بر اساس آمار صادرات شش ماهه اول امسال، سنگ آهن با ۲۳ درصد کاهش ارزش و چهار پله تنزل نسبت به دوره مشابه سال گذشته ششمین کالاهای صادراتی غیرنفتی ایران بوده است.

در فرآیند استخراج سنگ آهن تا تولید محصول نهایی تعادل مناسبی در کشور وجود ندارد. به طوری که از یک سو با صادرات مواد خام، ارزش افزوده و اشتغال‌زایی کاهش می‌یابد و از سوی دیگر برخی فرآورده‌های سنگ آهن از قبیل کنسانتره و گندله با قیمت چند برابر برای تأمین نیاز کارخانه‌های فولادسازی وارد می‌شود. بر اساس آمار منتشر شده توسط اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی تهران در سال ۱۳۹۲ کل ارزش کنسانتره و گندله وارداتی حدود ۴۴

میلیون دلار بوده است که عمدتاً از کشورهای امارات و بحرین وارد شده است. این در حالی است که بر اساس این آمار، در سال جاری کل ارزش کنسانتره و گندله وارداتی تا پایان ماه آبان حدود ۱۸۵ میلیون دلار بوده است که عمدتاً از کشورهای بحرین، امارات و هند وارد کشور شده است.البته ایران و هند دو کشور مهم در تولید آهن اسفنجی[1] در جهان می‌باشند.

الف: فرآوری سنگ آهن از منظر فناوری

هر کدام از کانی‌های سنگ آهن دارای جرم اتمی مشخصی از آهن بوده و میزان درصد وزنی آهن در هر کدام از کانی‌ها از میزان مشخصی بیشتر نخواهد شد. به طور کلی برای افزایش بهره‌وری باید عیار آهن موجود در سنگ آهن با استفاده از روش‌های فرآوری تا حد امکان افزایش یابد. در مورد کانسارهای کم‌عیار باید در کارخانه فرآوری میزان آهن محتوی تا حد امکان افزایش و میزان مواد غیرمفید نیز کاهش یابد. به این عملیات در اصطلاح پرعیارسازی سنگ آهن[2] گفته می‌شود. به این ترتیب محصول خروجی کارخانه فرآوری که کنسانتره[3] نامیده می‌شود به عنوان محصول ورودی کارخانه ذوب آهن و صنایع فولادسازی ارسال می‌شود.با توجه به افزایش میزان تقاضا و به تبع آن قیمت جهانی فولاد از یک سو و کاهش ذخایر پرعیار از سوی دیگر، تحقیقات زیادی در کشورهای مختلف بر روی فناوری‌های پیشرفته برای پرعیارسازی ذخایر کم‌عیار صورت گرفته است.

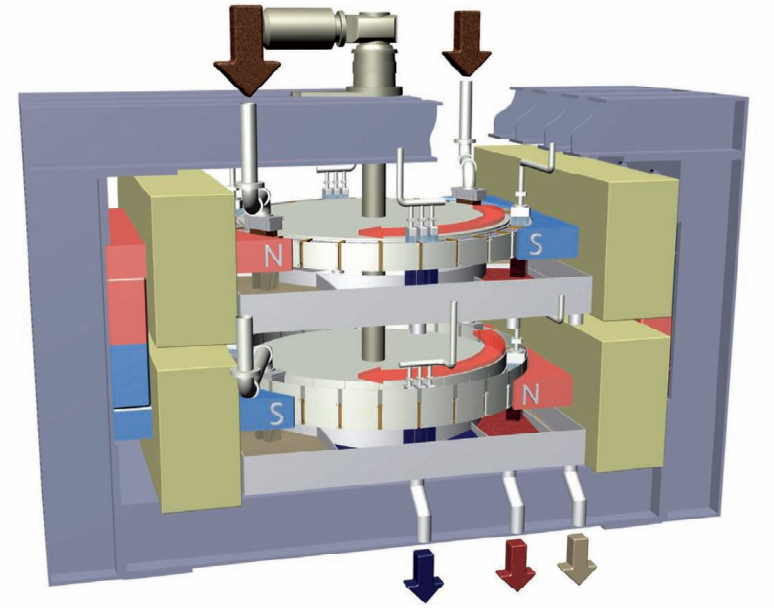
پس از استخراج سنگ آهن به منظور افزایش عیار آن و حذف ناخالصی‌های موجود، آن را فرآوری می‌کنند. به این ترتیب بر اساس نوع ماده معدنی و شرایط زمین‌شناسی کانسار، عملیات مختلفی همچون شستشو، جدایش ثقلی، جدایش مغناطیسی و فلوتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد.از طریق جدایش مغناطیسی (به ویژه جدایش مغناطیسی تر) و فلوتاسیون تا حدود زیادی ازناخالصی‌های فسفاتی و گوگردی حذف می‌شوند.

در تحقیقات اخیر در کشورهای آفریقای جنوبی، استرالیا، برزیل و هند با استفاده از روش جدایش با جیگ موفق به پرعیارسازی سنگ آهن کم‌عیار شده‌اند. بر اساس نتایج این تحقیقات، در هند سنگ آهن حاوی ۵۶/۵ درصد آهن بادرصد مواد فراریLOI[4] ۷/۱ درصد، به میزان ۶۳/۷ درصد و با بازیابی ۷۳ درصد پرعیارسازی شده است.

در مورد جدایش مغناطیسی نیزفناوری جدایش مغناطیسی با شدت بالای تر[1] (WHIMS)، تحت عنوان Gaustecدر آلمان، برزیل و هند مورد استفاده قرار گرفته است.ظرفیت مجاز خوراک ورودی این دستگاه بسته به مدل آن از ۰/۳ تا

[1] Sponge iron
[2] Iron ore beneficiation
[3] concentrate
[4] Loss On Ignition (LOI)

۲۰۰ تن در ساعت متغیر است. بومی‌سازی فناوری ساخت این دستگاه کمک زیادی برای جدایش سیلیکا[۲] و آلومینای[۳] موجود در سنگ آهن خواهد کرد.



فناوری جدایش مغناطیسی به صورت شماتیک

گندله[۴] و کلوخه[۵] دو فرآورده اصلی سنگ آهن هستند. گندله ماده اولیه برای تولید آهن اسفنجی به روش‌های مختلف همچون احیای مستقیم و کوره بلند است کهدر واحدهای گندله‌سازی تولید می‌شود. ماده اولیه برای گندله‌سازی باید کاملاً پودر شود و ۷۰ درصد آن از سرند ۴۵ میکرون عبور کند و سطح ویژه آن نیز حدود ۲۴۷۰ متر مربع در هر گرم باشد. گندله تولیدی باید پخته شود تا مقاومت کافی را برای حمل و نقل داشته باشد. در اثر پخته شدن گندله از مگنتیت به هماتیت تبدیل می شود.یکی از مباحث تحقیقاتی در این زمینه کنترل ابعاد گندله‌ها، یکنواختی خواص فیزیکی-شیمیایی آنها، تخلخل مناسب گندله‌ها و افزایش سطح ویژه آن‌ها است که بر سرعت عملیات احیای مستقیم تأثیر مستقیم دارد. گندله مورد نیاز در روش احیای مستقیم بر خلاف روش کوره بلند از نظر درجه قلیایی باید اسیدی باشد.

[1] Wet High Intensity Magnetic Separation (WHIMS)
[2] Silica
[3] Alumina
[4] Pellet
[5] Lump

امروزه تحقیقات گسترده‌ای بر روی فناوری‌های نوین از جمله بیوتکنولوژی[1] و نانوتکنولوژی[2] در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی برای سنگ آهن در حال انجام می‌باشد. بیوتکنولوژی استفاده از دانش زیست‌شناسی در زمینه‌های مختلف صنایع و پزشکی می‌باشد. نانوتکنولوژی هم جایگزینی یا دستکاری اتم‌ها در مقیاس یک میلیاردیم متر ($۱۰^{-۹}$) می‌باشد. به طور کلی محیط زیست‌شناسی از گیاهان و جانوران[3] و ارتباط آنها با پیرامون خود تشکیل شده است. کاربرد بیوتکنولوژی در فرآوری سنگ آهن کم‌عیار به گونه‌ای مطرح می‌شود که از میکروب‌های خاص در شرایط معین برای حذف ناخالصی‌های موجود در کانی‌های آهن‌دار استفاده می‌شود و به این ترتیب عیار آهن افزایش خواهد یافت.

میکرو- اورگانیسم‌های[4] طبیعی ضمن داشتن بار الکتریکی منفی، آب‌گریز نیز هستند. به همین علت ابزار مناسبی برای تغلیظ مواد معدنی مشخصی هستند. بیوتکنولوژی کاربرد گسترده‌ای در فرآوری مواد معدنی دارد. اولین کاربرد این فناوری در سال ۱۹۵۰ با معرفی روش بیولیچینگ[5] بوده است که در صنعت مس روش مرقون به صرفه‌ای می‌باشد. پس از آن این فناوری در زمینه‌های مختلف فرآوری و متالورژی توسعه یافته است؛ به طوری که امروزه بیوهیدرومتالورژی خود دامنه گسترده‌ای دارد.

ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن عمدتاً شامل آلومینا، سیلیکا، گوگرد و فسفر می‌باشد. در حالت ایده‌آل عیار آهن در کنسانتره سنگ آهن به حدود ۷۰ درصد خواهد رسید. معمولاً کنسانتره مناسب برای کوره بلند دارای عیار ۶۳/۵ درصد و کنسانتره مناسب برای احیای مستقیم دارای عیار ۶۶/۵ درصد است. حد مجاز سیلیکا و آلومینا در روش کوره بلند به ترتیب ۳ و ۲ درصد و در روش احیای مستقیم به ترتیب ۱/۵ و ۱ درصد تعیین شده است. همچنین حد مجاز گوگرد و فسفر به ترتیب حداکثر ۰/۱ و ۰/۰۵درصد تعیین شده و تجاوز از آن منجر به اعمال جریمه می‌شود.

به عنوان نمونه می‌توان به حذف عنصر فسفر[6] در سنگ آهن اشاره نمود. یکی از فناوری‌های نوین در این خصوص حذف فسفر[7] یا سایر عناصر غیرمفید موجود در سنگ آهن و یا حتی فرآوری مجدد سرباره‌های کوره بلند است که به کمک بیوتکنولوژی در حال توسعه می‌باشد. در این زمینه استفاده از روش‌های سوخت‌وساز قارچی[8] و باکتری‌های دگردوست (هتروفیک[9]) در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است.

---

[1] Biotechnology
[2] Nanotechnology
[3] Flora and fauna (plants and animals)
[4] Microorganisms
[5] Bioleaching
[6] Phosphorus
[7] Dephosphorization
[8] Fungal metabolites
[9] Heterotrophic bacteria

از آنجا که گوگرد و فسفر موجود در سنگ آهن اثرات مخربی بر روی تجهیزات کارخانه فرآوری دارد، بسته به نوع کانسنگ و ناخالصی موجود از چهار روش (۱) حرارتی مانند تشویه[۱]، (۲) روش فیزیکی مثل آزادسازی مکانیکی،(۳) فلوتاسیون و (۴) روش شیمیایی مثل اسید-شویی[۲] و فروشویی قلیایی[۳] برای حذف این عناصر استفاده می‌شود.

از نظر اقتصادی هزینه این روش‌ها زیاد بوده و منجر به افزایش قیمت تمام شده و در نتیجه کاهش رقابت‌پذیری در بازارهای جهانی می‌شود. از این گذشته صنعت معدنکاری در جهان ملزم به رعایت قوانین زیست‌محیطی به منظور حفاظت از محیط زیست می‌باشد. بنابراین استفاده از مواد اسیدی و تولید زهاب‌های اسیدی ممنوع می‌باشد. یکی از مزیت‌های بیوتکنولوژی استفاده از گونه‌های زیستی طبیعی[۴] برای کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی است.

اخیراً در یکی از معادن برزیل با استفاده از تکنیک فلاسک لرزان[۵] از گونه‌های گیاهی طبیعی در مقیاس میکروسکوپی[۶] مثل جلبک‌ها[۷]، قارچ‌ها[۸]، باکتری‌ها[۹] (میکروب‌های تک یاخته‌ای) و غیره برای حذف فسفر استفاده شده است. در این روش به منظور افزایش نرخ رشد میکرو-ارگانیسم‌هایی که به طور طبیعی در سنگ آهن موجود هستند، نمونه‌های سنگ آهن در محیط مایع حاوی گلوکوز[۱۰] قرار داده می‌شوند. در این مطالعات باکتری نوع Burkholderia و قارچ نوع Aspergillus به عنوان حلال فسفر شناسایی شدند و به ترتیب سبب کاهش فسفر موجود در سنگ آهن به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد شده‌اند.

برای این منظور در ابتدا با استفاده از روش‌های میکروب‌شناسی[۱۱] میکرو-ارگانیسم‌های موجود در سنگ آهن که دارای ظرفیت حل کردن فسفر هستند، غربال‌گری می‌شوند. سپس با تهیه محلولی از ۵ گرم کانی تازه[۱۲] و ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل شده[۱۳] و ایجاد لرزش در آن، سلول‌ها[۱۴] و هاگ‌ها[۱۵] (تخم میکروب) به مدت ۲۴ ساعت و با سرعت ۱۵۰

[1] Roasting
[2] Acid-leaching
[3] Alkaline leaching
[4] Indigenous species
[5] Shake-flask technique
[6] Indigenous microflora
[7] Algae
[8] Fungi
[9] Bacteria
[10] Glucose-containing liquid medium
[11] Microbiological techniques
[12] Fresh mineral
[13] Sterile distilled water
[14] Cells
[15] Spores

دور در دقیقه از سطح سنگ آهن جدا می‌شوند. در پایان برای جدا کردن ترکیب انحلال ناپذیر فسفات کلسیم، صفحه‌های تلقیح[1] به مدت ۱۲ روز در دمای ۳۰ درجه بر روی محلول قرار داده می‌شوند.

در کشور هند به منظور کاهش ورود آلاینده‌های زیست‌محیطی و آب‌های اسیدی به محیط زیست، از چهار باکتری به نام‌های Paenibacilluspolymyxa، Bacillus subtilis، Saccharomyces cerevisiaeو Desulfovibriodesulfuricansبرای حذف سیلیکا، آلومینا، رس و آپاتیت[2] (کانی فسفر) موجود در سنگ آهن هماتیتی استفاده شده است. روش بیوتکنولوژی برای کاهش هزینه‌ها و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی در مقابل روش‌های فیزیکو-شیمیایی مرسوم مثل فلوتاسیون[3] و جدایش الکترو-استاتیکی مطرح شده است.

در مطالعه دیگری در کشور هند، به منظور حل کردن فسفر از سرباره‌های کارخانه‌های فولادسازی و استفاده مجدد از آنها، از یک باکتری خاکی[4] (میکروب گیاهی) به نام Frateuriaaurentia استفاده شده است که موفق به حذف فسفر به میزان ۷۲ تا ۹۰ درصد شده‌اند.

نانوتکنولوژی هم قادر به حل مشکلات زیادی در زمینه فرآوری و پرعیارسازی سنگ آهن است. به عنوان نمونه در مورد کانی‌های سنگ آهن که حاوی عناصر فرعی همچون تیتانیوم، نیکل و منگنز هستند، اگر چه در عملیات فروشویی، تبلور و الکترولیز، پیوندهای یونی گسسته می‌شوند، ولی این روش‌ها از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی دارای مشکلات زیادی می‌باشند. از این رو استفاده از نانوتکنولوژی برای افزایش صرفه اقتصادی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی ضروری است. در این خصوص کامپوزیت‌هایی با سطح ویژه بالا برای جذب انتخابی عناصر توسعه داده شده است. البته روش‌های دیگری همچون رنگ‌نگاری[5]، استخراج الکتریکی[6] و... نیز در حال مطالعه و بررسی می باشند.

به طورکلی فرآیند خردایش یک فرآیند انرژی‌بر در فرآوری مواد معدنی محسوب می‌شود، در این راستا استفاده از آسیاهای سانتریفیوژ که برای خردایش مواد معدنی به ابعاد خیلی ریز بسیار مفید هستند، یکی از زمینه‌های کاربرد نانوتکنولوژی برای افزایش بهره‌وری در فرآوری سنگ آهن می‌باشد. برای مثال استفاده از آسیاهای سانتریفیوژ ابزاری

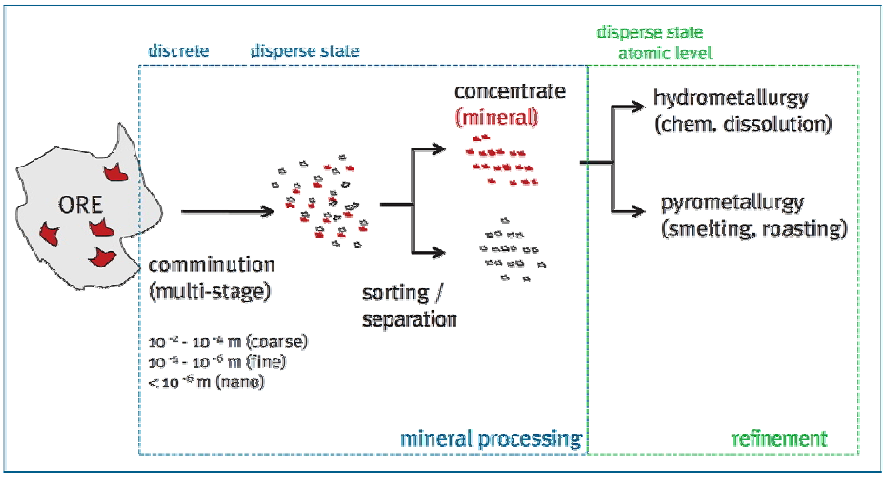
[1] Inoculated plates
[2] Apatite
[3] Froth flotation
[4] Soil bacterium
[5] Chromatography
[6] Electrowining

مفید برای فرآوری کانسنگ تیتانومگنتیت[1] است؛ به طوری که با کاربرد این فناوریعیار آهن، تیتانیوم و اکسید وانادیوم موجود در کنسانتره حاصل از فرآوری این نوع کانسنگ به ترتیب تا ۵۷، ۱۲ و ۰/۵ درصد افزایش یافته است.

از جمله دیگر کاربردهای نانوتکنولوژی در حوزه فرآوری مواد معدنی می‌توان به فرآوری مواد معدنی کم‌عیار و فرآوری مجدد باطله‌های کارخانه فرآوری اشاره نمود. برای این منظور اختلاط شدید مواد با استفاده از انواع همزن‌های دور بالا، همگن سازها، آسیاهای کلوئیدی و غیره،روشی مفید برای تهیه ریزذرات معلقیک جسم جامد در مایع یا ریزقطرات یک مایع در مایع دیگر (نانو کپسول‌ها) می‌باشد.

ب: فرآوری سنگ آهن از منظر انرژی، آب و محیط زیست

همانطور که اشاره شد، در فرآیند خردایش مواد معدنی[2] که اولین گام برای فرآوری مواد معدنی است، بیشترین انرژی مصرف می‌شود؛ به طوری که حدود نیمی از هزینه فرآوری و بیش از ۶۰ درصد انرژی لازم برای فرآوری هر تن ماده معدنی صرف خرد کردن آن به ابعاد مناسب به منظور جدا کردن ماده معدنی مفید از مواد غیرمفید[3] همراه آن می‌شود.



تصویر شماتیک از خردایش کانسنگ برای دسترسی به مواد معدنی با ارزش

در این رابطه پنج مرحله شامل سنگ‌شکنی درون معدن[4]، سنگ‌شکنی مرحله اول[5]، سنگ‌شکنی مرحله دوم[6]، سنگ-شکنی مرحله سوم[7] و سنگ‌شکنی مرحله چهارم[8] وجود دارد که البته ممکن است همه آنها در برخی معادن قابل کاربرد نباشند. این عملیات به ترتیب در سنگ‌شکن‌های فکی، ژیراتوری و مخروطی و آسیاهای قلوه‌سنگی، گلوله‌ای و میله‌ای

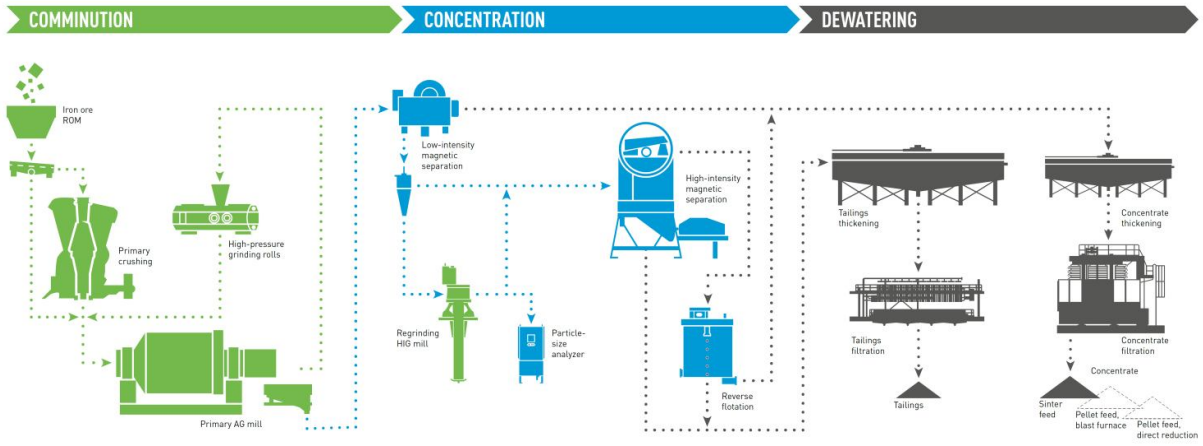
[1] Titanomagnetite
[2] Comminution
[3] Gangue
[4] In-pit crushing
[5] Primary crushing
[6] Secondary crushing
[7] Tertiary crushing
[8] Quaternary crushing

انجام می‌شود. البته استفاده از آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن سبب افزایش بهره‌وری کلی عملیات خردایش و صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌ای و انرژی می‌شود.

از آنجا که بیشتر کانسارهای سنگ آهن ایران از نوع مگنتیت هستند، استفاده از آسیاهای گلوله‌ای گزینه مناسبی برای خردایش نرم می‌باشد. در این خصوص طراحی مدار سنگ‌شکن‌ها و آسیاها نیز با توجه به تغییر مواد ورودی نیازمند پژوهش می‌باشد. همچنین طراحی آسیاها بر اساس استانداردهای بین‌المللی به منظور کاهش میزان مصرف انرژی، کاهش ضخامت و وزن آسیا و کاهش خوردگی پوشش داخلی آن نیز به کارهای تحقیقاتی متناسب با نوع ماده ورودی نیاز دارد.

در مورد مگنتیت برای جدا کردن ذرات آهن‌دار از ماتریکس سیلیکاتی[1] آن باید سنگ آهن به اندازه کافی خرد شود. در برخی موارد ابعاد ذرات خرد شده به P_{80} (عبور ۸۰ درصد مواد از سرندی با ابعاد ۲۵ تا ۳۵ میکرومتر) نیز برسد.

بنابراین انجام تحقیقات کاربردی در این زمینه به منظور کاهش انرژی لازم برای خردایش سنگ آهن اهمیت زیادی دارد. زیرا هدف اصلی در عملیات خردایش، آزادسازی کانی‌های باارزش از مواد غیرمفید است به طوری که ابعاد مواد تا حد امکان کمتر خرد شوند. بدیهی است کاهش میزان خردایش منجر به کاهش میزان انرژی مصرفی، کاهش میزان نرمه و کاهش هزینه‌های جدایش می‌شود. پس یکی دیگر از زمینه‌های تحقیقاتی در این خصوص تعیین درجه آزادی انواع کانی‌های اکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی آهن می‌باشد.



ترتیب مراحل فرآوری سنگ آهن

با توسعه فناوری در دو دهه گذشته، نوعی آسیا به نام آسیای غلطکی فشار بالا(HPGR[1]) که مواد معدنی را تحت فشار زیاد پودر می‌کند، به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی مربوط به خردایش و آسیا کردن[2] در استرالیا معرفی شده است.

[1] Silicate matrix

HPGRبه صورت یک سیستم مدار بسته عمل نموده و دارای سرندهای مرطوب با روزنه‌های ۳ میلیمتری بوده که خروجی آن به یک جداکننده مغناطیسی اولیه[3] منتقل می‌شود. با کاربرد اینفناوری به همراه آسیای همزن‌دار[4] در یک کارخانه فرآوری سنگ آهن در غرب استرالیا[5] حدود ۲۵ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی شده است.

کارخانه پرعیارسازی سنگ آهن Whyalla در استرالیا

در معدنکاری بیشترین حجم آب در بخش فرآوری مواد معدنی مصرف می‌شود. در اکثر روش‌های فرآوری نقش آب بسیار مهم است و حتی برخی از روش‌های فرآوری همچون فلوتاسیون تنها با استفاده از آب امکان‌پذیر هستند. کاهش منابع آب در دسترس به دلیل افزایش مصرف و نیز بروز خشکسالی به خصوص در مناطق کم آب می تواند منجر به وقوع چالش‌های شدیدی در صنایع معدنی شود. علی‌رغم تشدید مشکل کم آبی، تاکنون در این زمینه دستورالعمل مشخصی برای مدیریت مصرف آب در بخش معدن و صنایع معدنی کشور تهیه نشده است. از طرف دیگر انجام پژوهش‌های کاربردی برای توسعه روش‌های خشک فرآوری سنگ آهن ضروری است.

آلودگی آب در سایت‌های معدنی و کارخانه‌های فرآوری یکی دیگر از چالش‌های معدنکاری در آینده است. به منظور رعایت اصول توسعه پایدار باید از آلودگی آب در معدن و کارخانه و حتی پس از پایان عمر معدن جلوگیری شود. بنابراین استراتژی و برنامه‌ریزی بلند مدت برای استخراج معدن مستلزم در نظر گرفتن روش‌های حفاظت و

---

[1] High pressure grinding rolls (HPGR)
[2] Grinding
[3] Rougher magnetic separators (RMS)
[4] Stirred mill
[5] Whyalla magnetite concentrator plant

مدیریت مصرف آب می‌باشد. در این رابطه تهیه و حفظ آب سالم با کیفیت قابل‌قبول یکی از الزامات اساسی در طول عمر فعالیت معدن و صنایع وابسته می‌باشد.

آهن قراضه به عنوان یکی از منابع تأمین ماده اولیه کارخانه‌های فولادسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حدود ۳۰ درصد از فولاد و چدن تولید شده در جهان از طریق بازیابی آهن قراضه در کوره‌های الکتریکی و ۷۰ درصد بقیه از سنگ آهن تأمین می‌شود. کشور ترکیه به علت کمبود ذخایر سنگ آهن و همچنین کنترل هزینه‌های انرژی، سیاست خود را بر واردات آهن قراضه استوار کرده است و از این طریق موفق به تولید بیشترین حجم فولاد در منطقه شده است. یعنی دقیقاً برعکس کشور ما، زیرا ما مواد خام را صادر و فولاد وارد می‌کنیم؛ ولی ترکیه مواد خام را وارد و فولاد صادر می‌کند.

مسلماً برای استخراج هر ماده معدنی باید مواد سنگی روباره آن نیز برداشت شود. به مجموعه عملیاتی که برای برداشت روباره انجام می‌شود، باطله‌برداری گفته می‌شود. نسبت باطله‌برداری در کشورهای مختلف متفاوت است و معمولاً در محدوده ۱ : ۰/۵ تا ۱: ۷ متغیر است. اگر فرض شود نسبت باطله‌برداری به طور متوسط حدود ۱ : ۲ باشد، برای استخراج یک میلیارد تن سنگ آهن در هر سال، سالانه حدود دو میلیارد تن باطله[1] تنها برای استخراج معادن سنگ آهن باید برداشت شود. حال اگر میزان مواد غیرمفید[2] حاصل از کارخانه‌های فرآوری و سرباره‌های کارخانه‌های فولادسازی را هم به آن اضافه کنیم، مشاهده می‌شود که هر سال حجم بسیار زیادی باطله وارد محیط زیست می‌شود که دارای پتانسیل اشغال فضا، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، ایجاد گرد و غبار، لغزش زمین و... می‌باشند. بنابراین توجه به اصول بازسازی معادن و رعایت مقررات زیست‌محیطی در این زمینه ضروری است. در این خصوص تحقیقات گسترده‌ای برای استفاده مجدد از این مواد در کشاورزی و دامداری و حتی جاذبه‌های توریستی در کشورهای معدنی جهان در حال انجام است.

[1] Waste
[2] Gangue

پ: فناورهای تولید فولاد

اگر چه امروزه حدود ۷۰ درصد فولاد جهان از طریق کوره بلند[1] تولید می‌شود، ولی به منظور افزایش بهره‌وری، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، استفاده بهینه از انرژی و غیره اکثر کشورهای صنعتی در حال تحقیق و پژوهش برای توسعه روش‌های جدید می‌باشند.

به طور کلی روش‌های تولید فولاد به سه دسته کوره بلند، احیای مستقیم و احیا از طریق ذوب تقسیم می‌شوند. از طرف دیگر بر اساس نوع کوره انواع فناوری‌های تولید فولاد به پنج گروه زیر تقسیم می‌شوند:

(۱) فناوری‌های مبتنی بر کوره‌های استوانه‌ای[2] شامل کوره بلند، کورکس[3]، میدرکس[4]، HYL، Tecnoredو غیره.

(۲) فناوری‌های مبتنی بر کوره‌های گردان[5] مثل[6] SL/RN،

(۳) فناوری‌های مبتنی بر کوره‌های بوته گردان[7] شامل Redsmelt، Fastmet/Fasmelt، ITMK3، Inmetco، Iron Dynamic، Maumeeو غیره.لازم به ذکر است که در همه روش‌های فوق برای احیاء سنگ آهن از زغال‌سنگ استفاده می‌شود.

(۴) فناوری‌های مبتنی بر بستر سیال[8] شامل Finmet، Circored، Circofer، Iron Carbideو غیره. که دو روش اول از گاز طبیعی و در دو روش دوم از زغال‌سنگ برای احیاء سنگ آهن استفاده می‌شود.

(۵) سایر فناوری‌ها شامل Hismelt، Dios، Romelt، Gridsmelter، Comet، Finex، Plasma، PlasmaRed، AISI و غیره.

بر اساس مقررات زیست‌محیطی دراروپا،احداث کارخانه‌های کوره بلند ممنوع شده است و کوره‌های قوس الکتریکی که از میزان زیادی برق برای ذوب قراضه استفاده می‌کنند، جایگزین آن شده است.روش‌های دیگری نیز برای فولادسازی در حال بررسی آزمایشگاهی است که می‌توان به فرآیند مایکرو ویو[9] (امواج الکترومغناطیسی با فرکانس

[1] Blast furnace
[2] Shaft furnace
[3] Corex
[4] Midrex
[5] Rotary kiln
[6] Stelco-Lurgi/Republic Steel-National Lead (SL/RN)
[7] Rotary hearth furnace
[8] Fluidized bed
[9] Microwave

بسیار بالا) و روش‌های تمام هیدروژنی[1] اشاره نمود.هر چند پژوهش‌های فراوانی در این زمینه برای استفاده از این فناوری‌ها بر اساس شرایط کشور لازم است، ولی در ادامه به طور مختصر معرفی می‌شوند.

۱- کوره بلند

کوره بلند به شکل یک مخروط بوده که به صورت عمودی بر روی بوته کوره قرار گرفته است. در کوره بلند سنگ آهن به کمک کک و سنگ آهک، احیاء شده (کاهش اکسیژن) و آهن خام به صورت مذاب تولید می‌شود. به این ترتیب مواد حاوی آهن شامل سنگ آهن، کلوخه[2]، گندله[3]، سرباره فولادسازی[4]، قراضه[5] و غیره به همراه کک و کمک ذوب (سنگ آهک و دولومیت) از بالا به داخل کوره ریخته می‌شوند. از پایین کوره نیز هوای گرم برای مشتعل کردن کک به درون کوره دمیده می‌شود. به این ترتیب حرارت مورد نیاز برای ذوب سنگ آهن و حذف اکسیژن از اکسید آهن تأمین می‌شود. در پایان آهن ذوب شده از پایین کوره خارج می‌شود.

دراین روش، سنگ آهن ضمن حرکت تدریجی به طرف اجاق کوره،توسط گازهای احیا که به طرف بالاحرکت می‌کنندگرم شده ودر درجه حرارت ۱۵۰۰درجه سانتیگراد ذوب و درآنجا بار مذاب به دو بخش تقسیم می‌شود:

(۱) سرباره مذاب شامل ترکیبات اکسیدی مانند اکسیدهای کلسیم، سیلیسیم، آلومینیوم، منگنز وآهن که روی آهن خام قرار گرفته و(۲) عناصراحیا شده مانندکربن،منگنز،سیلیسیم،گوگرد و فسفرکه درآهن خام مذاب حل شده‌اند.

محصول کوره بلندآهن خام[6] بوده و هنگام خروج ازکوره دارای۹۰ تا ۹۵ درصدآهن، ۳ تا ۵ درصد کربن و مقادیر کمی از سایر عناصر می‌باشد.

۲- روش‌های احیای مستقیم

دراحیای مستقیم سعی برآن است که قبل ازذوب،اکسیژن موجود درسنگ آهن تقریباً بطورکامل خارج گردد. باتوجه به این که آهن اسفنجی حاصل دارای مقداری ناخالصی می‌باشد، سنگ معدن مورد استفاده در این روش باید نسبتاً مرغوب بوده وفسفر و گوگرد آن کم باشد. علاوه بر این به علت استفاده از نیروی الکتریسیته درکوره الکتریکی ذوب،برق ارزان نیز مورد نیاز می‌باشد. مهمترین روش‌های احیای مستقیم عبارتند از میدرکس، ITmk3، HYLو SL/RN.

[1] All-hydrogen
[2] Lump ore
[3] Pellet
[4] Slag
[5] Scrap
[6] Pig iron

روش میدرکس دارای یک کوره قائم کم فشار با بستر متحرک می‌باشد. در این روش گازهای احیا به سمت بالا (در خلاف جهت ورود کلوخه و گندله) حرکت می‌کنند و همچنین امکان بازیابی و استفاده مجدد از گازهای خروجی[1] وجود دارد. همچنین در این روش امکان استفاده از گاز طبیعی به جای زغال‌سنگ وجود دارد. محصول نهایی این روش، آهن اسفنجی یا آهن احیاء مستقیم[2] (DRI) به صورت گرم یا سرد و آهن بریکت شده گرم[3] (HBI) می‌باشد. آهن بریکت شده گرم در کوره ذوب فولادسازی قابل استفاده می‌باشد.

در روش SL/RNبرای تولید آهن اسفنجی گرم یا سرد، کلوخه سنگ آهن، گندله، زغال‌سنگ و کمک ذوب وارد کوره دوار می‌شوند. در این روش دمای واکنش بسیا بالا است و از زغال‌سنگ برای تولید این دما و احیاء مستقیم سنگ آهن استفاده می‌شود.

۳- روش‌های احیا از طریق ذوب

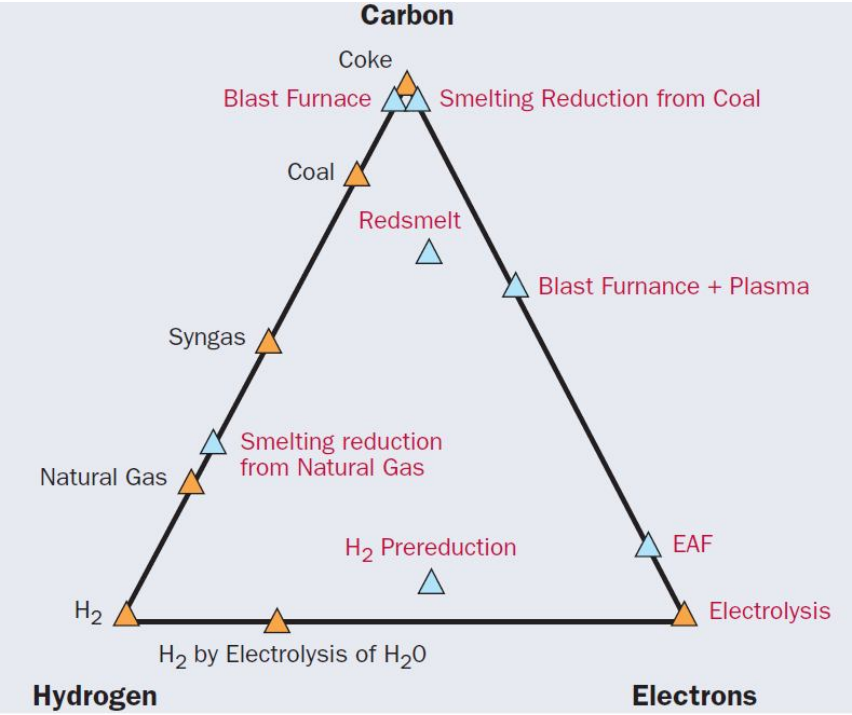
کورکس یکی از معروف‌ترین فرآیندهایاحیااز طریق ذوب[4] بوده که توسط شرکت زیمنس[5] به منظور کاهش هزینه‌ها و آلودگی محیط زیست توسعه داده شده است. در این روش اکسید آهن به شکل کلوخه و گندله به درون کوره شارژ می‌شود. تفاوت اصلی این روش با کوره بلند استفاده از زغال‌سنگ به جای کک برای احیای سنگ آهن می‌باشد. به این ترتیب نیازی به کارخانه کک سازی نبوده و علاوه بر هزینه‌های ساخت، آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از آن نیز کاهش خواهد یافت. در این روش گازهای احیاء مثل روش میدرکس در خلاف جهت موارد ورودی به سمت بالا حرکت می‌کنند و پس از جمع‌آوری امکان استفاده مجدد از آنها وجود خواهد داشت. در پایان آهن مذاب از طریق نقاله حلزونی[6] از کوره تخلیه و به کوره‌های اکسیژنی بازی[7] (BOF) و یا قوس الکتریکی[8] (EAF) ارسال می‌شود.

محصول خروجی کوره بلند، کورکس و HIsmelt چدن خام است، در حالی که محصول خروجی روش‌های احیای مستقیم (میدرکس،ITmk3، HYL و SL/RN) آهن اسفنجی می‌باشد. یادآوری می‌شود که در روش‌های احیای مستقیم امکان استفاده از گاز طبیعی نیز به جای زغال‌سنگ وجود دارد.

[1] Flue gas
[2] Direct Reduction Iron (DRI)
[3] Hot Briquetted Iron
[4] Smelting-reduction process
[5] Siemens
[6] Screws convey
[7] Basic Oxide Furnace (BOF)
[8] Electric Arc Furnace (EAF)

روش‌های احیا از طریق ذوب مثل کورکس، FINEXو HIsmelt به علت عدم نیاز به کک قابلیت رقابت با کوره بلند را دارند؛ زیرا در این روش‌ها می‌توان از زغال‌سنگ به طور مستقیم برای ذوب و تصفیه سنگ آهن استفاده نمود. البته در روش FINEX ادعا شده است که هزینه‌های سرمایه‌ای به میزان ۲۰ درصد و هزینه‌های عملیاتی حدود ۱۵ درصد نسبت به کوره بلند کاهش می‌یابد.

البته باید توجه داشت که هزینه سرمایه‌گذاری روش‌های کورکس، میدرکس، HYL،ITmk3 و SL/RN نسبت به کوره بلند بسیار بیشتر است. این در حالی است که ممکن است هزینه‌های عملیاتی در برخی از این روش‌ها نسبت به کوره بلند کمتر باشد.در شکل زیر انواع عامل‌های شیمیایی در روش‌های مختلف به منظور احیای سنگ آهن ارائه شده است.



انواع عامل شیمیایی احیا یا کاهش اکسیژن سنگ آهن

ت : تجارب مرکز تحقیقات فرآوری مواد مدنی ایران در فرآوری سنگ آهن

در زمینه فرآوری سنگ آهن در کشور از سال ۱۳۸۶ تا کنون پروژه های متعددی در مرکز یاد شده صورت پذیرفته و به دلیل انباشت تجارب فنی نا شی از اجرای پروژه‌های مذکور، مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی را می‌توان هاب توسعه فناوری‌های فرآوری و استحصال سنگ آهن تا مقیاس نیمه صنعتی به حساب آورد. در ادامه فهرست برخی پروژه های انجام شده و در دست اجرای مرکز موصوف در زمینه فرآوری سنگ آهن به شرح جدول ذیل می باشد:

ردیف	عنوان پروژه	مقیاس آزمایشگاهی	مقیاس نیمه صنعتی	کارفرما	تاریخ قرارداد
۱	فرآوری سنگ آهن معدن جلال آباد	✓	✓	شرکت مهندسین مشاور ناموران	۱۳۸٦
۲	فرآوری سنگ آهن پلاسری معدن سنگان		✓	شرکت کیمیا فرآوران ارمغان	۱۳۸۷
۳	مطالعه اولیه فراوری کانسنگ آهن معدن باباعلی همدان	✓		شرکت تامین مواد اولیه صبانور	۱۳۸۷
٤	امکانپذیری کاهش گوگرد در سنگ آهن معدن گل گهر	✓	✓	شرکت سنگ آهن گل گهر	۱۳۸۷
٥	مطالعات فراوری سنگ آهن کویر	✓		شرکت سنگ آهن کویر	۱۳۹۰
٦	خدمات تحقیقاتی و مطالعات نیمه صنعتی بر روی نمونه ته ریز سیکلون های هوایی کازخانه کنسانتره مگنتیتی	✓	✓	شرکت سنگ آهن گل گهر	۱۳۹۰
۷	تست پایلوت فلوتاسیون نمونه کنسانتره سنگ آهن		✓	شرکت فکور صنعت	۱۳۹۰
۸	تست نیمه صنعتی در مدار غیر پیوسته بر روی نمونه تیپ های B و C شمالی کانسنگ سنگان		✓	طرح احداث کارخانه گندله سازی ٥ میلیون تنی سنگان شرکت فولاد	۱۳۹۰
۹	انجام خدمات تحقیقاتی و مطالعاتی نیمه صنعتی بر روی نمونه های کنسانتره مگنتیتی جهت ارتقائ کیفی کنسانتره تولیدی به منظور تولید خوراک مناسب کارخانه گندله سازی		✓	شرکت سنگ آهن گل گهر	۱۳۹۱
۱۰	فرآوری هماتیت سنگ آهن با هدف تولید کنسانتره و کاهش فسفر		✓	شرکت سنگ اهن مرکزی	۱۳۹۱
۱۱	مطالعات فراوری سنگ آهن پلاسری فدک قدر قهستان	✓		شرکت فدک قدر قهستان	۱۳۹۱
۱۲	مطالعات فراوری سنگ آهن پلاسری سنگان		✓	شرکت احیاء نگین سپاهان	۱۳۹۱

۱۳	مطالعات فراوری سنگ آهن پلاسری کیهان کاپرآرا		✓	شرکت کیهان کاپرآرا	۱۳۹۱
۱٤	مطالعات فراوری سنگ آهن پلاسری فولاد مارشنان	✓		شرکت فولاد مارشنان	۱۳۹۱
۱۵	مطالعات خردایش سنگ آهن شرکت آریانا وستا کرمان		✓	شرکت آریانا وستا کرمان (خیام سپنتا)	۱۳۹۲
۱٦	انجام آزمایشهای مقیاس پایه بر روی نمونه های نماینده سنگ آهن سنگان خواف	✓		سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران	۱۳۹۲
۱۷	مطالعه ازمایشگاهی فرآوری برای کنسانتره تر کارخانه فرآوری سنگ آهن گل گهر	✓	✓	شرکت سنگ آهن گل گهر	۱۳۹۲
۱۸	مطالعه فرآوری سنگ آهن پلاسری کم عیار در مقیاس پایلوت		✓	جهاد دانشگاهی تربیت مدرس	۱۳۹۲
۱۹	مطالعه فرآوری کانسنگ پلاسری در مقیاس پایلوت		✓	شرکت معدنی و صنعتی اسپیر	۱۳۹۲
۲۰	مطالعات فرآوری کانسنگ منیتیتی در مقیاس پایلوت		✓	شرکت جهان نمو	۱۳۹۲
۲۱	عملیات پر عیار سازی در مقیاس نیمه صنعتی سنگ آهن در منطقه زنجان		✓	شرکت صنعتی و معدنی جهان نمو	۱۳۹۲
۲۲	بازیابی هماتیت از باطله های کارخانه کنسانتره سنگ آهن زرند	✓		شرکت مهندسی معیار صنعت خاورمیانه	۱۳۹۲
۲۳	مطالعات فرآوری جهت راه اندازی واحد کنسانتره سنگ آهن خواف	✓		شرکت احیا سپاهان	۱۳۹۲
۲٤	مطالعات بایو لیچینگ برای استحصال فلزات با ارزش از باطله سنگ آهن	✓	✓	شرکت سنگ آهن گل گهر	۱۳۹۲
۲۵	پرعیارسازی سنگ آهن پلاسری معدن گور رندان هرمزگان		✓	شرکت زمین کاوان زمان	۱۳۹۲
۲٦	مطالعات فراوری جدایش مغناطیسی خشک سنگ آهن جلال آباد	✓		شرکت سنگ آهن جلال آباد	۱۳۹۳
۲۷	مطالعات فراوری نمونه سنگ آهن شرکت جهان نمو	✓		شرکت صنعتی معدنی جهان‌نمو	۱۳۹۳
۲۸	مطالعات فراوری نمونه سنگ آهن پلاسری بزمان	✓		طرح توانمدسازی اکتشاف ایمیدرو	۱۳۹۳
۲۹	مطالعات فرآوری جهت راه اندازی واحد کنسانتره سنگ آهن خواف		✓	شرکت احیای نگین سپاهان	۱۳۹۳

ث : اولویت‌های پژوهشی در صنعت فرآوری سنگ آهن

در طرح جامع فولاد، میزان فولاد تولید شده در کشور باید تا یک دهه آینده حداقل به بیش از ۵۰ میلیون تن برسد. این در حالی است که هم اکنون کل تولید فولاد کشور حدود ۱۵ میلیون تن در سال می‌باشد. بنابراین انجام پژوهش های کاربردی برای توسعه روش‌ها و فناوری‌های مدرن در طول زنجیره ارزش سنگ آهن برای نیل به اهداف تعیین شده در طرح جامع فولاد کشور ضروری است.

بر اساس برآوردهای انجام شده تا سال ۲۰۲۰ میلادی میزان سنگ آهن تولید شده در جهان به حدود یک میلیارد تن در سال یعنی حدود دو برابر تولید کنونی خواهد رسید. با توجه به اهمیت فولاد در همه صنایع و همچنین وجود ذخایر فراوان انواع سنگ آهن در کشور، به نظر می‌رسد سنگ آهن و کنسانتره آن تا چند سال آینده همچنان جایگاه ویژه‌ای در بازارهای جهانی داشته باشد. ملاحظاتی که در این ارتباط مطرح است، عبارتند از:

۱) با توجه به کاهش ذخایر پرعیار و افزایش عمق معادن، در کانسارهای جدید نسبت سنگ آهن پرعیار به سنگ آهن کم‌عیار در حال کاهش است. به عبارت دیگر کانسارهایی که در آینده کشف می‌شوند، بیشتر از نوع سنگ آهن کم‌عیار هستند که باید برای فرآوری آن‌ها از روش‌های مناسب و اقتصادی استفاده شود.

۲) ارزش میزان آهن موجود در سنگ آهن در چند سال گذشته بیش از ۱۰۰ درصد افزایش یافته است. بنابراین همانطور که اشاره شد با توجه به وجود بازارهای مصرف فراوان در منطقه، باید بر روی پروژه‌های تولید فولاد در کارخانه‌هایی با ظرفیت بالا و رقابتی در حاشیه خلیج فارس و تامین نیاز واحدهای بزرگ جدید متمرکز شویم.

۳) با پیشرفت فناوری و دانش فنی می توان از نرمه‌ها که در گذشته به عنوان باطله تلقی می‌شدند، در کارخانه‌های گندله‌سازی و کلوخه‌سازی استفاده کرد. بنابراین انجام پژهش‌های کاربردی در این زمینه لازم است.

۴) روش‌های پرعیارسازی مدرن علاوه بر کنترل هزینه‌ها، با استفاده از فرآیندهای پیشرفته عیار آهن را در کلوخه، نرمه و فوق نرمه‌ها[1] به طور کاملاً مؤثر افزایش می‌دهند.

۵) وجود کانسارهای چند- فلزی مثل تیتانیوم-آهن، منگنز-آهن و... یک ظرفیت مناسب برای استفاده از فلزات فرعی[2] موجود در سنگ آهن می‌باشد. بنابراین انجام پژوهش‌های بیشتر به ویژه با استفاده از روش‌های متعارف فرآوری نانو و بایو تکنولوژی برای جدایش همه عناصر و مواد معدنی مفید از کانسنگ‌های چند- فلزی ضروری است.

[1] Ultrafines
[2] By-product