



وزارت صنعت، معدن و تجارت

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

معاونت اکتشافات معدنی

مدیریت فرآوری و فرآوری

بخش اول گزارش

پایش و خواص سنجی ذخایر هماتیتی کشور از دیدگاه متالورژیکی



مجری طرح:

مدیریت فرآوری و فرآوری

اسفندماه ۱۴۰۰

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

این گزارش مورد تأیید داوران شورای ارزیابی قرار گرفته و طبق کد شماره ۱۴۰۲/۱۳ گ ۳۳۴۶-۱۱۰۰-۱۴۰۰ از این شورا، مجوز انتشار دریافت کرده است.

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

چکیده

با توجه به برنامه و چشم انداز تولید فولاد در کشور^۱ لزوم تامین بار ورودی کارخانه های کنسانتره و گندله از اهمیت اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این زمینه استفاده حداکثری از پتانسیل های سرزمینی ایران در تولید سنگ آهن می بایست مورد توجه جدی قرار گیرد. با توجه به حجم قابل توجه ذخایر سنگ آهن منبیتی در کشور اکثر برنامه ریزی ها و سرمایه گذاری تولید بر روی این ذخایر متمرکز است. در چند سال اخیر توجه به ذخایر هماتیتی و امکان فرآوری و تولید محصول از این ذخایر مورد توجه قرار گرفته است و پتانسیل تامین بار ورودی کارخانه های فولاد از این ذخایر قابل توجه قلمداد می شود. اما سؤال اصلی این است که ظرفیت و پتانسیل کشور در رابطه با این ذخایر چقدر است؟ همچنین چالش ها و مسائل پیش روی معادن و فرآوری این ذخایر چه مواردی می باشد؟ هدف از این طرح پایش وضعیت ذخایر و واحدهای فرآوری هماتیت در کشور می باشد تا براساس نتایج آن بتوان برنامه ریزی و راهبری مناسب تری را در این رابطه برای ذینفعان و دست اندرکاران امکان پذیر نماید. در بخش اول این طرح سعی گردید تا نمای کلی از وضعیت ذخایر آهن در کشور و روش های فرآوری ارابه شود. همچنین وضعیت زمین شناسی کشور به لحاظ امکان تشکیل ذخایر هماتیتی مورد بررسی قرار گرفت و براساس آن مناطق و نقاط پرتانسیل جهت انجام مطالعات فرآوری مدنظر قرار گرفت. در ادامه نیز بررسی واحدهای معدنی و فرآوری هماتیت در کشور و چالش های آن ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱ در مردادماه سال ۸۵ سند راهبردی توسعه صنعتی کشور بر اساس سند چشم انداز ۱۴۰۴ با اولویت تولید ۵۵ میلیون تنی فولاد (معادل سهم ۳/۵

درصد تولید جهانی) تنظیم شد .

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۳	فصل ۱ کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- مشخصات آهن
۳	۱-۲-۱- تاریخچه مختصر آهن
۴	۲-۲-۱- خواص فیزیکی و شیمیایی آهن
۵	۳-۲-۱- کانی‌های آهن
۵	۱-۳-۲-۱- کانی‌های اکسیده
۶	۲-۳-۲-۱- کانی‌های اکسیده آبدار
۷	۳-۳-۲-۱- کانی‌های کربناته (سیدریت)
۷	۴-۳-۲-۱- کانی‌های سولفور
۸	۴-۲-۱- بررسی ترکیب شیمیایی آهن
۹	۳-۱- عوامل موثر بر ارزشیابی سنگ آهن
۹	۱-۳-۱- عیار آهن
۱۰	۲-۳-۱- اندیس قلیایی بودن
۱۰	۳-۳-۱- ناخالصی‌های سنگ آهن
۱۲	۴-۳-۱- ابعاد
۱۳	۵-۳-۱- قابلیت‌های پر عیارسازی
۱۳	۶-۳-۱- قابلیت خردایش
۱۳	۷-۳-۱- خاصیت احیاء پذیری
۱۴	۸-۳-۱- سختی آهن
۱۴	۹-۳-۱- وزن مخصوص حقیقی و ظاهری
۱۴	۱۰-۳-۱- رطوبت و آب تبلور
۱۵	۱۱-۳-۱- شکل و چگونگی عملیات انجام شده بر روی سنگ آهن
۱۵	۴-۱- منابع و ذخایر جهانی سنگ آهن
۱۷	۵-۱- منابع و ذخایر سنگ آهن ایران
۱۸	۶-۱- کاربردها و مصارف سنگ آهن
۱۹	۷-۱- فرآوری سنگ آهن
۱۹	۱-۷-۱- سنگ شکنی و خردایش سنگ آهن
۲۰	۲-۷-۱- پرعیارسازی سنگ آهن
۲۰	۳-۷-۱- طبقه بندی و سایش
۲۱	۴-۷-۱- جدایش ثقلی

- ۲۱-۱-۴-۷-۱- پرعیار سازی از طریق جیگ.....
- ۲۲-۲-۴-۷-۱- پرعیار سازی از طریق اسپیرال.....
- ۲۲-۳-۴-۷-۱- پرعیار سازی از طریق میز لرزان.....
- ۲۳-۴-۴-۷-۱- پرعیار سازی از طریق مولتی گراویتی.....
- ۲۴-۵-۴-۷-۱- پرعیار سازی از طریق واسطه سنگین.....
- ۲۴-۵-۷-۱- روش های فیزیکی از طریق جدایش مغناطیسی.....
- ۲۴-۶-۷-۱- روش های پرعیار سازی از طریق فلوتاسیون.....
- ۲۵-۷-۱- پرعیار سازی از طریق فرآیند اسیدشویی.....
- ۲۵-۸-۷-۱- پرعیار سازی از طریق فرآیند احیاء.....
- ۲۵-۱-۸-۷-۱- هوا زدگی سنگ معدن.....
- ۲۶-۲-۸-۷-۱- توزیع دانه ریز ناخالصی ها.....
- ۲۶-۳-۸-۷-۱- روش های تبدیل کانی اکسید آهن به مگنتیت.....
- ۲۶-۴-۸-۷-۱- تبدیل هماتیت به مگنتیت.....
- ۲۷-۵-۸-۷-۱- تبدیل سیدریت به مگنتیت.....
- ۲۸-۶-۸-۷-۱- تبدیل پیریت به مگنتیت.....
- ۲۹-۷-۸-۷-۱- روش التراسونیک.....

فصل ۲ بررسی وضعیت هماتیت در ایران از نگاه زمین شناسی..... ۳۱

- ۳۱-۱-۲- بررسی ساختاری هماتیت در ایران.....
- ۳۱-۲-۲- کانسارهای آهن نواری بزرگ زمین و جایگاه کانسارهای آهن بزرگ ایران.....
- ۳۳-۳-۲- ذخایر آهن هماتیته در ایران.....
- ۳۳-۱-۳-۲- کانسارهای پهنه زاگرس (سازند هرمز).....
- ۳۴-۲-۳-۲- کانسارهای منطقه کاشمر تا بافق.....
- ۳۴-۱-۲-۳-۲- کانسار آهن ده زمان (کاشمر).....
- ۳۴-۲-۲-۳-۲- کانسارهای آهن منطقه بافق.....
- الف- کانسار آهن میشدوان.....
- ب- کانسار آهن-منگنز ناریگان.....
- ۳۶-۳-۳-۲- کانسارهای مرتبط با فاز آغازین یا شکل گیری پوسته اقیانوسی نئوتیس.....
- ۳۶-۱-۳-۳-۲- کانسار آهن منگنز دار هنشک تریاس (مهم ترین کانسار پهنه سندج-سیرجان جنوبی).....
- ۳۶-۲-۳-۳-۲- کانسارهای آهن-منگنز آتشفشانی-رسوبی کرتاسه.....
- ۳۷-۴-۳-۲- کانسارهای آهن سنوزوئیک کمر بند آتشفشانی-پلوتونیک خواف-بردسکن-کاشمر.....
- ۳۷-۱-۴-۳-۲- کانسار کوه زر.....
- ۳۷-۲-۴-۳-۲- کانسار مس قلعه زری.....

فصل ۳ فرآوری نمونه های مختلف هماتیته..... ۳۸

- ۳-۱- اهمیت فرآوری ذخایر هماتیت در ایران ۳۹
- ۳-۲- بررسی فرآوری نمونه های مختلف هماتیته ۳۹
- ۳-۲-۱- باطله کارخانه سنگ آهن چادرملو ۳۹
- ۳-۲-۱-۱- آنالیز شیمیایی نمونه باطله چادرملو ۴۰
- ۳-۲-۱-۲- آزمایش جدایش مغناطیسی با شدت های مختلف ۴۰
- ۳-۲-۲- نمونه آهن اکسیده معدن هماتیت اردهال ۴۱
- ۳-۲-۳- آماده سازی و آنالیز شیمیایی نمونه ۴۲
- ۳-۲-۴- بررسی توزیع ابعادی آهن ۴۲
- ۳-۲-۵- بررسی اولیه کانی شناسی نمونه ۴۲
- ۳-۲-۶- آزمایش اولیه جدایش مغناطیسی شدت بالا ۴۳
- ۳-۲-۷- آزمایش ترکیبی سایش و جدایش مغناطیسی ۴۳
- ۳-۲-۸- نمونه سنگ آهن سنگان ۴۴
- ۳-۲-۸-۱- بررسی توزیع دانه بندی و توزیع Fe و FeO در فراکسیون های مختلف نمونه سنگ آهن سنگان ۴۴
- ۳-۲-۸-۲- جدایش مغناطیسی خشک ۴۷
- نتایج و پیشنهادها ۴۸

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۱): فشار تجزیه اکسیژن برای اکسیدهای آهن در دماهای مختلف (فشار بر حسب اتمسفر)..... ۶
- جدول (۲-۱): خواص بعضی از کانی‌ها نسبت به آهن نرم..... ۶
- جدول (۳-۱): مشخصات و ترکیب شیمیایی سنگ آهن برای مصرف در کوره بلند و احیاء مستقیم..... ۹
- جدول (۴-۱): حد مجاز ناخالصی‌هایی که در سنگ آهن وارد و کیفیت آن را کاهش می‌دهد..... ۱۱
- جدول (۵-۱): نوع عناصر و حداکثر مجاز در سنگ آهن..... ۱۲
- جدول (۶-۱): ذخایر و منابع سنگ آهن در جهان (میلیون تن)..... ۱۶
- جدول (۷-۱): آنالیز نمونه‌های کنسانتره در دنیا..... ۱۷
- جدول (۸-۱): ذخایر سنگ آهن ایران..... ۱۸
- جدول (۱-۳): رده بندی ذخیره براساس درجه اکسیداسیون ماده معدنی..... ۳۹
- جدول (۲-۳): نتایج جدایش مغناطیسی باطله چادرملو (۲ آمپر)..... ۴۰
- جدول (۳-۳): نتایج جدایش مغناطیسی باطله چادرملو (۴ آمپر)..... ۴۰
- جدول (۴-۳): نتایج جدایش مغناطیسی باطله چادرملو (۶ آمپر)..... ۴۱
- جدول (۵-۳): آنالیز XRF نمونه هماتیت..... ۴۲
- جدول (۶-۳): مقدار عناصر مختلف در فراکسیون‌های مختلف..... ۴۲
- جدول (۷-۳): نتایج جدایش مغناطیسی شدت بالا بر روی نمونه‌های با ابعاد ۳۰ و ۵۰ مش..... ۴۳
- جدول (۸-۳): آنالیز محصولات آزمایش ترکیبی سایش و جدایش مغناطیسی..... ۴۴
- جدول (۱۰-۳): نتایج آنالیز شیمیایی فراکسیون‌های مختلف نمونه سنگ آهن سنگان..... ۴۶
- جدول (۱۱-۳): نتیجه آزمایش جدایش مغناطیسی خشک..... ۴۷

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): عمل احیا سنگ آهن هماتیت و پریار سازی با استفاده از جداکننده مغناطیسی ضعیف..... ۲۶
- شکل (۱-۲): عمل احیا سنگ آهن سیدریت و پریار سازی با استفاده از جداکننده مغناطیسی میدان ضعیف..... ۲۸
- شکل (۳-۱): شکل طرح هندسی از تغییر ساختار ذرات سنگ آهن در طول احیا..... ۲۹
- شکل (۴-۱): نمایی از روش فرآوری SMR..... ۳۰
- شکل (۱-۲): موقعیت رخداد انفجاری افزایش ناگهانی فوگاسیته اکسیژن آب دریاها..... ۳۲
- شکل (۲-۲): مقطع عرضی چینه شناسی سازند اسفوردی میزبان کانسار میشدوان..... ۳۵
- شکل (۱-۳): نمونه هماتیت معدن اردهال..... ۴۱
- شکل (۲-۳): نمودار دانه بندی نمونه سنگ آهن سنگان..... ۴۵
- شکل (۳-۳): نمودار توزیع FE و FEO در فراکسیون‌های مختلف نمونه سنگ آهن سنگان..... ۴۶

فصل ۱ کلیات

کلیات

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

۱-۱- مقدمه

آهن یکی از فراوانترین عناصر در پوسته زمین است. مقدار آهن در پوسته زمین حدود ۵ درصد می‌باشد و از این نظر چهارمین عنصر فراوان در پوسته زمین است. عدد اتمی آهن ۲۶، وزن اتمی ۵۵/۸۵، نقطه ذوب ۱۵۳۵ درجه سانتی‌گراد، نقطه جوش ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است. آهن به صورت خالص فلزی نقره‌ای رنگ و نرم و چکش‌خوار است. به علت میل ترکیبی شدید آن با اکسیژن در طبیعت به صورت خالص یافت نمی‌شود، فقط در بعضی از سنگ‌های آسمانی که وارد جو زمین شده‌اند به صورت فلزی و - آلیاژ مشاهده می‌شوند. آهن در طبیعت به شکل‌های ترکیبی مانند اکسید، سولفور، کربنات، سیلیکات و غیره یافت می‌شود و عملاً تمامی سنگ‌های پوسته زمین به استثنای بعضی از سنگ‌های آهکی حاوی مقداری آهن در ترکیب خود می‌باشند. همچنین مقدار کمی آهن در آب دریا وجود دارد. کانی‌های آهن‌دار در طبیعت فراوان بوده و تعداد آنها بالغ بر ۳۰۰ عدد می‌باشد که اکثر آنها از نظر استخراج متالوژی آهن به علت عیار کم آهن در آنها یا همراه بودن با کانی‌های مضر و نا مطلوب که عملیات تصفیه و جداسازی آنها را مشکل یا غیره ممکن می‌نماید غیر قابل استفاده نموده و عملاً تعداد محدودی از آنها که به طور کلی اکسیدهای آهن هستند برای این منظور اهمیت علمی دارند.

مهمترین کانی‌های آهن منیتیت، هماتیت، لیمونیت، گونیت، سیدریت و ایلمنیت است. سنگ آهن به سنگی اطلاق می‌شود که به طور عمده از یک یا چند کانی نام برده تشکیل شده باشد. در اغلب موارد کانی‌های دیگر نیز همراه با کانی‌های آهن‌دار فوق در سنگ آهن وجود دارند که باعث پایین آمدن عیار آهن می‌شوند. صنعت ذوب آهن و فولاد پیوسته خواهان مواد اولیه به بخصوص سنگ آهن با کیفیت بهتر است. از آنجا که بیشتر سنگ آهن‌های استخراج شده شرایط مورد نیاز صنعت را برآورده نمی‌کنند، لذا فرآوری سنگ آهن اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند و به طور پیوسته مورد تحقیق و بررسی به منظور توسعه و پیشرفت تکنولوژی آن قرار دارد. عملاً سنگ آهن حداقل باید حدود ۴۰ درصد آهن^۱ داشته باشد و در شرایط خاص، سنگ با عیار کمتر نیز به علت ذخایر زیاد آهن یا شرایط ویژه سنگ از نظر ترکیب کانی شناسی و خصوصاً خاصیت پر عیار شدن با هزینه کم در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. انجام مطالعات در زمینه سنگ آهن اثر فراوانی در کاهش هزینه ذوب و تصفیه و هزینه مصرف انرژی در خط تولید آهن دارد. با انجام عملیات فرآوری نمی‌توان برخی از روش‌های حرارتی را حذف کرد و یا شدت آلاینده‌گی آن را کاهش داد. مجموعه این اهداف باعث شده است امروز فرآوری در صنایع معدنی و متالوژی آهن اهمیت بسیاری داشته باشد. در بسیاری از موارد نیز کاربرد فرآوری شرط اصلی برای انجام پذیری و اقتصادی بودن روش صنعتی است. شایان ذکر است که دامنه فرآوری و مراحل آن بستگی به سنگ معدن و پیچیدگی آن دارد. پیچیدگی سنگ می‌تواند ناشی از عوامل متعددی نظیر ترکیب کانی‌شناسی، دانه‌بندی کانسنگ و پیچیدگی ناشی از هوازدگی باشد، هدف از فرآوری سنگ آهن، پر عیار شدن

^۱ با توجه به هزینه های تولید و همچنین بازدید میدانی از کارخانه های کنسانتره سنگ آهن، حداقل عیار بار ورودی برای تولید اقتصادی کنسانتره حدود ۴۰ درصد مناسب است. برای عیارهای پایین تر سعی می‌شود با روش های خردایش، دانه بندی و جدایش مغناطیسی خشک، محصول با عیار ۴۰ درصد برای ورود به کارخانه کنسانتره مهیا شود.

آهن و کاهش عیار عناصر مضر و مزاحم در آن است. علاوه بر عناصر مضر تعدادی عنصر نیز وجود دارند که اگر مقدار آنها از حدی فراتر نرود، سبب بهبود کیفیت فولاد و یا بهبود وضعیت تولید آن می‌شود. عنصر آهن به لحاظ ترکیب به دو صورت است دو ظرفیتی اغلب در سنگ های آذرین و سه ظرفیتی در سنگ های رسوبی و هر دو ترکیب در کانسار های آهن یافت میشوند. از دیدگاه فرآوری کانسارهای رسوبی لایه‌ای از اهمیت خاصی در دنیا بوده ولی در ایران به دلیل نبود ذخیره کافی از آن چندان قابل توجه نیستند.

مصرف اصلی سنگ‌های آهن در تولید آهن و فولاد می‌باشند و علاوه بر آن مصارف فرعی دیگر نیز برای سنگ آهن موجود است که بستگی به شکل و نوع کانی دارد. به عنوان مثال از مگنتیت در ابعاد ریز می‌توان برای تهیه واسطه سنگین استفاده کرد و یا از همین کانی در ابعاد درشت‌تر می‌توان برای مجموعه سنگی بعضی از بتن‌ها استفاده کرد. برخی از کانه‌های آهن به عنوان پیگمنت یا همان خاک سرخ در صنایع رنگ‌سازی استفاده می‌شود. مقداری در صنایع سیمان و همچنین به عنوان ماده گدازه‌آور در متالورژی فلزات غیرآهنی استفاده می‌شود. تولید هر تن چدن و فولاد از سنگ آهن به طور متوسط حدود ۱/۵ تا ۲ تن سنگ معدنی آهن نیاز دارد که این میزان به عیار اولیه آهن در سنگ معدنی و در صورتی که مورد عملیات فرآوری قرار گرفته باشد به بازدهی فرآوری بستگی دارد. با توجه به این که تولید جهانی آهن از طریق سنگ معدن حدوداً ۵۰۰ میلیون تن در سال می‌باشد ملاحظه می‌شود که مقدار سنگ معدن مصرفی در جهان برای تولید آهن نزدیک به ۷۵۰ تا ۱۰۰۰ میلیون تن در سال بوده و سایر مصارف سنگ آهن در مقابل این حجم ناچیز است.

به طور کلی قسمت عمده سنگ آهن در روش سنتی تولید آهن و فولاد (کوره باند و کنورتور) و فقط قسمت جزئی از آن در سایر روش‌ها به ویژه احیاء مستقیم مصرف می‌شود. مشخصات لازم برای سنگ آهن با توجه به نوع مصرف و منطقه تولید و تهیه متفاوت می‌باشد فرآیند احیاء مستقیم بنا به ویژگی آن نیاز به سنگ آهن غنی‌تر و فاقد ناخالصی‌های نامطلوب است. تاکنون صدها روش احیاء مستقیم در سطوح مختلف آزمایشگاهی، نیمه‌آزمایشگاهی و صنعتی در ظرفیت‌های مختلف احداث و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. یکی از متداول‌ترین شیوه‌های احیاء مستقیم سنگ آهن با گاز طبیعی در سطح جهان، روش میدرکس است که در آن گندله‌های پخته تولیدی از سنگ آهن، توسط گازهای حاصل از اکسایش جزئی گازهای طبیعی در کوره احیاء در حالت جامد به طور مداوم احیاء می‌شوند. آهنی که در تولید فلز استفاده می‌شود، یک عنصر نیست بلکه یک آلیاژ است و در واقع یک محلول از فلزاتی است که به همراه مقدار زیادی غیر فلزات به ویژه کربن مشاهده می‌شود.

۱-۲- مشخصات آهن

۱-۲-۱- تاریخچه مختصر آهن

علامت Fe و کلماتی مانند Ferrous از کلمه لاتین Ferrum گرفته شده است. دانسته‌ها و آموخته‌های باستان‌شناسی و تاریخی اذعان می‌دارد که شناخت و کاربرد آهن تاریخی ۶ هزار ساله دارد. اولین نشانه‌های استفاده از آهن متعلق به حدود ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد یعنی زمان یومری‌ها و مصریان می‌باشد که انواع نیزه و ارابه در آنجا کشف شده است. گداز آهن از کانه آن در ۲ در ۳ هزار سال قبل از میلاد انجام شد. واضح است تاریخ فلزگدازی با

فرآوری آهن آغاز نشده چرا که آدمی پیش از آن به عصر مفرغ گام نهاده بود، لکن با گداختن آهن چهارمین گام را در راه تمدن برداشت که تاکنون نیز در همان کام می‌باشد. عامل اصلی افزایش استفاده از آهن، کاهش ذخایر قلع بوده و افزایش آهن کاری تاثیر کمتری در آن داشته، گداختن آهن ابتدا با گداز کانه هماتیت به کمک زغال چوب آغاز شد. همزمان با مرحله گزار از مفرق به آهن، **caburrzation** که فرآیند اضافه کردن کربن به آهن است کشف شد. اگر در دماهای ۱۴۲۰ و ۱۴۷۰ درجه کلون آهن همراه با کربن حرارت داده شود ماده مذاب یک آلیاژ با حدود ۹۵٪ آهن و ۳/۵٪ کربن، شکل می‌گیرد. این محصول قوی بوده و به اشکال مختلف قالب‌گیری می‌شود، اما در هنگام کار به شدت شکننده بوده. اگر این محصول کربن‌گیری می‌شد و کلیه کربن خود را از دست می‌داد از شکنندگی کمتری برخوردار می‌شد.

در زمان‌های گذشته تولید آهن در کوره‌های حفره‌دار و چال‌های کوچک که از گل یا پاره سنگ ساخته می‌شد انجام می‌گرفت. این کوره‌ها را آتش فرا یا کوره‌های فرا می‌نامیدند. مدت‌ها بعد که دستگاه‌های دم به وسیله نیروهای مولد به کار افتاد، توانست کوره‌های فرار را بلندتر سازد و با مقادیر بیشتری سنگ معدن و زغال چوب آن را پر کنند. این کوره‌های بزرگ، کوره‌های قطعه‌ای نامیده می‌شود. در منطقه زیگرلند آثار تولید آهن تا سالهای قبل از میلاد یافت می‌شد و کوره‌های بلند که تحول یافته کوره‌های قطعه‌ای بود برای نخستین بار در این منطقه شروع به کار کرد. در اواسط قرن ۱۸ میلادی برای اولین بار در انگلستان توانستند در کوره‌های بلند به جای زغال چوب از زغال سنگ استفاده کنند. استفاده از کک به عنوان یک عامل احیاء کننده قوی را می‌توان یکی از فاکتورهای مهم آغاز انقلاب صنعتی به شمار آورد. با پیشرفت تکنولوژی ساخت آهن کوره‌های احیاء آهن جایگزین کوره‌های ذوب ساده شدند و تولید چدن با مصرف متعدد آهن و زغال‌های کک شو آغاز شد. توسعه این صنعت باعث شد که تبدیل چدن به فولاد ممکن شود. در قرن ۱۹ چگونگی تولید فولاد با کیفیت بالا شناخته شد. فولادهای ضد زنگ کربن بالا، فولادهای مقاوم در برابر اسید به صورت آلیاژهای مخصوص با اضافه شدن فلزاتی مانند منگنز، کروم، تیتانیوم و انادیوم، نیکل، کبالت و تنگستن تولید شد.

۱-۲-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی آهن

آهن در گروه A جدول تناوبی و در دوره ۴ می‌باشد. نام جدول تناوبی و در دوره ۴ می‌باشد. نام **Iron** از واژه انگلوساکسون به معنی فلز مقدس گرفته شده و نماد Fe از واژه لاتین (**Ferrum**) به معنی آهن اقتباس شده است. آهن به عنوان چهارمین عنصر فراوان در پوسته زمین با فراوانی ۵/۰٪ و دهمین عنصر فراوان در جهان می‌باشد. کلارک عنصر آهن ۴/۶ است که در سنگ‌های مافیک و اولترامافیک تا ۲ برابر افزایش می‌یابد. یک اتم آهن معمولی ۵۶ برابر جرم یک هیدروژن معمولی است. آهن خالص به رنگ سیاه تا خاکستری و در سطح صیقلی به رنگ سفید فلزی بوده و دارای عدد اتمی ۲۶، وزن اتمی ۵۵/۸، وزن مخصوص ۷/۳ گرم بر سانتی متر مکعب، سختی ۴ در مقیاس موس، جلای فلزی، نقطه جوش ۲۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، نقطه ذوب ۱۵۳۶ درجه سانتی‌گراد و خواص مغناطیسی زیاد می‌باشد. آهن ۴ ایزوتوپ پایدار با منشأ طبیعی دارد که عبارتند از: **Fe54**، **Fe56**، **Fe57** و **Fe58** که فراوانی نسبی ایزوتوپ‌های آهن به ترتیب برابر است با ۵/۸، ۹۱/۷، ۲/۲ و ۰/۲۸۵ درصد از لحاظ شیمیایی آهن عنصری فعال است و

در هوا با آب سریع اکسید می‌شود و از لحاظ آرایش الکترونی شبیه کبالت، کروم، منگنز، تیتان و آنادیوم است. به علت رفتار ژئوشیمیایی مشابه این عنصر با آهن به این عناصر گروه فریدها گفته می‌شود.

حالات اکسیداسیون در آهن عبارتند از:

حالت فروس Fe^{2+} ، حالت فریک Fe^{3+} ، حالت فریل Fe^{4+}

حالت فرات پتاسیم K_2FeO_4 که بسیار نادر و یک اکسید کننده انتخابی برای الکل های اولیه است

حالت کاربید آهن Fe_3C که به صورت سنگ سیمان شناخته شده است

حالت اکسید آهن FeO آهن در سنگ‌های آذرین بیشتر به صورت ۲ ظرفیتی و در سنگ‌های رسوبی به صورت ۳ ظرفیتی دیده می‌شود. آهن در سطوح فوقانی زمین به صورت فریک با اکسیژن ترکیب شده و در تشکیل کانی‌ها مشارکت می‌کند. در اعماق زمین این عنصر بیشتر به صورت فرو در کانه‌های سیلیکاته وجود دارد. بنابراین نسبت فرو به فریک تابع عمق منشاء و زمان واکنش با اتمسفر می‌باشد.

ترکیب‌های آهن در مرحله اول تبلور ماده مذاب و همچنین در مرحله اصلی تبلور در داخل سنگ‌های قلیائی، به صورت سیلیکات‌های آهن و منیزیم و یا به صورت اکسیدها یا سولفورهای فرعی و یا بیشتر از مقدار کانی‌های اصلی پیدا می‌شوند و بالاخره از منشاء گرمایی به صورت ترکیبات کربنات، اکسید و سولفور به شکل کانی اصلی و یا کانی گانگ در رگه‌های مختلف معدنی تشکیل می‌شوند. تمرکز آهن در کانسارهای دگرسانی جانشینی و یا رسوبی نیز اهمیت زیادی دارد.

۱-۲-۳- کانی‌های آهن

انواع کانی‌های آهن شامل کانی‌های اکسیده آهن، کانی‌های اکسیده آبدار، کانی‌های کربناته، کانی‌های سولفور، کانی‌های آرسنیک‌دار، کانی‌های سولفات و کانی‌های سیلیکاته می‌باشند. به طور مختصر کانی‌هایی که قابل استفاده در صنعت متالورژی آهن و فولاد میباشد را بررسی می‌کنیم.

۱-۲-۳-۱- کانی‌های اکسیده

کانی‌های اکسیده مهمترین نوع کانی آهن می‌باشند که در صنعت متالورژی آهن از آن استفاده می‌شود. در بین آنها هماتیت و مگنتیت بیشترین کاربرد را دارا می‌باشند.

الف) هماتیت

فرمول شیمیایی آن Fe_2O_3 است. در حالت خالص ۶۹/۹۴ درصد آهن و ۳۰/۰۶ درصد اکسیژن دارد. رنگ آن ممکن است از خاکستری به قرمز تیره یا قرمز روشن تغییر کند. وزن مخصوص آن ۵/۲۶ گرم بر سانتی متر مکعب است. ممکن است به صورت کلوخه‌ای، خاکی، کمپاکت و یا کریستالی باشد. نوع بسیار خالص این کانی که به صورت خاکی و قرمز رنگ است و گل اخرا نام دارد در جزیره هرمز وجود دارد. سنگ معدن هماتیت معمولاً دارای درجه خلوص بالا (۵۰ تا ۶۸ درصد آهن) بوده و عمدتاً با باطله سیلیسی همراه است.

احیاءپذیری این سنگ معدن نسبت به مگنتیت بسیار بهتر است. اغلب مواقع این کانی همراه مقداری فسفر است. هماتیت در دمای ۱۴۵۷ درجه سانتی‌گراد و فشار اکسیژن یک اتمسفر به مگنتیت و آهن تجزیه می‌شود. فشار تجزیه

اکسیدهای آهن در دماهای مختلف و حرارت تشکیل آن‌ها در جدول ۱-۱ داده شده است. چون فشار جدول اکسیژن برای هماتیت زیاد است در نتیجه به آسانی در دمای بالا حتی در محیط‌های احیایی ضعیف، به مگنتیت تبدیل می‌شود. به همین دلیل هنگام کلوخه‌سازی کانه‌های آهن مقدار زیادی از هماتیت به مگنتیت تبدیل شده که به این ماده هماتیت ثانویه می‌گویند.

جدول (۱-۱): فشار تجزیه اکسیژن برای اکسیدهای آهن در دماهای مختلف (فشار بر حسب اتمسفر).

۱۱۰۰	۱۲۰۰	۱۳۰۰	۱۴۰۰	اکسیدهای آهن
درجه سانتی‌گراد	درجه سانتی‌گراد	درجه سانتی‌گراد	درجه سانتی‌گراد	
$5/2 * 10^{-5}$	$1/6 * 10^{-3}$	$1/4 * 10^{-2}$	$1/3 * 10^{-1}$	هماتیت به مگنتیت
$2 * 10^{-11}$	$8/4 * 10^{-10}$	$2/2 * 10^{-8}$	$3/7 * 10^{-7}$	مگنتیت به وستیت
$6 * 10^{-14}$	$1/3 * 10^{-12}$	$2 * 10^{-11}$	$2/1 * 10^{-10}$	وستیت به آهن

(ب) مگنتیت

دارای فرمول شیمیایی Fe_3O_4 می‌باشد. به سختی در HCL حل می‌شود. خالص آن حاوی $31/03$ درصد FeO و $68/97$ درصد Fe_2O_3 است. از نظر شکل بلور به صورت اکتاندر بوده و رنگ آن سیاه و شفافیت آن کدر بوده، جلای آن فلزی، مات و چرب، رخ آن ناقص مطابق با سطح، سیستم تبلور آن کویبک یا مکعبی و در رده‌بندی اکسید است. همچنین خاصیت مغناطیسی بسیار شدید دارد و منشاء تشکیل آن ماگمایی، دگرگونی، مجاور تیوهیدروترمال است. در جدول ۱-۲ زیر خواص بعضی از کانی‌ها نسبت به آهن نرم آورده شده است.

جدول (۲-۱): خواص بعضی از کانی‌ها نسبت به آهن نرم

نام کانی	فرمول شیمیایی	خاصیت مغناطیسی
آهن نرم	Fe	100
مگنتیت	Fe_3O_4	18/40
فرانکلینیت	-	37/35
ایلمینیت	$TiO_2 \cdot FeO$	34
پیروتیت	Fe1-XS	69/6
سیدریت	$FeCo_3$	82/1
هماتیت	Fe_2O_3	32/1
زیرکن	ZrO2	1

۱-۲-۳-۲- کانی‌های اکسیده آبدار

(الف) گوتیت

فرمول شیمیایی آن $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ یا FeO_2H است. از نظر ترکیب شیمیایی حاوی $89/9$ درصد Fe_2O_3 و $10/1$ درصد آب است.

مقدار آهن این کانی ۶۲/۹ درصد است. از نظر کانی‌شناسی دارای شکل بلوری ارتورمبیک می‌باشد. رنگ کانی قهوه‌ای تیره یا سیاه است. سختی آن در مقیاس موس ۴/۵ تا ۵/۵ و وزن مخصوص آن ۴ تا ۴/۴ گرم بر سانتی متر مکعب است.

(ب) لیمونیت

فرمول شیمیایی آن $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ است. مقدار آب تبلور آن بیشتر از گوئیت بوده و به طور معمول حاوی ۱۲ تا ۱۵ درصد آب تبلور می‌باشد. رنگ کانی نسبت به گوئیت روشن‌تر بوده و به رنگ زرد تا قهوه‌ای روشن در طبیعت دیده می‌شود.

۱-۲-۳- کانی‌های کربناته (سیدریت)

فرمول شیمیایی سیدریت $FeCO_3$ بوده و حاوی ۴۸/۳ درصد آهن می‌باشد. این کانی در سیستم تری‌گونال متبلور می‌شود. وزن مخصوص آن حدود ۳/۹ گرم بر سانتی متر مکعب و سختی آن ۳/۵ تا ۴/۵ در مقیاس موس است. کانسارهای سیدریت به طور کلی به دو طریق تشکیل می‌شوند:

- کانسارهای هیدروترمال: این کانی‌ها در حرارت‌های نسبتاً پایین تشکیل شده‌اند و معمولاً همراه با سولفورها یا سولفیدهای فلزی سرب، روی و مس می‌باشند. گاهی هم به طور کاملاً خالص با کلسیت در طبیعت دیده می‌شود.
- کانسارهای رسوبی: کانسار سیدریت به صورت رسوبی در مرداب‌ها تشکیل می‌شود. در اثر تجزیه مواد آلی در مرداب‌ها گاز کربنیت حاصل از این تجزیه روی کانی آهن دار اثر کرده و آن را به سیدریت تبدیل می‌نماید. در محیط‌های اکسیدکننده سیدریت نا پایدار بوده و تبدیل به گوئیت و لیمونیت می‌شود.

۱-۲-۳-۴- کانی‌های سولفور

(الف) پیریت

فرمول این کانی FeS_2 است. در ترکیب شیمیایی آن ۴۶/۶ درصد آهن و ۵۳/۴ درصد گوگرد وجود دارد. سیستم تبلور آن مکعبی است. وزن مخصوص آن ۴/۹ تا ۵/۲ گرم بر سانتی متر مکعب است و سختی آن ۶ تا ۶/۵ در مقیاس موس است. رنگ آن از زرد برنجی تا زرد مایل به قهوه‌ای تغییر می‌کند. معمولاً فاقد خواص مغناطیسی می‌باشد.

(ب) مارکاسیت

فرمول شیمیایی آن FeS_2 می‌باشد. در سیستم اورتورومیک متبلور می‌شود. وزن مخصوص آن ۴/۶ تا ۴/۹ گرم بر سانتی متر مکعب و سختی آن بین ۵ تا ۶ در مقیاس موس است. تشخیص مارکاسیت و پیریت بسیار مشکل است و معمولاً مقاطع تازه شکسته آن دارای یک تکه رنگ متمایل به سبز است که با مقاطع تازه شکسته پیریت متفاوت است. رنگ کانی از زرد برنجی تا قهوه‌ای روشن است. مارکاسیت در اثر هوازدگی سریع‌تر از پیریت تغییر شکل یافته و معمولاً به تشکیل لیمونیت منجر می‌شود.

ج) پیروتیت

فرمول آن $Fe_{1-x}S$ میباشد و از کانی های سولفیدی همانند وستیت که دارای کمبود آهن می باشند. مقدار X در فرمول این کانی از ۰/۱ تا ۰/۲ متغیر است و اغلب این کانی را با فرمول FeS نشان می دهند. مقدار گوگرد این کانی ۳۹ تا ۴۰ درصد می باشد. این کانی در سیستم هگزاگونال متبلور می شود و وزن مخصوص آن ۴/۵ تا ۴/۷ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. سختی آن در مقیاس موس ۴ می باشد.

۱-۲-۴- بررسی ترکیب شیمیایی آهن

ترکیب شیمیایی سنگ آهن در کاربرد آن بسیار مهم است و از این نقطه نظر سنگ آهن را می توان به چند دسته تقسیم کرد که به آن در زیر اشاره شده:

- سنگ آهن با فسفر کمتر از ۰/۰۴ درصد
- سنگ آهن با فسفر ۰/۰۴ تا ۰/۱۸ درصد
- سنگ آهن با فسفر بیشتر از ۰/۱۸ درصد
- سنگ آهن منگنز دار که منگنز آن ۲ تا ۱۰ درصد است
- سنگ آهن سیلیس دار که مقدار سیلیس آن بیش از ۱۵ درصد است
- سنگ آهن آلومین دار که آلومین آن بیش از ۵ درصد است
- سنگ آهن آهک دار که آهک آن بیش از ۱۵ درصد است

مصرف سنگ آهن به صورت مستقیم در کنورتورهای فولادسازی و یا برای احیا مستقیم، حجم بسیار کوچکی از تولید را تشکیل می دهند. با توجه به این که تولید فولاد به شکل احیاء مستقیم حدود ۵ درصد از کل تولید فولاد در جهان را تشکیل می دهند بنابراین این مصارف که مشخصات خاصی را برای سنگ آهن ایجاب می کند، بسیار محدود است. البته از آنجا که تولید فولاد در کشور ما به صورت عمده از طریق احیاء مستقیم بنا شده، بنابراین تعیین مشخصات لازم برای سنگ آهن به منظور کاربرد در احیاء مستقیم برای کشور ما اهمیت خاصی داشته و باید مورد بررسی قرار بگیرد. به لحاظ ابعادی نیز دانه بندی سنگ آهن مورد استفاده در کوره بلند عمدتاً در دو اندازه ۱۰-۰ و ۲۵-۱۰ میلی متر است.

جدول (۳-۱): مشخصات و ترکیب شیمیایی سنگ آهن برای مصرف در کوره بلند و احیاء مستقیم [۱]

عنصر یا ترکیب	ترکیب شیمیایی	برای مصرف در کوره بلند (درصد)	تولید گندله و مصرف در احیاء مستقیم (درصد)
آهن	Fe	۴۰ تا ۶۳	۶۷ تا ۷۰
سیلیس	SiO ₂	۵ تا ۱۵	۱ تا ۳
آلومین	Al ₂ O ₃	۰ تا ۳	۰ تا ۱/۵
اکسید منیزیم	MgO	۰ تا ۲	۰ تا ۰/۵
فسفر	P	۰ تا ۰/۳	۰/۲ تا ۰/۰۳
گوگرد	S	۰ تا ۲	۰/۲ تا ۰/۰۴
آرسنیک	As	۰ تا ۰/۰۰۵	۰ تا ۰/۰۰۱
مگنتیت	Fe ₃ O ₄	۵ تا ۶	۰ تا ۲
مواد قلیایی	Na ₂ OK ₂ O	۰/۱ تا ۰/۲	۰/۱ تا ۰/۱۵

در راکتورهای احیا مستقیم وجود کاتالیزورهای گران قیمت که برای تفکیک گاز طبیعی لازم است، باعث شده عناصر مضر که برای کار کاتالیزورها نامطلوب است در ترکیب سنگ آهن بسیار محدود باشند. از طرف دیگر برای ذوب آهن اسفنجی از کوره‌های قوس الکتریکی استفاده می‌شود که انرژی مورد مصرف آن گران قیمت است، بنابراین حجم سرباره تولید شده در این کوره‌ها به ازای هر تن فولاد باید بسیار محدود باشد که این امر عیار بالای آهن در سنگ آهن را ایجاد می‌کند. معمولاً سنگ آهن فاقد این مجموعه خواص بوده و باید مورد عملیات پرعیارسازی و حذف ناخالصی‌های مضر قرار گیرد، تا بتوان آن را در احیاء مستقیم مصرف کرد. در جدول ۳-۱ مشخصات و ترکیب شیمیایی سنگ آهن برای مصرف در کوره بلند و احیاء مستقیم را نشان می‌دهد.

۳-۱- عوامل موثر بر ارزشیابی سنگ آهن

عوامل بسیاری در ارزشیابی سنگ آهن موثر است که به اختصار، شرح داده می‌شود

۳-۱-۱- عیار آهن

عیار آهن در سنگ معدنی یکی از مهمترین عوامل برای ارزشیابی و کاربرد سنگ معدن است. مقدار عیار آهن با توجه به مصارف و روش‌های مختلف تولید آهن متفاوت است. در روش سنتی (کوره بلند و کنورتور) حداقل عیار آهن برای کاربرد در کوره بلند ۴۰ درصد است. بدیهی است بازده تولید کوره بلند بستگی به عیار آهن دارد و هر چه عیار بالاتر باشد بازده و ظرفیت کوره بلند بالاتر بوده و کار آن اقتصادی‌تر خواهد بود. حداکثر عیار برای مصرف در کوره بلند ۶۲ تا ۶۳ درصد محدود شده است و چنانچه عیار از این حد تجاوز کند به علت کاهش وزن سرباره تعادل بین سرباره برقرار نبوده و عمل تصفیه چدن در داخل کوره بلند مختل شده و چدن حاصل از کیفیت مطلوبی برخوردار نخواهد بود. در احیاء مستقیم حداقل عیار سنگ آهن برای تولید گندله ۶۷ درصد است. کاهش عیار آهن باعث افزایش سرباره در کوره قوس الکتریکی شده و مصرف انرژی الکتریکی را بالا خواهد برد و کار کوره قوس الکتریکی از اقتصادی بودن

خارج خواهد کرد. با توجه به اینکه سنگ آهن مصرفی برای گندله و احیاء مستقیم باید فاقد عناصر نامطلوب باشد برای این منظور باید مورد عملیات فرآوری قرار گیرد. بنابراین کیفیت آهن از حد مطلوبی برخوردار بوده و لزومی به افزایش مقدار سرباره کوره برای تصفیه آن ندارد. در محاسبه عیار آهن شکل ترکیبی آن نیز موثر است. چنانچه آهن به صورت سیلیکات باشد، عملاً قابل احیاء نیست. در نتیجه مقدار آهنی که به صورت سیلیکاته می‌باشد در تعیین عیار محسوب نمی‌شود. عیار آهن برای مصرف در کوره بلند بستگی به باطله آن دارد. بعضی از سنگ‌های آهن که دارای باطله آهنی می‌باشند به مناسبت آنکه مواد گدازآور کمتری لازم خواهد داشت، با عیار کمتری قابل مصرف می‌باشند. چنانچه سنگ‌های آهن لرن در فرانسه به علت داشتن باطله آهنی با عیار کمتر از ۴۰ درصد به کار می‌روند.

۱-۳-۲- اندیس قلیایی بودن

اندیس قلیایی بودن سنگ در حقیقت نسبت Ca/SiO_2 است که در ارزشیابی سنگ معدن موثر بوده و با افزایش عددی این نسبت، ارزش سنگ نیز بالاتر می‌رود. همچنین نسبت Fe/SiO_2 نیز در ارزشیابی موثر بوده و با افزایش آن نیز قیمت سنگ بالا می‌رود.

۱-۳-۳- ناخالصی‌های سنگ آهن

تقسیم‌بندی ناخالصی‌های سنگ آهن به طریق متفاوت می‌تواند انجام گیرد. از نظر متالوژی آهن و فولاد، ناخالصی‌های سنگ آهن به سه دسته تقسیم می‌شود:

- ناخالصی‌هایی که در جریان تهیه و تولید آهن و فولاد تغییر نمی‌کند و مستقیماً وارد سرباره می‌شود، مانند: آلومین، اکسیدمنیزیم، اکسیدکلسیم و غیره.
 - ناخالصی‌هایی که در جریان تولید آهن و فولاد به طور جزئی تغییر می‌کنند. بعضی از این ناخالصی‌ها مانند سیلیس به طور جزئی، احیاء شده و وارد بار می‌شوند و بقیه آن به سرباره می‌روند و برخی دیگر مانند اکسیدهای تیتان سیلیکات‌ها و ترکیبات گوگرددار تغییر شکل داده و در بین سرباره و بار توزیع می‌شوند.
 - ناخالصی‌هایی که در جریان تولید احیاء شده و وارد بار می‌شوند، و یا اینکه بین بار و سرباره توزیع می‌شوند یا ممکن است به صورت گاز درآیند و همراه گاز خروجی، خارج شوند.
 - احیاء ترکیب‌های فلزی مانند مس و نیکل جزء دسته اول و فسفر و کادمیوم جزء دسته دوم می‌باشند.
- از نقطه نظر سنگ ناخالصی‌های سنگ آهن به دو دسته تقسیم می‌شود که عبارتند از:
- ناخالصی‌های مفید موجود در سنگ آهن
 - ناخالصی‌های نامطلوب در سنگ آهن که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.
 - ناخالصی‌های مفید: در این گروه دو ترکیب اصلی آهنک و ترکیبات منگنز دار قرار دارند.

الف) آهنک

از آنجا که باطله سنگ‌های آهن به طور کلی اسیدی و حاوی سیلیس زیادی است و ترکیب اخیر برای ذوب و جدا شدن از آهن به مواد گدازآور نیاز دارد و ماده گدازآور اصلی در این مورد سنگ آهنک می‌باشد، بنابراین وجود آهنک در باطله سنگ‌معدنی آهن مفید بوده و باعث کاهش مصرف مواد گدازآور و در نتیجه کاهش انرژی و هزینه خواهد شد. بنابراین سنگ‌های آهن با باطله آهنکی مفید بوده و در مقایسه با سنگ آهن با باطله سیلیسی از ارزش بالاتری برخوردار است. کانسارهای آهن با باطله آهنکی در در جهان بسیار محدود بوده و در ایران قسمتی از ذخایر سنگ‌آهن، معدن شمس‌آباد، ازنا دارای باطله آهنکی است و مقدار آهنک آن حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد می‌باشد.

ب) ترکیبات منگنزدار

وجود کانی‌های منگنزدار همراه سنگ آهن بر ارزش اقتصادی این سنگ اثر گذاشته و باعث افزایش قیمت آن می‌شود. منگنز در جریان تولید آهن و فولاد باعث گوگردزدایی و مانع از باقی ماندن گوگرد به صورت سولفور آهن در چدن و فولاد می‌شود و بدین ترتیب کیفیت چدن و فولاد می‌شود. از طرف دیگر مقداری از منگنز به صورت فلزی وارد ترکیب چدن و فولاد شده و کیفیت آن را بالا می‌برد.

ج) ناخالصی‌های نامطلوب

این گروه از ناخالصی‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول آنها که وارد ترکیب فولاد شده و کیفیت آن را کاهش می‌دهد. جدول ۱-۴ حد مجاز این ناخالصی‌ها را سنگ آهن با عیار حدود ۶۰ درصد نشان می‌دهد.

جدول (۱-۴): حد مجاز ناخالصی‌هایی که در سنگ‌آهن وارد و کیفیت آن را کاهش می‌دهد

نوع ناخالصی	درصد حد مجاز	اثر ناخالصی
مس	۰/۰۰۶	وارد ترکیب فولاد شده و خواص مکانیکی آن را کاهش می‌دهد
قلع	۰/۰۱	وارد ترکیب فولاد شده و خواص مکانیکی آن را کاهش می‌دهد
کروم	۰/۰۱ تا ۰/۰۵	وارد سرباره شده و سیالیت آن را به شدت کاهش می‌دهد
وانادیوم	۰/۰۱ تا ۰/۰۵	وارد سرباره شده و سیالیت آن را به شدت کاهش می‌دهد

دسته دوم این ناخالصی‌ها ترکیباتی هستند که در تکنولوژی تولید آهن و فولاد ایجاد اختلال کرده، باعث فرسودگی و از بین رفتن سریع آنها می‌شوند و با متصاعد شدن در محیط زیست باعث آلودگی آن می‌شوند. جدول ۱-۵ زیر نوع این عناصر و حداکثر مجاز آنها را در سنگ آهن نشان می‌دهد.

جدول (۵-۱): نوع عناصر و حداکثر مجاز در سنگ آهن

نوع عنصر یا ترکیب	حداکثر مجاز در ترکیب سنگ آهن با عیار حدود ۶۰ درصد
روی	۰/۰۲ تا ۰/۰۵
سرب	۰/۰۲ تا ۰/۰۵
اکسید تیتان	۰/۱ تا ۰/۶
اکسید سدیم و پتاسیم	۰/۱ تا ۰/۲
آرسنیک	۰/۰۰۵
فسفر	۰/۱ تا ۰/۲
گوگرد	۰/۰۱ تا ۰/۱
کلر	۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۶
فلوئور	۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۲

مقادیر فسفر و گوگرد بر حسب روش فولادسازی و نوع محصول می‌تواند متغیر باشد. به طور مثال در روش دمش از کف مقدار فسفر می‌تواند از حد مجاز هم بالاتر باشد زیرا در این روش حذف فسفر به راحتی امکان می‌پذیرد و در نتیجه این روش مناسب سنگ آهن با فسفر بالا می‌باشد. وجود فسفر در پروفیل‌های ساختمانی دارای تلورانس بالاتری نسبت به ورق می‌باشد، بنابراین کارخانه‌هایی که تولید آنها پروفیل ساختمانی است می‌توانند سنگ معدنی با فسفر بالاتری را مصرف کنند. در کل، در روش احیاء مستقیم دو عنصر فسفر و گوگرد بسیار نامطلوب است، زیرا باعث مسمومیت کاتالیزورهای راکتور تفکیک گاز طبیعی می‌شوند.

۱-۳-۴- ابعاد

ابعاد خود عامل موثری در ارزشیابی سنگ معدنی می‌باشد. کاهش ابعاد باعث افزایش ارزش سنگ می‌شود. کاهش ابعاد سنگ معدنی باعث صرفه‌جویی در هزینه خردایش بعدی و همچنین به علت افزایش وزن مخصوص ظاهری، سنگ حجم کمتری را اشغال می‌نماید و هزینه حمل و نقل آن نیز کاهش می‌یابد. دانه ریز بودن ابعاد نیز محدود می‌باشد و چنانچه بیش از حد ریز باشد به دلیل مشکلات حمل و نقل از ارزش سنگ کاسته می‌شود. در حجم‌های بزرگ نیز می‌توان سنگ را توسط لوله جابجا نمود که باعث کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌شود.

به طور کلی ابعاد سنگ آهن به چند دسته تقسیم می‌شود:

- سنگ درشت با ابعاد بیشتر از ۵۰ میلی‌متر.
- سنگ متوسط با ابعاد ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر.
- سنگ خرد با ابعاد ۱ تا ۱۰ میلی‌متر.
- سنگ ریز با ابعاد ۱۰ تا ۱ میلی‌متر.
- نرمه یا پودر با ابعاد کمتر از ۷۵ میکرون.

ارزش سنگ معدن از درشت تا ریز افزایش یافته ولی در مورد نرمه مسائل بسیاری از قبیل حجم، چگونگی حمل و نقل و غیره بر ارزش آن تاثیر می‌گذارد. چگونگی جابجایی نیز در ارزش سنگ معدن در محل معدن اثر می‌گذارد. با توجه به اینکه حمل و نقل دریایی بسیار ارزانه‌تر از حمل و نقل با قطار و کامیون می‌باشد و حمل با کشتی‌های بزرگ با

ظرفیت‌های بالا حداقل ۳۰ تا ۴۰ درصد از حمل و نقل با کشتی‌های کوچک است معادن نزدیک به دریا‌های عمیق از ارزش بالاتری برخوردار می‌باشند. حمل با لوله نیز برای نواحی گرمسیر و مسطح محدود می‌شود. همچنین خاصیت فرسایشی ذرات، شکل آنها گرد یا گوشه‌دار بودن و غیره روی انتقال توسط لوله به منظور حمل و نقل تاثیر دارد.

۱-۳-۵- قابلیت‌های پر عیارسازی

بیشتر سنگ‌های آهن امروزه عملاً مورد عملیات فرآوری به منظور پرعیارسازی و یا حذف ناخالصی‌های نامطلوب می‌گردند. بنابراین قابلیت پرعیارسازی و هزینه آن در ارزشیابی سنگ معدن موثر خواهد بود. به طور کلی روش‌های فیزیکی و مغناطیسی ارزان‌تر از فلوتاسیون است، بنابراین کانی‌های آهن‌دار که دارای خاصیت مغناطیسی باشند با هزینه کمتری قابل پر عیار شدن هستند.

۱-۳-۶- قابلیت خردایش

خردایش سنگ یکی از گران‌ترین عملیات فرآوری می‌باشد. عملاً بیش از ۵۰ درصد هزینه و ۷۰ درصد انرژی در عملیات فرآوری صرف خردایش نمونه می‌گردد. بنابراین قابلیت خردایش سنگ آهن روی ارزشیابی آن اثر بسیار مهمی دارد. در خردایش، اندیس کار، سنگ یکی از عوامل اصلی بوده و هر قدر سهم اندیس کار سنگ بیشتر باشد هزینه خردایش بیشتر می‌شود. بسیاری از سنگ‌های معدنی تا ابعاد حدود ۱ میلی‌متر به راحتی خرد می‌شوند ولی خردایش ریزتر از آن مواجه با اشکال و هزینه و مصرف انرژی زیاد می‌باشد. قابلیت خردایش سنگ را می‌توان به دو قسمت کرد که عبارتند از:

• قابلیت خردایش درشت

این قابلیت مربوط به خردایش تا ابعاد ۱ میلی‌متر است. در این قابلیت وجود درزه، شکاف، ترک، تخلخل، صفحات کلبواژ، رگه‌های ناخالصی و در نهایت سختی از عوامل مهم می‌باشند.

• قابلیت خردایش نرم

این قابلیت مربوط به خردایش سنگ تا ابعاد کوچکتر از ۱ میلی‌متر است. معمولاً خردایش نرم برای تولید گندله به کار می‌رود و حد آن در حدود ۴۴ میکرون می‌باشد. در این خردایش سختی سنگ و شکل بلوری و خواص فیزیکی آن از عوامل اصلی می‌باشد. بنابراین بسته به نوع عملیاتی که باید روی سنگ انجام شود و نوع مصرف سنگ آهن قابلیت خردایش درشت یا نرم در ارزشیابی سنگ موثر خواهد بود.

۱-۳-۷- خاصیت احیاءپذیری

خاصیت احیاء شونده‌گی سنگ آهن به عوامل متعددی بستگی دارد که در بین آنها نوع کانی، ابعاد و تخلخل مهمترین می‌باشند. احیاء پذیری کانی‌های آهن دار به صورت زیر می‌باشد:

سیدریت ← لیمونیت ← هماتیت ← مگنتیت

عامل بعدی در قابلیت احیاءپذیری تخلخل است. هر قدر میزان تخلخل افزایش یابد، قابلیت احیاءپذیری سنگ آهن بالا می‌رود. معمولاً کلوخه‌ها، تخلخلی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد و گندله‌ها تخلخلی در حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد دارا

می‌باشند. در مورد مخلوط کلوخه و گندله با آنکه کلوخه تخلخل بیشتری نسبت به گندله دارد، ولی به علت اینکه دانه‌های گندله از نظر ابعاد منظم‌تر بوده خاصیت احیاءپذیری و کارایی گندله بهتر است.

سرانجام ابعاد نیز اثر مستقیم در احیاءپذیری دارد و هر قدر کانی دارای خاصیت احیاءپذیری بیشتر باشد ابعاد بزرگتری از سنگ معدنی حاوی آن را می‌توان به کوره بارگیری کرد. به طور مثال در مورد سیدریت و لیمونیت سنگ‌ها با ابعاد بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر را می‌توان به صورت مستقیم در کوره شارژ کرد. در مورد هماتیت ابعاد سنگ باید در حدود ۳۵ تا ۵۰ میلی‌متر باشد و در مورد کانی مگنتیت که دارای خاصیت احیاءپذیری کمتری است حداکثر ابعاد آن به حدود ۳۰ میلی‌متر محدود می‌شوند. قابل توجه است ابعاد کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر به علت ایجاد مشکل در توزیع گازهای صعودی برای کوره‌های بلند مطلوب نیست.

۱-۳-۸- سختی آهن

سختی سنگ معدن عامل مهمی در کاربرد آن است. اگر سنگ آهن مستقیم در کوره بلند بارگیری شود سختی مطلوب خواهد بود، زیرا در کوره خرد نشده و مقاومت مکانیکی کافی خواهد داشت. ولی از آنجا که امروزه عملاً در صنعت، سنگ آهن کمتر به صورت مستقیم به کار برده می‌شود و عمده مصرف آن به صورت کلوخه یا گندله در تولید آهن و فولاد کاربرد دارد و افزایش هزینه خردایش آن به دلیل سختی سنگ آهن نامطلوب است. ذکر این مطلب نیز لازم است که سختی سنگ آهن معمولاً از سختی بلور کانی متفاوت می‌باشد. وجود درزه، شکاف، ترک و صفحات کلیواژ از سختی سنگ معدن کاسته و هزینه خردایش را پایین می‌آورد. نوع باطله همراه و توزیع ناخالصی‌ها به خصوص سیلیس باعث افزایش هزینه خردایش می‌شود.

۱-۳-۹- وزن مخصوص حقیقی و ظاهری

وزن مخصوص سنگ آهن از بلور کانی متفاوت است. وزن مخصوص حقیقی بستگی به عیار کانه آهن دار و نوع باطله دارد. در مورد سنگ آهن وزن مخصوص ظاهری اهمیت بیشتری دارد و هر قدر میزان آن بالاتر باشد مطلوب تر است زیرا سنگ معدن حجم کمتری را اشغال کرده و هزینه حمل و نقل کاهش می‌یابد. وزن مخصوص ظاهری به دانه‌بندی و تخلخل و نوع کانه آهن بستگی دارد و در حدود ۱.۶ تا ۴ گرم بر سانتی متر مکعب تغییر می‌کند. سنگ آهنی که کانه آن مگنتیتی باشد معمولاً وزن مخصوص بالاتری و سنگ‌های لیمونیتی وزن مخصوص کمتری را دارا می‌باشند.

۱-۳-۱۰- رطوبت و آب تبلور

مقدار رطوبت سنگ معدن بین ۰ تا ۲۰ درصد تغییر می‌کند. آب موجود در سنگ معدن ممکن است رطوبت یا آب تبلور باشد. در بعضی از کانی‌های لیمونیتی مقدار آب تبلور می‌تواند به ۱۵ تا ۱۶ درصد نیز برسد. هر قدر آب موجود در سنگ معدن بیشتر باشد، ارزش آن را بیشتر کاهش می‌دهد. وجود آب در سنگ معدن باعث افزایش هزینه حمل و نقل و

همچنین افزایش انرژی برای خشک کردن آن می‌شود. به خصوص در مورد آب تبلور باید در نظر داشت حذف آن نیاز به درجه حرارت بالاتری نسبت به رطوبت دارد و هزینه انرژی مصرفی برای حذف آن بالاتر خواهد بود.

۱-۳-۱۱- شکل و چگونگی عملیات انجام شده بر روی سنگ آهن

عملیات قبلی انجام شده بر روی سنگ معدن یکی دیگر از عوامل ارزشیابی آن است. سنگ آهن به صورت‌های مختلف در صنعت وجود دارد که به صورت موارد زیر می‌باشد:

- سنگ آهن به صورت مستقیم در این حالت سنگ از معدن استخراج و پس از خردایش تا میزان معینی مستقیم وارد بازار می‌شود.
 - کنسانتره آهن
- سنگ معدنی است که پس از استخراج و خردایش مورد عملیات فرآوری قرار می‌گیرد و معمولاً پر عیار بوده و فاقد ناخالصی‌های نامطلوب است.
- کلوخه
- سنگ آهن پس از خردایش مورد عمل کلوخه‌سازی قرار می‌گیرد و چون قابل حمل و نقل زیادی ندارد و در جریان جابجایی و حمل و نقل طولانی خرد می‌شود عمل کلوخه‌سازی فقط در محیط کارخانه ذوب آهن انجام می‌شود و این شکل سنگ آهن در بازار وجود ندارد.
- گندله

یکی از متداول‌ترین شکل سنگ آهن موجود در بازار است. در این فرایند سنگ آهن پس از خردایش و عملیات فرآوری به صورت گندله درآمده و به بازار عرضه می‌شود. تولید گندله از کنسانتره و عرضه آن به بازار عملاً مشکلات مربوط به حمل و نقل نرمه را حل می‌کند. گندله خودگداز که ترکیب آن آهک به اندازه کافی وجود دارد و به مصرف کوره بلند می‌رسد. در این گندله معمولاً عیار آهن در حدود ۶۲ تا ۶۳ درصد می‌باشد و اندیس قلیایی آن‌ها از ۱.۲ تا ۱.۴ تغییر می‌کند. گندله‌هایی که عیار آهن آن بالاتر از ۶۷ درصد است به مصرف احیاء مستقیم می‌رسد.

۱-۴- منابع و ذخایر جهانی سنگ آهن

مجموع ذخایر و منابع سنگ آهن در حدود ۷۵۰ میلیارد تن برآورده شده. از این مقدار حدود مقدار ۲۵۰ میلیارد تن ذخایر قابل استخراج بوده و در حال حاضر اولویت‌های اقتصادی استخراج سنگ آهن در جهان روی ۱۶۰ میلیارد تن از این ذخایر متمرکز شده. جدول ۱-۶ ذخایر و منابع آهن در جهان را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۶): ذخایر و تولید سنگ آهن در جهان (میلیون تن) سال ۲۰۲۱ [۲]

ردیف	کشور	میزان ذخیره	آهن محتوی ذخیره	میزان تولید	آهن محتوی تولید
۱	آمریکا	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۴۶	۲۹
۲	استرالیا	۵۱۰۰۰	۲۵۰۰۰	۹۰۰	۵۶۰
۳	برزیل	۳۴۰۰۰	۱۵۰۰۰	۳۸۰	۲۴۰
۴	کانادا	۶۰۰۰	۲۳۰۰	۶۸	۴۱
۵	شیلی	---	---	۱۹	۱۲
۶	چین	۲۰۰۰۰	۶۹۰۰	۳۶۰	۲۲۰
۷	هند	۵۵۰۰	۳۴۰۰	۲۴۰	۱۵۰
۸	ایران	۲۷۰۰	۱۵۰۰	۵۰	۳۳
۹	قزاقستان	۲۵۰۰	۹۰۰	۶۴	۱۳
۱۰	مکزیک	---	---	۱۷	۱۱
۱۱	پرو	۲۶۰۰	۱۵۰۰	۱۶	۱۱
۱۲	روسیه	۲۵۰۰۰	۱۴۰۰۰	۱۰۰	۷۱
۱۳	آفریقای جنوبی	۱۰۰۰	۶۷۰	۶۱	۳۹
۱۴	سوئد	۱۳۰۰	۶۰۰	۴۰	۲۸
۱۵	ترکیه	۱۳۰	۳۸	۱۶	۸/۹
۱۶	اکراین	۶۵۰۰	۲۳۰۰	۸۱	۵۱
۱۷	سایر کشورها	۱۸۰۰۰	۹۵۰۰	۹۰	۵۸
	مجموع دنیا	۱۸۰۰۰۰	۸۵۰۰۰	۲۶۰۰	۱۶۰۰

با توجه به اینکه روند تولید فولاد از سنگ معدن در کشورهای پیشرفته رو به کاهش است بنابراین به نظر می‌رسد واردات سنگ آهن این کشورها در آینده رو به کاهش بگذارد. شایان ذکر است که قسمت عمده سنگ آهن تولیدی دنیا بر خلاف انواع پر عیار شده، به صورت سنگ دانه‌بندی به کشورهای هم جوار صادر می‌شود. از کشورهای عمده تولید کننده سنگ آهن می‌توان به روسیه، برزیل، استرالیا، چین، کانادا، سوئد و آفریقای جنوبی اشاره کرد. عیار آهن این سنگ‌ها بالاتر از ۶۰ درصد بوده و فاقد ناخالصی نامطلوب است. ترکیب شیمیایی بعضی از سنگ‌های آهن فرآوری شده و عرضه شده و به صورت کنستاتره در جدول ۱-۷ آمده است.

جدول (۷-۱): آنالیز نمونه های کنسانتره در دنیا [۱]

نام معدن	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S	Mn
	%	%	%	%	%	%	%	%
اوتاریو-کانادا	۶۸	۱/۲۵	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۲
برزیل	۶۸/۵	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۰۵	۰/۱	۰/۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۱
برزیل-سامارکو	۶۷/۲	۱/۰۶	۰/۲۹	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۳	-
برزیل-فرتکو	۶۸/۰۱	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۶	-	۰/۰۸
هند-کودرموخ	۶۷/۵	۴-۳	۰/۱۵ تا ۰/۳	۰/۰۶ تا ۰/۱	۰/۰۲	-	-	-
هند-گوا	۶۸/۴۸	۰/۶۹	۰/۴	۰/۰۴	-	۰/۰۲۳	۰/۰۰۴	۰/۰۱۵
برزیل-CVRX	۶۷/۷۵	۲/۰۶	۰/۳	۰/۰۱	۰/۰۱	-	-	-
سوئد-LKAB	۶۹/۴	۱/۲۶	۰/۱۷	۰/۱۶۵	۰/۵۳	۰/۰۵	۰/۰۲	-
برزیل-MBR	۶۷/۸	۱/۱۲	۰/۱۶۸	۰/۰۲۱	۰/۰۳۹	۰/۰۳۵	۰/۰۰۶	۰/۳۷
ونزوئلا-CVG	۶۸/۰۵	۰/۶۵	۰/۴۵	-	-	۰/۰۳۹	۰/۰۰۸	۰/۰۴

۱-۵- منابع و ذخایر سنگ آهن ایران

کشور ایران از نظر ذخایر و منابع سنگ آهن، کشوری نسبتاً غنی است. مهمترین کنسارهای آهن اکتشاف شده در ایران در استان های یزد، کرمان، خراسان و مرکزی واقع شدند. میزان ذخیره قطعی این کنسارها تقریباً ۱.۸ میلیارد تن و ذخیره کلی آنها (ذخیره قطعی و احتمالی) در حدود ۳ میلیارد تن گزارش شده است که بیش از ۹۰ درصد از این کنسارها از نوع آذرین و اسکارنی هستند. عیار متوسط آهن در این معادن بیش از ۵۰ درصد بوده و اغلب از کانی های اکسیده آهن تشکیل شده. در حال حاضر ۵ سازنده آهن در ایران شناخته شده اند که می توان به سازنده های منیتیتی، منیتیت-هماتیتی، سیدریتی، ایمونیتی و هماتیتی قهوه ای اشاره کرد. ذخایر عمده منیتیتی در ایران مرکزی (حوالی بافق یزد) قرار دارد و در نواحی دیگر کشور نیز می توان به سمنان و سیرجان اشاره نمود. لازم به ذکر است که بیشترین ذخایر آهن ایران در فاصله پروترزویک پسین تا پالئوزویک پیشین تشکیل شده اند. به طور کلی نواحی سنگ آهن دار، ایران را به چند منطقه تقسیم کرد در جدول ۱-۸ به آن اشاره شده است. لازم به ذکر است اکثر ذخایر یاد شده در جدول مذکور از نوع منیتیتی است و بخش محدودی از این ذخایر مانند تنگه زاغ در استان فارس از نوع هماتیتی است.

جدول (۸-۱): ذخایر سنگ آهن ایران [۱]

ترکیب شیمیایی سنگ معدن (%)			ذخیره معدن (میلیون تن)	موقعیت	نام معدن	
S	P	Fe				
+۰/۱	+۰/۰۴	۵۸	۱۹۶	کیلومتر ۱۴ شمال غرب بافق	چغارت	
+۰/۱	+۰/۹۹	۵۵	۳۸۰	کیلومتر ۶۵ شمال غرب چغارت	چادرلو	
+۰/۸	+۰/۹	۴۰/۵	۱۱۷	کیلومتر ۳۰ شمال شرق چغارت	سه چاهون	
+۰/۱۲	+۰/۸	۴۵	۲۰۰	کیلومتر ۱۵۰ جنوب چغارت	جلال ایاد زرد	
-۰/۲	+۰/۵	۵۷	۱۰۰	کیلومتر ۴۵ شمال چغارت	چاه کز	
+۰/۱	+۰/۱۳	۳۱/۸	۱۰۰	کیلومتر ۴۰ شمال شرق بافق	ناریگان	
+۰/۰۴	+۰/۰۲/۵	۶۰-۵۰	۱۰-۲۰	-	ریاض پشت یادام	
+۰/۲/۲۵	+۰/۰-۱۵/۱	۵۶-۳۰	۱۳۰	کیلومتر ۲۵ شمال چادرلو	ساغند	
+۰/۱	+۰/۱۲	۲۷/۵	۳۳۷-۲۰۰	کیلومتر ۱۲ چغارت	اومالی شمالی - شرقی	
-	-	-	۲۲۰	-	سایر معادن	
+۰/۸۵	+۰/۰۴	۵۵	۱۱۰۰	کیلومتر ۵۰ جنوب غرب سیرجان	منطقه کرمان (معدن گل گهر)	
-۰/۷	+۰/۰۲	۴۵	در حال اکتشاف	کیلومتر ۲۹۰ جنوب مشهد	منطقه خراسان (معدن سنگان)	
-	-	۲۸-۵۰	۴۸	کیلومتر ۴۰ جنوب اراک	منطقه اصفهان - اراک (معدن شمس ایاد)	
+۰/۰۲	+۰/۰۸	۵۲-۵۰	-	کیلومتر ۷۰ شرق اصفهان	آب پوله	منطقه
-	+۰/۰-۰۲/۰۵	۶۵	۱	کیلومتر ۹ نیاسر	نیاسر	اصفهان
-	-	۶۲-۵۸	+۰/۵	کیلومتر ۴۰ شمال غرب گانمان	نیزار	گلستان
+۰/۲۲	+۰/۲۶	۶۴-۶۲	+۰/۵	کیلومتر ۳۰ غرب بندر لنگه	جزیره فرور	منطقه
-	-	۷۰ تا	+۰/۱۲	کیلومتر ۱۸ جنوب شرق بندر عباس	خاک سرخ هرمز	خلیج
+۰/۲۱	+۰/۱۸	۵۰-۴۰	۲۰	کیلومتر ۱۱۷ شمال شرق بندر عباس	تنگ زاق	فارس
+۰/۵	+۰/۰۵	۴۵-۴۰	۱/۵	۶۰ کیلومتری شرق سستان	شیخ ایاد شرق	منطقه
-	-	۶۷-۶۰	۲	۴ تا ۸ کیلومتری شمال سستان	سایر معادن	سستان
+۰/۱۰	+۰/۰۴	۶۳	۶۶	-	همه کنسی	منطقه
-	-	-	-	-	کاهی	همدان

۱-۶- کاربردها و مصارف سنگ آهن

آهن که در میان فلزات بیشترین مصرف را دارد، ۹۵٪ ذخیره فلزی تولید شده در تمام دنیا را به خود اختصاص می‌دهد و بیان تمدن امروزی را تشکیل می‌دهد. ترکیب‌های آهن به علت فراوانی، قیمت کم و استحکام زیاد، در انواع ماشین‌های سبک و سنگین، ساخت بدنه کشتی‌ها، راه‌آهن، پل‌ها، سدها، ساختمان‌سازی، تهیه ادوات جنگی، لوازم‌خانگی و ساخت کارخانه‌ها استفاده می‌شود. ۹۹٪ از کل مصرف آهن مربوط به صنایع فولاد و چدن می‌باشد و فولاد بهترین آلیاژ شناخته شده آهن است. مصارف دیگر سنگ آهن که بسیار ناچیزند عبارتند از: مصرف سنگ آهن در

بتن، استفاده در تولید سیمان، استفاده در گل حفاری، استفاده به عنوان واسطه سنگین در شستشوی زغال سنگ و به عنوان رنگدانه.

موارد کاربرد اکسید آهن طبیعی: رنگ سازی، جوهر چاپ، مداد شمعی پلاستیک، لاستیک، کاغذ، بتن، آجر، کاشی، جلاى سرامیک و ضد زنگ.

موارد کاربرد اکسید آهن مصنوعی: رنگ، لاستیک، پلاستیک، لوازم آرایشی، داروسازی، رنگ چوب.

موارد کاربرد منیتیت: آهنرباهای سرامیکی صلب و انعطاف پذیر، بهبود دهنده‌های اصطکاک در دمای بالا مانند لنت ترمز، جوهر چاپ مغناطیسی، خمیر شیشه و چینی، مواد مغذی ریز برای خاک، تصویرسازی، فتوکپی و فکس.

موارد کاربرد اکسید آهن میکایی: کنترل خوردگی مانند سازه‌های فولادی در پل‌سازی‌ها، دکل‌های دریایی، مبدل‌های ولتاژ بالا، دکل‌های انتقال برق، طرح‌های صنعتی و مخازن ذخیره.

موارد کاربرد هماتیت ریزدانه: صنایع ساینده مانند ساینده‌های بادی، ساینده‌های تجهیزات اپتیکی، گل حفاری، خطوط لوله دریایی و سکوهاى نفتی.

۱-۷- فرآوری سنگ آهن

۱-۷-۱- سنگ شکنی و خردایش سنگ آهن

سنگ شکنی و خردایش با هدف رساندن ابعاد بار به حد مطلوب و مورد نیاز برای عملیات بعدی، اولین قسمت از کارگاه فرآوری آهن و عملاً پرهزینه‌ترین قسمت است. به طوری که بیش از نیمی از هزینه‌های فرآوری و ۷۰٪ انرژی مصرفی در کارگاه را به خود اختصاص می‌دهد، بررسی و کاربرد روش‌هایی که بتواند در کاهش مصرف انرژی و هزینه اثر بگذارد، می‌تواند در اقتصاد کارگاه نقش مهمی را ایفا کند. یکی از مهمترین اهداف خردایش، آزاد سازی کانی‌های با ارزش از مواد باطله همراه در درشت‌ترین ابعاد ممکن است. بنابراین با کاهش میزان خردایش، مصرف انرژی، میزان نرمه و هزینه‌های جدایش کمتر و فرایند نیز ساده تر می‌شود. در حقیقت یک محصول پرعیار (پرعیارسازی کانسنگ‌های اکسیدی آهن) و یا یک محصول آرایش و یا پیرایش یافته (پیرایش کائولن با حذف ناخالصی‌های آهن) وابسته مطالعه دقیق تعیین درجه آزادی است.

در مورد خردایش کانسنگ‌های آهن، فرآیندهای متفاوتی وجود دارد که می‌توان به سیستم فکی یا ژیراتوری برای تولید موادی با ابعاد درشت، ژیراتوری ثانویه و مخروطی برای تولید موادی با ابعاد متوسط و آسیاهای میله‌ای، گلوله‌ای و قلوه‌سنگی برای موادی با ابعاد بسیار ریز اشاره کرد. فرآیند خردایش امروزه بیشتر در کارگاه‌های فرآوری سنگ آهن و در آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن به جای آسیاهای کلاسیک (میله‌ای و گلوله‌ای) انجام می‌شود که این عمل ضمن صرفه‌جویی در فضا، نیروی کار، هزینه و تجهیزات اضافه، سائیدگی‌های آهن نیز به دنبال ندارد.

بیشتر کانسنگ‌های آهن ایران که مورد مصرف واحدهای تولید فولاد قرار می‌گیرند، منیتیتی می‌باشند لذا کاربرد آسیاهای گلوله‌ای به منظور خردایش نرم با پوشش داخلی مغناطیسی می‌تواند راه حل مناسبی برای خردایش پیشرفته باشد. لازم به ذکر است که معمولاً بین پوشش فولادی خارجی آسیا و آستر لاستیکی، یک لایه مغناطیس دائمی وجود دارد و در حجم آستر لاستیکی نیز مغناطیس دائمی به طور یکنواخت پخش شده است. این امر باعث می‌شود که آستر

لاستیکی به جدار چسبیده و بدین ترتیب نصب آستر نیاز به پیچ و مهره نخواهد داشت، از طرف دیگر وجود مغناطیسی در پوشش داخلی آسیا باعث جذب ذرات نرم مغناطیسی (سنگ آهن مگنتیتی) در روی پوشش شده و آن را از خوردگی و فرسایش محافظت می‌کند. بدین ترتیب لایه محافظ در روی آستر تشکیل شده عامل مهمی در طول عمر پوشش داخلی خواهد بود. کاربرد آستر مغناطیسی باعث کاهش ضخامت آستر و وزن آسیا می‌شود و بدین ترتیب حجم مفید آسیا افزایش یافته و مصرف انرژی آن نیز نسبت به واحد وزن محصول تولیدی، کاهش می‌یابد. این پوشش‌ها در آسیاهایی که برای خردایش نرم هستند به کار می‌رود. ابعاد گلوله‌های آن نیز نسبتاً کوچک است. پوشش مغناطیسی می‌تواند به خوبی جانشین سایر انواع پوشش داخلی آسیاها شود و شرط کاربرد آن، وجود خاصیت مغناطیسی در بار خرد شونده می‌باشد که سنگ‌های آهن مگنتیتی مثال خوبی می‌تواند برای این امر باشد^۱.

۱-۷-۲- پرعیارسازی سنگ آهن

پرعیارسازی در مورد سنگ‌های معدنی کم عیار انجام می‌شود. هدف اصلی این عملیات، کاهش مقدار باطله سنگ آهن، افزایش عیار آهن در محصول و حذف ناخالصی‌های نامطلوب می‌باشد. این عملیات شامل روش‌های مختلف است که بر

اساس خواص فیزیکی، فیزیک و شیمیایی و یا شیمیایی پایه‌گذاری شده است. مهمترین این عملیات‌ها عبارتند از:

- طبقه بندی و سایش
- روش های ثقلی که براساس اختلاف وزن مخصوص کانی با باطله سنگ معدن قرار دارد.
- روش های مغناطیسی که براساس خاصیت مغناطیسی کانی های آهن دار به کار می روند.
- روش های فیزیکی-شیمیایی که بر اساس خواص سطحی کانی های آهن دار قرار دارد.
- روش های شیمیایی که بر اساس خواص شیمیایی کانی های آهن دار قرار دارد.

۱-۷-۳- طبقه بندی و سایش

الف) پرعیارسازی از طریق دانه‌بندی

در اثر خردایش، سنگ آهن به بخش‌های مختلف دانه‌بندی تقسیم می‌شود که توزیع آهن این بخش‌ها متغیر است و این موضوع می‌تواند برای پرعیارسازی کانسنگ آهن مورد استفاده قرار گیرد. توزیع آهن در بخش‌های مختلف دانه‌بندی بستگی به سختی کانه آهن دار و باطله همراه دارد.

چنانچه سختی کانی آهن دار بیشتر از باطله همراه باشد در اثر خردایش، باطله بیشتر خرد شده و مقدار آهن در بخش‌های دانه ریز کم خواهد بود و بالعکس، اگر سختی باطله بیشتر باشد در این صورت کانی آهن دار بیشتر خرد شده و در بخش‌های دانه درشت عیار آهن پایین خواهد بود. به عنوان نمونه از سنگ آهن تاکونیت می‌توان نام برد که

^۱ معدن Baiyunebo Deposit در مرز مغولستان و چین. برای مطالعه بیشتر به آدرس ذیل مراجعه شود:

باطله همراه آهن بسیار سخت بوده و در اثر خردایش معمولاً قسمت‌های آهن‌دار خرد شده و در بخش‌های درشت در حد سانتی‌متر عیار آهن بسیار پایین است و می‌توان با سرنده کردن ساده و جدا نمودن دانه درشت‌ها، عیار آهن را در محصول چند درصدی افزایش داد و یا در معادن آهن قیصر کالیفرنیا، باطله همراه نرم بوده و در بخش ریزتر از ۷۵ میکرون مقدار آهن بسیار کم است و با نرمه‌گیری از محصول خردایش و خارج کردن آن از مسیر می‌توان عملاً عیار آهن را بالا برد. این روش به تنهایی برای پرعیارسازی سنگ آهن کافی نبوده و عملاً مرحله اول پرعیارسازی را تشکیل می‌دهد و محصول حاصل پس از حذف بخش فقیر از آهن مجدداً در چرخه فرآیند پرعیارسازی قرار می‌گیرد.

ب) پرعیارسازی از طریق ساییش

در این روش، دانه‌های سنگ آهن در اثر حرکت درون استوانه‌ای روی یکدیگر اثر فرسایشی داشته و باعث می‌شود که کانی‌هایی که در در سطح کانی‌های آهن‌دار وجود دارند از سطح جدا شوند و به صورت نرمه درآیند و سپس با نرمه‌گیری می‌توان آنها را جدا کرد. در این مورد عیار آهن تغییر چندانی نمی‌کند ولی این روش می‌تواند ناخالصی‌های نامطلوب را به ویژه زمانی که این ناخالصی‌ها به صورت یک فیلم نازک روی سطح کانی آهن‌دار قرار گرفته است، کم و بیش حذف کند. از این روش برای کاهش مقدار آلومین سنگ آهن می‌توان استفاده کرد. آلومین در سنگ آهن اغلب به صورت رس می‌باشد که دارای سختی بسیار کمی بوده و بیشتر روی کانی‌های آهن‌دار را به صورت نواری نرم می‌پوشاند. با فرسایش و اصطحکاک دانه‌های آهن با یکدیگر این نوار از روی سطوح کانی جدا می‌شود. برای جدا کردن باید عمل مالش در محیطی نرم صورت گیرد. از این روش در معادن آهن هندوسان استفاده می‌شود که عیار آلومین در سنگ معدن اولیه در حدود ۵ درصد بوده و به کمتر از ۲ درصد کاهش می‌یابد.

۱-۷-۴- جدایش ثقلی

روش ثقلی پرعیار کردن بر اساس اختلاف وزن مخصوص کانی آهن‌دار و باطله آن پایه گذاری شده است. کانی‌های آهن‌دار معمولاً دارای وزن مخصوص بالاتر از ۴ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشند. باطله سنگ آهن معمولاً از کانی‌های آهکی (کلسیت) با وزن مخصوص ۲.۷ گرم بر سانتی متر مکعب و سیلیس و کوارتز با اختلاف وزن مخصوص ۲.۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب تشکیل شده است. بازده و کارایی این روش‌ها بستگی به اختلاف وزن مخصوص باطله و کانه دارد. از آنجایی که این اختلاف در مورد کانی‌های آهن‌دار و باطله قابل توجه است لذا بیشترین روش‌های فیزیکی پرعیار کردن را می‌توان در مورد سنگ‌های معدنی آهن به کار برد. این روش‌ها متعدد بوده و در زیر به بعضی از آنها اشاره می‌شود.

۱-۷-۴-۱- پرعیارسازی از طریق جیگ

به طور کلی روش‌های فیزیکی کمتر در مورد سنگ آهن به کار برده می‌شود. متداول‌ترین این روش‌ها، روش جیگ است. ذرات در این روش با حرکت متداول آب به صورت بالا رونده و پایین رونده به مدت بسیار محدودی به صورت معلق در آب در می‌آیند و بر حسب وزن مخصوص شان دانه‌بندی می‌شوند. ذرات سنگین در کف و ذرات سبک در سطح جمع می‌شوند.

چنانچه ذرات دارای ابعاد یکسان باشند، در این صورت دانه‌بندی بر اساس وزن مخصوص انجام می‌شود و ذرات با وزن مخصوص بالاتر در کف قرار گرفته و از دانه‌ها با وزن مخصوص کمتر جدا می‌شوند. هر چه اختلاف وزن مخصوص ذرات کانی و باطله بیشتر و اختلاف ابعاد ذرات کمتر باشد کارایی جیگ بیشتر و جدایی کامل تر خواهد بود. علاوه بر این دو عامل اساسی، عواملی نظیر اثر ذرات بر یکدیگر، ویسکوزیته پالپ، شکل ذرات و درجه آزادی آنها در کارایی جیگ موثر می‌باشد. ابعاد مناسب برای جیگ بین ۱ تا ۱۰ میلی متر است و عیب این روش ظرفیت پایین جیگ می‌باشد.

۱-۷-۴-۲- پرعیار سازی از طریق اسپیرال

در گذشته برای پرعیار سازی سنگ آهن از میز لرزان استفاده می‌شد، اما امروزه این دستگاه‌ها به طور کلی از صنعت فرآوری سنگ آهن حذف شده و اسپیرال جایگزین آن شده. اسپیرال، دستگاه مارپیچ شکلی هستند که به صورت عمودی قرار دارند. ذرات سبک و سنگین به صورت پالپ نسبتاً رقیق از بالا بروی دستگاه ریخته می‌شوند. ذرات سنگین در کف در تماس با سطح بشقاب قرار می‌گیرند. در اثر حرکت دورانی آب، نیروی گریز از مرکز بر روی ذرات وارد می‌شود که باعث رانده شدن ذرات با وزن مخصوص کم و معلق در آب به طرف جدار خارجی دستگاه و خروج آنها از طریق روزنه‌هایی که به همین منظور تعبیه شده‌اند می‌شوند. در حالی که ذرات با وزن مخصوص بالا بر روی سطح بشقاب قرار گرفته و نیروی اصطحاک موجود بین سطح و ذرات مانع از رانده شدن آنها به طرف جدار می‌شوند و بدین ترتیب جدایش انجام می‌شود. معمولاً اسپیرال به سری چیده می‌شود و در مواقعی که درجه آزادی کانی در ابعاد کاربردی بالا باشد کارایی اسپیرال نیز بالا می‌رود. ابعاد مناسب این دستگاه بین ۱۰ تا ۲ میلی متر است.

۱-۷-۴-۳- پرعیار سازی از طریق میز لرزان

از این دستگاه برای آرایش موادی با دانه‌بندی ریز و گاهی برای آرایش محصول بعضی روش‌های فرآوری به روش ثقلی پرعیار شده‌اند استفاده می‌شود. میز لرزان از سطح مستطیلی شکل که در جهت عرضی و طولی شیبی دارد. بار به شکل پالپ با غلظت ۲۵٪ جامد از یک گوشه وارد شده و روی میز توزیع می‌گردد. سطح میز دارای شیارهای طولی می‌باشد با فواصل کم که ارتفاع آنها از سمت ورودی به سمت خروجی کم می‌شود. توسط سیستم محرکه، حرکت نوسانی در جهت طول میز به به منتقل می‌شود. این حرکت به نحوی است که میز را به آرامی به جلو می‌برد و به سرعت به عقب بر می‌گرداند. در نتیجه دانه‌های جامد روی سطح میز، در امتداد طول به جلو پرتاب می‌شوند. بنابراین دانه‌ها تحت تاثیر دو نیرو قرار می‌گیرند. یکی نیروی ناشی از حرکت میز در جهت طول آن و یکی نیروی ناشی از حرکت لایه نازک آب در امتداد شیب عرضی، براین دو نیرو، در امتداد قطر میز از محل ورود بار اولیه است و چون تاثیر جریان لایه نازک آب به ابعاد و چگالی دانه بستگی دارد، در نتیجه دانه های کوچکتر و سنگین تر دارای حرکتی عمدتاً در جهت طول میز و به بخش محصول پرعیار هدایت می‌شوند، حال آنکه دانه‌های درشت تر و سبک تر با عبور از موانع به بخش باطله منتقل می‌شوند. در بخش خروجی میز تیغه‌ای قابل تنظیم وجود دارد که با کنترل موقعیت آنها می‌توان مسیر محصولات بدست آمده را کنترل کرد.

۱-۷-۴-۴- پرعیارسازی از طریق مولتی گراویتی

نحوه جدایش مواد در این وسیله مشابه میزهای لرزان است با این تفاوت که بستر جدایش به جای یک سطح مسطح، از سطح استوانه تشکیل شده است که حول محور خود دوران می‌کند. با توجه به نیروی گریز از مرکز وارد بر دانه‌ها، امکان آرایش ثقلی موادمعدنی توسط این وسیله در ابعاد کوچکتر وجود دارد. استوانه این دستگاه دارای محوری که نسبت به افق دارای شیب قابل تنظیم است و حول این محور با سرعتی قابل تنظیم، دوران می‌کند. در ضمن استوانه در امتداد محور خود دارای حرکت نوسانی غیر یکنواختی است که در جهت افزایش شیب به سرعت به جلو و به آرامی به عقب باز می‌گردد. دامنه و فرکانس این حرکت نیز قابل تنظیم است. بار اولیه پس از ورود به استوانه در اثر گردش آن تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز قرار می‌گیرد. با برقرار کردن جریان آب با ضخامت مناسب بروی جداره داخلی استوانه، کانی‌های سبک‌تر در امتداد شیب توسط آب به خارج حمل می‌شوند و کانی‌های سنگین‌تر که با نیروی بیشتری به دیواره چسبیده، تحت تاثیر حرکت نوسانی از سمت دیگر استوانه تخلیه می‌شوند. ابعاد کار این استوانه دانه با ابعاد ریزتر از ۵۰۰ میکرون می‌باشد. ظرفیت این دستگاه در مقیاس پیلوت در حدود ۲۰۰ کیلوگرم بر ساعت است و این در حالی است که در صنعت به حدود ۲ تن بر ساعت می‌رسد و به صورت دو استوانه پشت به پشت هم کار می‌کنند. در سال‌های اخیر از این وسیله برای آرایش ثقلی مواد معدنی در ابعاد کوچکتر و همچنین آرایش باطله‌های قدیمی معادن استفاده شده است.

ویژگی‌های دستگاه مولتی گراویتی از جمله خواص تغییرپذیری، مزایا و معایب آن‌ها را می‌توان به صورت موردی اشاره کرد، که به صورت زیر است:

تغییر پذیری

افزایش سرعت چرخش، نیروی گرانش بالاتری را به ذرات وارد نموده و باعث می‌شود که آن‌ها نتوانند از روی سطح استوانه جدا شوند، بنابراین دستگاه وزن کمتری را احساس می‌کند و در نتیجه عیار کنسانتره بالاتر می‌رود. افزایش طول ضربه و فرکانس بدون محدودیت، باعث می‌شود نیرویی که ذرات را به بالای استوانه می‌برد، بیشتر شود و در نتیجه عیار کنسانتره کمتر می‌شود. آب شستشوی استوانه باعث شسته شدن بیشتر ذراتی می‌شود که تلاش می‌کنند به سمت بالای استوانه بروند، در نتیجه عیار کنسانتره بیشتر می‌شود. زاویه شیب استوانه که با افزایش آن پر عیاری حاصل می‌شود.

مزایا

جدایش انتخابی بالا در اندازه ذرات ریز دارد (۷۵ تا ۱۰ میکرون)، نسبت ارتقاء یافتگی بالا دارد.

معایب

- نسبت به فضا و سطحی که می‌گیرد، ظرفیت کمی دارد، اگر چه ماشین‌هایی با ظرفیت بالاتر و ابعاد بزرگتر نیز در دسترس است.
- مکانیک بسیار پیچیده و گران قیمتی دارد.
- معمولاً پوشیده است و دیدن سطح جدایش مقدور نیست.
- نیاز به توجه زیاد اپراتور را دارد.

- نامناسب برای ذرات درشت (بار ورودی باید حتماً سرند شود)

۱-۷-۴-۵- پرعیار سازی از طریق واسطه سنگین

در این روش، یک پالپ با ذرات بسیار ریز و با وزن مخصوص بالا معلق در آب ساخته می شود که وزن مخصوص پالپ کمتر از وزن مخصوص کانی آهن و بیشتر از وزن مخصوص باطله می باشد. در اثر این پدیده، دانه های باطله همراه دانه های آهن (با وزن مخصوص کمتر از پالپ)، شناور و جدا می شوند. این دستگاه با ذرات نسبتاً درشت ۱ تا ۵ میلی متر کار می کند. کاربرد ذرات ریز تر باعث افزایش دانسیته و ویسکوزیته پالپ می شود و به این ترتیب مانع جدایی باطله از کانسنگ می شود. ذرات معلق در پالپ باید قابلیت جدایش را داشته باشند و معمولاً از ذراتی تشکیل می شوند که دارای خاصیت مغناطیسی هستند (فروسیلیسیم-مگنتیت). و قابلیت جدا کردن توسط خدکننده مغناطیسی و مصرف مجدد را نیز دارند. چنانچه در نظر باشد از این روش برای پرعیار کردن سنگ آهن استفاده شود باید سنگ آهن فاقد مگنتیت باشد. در غیر این صورت، باید این مواد توسط جدا کننده مغناطیسی با میدان ضعیف جدا شوند.

۱-۷-۵- روش های فیزیکی از طریق جدایش مغناطیسی

متداول ترین روش پرعیار سازی سنگ آهن به ویژه آهن اکسیده مانند مگنتیت که دارای خاصیت قوی هستند، روش جدایش مغناطیسی است که ارزانترین و کارآمدترین روش پرعیار سازی و حذف ناخالصی می باشد. اکثر ناخالصی های کانسنگ آهن مانند فسفات ها و ترکیبات گوگرد دار (به جزء پیروتیت که دارای خاصیت مغناطیسی است) فاقد خاصیت مغناطیسی بوده و در صورتی که درجه آزادی مناسبی داشته باشند، جدا و حذف می شوند. به طور کلی اکثر اکسیدهای آهن کم و بیش دارای خاصیت مغناطیسی هستند و باطله های متداول همراه با آن از جمله سیلیس، سیلیکات ها و کربنات کلسیم در مقایسه با خاصیت مغناطیسی اکسید های آهن خاصیت مغناطیسی بسیار کمتری دارند و با این روش جدا می شوند.

۱-۷-۶- روش های پرعیار سازی از طریق فلوتاسیون

در ابتدای قرن بیستم، کاربرد روش های فیزیکی - شیمیایی و از آن جمله فلوتاسیون به تدریج رو به افزایش نهاده است، به طوریکه امروزه موثرترین روش برای پرعیار سازی کانسنگ های آهن می باشد. مهمترین مزیت این روش در فرآوری کانسنگ های آهن عبارتند از:

- قابلیت پرعیار سازی با عیار کم و ابعاد بسیار ریز (تا ۱۰ میکرون).
- قابلیت کاربرد آن در مورد تمام کانی های سنگ آهن اعم از کانی ها با وزن مخصوص یکسان (ناکارآمد در روش های فیزیکی)، با خاصیت مغناطیسی یکسان (ناکارآمد در روش های مغناطیسی) و کانی ها با خاصیت سطحی غیر یکسان
- عیار و بازیابی کنسانتره آهن با این روش نسبت به سایر روش های پرعیار سازی بالاتر است.

- حذف موثر کانی‌های مزاحم از جمله پیریت و کانی‌های فسفر (کاهش گوگرد و فسفر در کنسانتره نهایی)

۱-۷-۷- پرعیارسازی از طریق فرآیند اسیدشویی

توزیع فسفر در کل کانسنگ‌های آهن به ویژه کانسنگ گوتیت، روش‌های فیزیکی پرعیارسازی را غیر موثر جلوه داده و به کارگیری روش‌های جدایش شیمیایی از طریق اسیدشویی را موجب شده است. فاز فسفر در هماتیت نسبت به گوتیت دارای حلالیت کمتری می‌باشد. گوتیت می‌تواند در اثر عمل تشویه شدن به هماتیت تبدیل شود که همین امر موجب آن خواهد شد که کانسنگ بهتر در یک اسید شسته شود. در روند تشویه دو عامل دما و زمان نقش اساسی را ایفا می‌کنند. همچنین شایان ذکر است که غلظت اسید مصرفی نقش اساسی در بازیابی آهن داشته و نباید از یک حد بهینه‌ای زیاد باشد. از جمله نمونه‌های عملی در این مورد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

فسفرزدایی کانسنگ آهن پرفسفر منطقه پیلبارا واقع در غرب استرالیا، که آقای گودن و همکارانش با توجه به اینکه مقدار فسفر موجود در کانسار در فاز درگیر با گوتیت می‌باشند روش‌های شیمیایی را به جای روش‌های فیزیکی پیشنهاد دادند. آنها با به کارگیری اسیدهای مختلف همچون سولفوریک، نیتریک، هیدروکلریک و محلول‌های هیدروکسید سدیم، مقدار فسفر کانسنگ را از ۰/۱۲ درصد تا ۰/۰۵ درصد کاهش دادند. زمان بهینه تشویه در این تحقیق ۳۰ دقیقه و دمای لیچینگ ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد، غلظت اسید حداکثر ۰/۲ مولار تعیین شده بود. آقای وانگ مقدار فسفر کانسنگ آهنی در چین را در اثر فرآیند اسیدشویی همراه آب باکتری تیوباسیلوس و اسید نیتریک از ۰/۳۶ تا ۰/۱۸ و ۰/۰۵ درصد کاهش داده است [۳ و ۴].

۱-۷-۸- پرعیارسازی از طریق فرآیند احیاء

پرعیار کردن سنگ آهن با تبدیل اکسیدهای آهن به مگنتیت از نظر اقتصادی حائز اهمیت است. به علت خاصیت مغناطیسی بالای مگنتیت این کانی به آسانی و با صرف انرژی و سرمایه‌گذاری کمتر نسبت به سایر روش‌های پرعیارسازی، قابلیت حذف ناخالصی‌ها را توسط کاربرد جداکننده مغناطیسی با میدان ضعیف را دارد. لذا تبدیل سایر اکسیدهای آهن به مگنتیت می‌تواند در اقتصاد پرعیار کردن سایر اکسیدها موثر باشد. تبدیل سایر ترکیبات آهن از طریق فرآیند احیاء به مگنتیت به خصوص در موارد زیر می‌تواند راه حل مناسبی برای پرعیار سازی سنگ معدنی آهن باشد.

۱-۷-۸-۱- هوا زدگی سنگ معدن

در حالتی که سنگ معدن مورد هوازدگی شدید قرار گرفته باشد، انواع مختلف اکسیدهای آهن سه ظرفیتی تشکیل خواهد شد که خواص کاملاً متفاوتی با اکسید اولیه که از آن به وجود آمده‌اند را دارند. به طور مثال در اثر هوازدگی، هماتیت می‌تواند به مارتیت و انواع هیدروکسیدهای آبدار تبدیل شود. در یک سنگ هوازده معمولاً انواع و اقسام کانی‌ها وجود دارند که هر یک خواص متفاوتی را از نظر پرعیارسازی دارند. با یک روش تنها نمی‌توان این سنگ‌ها را مورد عمل فرآوری قرار داد. در این مورد تبدیل همگی این کانی‌ها به مگنتیت می‌تواند از پیچیدگی روش فرآوری جلوگیری

و با کاربرد تنها یک روش (جداکننده مغناطیسی با شدت پایین) و در نظر گرفتن فناوری‌های در دسترس و ارزیابی اقتصادی این سنگ هوازده را پرعیار نمود.

۱-۷-۸-۲- توزیع دانه ریز ناخالصی‌ها

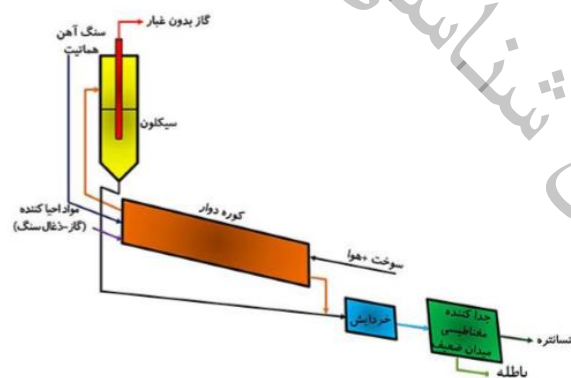
زمانی که درگیری شدید ناخالصی‌ها در هماتیت به شکلی باشد که ابعاد ذرات بسیار دانه ریز باشد نیاز به خردایش بسیار زیاد است که در این صورت بسیاری از روش‌های فرآوری فیزیکی و یا فلوتاسیون کارایی خود را از دست می‌دهند و یا راندمان بازیابی آن پایین می‌آید. در این حالت با تبدیل کانی اکسیده به منیتیت و استفاده از جداکننده مغناطیسی میدان ضعیف به روش تر کاربرد خواهد داشت.

۱-۷-۸-۳- روش‌های تبدیل کانی اکسید آهن به مگنتیت

در کلیه روش‌های تبدیل کانی‌های اکسید آهن به مگنتیت، سنگ معدن به ابعاد ۳ تا ۱۰ میلی‌متر خرد شده و بیشتر در یک کوره دوار مورد عمل احیا قرار می‌گیرد. مقدار مصرف انرژی نسبتاً بالا بوده و اغلب قیمت انرژی و مقدار مصرف آن عامل اصلی در اقتصادی بودن روش می‌باشد.

۱-۷-۸-۴- تبدیل هماتیت به مگنتیت

تبدیل هماتیت به مگنتیت یک عمل احیا است. عمل احیا می‌تواند توسط کربن و هم توسط گاز اکسی کربن و یا هر گاز اکسید کننده دیگری انجام شود. معمولاً برای این منظور از یک کوره دوار استفاده می‌کنند. دمای کوره حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است و مدت زمان توقف بار در آن نسبتاً کم و در حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه می‌باشد. شکل ۱-۱-۱ نمای این عملیات را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱): عمل احیا سنگ آهن هماتیت و پرعیار سازی با استفاده از جداکننده مغناطیسی ضعیف

سنگ معدن هماتیتهی که تا حدود ۳ تا ۱۰ میلی‌متر خرد شده است، همراه با مواد احیاکننده به کوره دوار وارد شده و در سر دیگر کوره مشعل‌ها قرار دارند. ابعاد کوچکتر از ۳ میلیمتر به دلیل ایجاد مشکل در فرآیند کوره احیا، می‌توان ابتدا با روش‌های کلوخه‌سازی و یا گندوله‌سازی به ابعاد درشت‌تر تبدیل کرد و سپس وارد کوره احیا کرد. هماتیت در داخل کوره، به طور جزعی احیا و از کوره خارج می‌شود. گازهای خروجی کوره نیز پس از غبارگری در یک سیکلون، خارج

می‌شوند. محصول خارج شده از کوره همراه غبار بازیابی شده در سیکلون مورد عمل خردایش قرار گرفته و سپس توسط جداکننده مغناطیسی میدان ضعیف پرعیار می‌شود.

مقدار مواد احیا کننده باید به دقت کنترل شوند و چنانچه مقدار آن از حد مجاز رد شود ممکن است عمل احیا ادامه پیدا کند و منجر به تشکیل اکسید آهن دو ظرفیتی شود که عملاً فاقد خاصیت مغناطیسی است. محصول خروجی از کوره باید به سرعت سرد شود و یا سرد شدن آن در غیاب هوا انجام گیرد تا از اکسایش مجدد مگنتیت و تبدیل آن به هماتیت جلوگیری شود.

چنانچه به جای هماتیت از کانی لیمونیتی و یا سایر اکسیدهای آهن آبدار استفاده شود حداقل دما در کوره باید کمی بالاتر و در حدود ۵۰۰ تا ۵۵۰ درجه باشد. مصرف انرژی برای احیای هماتیت نسبتاً بالا بوده و حداقل در حدود ۲۵۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ کیلو کالری به ازای هر تن با است.

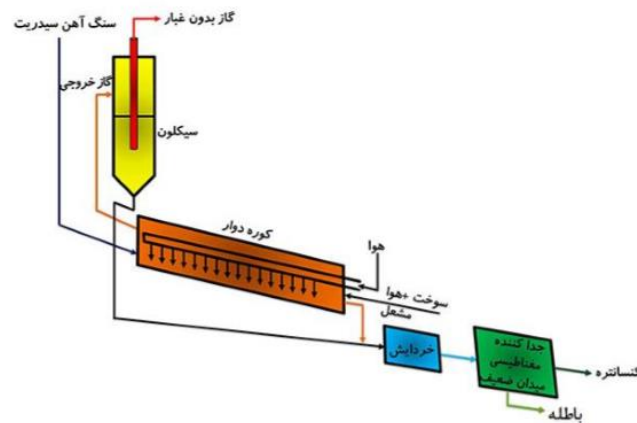
۱-۷-۸-۵- تبدیل سیدریت به مگنتیت

در مورد سیدریت بر عکس هماتیت باید عمل اکسایش صورت گیرد تا کانی تبدیل به مگنتیت شود. واکنش سیدریت در جریان کار عملاً شامل دو مرحله است. در مرحله اول سیدریت باید تکلیس و در مرحله دوم اکسید شود. روش کار مانند هماتیت بوده و در یک کوره دوار انجام می‌گیرد ولی به جای افزودن مواد احیا کننده در کوره هوا تزریق می‌شود.

بار ۳ تا ۱۰ میلیمتر خرد شده از یک طرف وارد کوره دوار می‌شود و از سر دیگر خارج شده. ابعاد کوچکتر از ۳ میلیمتر به دلیل ایجاد مشکل در فرآیند کوره احیا را می‌توان با استفاده از روش‌های کلوخه سازی یا گندله‌سازی به ابعاد درشت تر تبدیل نمود و سپس وارد کوره نمود. هوا توسط یک لوله در طول کوره به داخل آن تزریق می‌شود. گازهای خروجی پس از غبارزدایی خارج شده و غبار همراه محصول خروجی پس از خردایش توسط یک جداکننده مغناطیسی ضعیف پرعیار می‌شوند.

مقدار هوای تزریق شونده باید به دقت کنترل شود و چنانچه مقدار آن بیش از حد لازم باشد عمل اکسایش می‌تواند تا تشکیل هماتیت ادامه یابد. درجه حرارت در این روش بیشتر از احیای هماتیت است. تکسیل سیدریت در دمای ۶۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به طور کامل انجام می‌شود لذا درجه حرارت کوره برای اکسایش اکسید آهن دو ظرفیتی معمولاً بین ۷۰۰ تا ۷۷۵ درجه سانتی‌گراد است.

مقدار مصرف انرژی ۲۷۵۰۰۰ تا ۳۲۵۰۰۰ کیلوکالری به ازای هر تن بار می‌باشد. در این مورد نیز محصول حاصل باید به سرعت سرد شود یا طی مدت سرد شدن در مجاورت هوا نباشد تا به هماتیت تبدیل نشود. شکل ۱-۲ زیر طرح کار را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱): عمل احیا سنگ آهن سیدریت و پرعیار سازی با استفاده از جداکننده مغناطیسی میدان ضعیف

۱-۷-۸-۶- تبدیل پیریت به مگنتیت

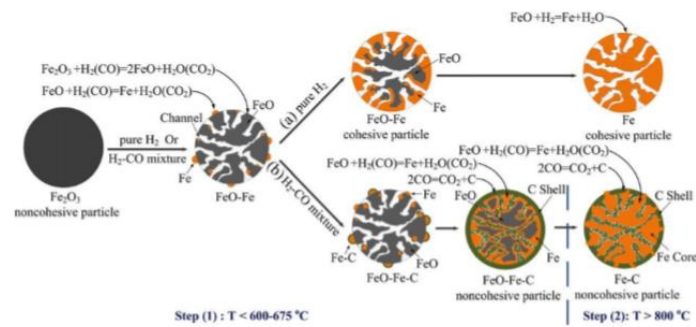
با کنترل دقیق مقدار هوا که برای تشویه پیریت لازم است می توان عمل را طوری انجام داد که پیریت تا مرحله مگنتیت اکسید شود. در رابطه زیر نحوه اکسایش پیریت بیان شده است:



این واکنش گرمازا بوده و به مقدار $1748/3$ کیلو کالری را به ازای هر کیلوگرم مگنتیت گرما تولید می شود و در درجه حرارت 500 تا 600 درجه سانتی گراد انجام می شود. عملاً راکتور تشویه نیاز به انرژی خارجی نداشته و انرژی حاصل از تشویه بیش از مقدار لازم بوده و باعث گرم شدن راکتور می شود که باید به نحوی سرد شود. لزوم کنترل دقیق مقدار اکسیژن باعث می شود که تمام گوگرد اکسید نشده و مقدار گوگرد باقیمانده در اکسید آهن خروجی بالا باشد که این امر کیفیت محصول را کاهش می دهد. در هر حال در این مورد نیز محصول باید به سرعت در غیاب اکسیژن سرد شود.

مکانیزم احیا

تغییر ساختاری ذرات سنگ آهن در طول احیا توسط یک طرح هندسی در شکل زیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در شکل طرح هندسی از تغییر ساختار ذرات سنگ آهن در طول احیا توسط گازهای H_2 و مخلوط $CO-H_2$ در دماهای 600 تا 675 درجه سانتی گراد و همچنین دمای بیشتر از 800 درجه سانتی گراد نشان داده شده است. هنگامی که گاز خالص H_2 در دمای 600 تا 675 درجه سانتی گراد تزریق می شود اکسید آهن از سطح بیرونی به سمت هسته داخلی نیز به کلی احیا می شود. هنگامی که مخلوط گازهای $CO-H_2$ به محیط احیا تزریق می شوند آهن روی سطح ذرات رسوب می کند و کربن نیز روی سطح ذرات باقی می ماند و در دمای بالاتر اثر احیا افزایش می یابد.



شکل (۱-۳): شکل طرح هندسی از تغییر ساختار ذرات سنگ آهن در طول احیا

۱-۷-۸-۷- روش التراسونیک

امواج التراسونیک می‌توانند از آب یا پالپ عبور کند و به طور قابل توجهی پدیده‌های مختلف فیزیکی مانند پلیمرسازی، پلیمرزدایی، امولسیون‌سازی و لخته‌سازی، تمیز کردن سطح، اکسیداسیون و احیا، فعال‌سازی و فروپاشی کانی‌ها را تشدید کند. ارتشاعات در آب و پالپ، زمانی که افت فشار در مناطق رقیق شده وجود دارد، یک سری از رقیق‌سازی‌ها و فشرده‌سازی‌ها را ایجاد می‌کند. روش التراسونیک در جداسازی ذرات فوالعاده ریز و چسبیده به ذرات بزرگتر در فرآیندهای فرآوری آهن، کمک می‌کند. در سنگ‌های معدنی آهن، بخش‌های با اندازه بسیار ریز به طور کلی حاوی آهن پایین‌تر و آلومینا و سیلیس بیشتر از بخش‌های با اندازه بزرگتر هستند.

در تحقیق دیگری نشان داده شده است که به کارگیری امواج اولتراسونیک می‌تواند اثر قابل توجهی روی نرمه سنگ آهن، توسط آزادسازی ذرات فوق‌العاده ریز عیار پایین از بخش‌های با اندازه بزرگتر داشته باشد، که می‌تواند عیار محصول را پس از نرمه‌زدایی افزایش دهد. همچنین استفاده از التراسونیک و نرمه‌زدایی به طور قابل توجهی توانست میزان آلومینا، سیلیس و فسفر را در دو سنگ معدن آهن هند کاهش دهد.

امواج التراسونیک (امواج ما فوق صوت) در پالپ‌های حاوی نرمه سنگ آهن می‌توانند به طور قابل توجهی، فروپاشی ذرات را تشدید کند و از کلوخه شدن آن‌ها جلوگیری کند. برخی از کانی‌های نرم‌تر، اغلب کانی‌های باطله با محتوای آهن پایین‌تر مانند آهن کائولینیت و یا گوتیت، سریع‌تر از کانی‌های آهن‌دار ارزشمند مانند مگنتیت یا هماتیت، متلاشی می‌شوند که می‌توان با استفاده از امواج التراسونیک و حذف نرمه به پرعیارسازی سنگ آهن کمک کرد. همچنین در پالپ‌های حاوی نرمه سنگ آهن می‌توان با پوشش دهی انتخابی با مواد مگنتیت ریزدانه به منظور افزایش حساسیت مغناطیسی و جداسازی بهینه کانی‌های آهن‌دار از باطله استفاده کرد.

تشویه مغناطیسی سیال (SMR)^۱

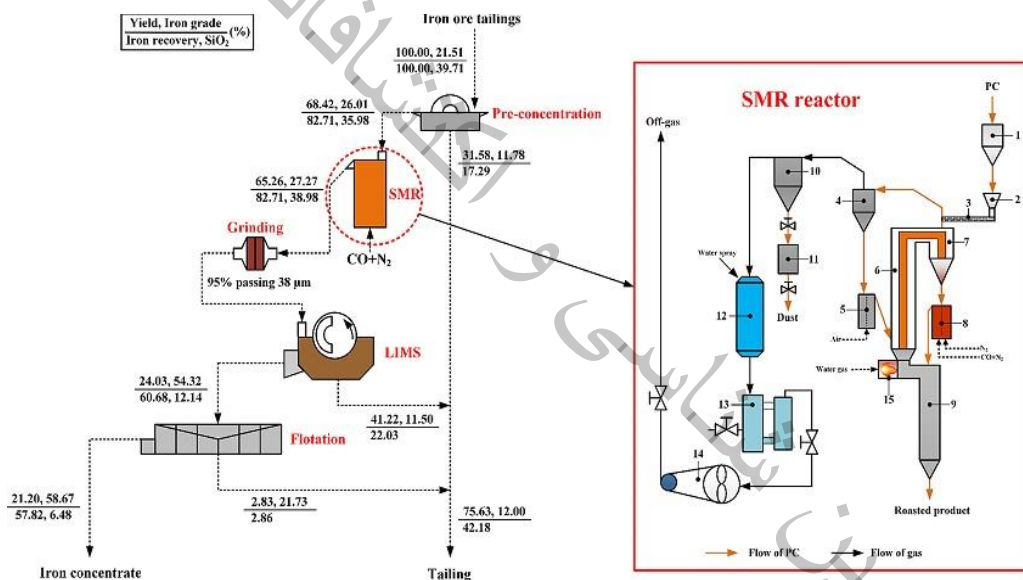
کاهش سریع سنگ‌های آهن با عیار بالا، و همچنین تقاضای فوق‌العاده صنایع آهن و فولاد، نیاز فوری به توجه جهانی به استفاده مؤثر از سنگ آهن هماتیتی (همراه با سیدریت) را به وجود آورده است. در چین، ذخایر بزرگ سنگ آهن هماتیتی به دلیل خواصی مانند عیار آهن پایین، ترکیب پیچیده و دانه‌بندی ریزدانه، فاقد روش فرآوری مناسب

^۱ suspension magnetization roasting

است. در طی فرآیند تشویه کردن مغناطیسی تعلیق (SMR)، فازهای سنگ آهن نسوز می‌توانند به مگنتیت تبدیل شوند که به طور موثر با روش‌های جداسازی مغناطیسی با شدت کم جدا می‌شود. SMR نه تنها در فرآوری سنگ آهن هماتیته بلکه در پسماندهای حاوی عناصر سنگین سنی مانند کادمیوم و سرب و... نقش مهمی ایفا می‌کند. بنابراین، صنعتی شدن SMR به سرعت در حال رشد است و اجرای فناوری تشویه کردن مغناطیسی تعلیق در آینده نزدیک انتظار می‌رود.

اگر چه SMR به طور گسترده در زمینه فرآوری سنگ آهن پذیرفته شده است، اما مشکل شدید آلودگی زیست محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی را نمی‌توان نادیده گرفت.

مطابق شکل ۱-۴ سیستم تشویه شامل یک دستگاه تامین گاز، یک کنترل کننده جریان گاز، یک کنترل کننده دما، و یک تحلیلگر ترکیب گاز N_2 است به جهت حمل گازهای حامل برای خروج هوا، زمان تشویه کردن ۵ الی ۱۰ دقیقه، دما ۶۵۰ درجه سانتیگراد، محصولات تشویه شده با استفاده از جداکننده مغناطیسی شدت کم در شدت میدان مغناطیسی ۱۰۴ کیلو آمپر جدا می‌شوند و هر دو کنسانتره مغناطیسی و باطله غیرمغناطیسی فیلتر، و در کوره با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد خشک می‌شوند.



شکل (۱-۴): نمایی از روش فرآوری SMR

بررسی وضعیت هماتیت در ایران از نگاه زمین شناسی

سازمان زمین شناسی و
اکتشافات

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

۲-۱- بررسی ساختاری هماتیت در ایران

مطالعه حاضر نتیجه مرور مهمترین انواع کانسارهای آهن شناخته شده در جهان و کارهای گذشته در خصوص کانسارهای آهن در ایران و شرایط تشکیل آن ها از دیدگاه زمین شناسی اقتصادی می باشد. این تحقیق نشان داده است که کانسارهای ایران اغلب از نوع مگنتیتی است که عمدتاً در میکرو قاره ایران مرکزی در بلوک پشت بادام، در کمربند باریک خمیده ای در حدفاصل بین بلوک های طبس و یزد، که کمربند تکتونیکی کاشمر-کرمان (Kashmar-Kerman Tectonic Zone) (به اختصار KKTZ)، نامگذاری شده است، متمرکز می باشد. بخشی از کانسارهای مهم ایران نیز اسکارنی و در دوران سوم شکل گرفته است که اغلب اسکارنی و و کانه آهن آن ها مگنتیتی است. کانسارهای آهن کمربند (KKTZ) با آپاتیت بلورین همراه است. کانسارهای مذکور که شالوده اصلی کانسارهای آهن در ایران را تشکیل می دهد، در رخنمون های کمپلکس های پی سنگی قدیمی مرز نئوپروتروزوئیک-کامبرین تا کامبرین ایران قرار دارد، که تحت تاثیر فازهای کوهزادهای جوان بعدی برونزد پیدا کرده (inliers)، مشاهده می شود. کانسارهایی از این نوع به کانسارهای کایرونا و اخیراً با کانسارهای آهن نواری (BIF) نوع راپیتان (Rapitan type) مقایسه می شود که در ایران اساساً مگنتیتی است.

به عبارت دیگر تشکیلات آهن نواری اقتصادی مهم (شامل افق های هماتیت) مانند آنچه در اوایل پروتروزوئیک (Paleoproterozoic) در سپرهای قدیمی قابل مشاهده است با توجه به فقدان سنگ های به قدمت پالئوپروتروزوئیک در ایران منتفی است. از طرفی کانی متداول کانسارهای آهن نئوپروتروزوئیک ایران در کمربند تکتونیکی کاشمر کرمان (KKTZ) که بیش از ۴ میلیارد تن ذخیره دارد، نیز مگنتیتی می باشد. کانسارهای آهن سنگان در خراسان، و یا کانسار گل گهر واقع در پهنه تکتونیکی ساندج-سیرجان نیز از کانسارهای مهم دیگری است که در اینجا نیز کانی اصلی در قالب مگنتیت شکل گرفته است.

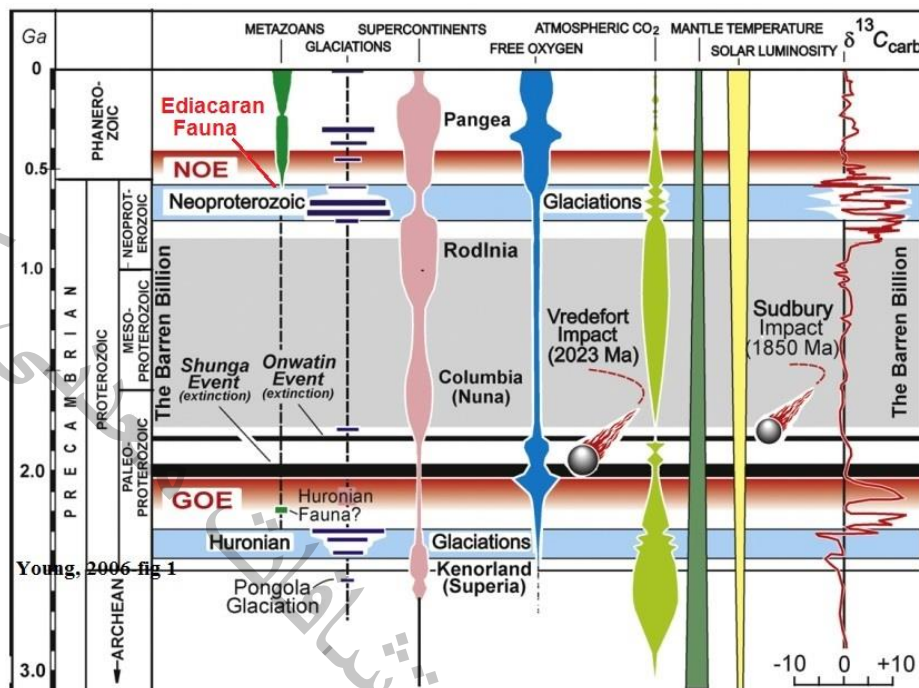
در واقع کانسارهای اولیه هماتیت در ایران گسترش محدودی دارد. به عبارت به جز ذخایر بسیار کوچک اولیه هماتیت، این کانی اغلب حاصل دگرسانی کانسارهای اولیه مگنتیت در سایر کانسارها و از جمله کانسارهای کوچکتر نوع اسکارنی می باشد.

از طرفی همانطور که قربانی، ۱۳۸۶ مطرح می کند، کانسارهای آهن وابسته به فازهای کوهزایی آلپی نیز که در فاصله زمانی مزوزوئیک-ترشیری، به ویژه آلپی جوان، در جهان و از جمله ایران تشکیل شده که اغلب منشاء ماگمایی دارند، ذخایر بزرگی را در دنیا تشکیل نمی دهند.

۲-۲- کانسارهای آهن نواری بزرگ زمین و جایگاه کانسارهای آهن بزرگ ایران

در طول پروتروزوئیک که حدود 42.5 درصد از طول تاریخ زمین را بخود اختصاص داده، دو دوره افزایش ناگهانی میزان اکسیژن به وقوع پیوسته است. کانسارهای آهن نواری عمدتاً پیامد اکسیداسیون یون های Fe^{2+} آب دریاها در طی فاز اول اکسیداسیون (GOE: The Great Oxidation Event) مقارن با اواخر آرکئن تا اوایل پروتروزوئیک است. بخشی از کانسارهای آهن نواری نیز پیامد فاز دوم اکسیژنه، در نئوپروتروزوئیک (Neoproterozoic oxidation event) (NOE) event، و در نتیجه اکسیداسیون محدودی می باشد که بعد از افزایش مجدد محدود اکسیژن و رخدادهای

یخچالی متعاقب آن در اواخر نئوپروتروزوئیک بوجود آمده است شکل ۱-۲ فازهای اکسیژنه پروتروزوئیک و رخدادهای یخچالی قبل از آن را نشان می دهد.



شکل (۱-۲): موقعیت رخداد انفجاری افزایش ناگهانی فوگاسیته اکسیژن آب دریاها در مراحل آغازین پروتروزوئیک (GOE)، و نئوپروتروزوئیک (Young, 2013) (NOE). کانسارهای اصلی ایران در اواخر نئوپروتروزوئیک و نتیجه فاز اکسیژنه (NOE) است که همراه با قطعات آواری یخچالی نهشته های ادیکارن تشکیل شده است.

کانسارهای اصلی آهن در ایران در نئوپروتروزوئیک و متعاقب فاز یخچالی کریوژنین در ادیکارن تشکیل شده است. سنگ های به قدمت پالئوپروتروزوئیک در ایران اساسا وجود ندارد، بنابراین کانساهای آهن نواری وابسته به اوایل پالئوپروتروزوئیک، یعنی کانسارهایی که در ادامه فاز اکسیژنه اصلی (GOE) پروتروزوئیک به وقوع پیوسته، در ایران رخنمون ندارد.

دوره ادیکارن (Ediacaran period)، یک دوره زمانی 94 میلیون ساله است که از اواخر دوره کریوژنین 635 Ma (Cryogenian period) پیش، تا آغاز دوره کامبرین (541 M قبل) را در برمی گیرد. این واژه از تپه های ادیکارن (Ediacaran Hills)، در جنوب استرالیا، اقتباس شده که واژه معرف اواخر ائون پروتروزوئیک (Proterozoic Eon)، و آغاز ائون فانروزوئیک (Phanerozoic Eon) است. معادل روسی این دوره زمانی وندین (Vendian) 650-543 Ma، است که طول دوره آن کمی کوتاه تر است این دوره بالاترین بخش های پروتروزوئیک (latest Proterozoic) را در بر می گیرد. دوره ادیکارن (635-541 Ma)، معرف بازه زمانی از پایان دوره یخچالی جهانی (Marinoan glaciation) تا ظهور اولین آثار فسیلی (Treptichnus pedum) می باشد (Seilacher, 1955). به نقل از (<https://en.wikipedia.org/wiki/Ediacaran>). این دوره یخچالی در شکل ۱-۲ در مرز بالای نئوپروتروزوئیک نشان داده شده است. کانسارهای ایران عمدتا مگنتیتی و در این فاز زمانی و یا در همین حدود تشکیل شده است.

۳-۲- ذخایر آهن هماتیته در ایران

ذخایر هماتیته اولیه ای که در توالی های رسوبی و یا توالی های آتشفشانی رسوبی ایران تشکیل شده است، ذخایری است که در اواخر نئوپروتروزوئیک در سازندهای هرمز و یا سلطانیه تشکیل شده است. این کانسارها در سیمای عدسی ها و لایه هایی محدود در توالی های دولومیتی بخش پائینی سازند سلطانیه و یا در نهشته های گرمابی-رسوبی سرپهای نمکی هرمز و آتشفشان های وابسته در منطقه بندرعباس و جزایر جنوبی آن و بعضی از سایر نواحی ایران که در آن های رخنمون های اواخر نئوپروتروزوئیک بصورت برونزدهای تکتونیکی (inlier) رخنمون دارد، تشکیل شده و ذخایر آن ها در ایران بسیار محدود است. به مقدار محدود در پهنه سندرچ-سیرجان نیز کانسارهای آهن گرمابی هماتیته در فانروزوئیک (مانند کانسارهای آهن-مگنز هتسک و شمس آباد در پهنه سندرچ-سیرجان)، شکل گرفته که ذخایر آن نیز محدود است.

کانسارهای هماتیته رسوبی اغلب درگیری شدید میکرونی با گانگ ریزبلور چرتی و یا کربنات ها دارند. بر آورد اولیه نشان می دهد ذخایر هماتیته که توسط قربانی ۱۳۸۷ معرفی شده برابر با حدود ۲۶ میلیون تن می باشد، که کمتر از ۱ درصد (۰/۶۵ درصد) از ذخایر آهن ایران مرکزی را که حدود ۴ میلیارد تن (قربانی، ۱۳۸۶) تخمین زده شده، را تشکیل می دهد. بنابراین بنظر می رسد، بهره برداری و اکتشاف ذخایر هماتیته ایران، فقط در قالب معادن سنتی و کوچک مقیاس از دیدگاه اشتغالزایی محدود در قالب بنگاه های کوچک می تواند مد نظر قرار گیرد. در ادامه پاره ای کانسارهای هماتیته، و یا کانسارهایی که دارای ذخایر هماتیته نیز می باشد، با توجه به اطلاعات موجود، به اختصار توضیح داده می شود.

۳-۱-۱- کانسارهای پهنه زاگرس (سازند هرمز)

در سنگ های نمک دار کمپلکس هرمز (که با عنوان خاک سرخ هرمز نیز شهرت دارد، اکسیدها/هیدروکسیدهای آهن شامل گوتیت و هماتیت، شاخص می باشد) همراه با سنگ های آتشفشانی منطقه بندرعباس و جزایر خاوی خلیج فارس، تعدادی کانسارهای کوچک آهن وجود دارد (مانند تنگه زاغ، هرمز، لارک، قشم و ...). این ذخایر با سازند هرمز همزاد هستند. منشاء آهن و سنگ های آتشفشانی به احتمال زیاد یکی است. به طوری که اغلب همراه گنبدهای نمکی جنوب ایران کانی های هماتیت و سنگ های ریولیتی مشاهده می شود (قربانی، ۱۳۸۶).

محدوده اکتشافی کانسار آهن تنگ زاغ با ذخیره حدود ۲۰ میلیون تن، در ۱۱۷ کیلومتری شمال خاوری بندرعباس، ۵۲ کیلومتری جنوب باختر حاجی آباد در پهنه ساختاری زاگرس چین خورده، در سازند هرمز در اشکال لایه ای تا عدسی شکل در یک حوضه رسوبی نهشت شده است. کانه آهن غالب آهن در این کانسار هماتیت است (اکبری، ۱۳۹۴).

کانسار آهن آک کهور در ۹۰ کیلومتری شمال باختر بندرعباس با ذخیره احتمالی ۷۵۰۰۰۰۰ تن با عیار ۴۵-۵۰ درصد، از دیگر کانسارهای هماتیته است که در سازند هرمز تشکیل شده است (قربانی، ۱۳۸۷).

۲-۳-۲- کانسارهای منطقه کاشمر تا بافق

۲-۳-۲-۱- کانسار آهن ده زمان (کاشمر)

کانسار آهن ده زمان در ۸۳ کیلومتری جنوب باختر کاشمر. حاوی عدسی های هماتی و مگنتیتی در شیست هاو مرمریت ها می باشد (قربانی، ۱۳۸۷). از دیدگاه ایمان پور (Imanpour et al., 2017) کانسار آهن ده زمان دارای دو بخش است، بخش مگنتیت- اسپکیولاریت آپاتیت و بخش حاوی افق هماتیت های رسوبی با ذخیره احتمالی ۱۰۳۸۵۰۰۰ تن با عیار ۶۳ درصد است (قربانی، ۱۳۸۷).

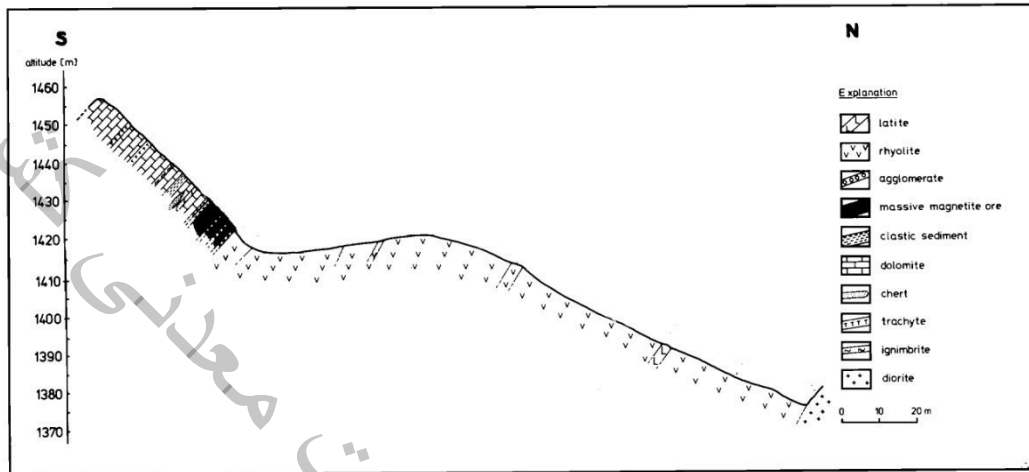
۲-۳-۲-۲- کانسارهای آهن منطقه بافق

تشکیلات یا کانسارهای آهن و آهن-منگنز اصلی آتشفشانی-رسوبی ایران، در پهنه سندنج-سیرجان (SSZ) و ناحیه بافق (Bafq district) قرار دارد. سازندهای آهن دار این بخش از تاریخ زمین شناسی ایران در اواخر نئوپروتروزوئیک، در ادیکاران (Ediacaran) تا کامبرین زیرین بوجود آمده، دارای ساختمان های رسوبی مانند لایه بندی، و همچنین کمترین ناخالصی (impurities) است و از این جهت با ارزش می باشد (Ghorbani, 1993; Nabatian et al., 2015). کانسارهای آهن همزمان با فعالیت های آتشفشانی-رسوبی (Synvolcanic_sedimentary ores) معمولاً در عدسی های کربناته متمایل به قهوه ای و یا بصورت نهشته های چرتی غنی از آهن (ژاسپیلیت: jaspilite) مشاهده می شود (Daliran et al. 2010). ژاسپیلیت یک سنگ قرمز رنگ است که معمولاً شامل تناوب های ظریفی از هماتیت و کوارتز می باشد. ژاسپیلیت ها معمولاً در کانسارهای آهن نواری پروتروزوئیک و آرکئن تشکیل می شود. با این حال این سنگ های چرتی آهن دار، همچنین در ارتباط با سیالات برون دمی، به عنوان رسوبات شیمیایی برون دمی (exhalative chemical sediment)، و نیز تحت تاثیر دگرگونی سنگ های آتشفشانی در دریاها نیز تشکیل می شود (Wikipedia). از این میان کانسارهای آهن میشدوان و کانسار آهن-منگنز نریگان توضیح داده می شود.

الف- کانسار آهن میشدوان

در منطقه بافق انواع مختلف کانی سازی آهن (iron mineralisation styles) وجود دارد که در نتیجه فرآیندهای چندین گانه متاسوماتیک تشکیل شده است (Daliran et al. 2010). دلیران (Daliran et al. 2010) و جامی (Jami, 2005)، تشکیل کانسارهای آهن این منطقه را نتیجه مستقیم رسوبگذاری از سیالات فلزدار کف دریا می دانند. کانسار اکسید آهن-آپاتیت میشدوان (Mishdovan iron oxide_apatite deposit)، در ۳۰ کیلومتری شمال بافق از ۲۰ عدسی جداگانه (individual lenses) تشکیل شده است که توسط یک توالی شامل توف های ریولیتی حاوی عدسی های کربناته (intercalated carbonate lenses) در بر گرفته شده است (Daliran 2002). هندسه (geometry) کانسارهای میشدوان لایه ای (stratiform) و چینه کران (stratabound) است. توده های معدنی لایه ای شکل، بصورت بین لایه های ظریف و یا عدسی شکل (intercalated as finely laminated beds and

(lenses), در واحدهای آتشفشانی-رسوبی کامبرین قرار دارد (Nabatian et al., 2015). شکل ۲-۲ نمای از مقطع عرضی این کانسار را نشان می دهد.



شکل (۲-۲): مقطع عرضی چینه شناسی سازند اسفوردی میزبان کانسار میشدوان (Forster and Knittel, 1979)

از لحاظ ترکیب کانی شناسی، سنگ آهن میشدوان از نوع مگنتیت فسفر دار، مگنتیت-هماتیت، هماتیت، و هماتیت- مگنتیت تشکیل شده است که سنگ آهن مگنتیت فسفردار و مگنتیت کم فسفر از انواع اصلی و عمده می باشد (قربان، ۱۳۸۷). ارزیابی ها نشان داده است کانسار آهن میشدوان شامل سه بخش شرقی، غربی و مرکزی با میزان ۱۱۷۵۴۰۰۰ میلیون تن (حدود ۱۲ میلیون تن) سنگ آهن کم عیار پرفسفر با عیار متوسط آهن ۴۹ درصد می باشد. این مطالعات همچنین نشان داده است که ذخیره های مگنتیت و هماتیت از هم جدا بوده و امکان تولید محصولات جداگانه وجود دارد (مجتمع معادن سنگ آهن فلات مرکزی ایران، ۱۴۰۰)

ب- کانسار آهن-مگنز ناریگان

کانسار آهن-مگنز ناریگان در دولومیت های آهکی و توف های ریولیتی سازندهای ریزو و دزو به سن نئوپروتروزوئیک-کامبرین تحتانی تشکیل شده است (Bonyadi & Moore 2005). مگانوسیدریت، هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن و مگنز فازهای این کانسار است. دو نوع کانسار متداول شامل کانسنگ غنی از مگانوسیدریت در ژرفای توده معدنی و در رخنمون های سطحی کانسنگ هماتیت-لیمونیت-پیرولوزیت تشخیص داده شده است. ذخیره این کانسار ۴.۸ میلیون تن با عیار متوسط آهن حدود ۳۷ درصد و عیار مگنز حدود ۵.۵۷ درصد است، که شامل ۳.۶ میلیون تن کانسنگ اکسیده دارای ۳۴.۶۴ درصد آهن و ۵.۹۵ درصد مگنز، و ۱.۲ میلیون تن کانسنگ مگانوسیدریت دارای ۳۱.۷۴ درصد آهن، و ۵.۲۱ درصد مگنز است (قربانی، ۱۳۸۷). در ماخذ نباتیان و همکاران (Nabatian et al., 2015)، کانسار ناریگان، یک کانسار عیار پائین مگنز (Mn: 5.75%)، و عیار متوسط آهن (Fe: 37%) با ۴.۸ Mt ذخیره، معرفی شده است.

۲-۳-۳- کانسارهای مرتبط با فاز آغازین یا شکل گیری پوسته اقیانوسی نئوتیس

۲-۳-۳-۱- کانسار آهن منگنز دار هنشک تریاس (مهمترین کانسار پهنه سندنج-سیرجان جنوبی)

کانسارهای هنشک، گلی و چشمه علی، همگی در ۱۹ کیلومتری جنوب خاوری صفاشهر استان فارس قرار دارند. این کانسارها در توالی های آتشفشانی-رسوبی دگرگون شده به سن تریاس (Triassic metavolcanic-sedimentary sequences)، شامل سنگ های با ترکیب ریولیت تا ریوداسیت، ریولیت های میلونیتی، توف، و چرت های دگرگونه قرار دارد. کانه زایی آهن-منگنز بصورت چینه کران (stratibound) و عدسی شکل (lenticular) مشتمل بر مگنتیت، هماتیت، پیرولوویت، پسیلوملان، و پیریت است که بصورت منقطع، از کانسار هنشک (در جنوب باختر) تا کانسارهای گلی و چشمه علی در شمال باختر امتداد دارد. این کانسارها ولکانوژن-رسوبی و در ارتباط با فعالیت های ماگماتیزم کشتی (extention) تریاس تشکیل شده است. کانسارهای مذکور با کانسارهای با میزبان کربناته آهن-منگنز شمس آباد در جنوب اراک (Farhadi, 1998) و کانسار (Vaferrera) در سوئیس قابل مقایسه است (Nabatian et al., 2015). مطالعه رجب زاده و همکاران، ۱۳۹۱ نشان داده است که کانه های اصلی کانسار هنشک شامل هماتیت، گوتیت و مقادیر کمتری مگنتیت است. محصول این کانسار بصورت خام و بدون فرآوری به بازار آهن عرضه می شود. فرآوری این کانسار قبل از این در قالب پایان نامه در مدیریت فرآوری و فرآوری مواد معدنی سازمان زمین شناسی بررسی شده است.

۲-۳-۳-۲- کانسارهای آهن-منگنز آتشفشانی-رسوبی کرتاسه

کانسار آهن منگنزدار شمس آباد

کانسار شمس آباد یک کانسار آهن-منگنز در ۳۰ کیلومتری جنوب شهرستان اراک و ۳ کیلومتری روستای شمس آباد، در کمربند معدنی اصفهان-ملایر در پهنه ساختاری سندنج-سیرجان قرار دارد. در این کانسار ماده معدنی بصورت عدسی های متمایز در توالی های آهکی اریبتولین دار کرتاسه تحتانی (آپسین)، تشکیل شده و شامل هماتیت، لیمونیت، گوتیت، پیرولوویت، پسیلوملان، و کریپتوملان است. نسبت Fe/Mn متفاوت است و از ۱۱ تا ۷۲۱ تغییر می کند. نهشت ماده معدنی از سیالات گرمایی دور از مرکز (distal) در یک محیط دریایی همزمان با رسوبگذاری کربنات های کرتاسه پائینی رخ داده و از نوع چینه کران (stratabound) است (فرهادی، ۱۳۷۴؛ Marboti et al., 2021; Farhadi, 1995). ذخیره کل کانسنگ حدود ۴۰ میلیون تن تخمین زده شده است (احمدی، ۱۳۸۵). این در حالی است که از دیدگاه قربانی، ۱۳۸۷ کانه اصلی آهن در کانسار شمس آباد لیمونیت است ولی گوتیت و لیمونیت هم با کانسار وجود دارد و لیمونیت را همراهی می کند. کانه پیرولوویت نیز میزبان منگنز است. ذخیره قابل بهره برداری از این کانسار نیز در این ماخذ حدود ۵۰ میلیون تن گزارش شده است. از دیدگاه متالورژی این کانسار مناسب نمی باشد. در جایی دیگر ذخیره پیش بینی شده را تا ۳۰۰ میلیون تن هم برآورد می کند و معتقد است از این مقدار ۱۰۰ میلیون تن قابل بهره برداری است.

کانسارهای آهن تربت حیدریه

کانسارهای آهن منگنز دار کافر دوغ، باغ غره، بادامک، نوک، و بند بیشه در سنگ های کرتاسه پائین در اشکال عدسی شکل منظم تشکیل شده است. در این کانسارها ۵ افق کانی سازی از یک منبع آتشفشانی دور از مرکز (distal) در سنگ های رسوبی تشکیل شده است (Nabatian et al., 2015)(Ahmadi, 2006).

۲-۳-۴- کانسارهای آهن سنوزوئیک کمربند آتشفشانی-پلوتونیک خواف-بردسکن - کاشمر

۲-۳-۴-۱- کانسار کوه زر

کانسار کوه زر در شمال شرق ایران در ۳۵ کیلومتری باختر شهرستان تربت حیدریه (استان خراسان رضوی) قرار دارد. این کانسار با کانسارهای طلای نوع (IOCG) قابل مقایسه است. در واقع کانسار کوه زر یک کانسار غیر متداول طلا دار تهی شده از مس (Mazloumi et al. 2008) و غنی از هماتیت ورقه ای یا اسپیکولاریت (با بیش از ۳۰ درصد حجمی) (Karimpour & Mazloumi 1998) است. از دیدگاه مظلومی و همکاران (Mazloumi et al. 2008)، کانسار کوه زر با عیار متوسط طلای حدود 3.02 ppm و با ذخیره 3 میلیون تن و عیار حد (cut off grade) 0.7 ppm، یک کانسار طلا- آهن دار منحصر بفرد در رده بندی جهانی و غنی از اسپیکولاریت می باشد که در رده کانسارهای "آهن اکسیدی طلا" (Iron-oxide-Au type deposits)(IOCG)، یا کانسار طلای غنی از اسپیکولاریت (Specularite-rich gold deposit) قرار می گیرد (Nabatian et al., 2015).

۲-۳-۴-۲- کانسار مس قلعه زری

این کانسار یکی از کانسارهای رگه ای مس ایران می باشد در حاشیه خاوری بلوک لوت است و از چند هزار سال پیش تاکنون مورد بهره برداری قرار گرفته است. در این کانسار نیز یک ارتباط نزدیک بین کانی سازی هماتیت ورقه ای (الیژیست) با کالکوپیریت، اسفالریت، و بیسموتیت وجود دارد (Hassan-Nezhad. & Moore 2006).

فصل ۳

فرآوری نمونه های مختلف هماتی

فرآوری نمونه های مختلف هماتی

سازمان زمین شناسی و

۳-۱- اهمیت فرآوری ذخایر هماتیت در ایران

همانگونه که در قسمت قبل عنوان شد شرایط ساختاری و زمین شناسی پهنه ایران به گونه ای است که پتانسیل وجود ذخایر هماتیتی با مقادیر عظیم ضعیف می باشد و توقع اینکه بتوان سهم بالایی از تولید سنگ آهن مورد نیاز صنایع آهن و فولاد را در کشور از این ذخایر داشته باشیم دور از انتظار است. به هر ترتیب با توجه به نقش و اهمیت فعالیت های معدنی در زمینه اشتغالزایی با هر مقیاسی شایسته است تا با انجام تحقیقات و بررسی های کارشناسی و فنی نسبت به فرآوری این ذخایر اقدام نمود. با توجه به بررسی های اولیه در این تحقیق ذخایر و تیپ های هماتیتی موجود از نگاه فرآوری شامل موارد ذیل می شود:

۱. هماتیت های همراه ذخایر منیتیتی (مانند ذخایر ایران مرکزی واقع در یزد و کرمان و ناحیه خواف و سنگان)
۲. هماتیت های جنوب ایران (استان های فارس و هرمزگان)
۳. هماتیت های همراه با سایر اکسیدهای آهن که بصورت توده های پراکنده در نقاط مختلف کشور و بعضا با ذخایر بسیار کوچک (مانند استان های مرکزی، همدان، زنجان و ...)

۳-۲- بررسی فرآوری نمونه های مختلف هماتیتی

۳-۲-۱- باطله کارخانه سنگ آهن چادرملو

درابتدا خلاصه ای از نوع ترکیب کانی شناسی ذخیره چادرملو ارایه می شود. با توجه به بررسی های انجام شده بخشی از ذخایر آهن چادرملو از نوع هماتیت می باشد که مشخصات آن در جدول ۳-۱ ارایه شده است.

جدول (۳-۱): رده بندی ذخیره براساس درجه اکسیداسیون ماده معدنی

درصد از کل ذخیره	میزان ذخیره (Mton)	Fe \ FeO	نوع ماده معدنی سنگ آهن
۶۱/۹	۲۳۰	< ۴	غیر اکسید (منیتیتی)
۷/۳	۲۷/۳	۴-۶	نیمه اکسید (منیتیت - هماتیت)
۶/۴	۲۳/۸	۶-۸	اکسید (هماتیتی)
۱/۸	۶/۶	۸-۱۰	خیلی اکسید (پر هماتیت)
۲۲/۶	۸۳/۹	> ۱۰	فوق العاده اکسید (فوق العاده پر هماتیت)
۱۰۰	۳۷۱/۶		مجموع

فرآیند اصلی کارخانه کنسانتره چادرملو بر اساس جدایش مغناطیسی شدت پایین برای تولید کنسانتره منیتیت و همچنین جدایش مغناطیسی شدت بالا به همراه فلوتاسیون جهت تولید کنسانتره هماتیت است که هدف آن تولید کنسانتره با عیار بیش از ۶۷ درصد آهن است. با توجه به تغییر پذیری رفتار کانسنگ و همچنین عملکرد عملیاتی خط، خواه ناخواه بخشی از ذرات آهن دار که عمدتاً هماتیتی هستند به سد باطله منتقل می شود. طی سالیان متمادی از فعالیت این کارخانه تا زمان نگارش این گزارش حجم باطله انباشت شده حدود ۱۷ میلیون تن برآورد شده است. از

آنجایکه این باطله بصورت پودری می باشد لذا هزینه اصلی فرآوری که بخش خردایش و نمایش است انجام شده است و در صورتیکه بتوان محصولات باارزشی از این باطله را تولید نمود فرصت مناسبی به لحاظ اقتصادی برای مجموعه خواهد بود. لذا نمونه ای از این باطله تهیه شد و بررسی های مقدماتی جهت امکان تولید کنسانتره آهن انجام شد.

۳-۱-۱-۲-۱- آنالیز شیمیایی نمونه باطله چادرملو

با توجه به آنالیز شیمیایی نمونه مقدار آهن و فسفر نمونه به ترتیب Fe_2O_3 حدود ۴۸ درصد و P_2O_5 حدود ۱/۵ درصد تعیین شد. با توجه به این نتایج، آزمایش جدایش مغناطیسی نمونه با شدت های مختلف مدنظر قرار گرفت.

۳-۱-۲-۲- آزمایش جدایش مغناطیسی با شدت های مختلف

برای این آزمایش از دستگاه جداکننده مغناطیسی ماتریسی به روش تر استفاده شد. شدت میدان مغناطیسی در این جداکننده در شدت جریان های مختلف از صفر تا ۶ آمپر قابل تنظیم می باشد که بالاترین شدت جریان یعنی ۶ آمپر شدت میدان مغناطیسی بیش از ۱۲۰۰۰ گوس را تامین می نماید. برای انجام این آزمایش از شدت جریان های ۲، ۴ و ۶ آمپر استفاده شد. نتایج حاصل از این آزمایش ها در جداول ۳-۲ الی ۳-۴ ارائه شده است.

جدول (۳-۲): نتایج جدایش مغناطیسی باطله چادرملو (۲ آمپر)

محصولات	وزن کیلوگرم	عیار	عیار	محتوای	محتوای	بازیابی	بازیابی
		Fe_2O_3 (%)	P_2O_5 (%)	P_2O_5 گرم بر تن	Fe_2O_3 گرم بر تن	P_2O_5 (%)	Fe_2O_3 (%)
بار ورودی	۰.۲۱	۴۲.۴۰	۲.۸۰	۰.۰۱	۰.۰۹	---	---
کنسانتره	۰.۰۷	۷۱.۷۰	۱.۶۶	۰.۰۰۱۲	۰.۰۵	۱۳.۸۳۸	۵۳.۴۰۴
باطله	۰.۱۳۶	۳۲.۲۰	۵.۳۲	۰.۰۱	۰.۰۴	۸۱.۱۶۲	۴۵.۵۹۶
عیار محاسباتی	۰.۲	۴۵.۶	۴.۰۸	۰.۰	۰.۱	۱۰۰	۱۰۰

جدول (۳-۳): نتایج جدایش مغناطیسی باطله چادرملو (۴ آمپر)

محصولات	وزن کیلوگرم	عیار	عیار	محتوای	محتوای	بازیابی	بازیابی
		Fe_2O_3 (%)	P_2O_5 (%)	P_2O_5 گرم بر تن	Fe_2O_3 گرم بر تن	P_2O_5 (%)	Fe_2O_3 (%)
بار ورودی	۰.۲۱۰	۴۲.۴۰	۲.۸۰	۰.۰۱	۰.۰۹	----	---
کنسانتره	۰.۰۹۵	۶۷.۰۱	۱.۷۰	۰.۰۰۱۶	۰.۰۶	۱۹.۰۱۸	۶۷.۴۰۹
باطله	۰.۱۱۲	۲۷.۴۸	۶.۱۴	۰.۰۱	۰.۰۳	۸۰.۹۸۲	۳۲.۵۹۱
عیار محاسباتی	۰.۲۰۷	۴۵.۶	۴.۱۰	۰.۰	۰.۱	۱۰۰	۱۰۰

جدول (۳-۴): نتایج جدایش مغناطیسی باطله چادرملو (۶ آمپر)

محصولات	وزن کیلوگرم	عیار Fe2o3 (%)	عیار P2o5 (%)	محتوای P2o5 گرم بر تن	محتوای Fe2o3 گرم بر تن	بازیابی Fe2o3 (%)	بازیابی P2o5 (%)
بار ورودی	۰.۲۱۰	۴۲.۴۰	۲.۸۰	۰.۰۱	۰.۰۹	---	---
کنسانتره	۰.۱۰۰	۶۵.۴۷	۱.۶۱	۰.۰۰۱۶	۰.۰۷	۶۸.۵۰۰	۱۸.۸۰۴
باطله	۰.۱۱۰	۲۷.۳۷	۶.۳۲	۰.۰۱	۰.۰۳	۳۱.۵۰۰	۸۱.۱۹۸
عیار محاسباتی	۰.۲۱۰	۴۵.۵	۴.۰۸	۰.۰	۰.۱	۱۰۰	۱۰۰

با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می گردد که امکان تولید محصولی با عیار بیش از ۶۵ درصد Fe2O3 با یک مرحله جدایش میسر است. همچنین جدایش مغناطیسی امکان تولید باطله با P2O5 حدود ۶ درصد را امکان پذیر نموده است که براساس آن می توان بررسی های تکمیلی جهت امکان تولید محصول با عیار بالاتر و همچنین تولید سایر محصولات مانند عناصر نادرخاکی را در دستور کار قرار داد.

۳-۲-۲- نمونه آهن اکسیده معدن هماتیت اردهال

این معدن در استان مرکزی واقع شده است و جزو ذخایر کوچک هماتیته است. براساس بررسی اولیه نمونه سنگ این معدن ظاهری شبیه نمونه های خاک سرخ داشته و حالت خاکه مانند دارد (شکل ۳-۱)



شکل (۳-۱): نمونه هماتیت معدن اردهال

۳-۲-۳- آماده سازی و آنالیز شیمیایی نمونه

حدود ۲۰ کیلوگرم نمونه دریافتی در ابتدا از سرند ۷ مش عبور داده شد و سپس با استفاده از تقسیم کن ریفل نمونه های ۱/۵ کیلوگرمی تهیه گردید. یک نمونه نیز به عنوان نمونه نماینده پس از پودر کردن تا ۲۰۰ مش جهت آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه ارسال گردید. نتیجه آنالیز XRF در جدول ۳-۵ ارائه شده است.

جدول (۳-۵): آنالیز XRF نمونه هماتیت

Unit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
%	۳۰.۷	۵.۸	۲۹.۹	۲۷.۵	۱.۸	۰.۳
Unit	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	CuO	L.O.I.
%	۰.۳	۰.۸	۰.۴	۰.۴	۰.۱	۱.۹

۳-۲-۴- بررسی توزیع ابعادی آهن

در ابتدا یک نمونه نماینده را با استفاده از روش تر سرند نموده و سپس از فراکسیون های مختلف نمونه برداری شده و پس از پودر کردن جهت مشخص شدن مقدار آهن به آزمایشگاه ارسال شد. نتیجه این آزمایش در جدول ۳-۶ مشاهده می شود.

جدول (۳-۶): مقدار عناصر مختلف در فراکسیون های مختلف

ابعاد (مش)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	CuO	L.O.I.
۱۲	۲۸.۵	۵.۸	۲۷.۸	۳۲.۰	۱.۸	۰.۳	۰.۲	۰.۶	۰.۵	۰.۵	۰.۱	۱.۸
۱۸	۳۱.۸	۵.۸	۲۸.۰	۲۹.۵	۱.۵	۰.۲	۰.۲	۰.۶	۰.۴	۰.۴	۰.۱	۱.۵
۳۵	۳۲.۶	۵.۴	۲۸.۹	۲۸.۵	۱.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۷	۰.۴	۰.۷	۰.۲	۱.۶
۱۰۰	۳۲.۴	۵.۷	۲۸.۷	۲۸.۲	۱.۵	۰.۳	۰.۲	۰.۷	۰.۴	۰.۳	۰.۱	۱.۵
۲۰۰	۳۲.۴	۵.۶	۲۸.۱	۲۹.۲	۱.۲	۰.۲	۰.۱	۰.۸	۰.۳	۰.۳	۰.۱	۱.۶
۲۰۰-	۲۹.۵	۶.۱	۳۴.۵	۲۳.۰	۲.۰	۰.۴	۰.۱	۰.۸	۰.۳	۰.۴	۰.۲	۲.۴

با توجه به جدول ۳-۶ ملاحظه می شود که توزیع عناصر و به ویژه آهن در فراکسیون های مختلف تقریباً یکسان است و فقط در فراکسیون کمتر از ۲۰۰ مش مقدار آهن افزایش داشته است که این مساله می تواند ناشی از نرم تر بودن اکسیدهای آهن نسبت به سایر کانی های همراه باشد که در اثر آن در فرآیند خردایش کانی های اکسیده آهن بیشتر از سایر کانی ها خرد شده و به فراکسیون های پایین تر منتقل می شود.

۳-۲-۵- بررسی اولیه کانی شناسی نمونه

براساس آنالیز XRD کانی های تشکیل دهنده نمونه هماتیت، آندرادیت، کلسیت و کوارتز می باشد. همچنین فراکسیون های مختلف نمونه با استفاده از بینوکولار بصورت اولیه بررسی گردید. با توجه به مشاهدات اولیه مشخص گردید که حدوداً نیمی از نمونه را کانی های گارنت و کوارتز تشکیل داده اند. براین اساس بخشی از آهن نمونه مربوط

به کانی‌های گارنت خواهد بود. لذا جهت تعیین دقیق تر کانی ها و نوع و میزان کانی های آهن دار نیاز به تهیه و مطالعه مقاطع نازک و صیقلی است که در صورت نیاز انجام خواهد شد.

۳-۲-۶- آزمایش اولیه جدایش مغناطیسی شدت بالا

برای این آزمایش از دستگاه جداکننده مغناطیسی ماتریسی به روش تر استفاده شد. شدت میدان مغناطیسی در این جداکننده در شدت جریان های مختلف از صفر تا ۶ آمپر قابل تنظیم می باشد که بالاترین شدت جریان یعنی ۶ آمپر شدت میدان مغناطیسی بیش از ۱۲۰۰۰ گوس را تامین می نماید. با توجه به اینکه کانی آهن دار در این نمونه هماتیت است لذا جهت بررسی کارایی جدایش و رفتار نمونه از بالاترین شدت جریان استفاده شد. همچنین نمونه در دو دانه بندی ۵۰ مش و ۳۰ مش آماده سازی شد. برای تولید نمونه های مذکور از آسیای میله ای آزمایشگاهی استفاده شد. مقدار ۱/۵ کیلوگرم نمونه نماینده به ترتیب به مدت ۵ و ۱۰ دقیقه در آسیای میله ای آسیا شد و از هر کدام حدود ۳۰۰ گرم برای انجام تست اولیه نمونه گیری شد. نتایج این آزمایش در جدول ۳-۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که در این مرحله جدایش مغناطیسی کارایی مناسبی برای جدایش نداشته است.

جدول (۳-۷): نتایج جدایش مغناطیسی شدت بالا بر روی نمونه های با ابعاد ۳۰ و ۵۰ مش

ابعاد نمونه	محصول	Fe درصد	FeO درصد
۳۰ مش	مغناطیسی	19.40	0.36
	غیرمغناطیسی	19.01	0.41
۵۰ مش	مغناطیسی	19.67	0.40
	غیرمغناطیسی	19.04	0.41

۳-۲-۷- آزمایش ترکیبی سایش و جدایش مغناطیسی

با توجه به ماهیت نمونه احتمال آغشتگی سطحی ذرات توسط اکسیدهای آهن وجود دارد و با توجه به آزمایش جدایش مغناطیسی اولیه این احتمال وجود دارد که این آغشتگی بر روی کارایی جداکننده مغناطیسی تاثیر منفی داشته است. لذا از آنجاییکه ذرات هماتیسی نرم تر از کانی های گارنت و کوارتز هستند در ابتدا عملیات سایش به روش تر (اسکرایینگ) بر روی نمونه ۳۰ مش به مدت ۱۵ دقیقه و درصد جامد ۶۰ انجام شد و پس از آن محصول سایش در ابتدا از سرند ۲۰۰ مش عبور داده شد و سپس مواد روی سرند از جداکننده مغناطیسی شدت بالای ماتریسی عبور داده شد. در نهایت محصولات زیر سرند ۲۰۰ مش و محصولات جدایش مغناطیسی آنالیز گردید که نتایج آن در جدول ۳-۸ ارائه شده است.

جدول (۳-۸): آنالیز محصولات آزمایش ترکیبی سایش و جدایش مغناطیسی

محصول	وزن	درصد وزنی	درصد Fe	درصد FeO	درصد SiO ₂
بخش کمتر از ۲۰۰ مش سایش	۱۳۷/۱۷	۳۶/۵	۲۲/۶۸	۰/۳۰	۳۳/۳۱
بخش مغناطیسی بزرگتر از ۲۰۰ مش سایش	۲۱۴/۸۶	۵۷/۱۸	۱۶/۲۳	۰/۳۱	۴۶/۰۲
بخش غیرمغناطیسی کوچکتر از ۲۰۰ مش سایش	۲۳/۷۳	۶/۳۲	۱۸/۹۸	۰/۳۲	۳۷/۳۱
مجموع	۳۷۵/۷۶	۱۰۰			

با توجه به نتایج جدول ۳-۸ موارد ذیل قابل توجه است:

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که نمونه هماتیت اردهال از نوع سنگ آهن کم عیار بوده که با توجه به نتایج جدایش مغناطیسی امکان تولید محصول قابل عرضه به صنایع فولاد بسیار ضعیف و ناممکن است. آزمایش سایش نسبتاً تاثیر مثبتی بر روی عیار آهن و کاهش سیلیس داشته است. با توجه به نتایج اولیه آزمایش سایش امکان بررسی بیشتر برای بهینه سازی و افزایش راندمان این روش در کاهش مقدار سیلیس و افزایش مقدار آهن وجود دارد.

با توجه به شواهد ظاهری نمونه انجام آزمایش های کیفی و ارزیابی خاک به منظور استفاده به عنوان تقویت کننده خاک های کشاورزی پیشنهاد می شود.

۳-۲-۸- نمونه سنگ آهن سنگان

در برخی از زون های ذخایر سنگی معدن سنگ آهن سنگان هماتیت همراه منیتیت است و حتی با توجه به بررسی های انجام شده در زون شرقی معدن که در حال اکتشاف تکمیلی نیز می باشد ذخیره موجود از نوع هماتیته می باشد. در حال حاضر بخش از کانسنگ استخراجی معدن تا ابعاد کمتر از ۱۰ میلیمتر خرد شده و پس از عبور از جداکننده های مغناطیسی خشک محصول ۱۰-۰ خروجی به فروش می رسد. عیار ورودی خط خردایش حدود ۴۵ تا ۵۰ و عیار محصول خروجی حدود ۵۴ درصد می باشد. جهت بررسی مقدماتی این کانسنگ نمونه ای به وزن ۱۰ کیلوگرم قبل از جداکننده های مغناطیسی خشک گرفته شد.

۳-۲-۸-۱- بررسی توزیع دانه بندی و توزیع Fe و FeO در فراکسیون های مختلف نمونه سنگ آهن

سنگان

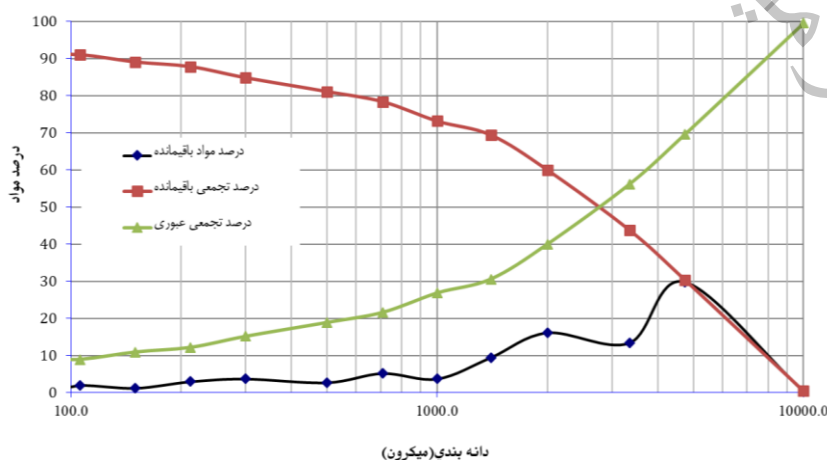
نمونه دریافت شده با استفاده ریفل به نمونه های ۱/۵ کیلوگرمی تقسیم شد. سپس بر روی یکی از نمونه ها تجزیه سرندهی انجام شد و از هر فراکسیون نمونه ای برای تعیین مقدار آهن و اکسید آهن پس از پودر کردن تا زیر ۲۰۰ مش به آزمایشگاه ارسال شد. براین اساس D80 نمونه مذکور حدود ۶۵۰۰ میکرون می باشد. نتایج تجزیه سرندهی در جدول

۳-۹ و شکل ۳-۲ ارایه شده است. همچنین نتایج آنالیز شیمیایی در فراکسیون ها نشان داد که عیار آهن از ابعاد درشت تر تا ریزتر از ۴۹ درصد تا حدود ۴۳ درصد کاهش می یابد. همچنین عیار متوسط بار ورودی در این نمونه حدود ۴۵ درصد است. نتایج آنالیز شیمیایی فراکسیون های مختلف و همچنین نمودار روند تغییرات عیار در هر فراکسیون در جدول ۳-۱۰ و شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

جدول (۳-۹): نتایج تجزیه سرنندی نمونه سنگ آهن سنگان

ردیف	طبقات سرنندی ASTM (مش)	دهانه (میکرون)	وزن (گرم)	درصد وزنی	درصد وزنی باقیمانده	درصد وزنی عبور کرده
۱		۱۰۰۰۰.۰	۱۰۰	۰.۵	۰.۵	۹۹.۵
۲	۴	۴۷۵۰	۶۰	۲۹.۹	۳۰.۳	۶۹.۷
۳	۶	۳۳۵۰	۲۷۰	۱۳.۴	۴۳.۸	۵۶.۲
۴	۱۰	۲۰۰۰	۳۲۵	۱۶.۲	۶۰.۰	۴۰.۰
۵	۱۴	۱۴۰۰	۱۹۰	۹.۵	۶۹.۴	۳۰.۶
۶	۱۸	۱۰۰۰	۷۵	۳.۷	۷۳.۱	۲۶.۹
۷	۲۵	۷۱۰	۱۰۵	۵.۲	۷۸.۴	۲۱.۶
۸	۳۵	۵۰۰	۵۵	۲.۷	۸۱.۱	۱۸.۹
۹	۵۰	۳۰۰	۷۵	۳.۷	۸۴.۸	۱۵.۲
۱۰	۷۰	۲۱۲	۶۰	۳.۰	۸۷.۸	۱۲.۲
۱۱	۱۰۰	۱۵۰	۲۵	۱.۲	۸۹.۱	۱۰.۹
۱۲	۱۴۰	۱۰۶	۴۰	۲.۰	۹۱.۰	۹.۰
۱۳	۲۰۰	۷۵	۱۰	۰.۵	۹۱.۵	۸.۵
۱۴	۲۰۰	۱۰	۱۷۰	۸.۵	۱۰۰.۰	۰.۰
	مجموع		۲۰۱۰	۱۰۰.۰۰		

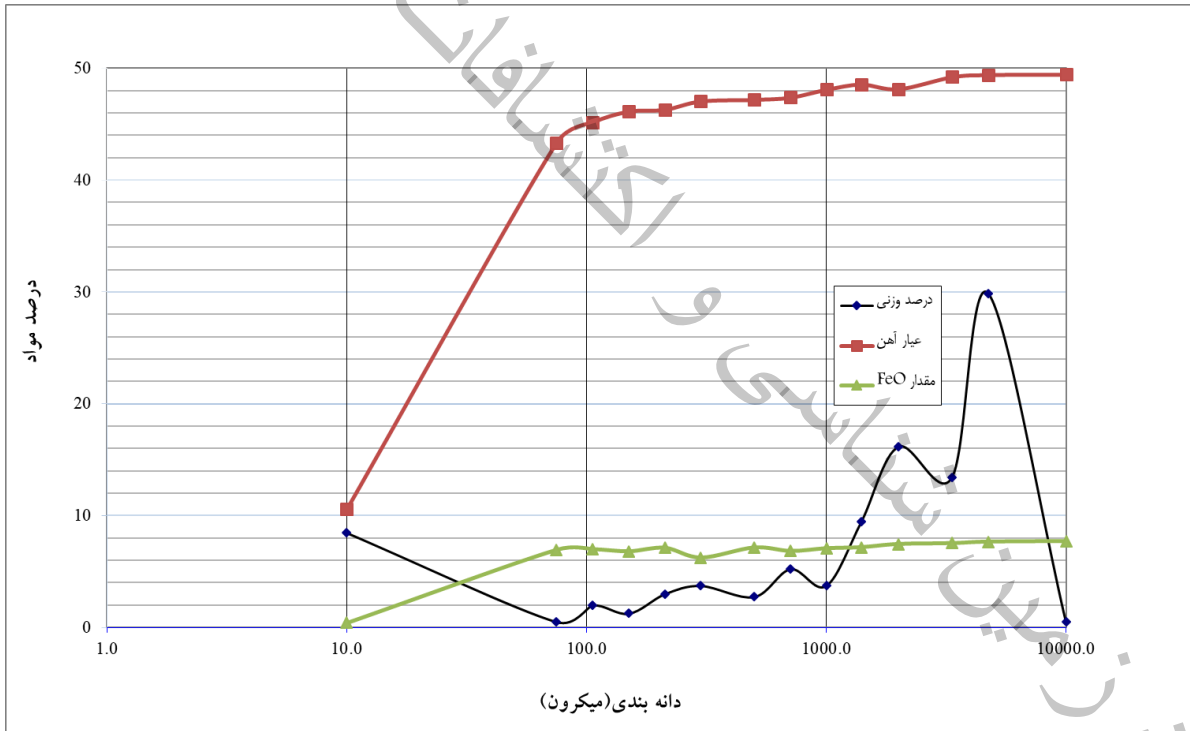
نمودار توزیع دانه بندی (لگاریتمی)



شکل (۳-۲): نمودار دانه بندی نمونه سنگ آهن سنگان

جدول (۱۰-۳): نتایج آنالیز شیمیایی فراکسیون های مختلف نمونه سنگ آهن سنگان

ردیف	طبقات سرندي ASTM (مش)	دهانه (میکرون)	وزن (گرم)	درصد وزنی	درصد Fe	درصد FeO	مقدار وزنی Fe	مقدار وزنی FeO	درصد وزنی Fe	درصد وزنی FeO	درصد وزنی باقیمانده Fe	درصد وزنی عبور کرده Fe	درصد وزنی تجمعی باقیمانده FeO	درصد وزنی تجمعی عبور کرده FeO
۱	۳.۸	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰	۰.۵	۴۹.۵	۷.۷	۴.۹	۰.۸	۰.۵	۰.۶	۰.۵	۹۹.۴	۰.۶	۹۹.۴
۲	۴	۴۷۵۰	۶۰۰	۳۹.۹	۴۹.۴۲	۷.۶۵	۳۹.۶۵	۴۵.۹	۳۲.۶	۳۳.۸	۳۳.۱	۶۶.۹	۳۴.۳	۶۵.۷
۳	۶	۳۳۵۰	۳۷۰	۱۳.۴	۴۹.۳۳	۷.۵۲	۱۳۳.۹	۲۰.۳	۱۴.۶	۱۴.۹	۴۷.۷	۵۲.۳	۴۹.۳	۵۰.۷
۴	۱۰	۲۰۰۰	۳۳۵	۱۶.۲	۴۸.۱۵	۷.۴۴	۱۵۶.۵	۲۴.۲	۱۷.۲	۱۷.۸	۶۴.۹	۳۵.۱	۶۷.۱	۳۳.۹
۵	۱۴	۱۴۰۰	۱۹۰	۹.۵	۴۸.۵۷	۷.۱۶	۹۲.۳	۱۳.۶	۱۰.۱	۱۰.۰	۷۵.۱	۳۴.۹	۷۷.۱	۳۳.۹
۶	۱۸	۱۰۰۰	۷۵	۳.۷	۴۸.۱	۷.۰۶	۳۶.۱	۵.۳	۴.۰	۳.۹	۷۹.۰	۲۱.۰	۸۱.۰	۱۹.۰
۷	۲۵	۷۱۰	۱۰.۵	۵.۲	۴۷.۴	۶.۸۲	۴۹.۸	۷.۲	۵.۵	۵.۳	۸۴.۵	۱۵.۵	۸۶.۲	۱۳.۸
۸	۳۵	۵۰۰	۵.۵	۲.۷	۳۷.۲	۷.۱۳	۲۶.۰	۳.۹	۳.۹	۳.۹	۸۷.۴	۱۲.۶	۸۹.۱	۱۰.۹
۹	۵۰	۳۰۰	۷.۵	۳.۷	۴۷.۰۶	۶.۳۳	۲۵.۳	۴.۷	۳.۹	۳.۴	۹۱.۳	۸.۸	۹۳.۵	۷.۵
۱۰	۷۰	۲۱۲	۶.۰	۳.۰	۴۶.۳۱	۷.۱	۲۷.۸	۴.۳	۳.۱	۳.۱	۹۴.۳	۵.۷	۹۵.۷	۴.۳
۱۱	۱۰۰	۱۵۰	۲.۵	۱.۳	۴۶.۱۵	۶.۷۹	۱۱.۵	۱.۷	۱.۳	۱.۲	۹۵.۶	۴.۴	۹۶.۹	۳.۱
۱۲	۱۴۰	۱۰۶	۴.۰	۲.۰	۴۵.۱۸	۶.۹۸	۱۸.۱	۲.۸	۲.۰	۲.۱	۹۷.۶	۳.۴	۹۹.۰	۱.۰
۱۳	۲۰۰	۷۵	۱.۰	۰.۵	۴۳.۳۶	۶.۹۲	۴.۳	۰.۷	۰.۵	۰.۵	۹۸.۰	۲.۰	۹۹.۵	۰.۵
۱۴	۳۰۰	۱۰	۱۷۰	۸.۵	۱۰.۵۶	۰.۴۱	۱۸.۰	۰.۷	۲.۰	۰.۵	۱۰۰.۰	۰.۰	۱۰۰.۰	۰.۰
				مجموع	۱۰۰۰	۲۰۱۰								
				عیار محاسباتی نمونه	۶.۸	۰.۴۵۳								



شکل (۳-۳): نمودار توزیع Fe و FeO در فراکسیون های مختلف نمونه سنگ آهن سنگان

با توجه به جدول ۱۰-۳ و شکل ۳-۳ ملاحظه می شود که در نمونه مطالعه شده ذرات کوچکتر از ۲۰۰ میکرون که به لحاظ درصد وزنی بیش از ۸ درصد نمونه را تشکیل می دهد مقدار آهن چندانی ندارد و می توان این بخش را قبل از مدار حذف کرد. البته در صورتیکه این مساله همیشگی باشد و از نظر فنی تایید گردد قابل توجه خواهد بود.

۳-۲-۸-۲- جدایش مغناطیسی خشک

بدین منظور از جداکننده مغناطیسی نواری خشک آزمایشگاهی با شدت میدان حدود ۲۰۰۰ گوس استفاده شد. با توجه به آنالیز محصولات حاصل از این جدایش عیار آهن در کنسانتره به حدود ۵۱ درصد و مقدار FeO به بیش از ۸ درصد بالغ گردید. همانطور که مشخص است نمونه مذکور با توجه به مقدار FeO از نوع هماتی می باشد. لذا جهت بررسی کارایی جدایش آزمایش های لوله دیویس و همچنین جداکننده شدت بالای ماتریسی تر انجام شد که نتایج آن در گزارش مرحله نهایی ارایه خواهد شد. نتایج این آزمایش در جدول ۳-۱۱ ارایه شده است.

جدول (۳-۱۱): نتیجه آزمایش جدایش مغناطیسی خشک

نوع محصول	وزن	درصد وزنی	درصد Fe	درصد FeO	مقدار وزنی Fe گرم	بازیابی Fe
مغناطیسی	۱۸۰۰.۰۰	۹۰.۰۰	۵۱.۳۱	۸.۸۳	۹۲۳.۵۸	۹۵.۵۶
غیرمغناطیسی	۲۰۰.۰۰	۱۰.۰۰	۲۱.۴۵	۰.۸۸	۴۲.۹۰	۴.۴۴
خوراک محاسباتی	۲۰۰۰.۰۰	۱۰۰.۰۰	۰.۴۸۳		۹۶۶.۴۸	۱۰۰.۰۰

با توجه به جدول ۳-۱۱ ملاحظه می شود بیش از ۴ درصد آهن به بخش باطله منتقل می شود که با توجه به مقدار پایین FeO به احتمال بسیار زیاد مربوط به سایر کانی های آهن دار مانند هماتیت می باشد. همچنین عیار آهن از حدود ۴۸ درصد به ۵۱ درصد رسیده است.

نتایج و پیشنهادها

سازمان زمین شناسی و
گسترش معادن
کشور

نتایج

۱. با توجه به ساختار زمین شناسی ایران وجود ذخایر عظیم هماتیتی مانند ذخایر آهن نواری در استرالیا و آمریکای جنوبی بعید به نظر می‌رسد.
۲. ذخایر هماتیت موجود اکثراً زون‌های درگیر با ذخایر منیتیتی شناخته شده مانند نواحی آهن دار در کرمان، یزد و خراسان است و برخی از ذخایر نیز در استان‌های جنوبی و هرمزگان وجود دارند که بعضاً نسبت به کلاس جهانی ذخایر کوچک محسوب می‌شوند. سایر ذخایر پراکنده در کشور نیز بعضاً حاوی اکسیدهای آهن و با ذخایر ناچیز هستند.
۳. توجه به باطله‌های معادن آهن منیتیتی مانند باطله چادرملو و بررسی امکان بازیابی هماتیت از این منابع می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.
۴. بررسی کاربرد هماتیت‌ها و اکسیدهای آهن در ذخایر پراکنده و کوچک کشور در کشاورزی و سایر صنایع

پیشنهاد

۱. ادامه مطالعات خواص سنجی و طبقه بندی متالورژیکی هماتیت‌ها جهت روشن شدن وضعیت این ذخایر و کاربرد و مصارف متنوع
۲. بررسی فناوری‌ها و روش‌های جدید فرآوری به ویژه روش احیا

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

منابع

سازمان زمین شناسی و اکتشافات
معدنی کشور

منابع

۱- محمد پورسهی، پایان نامه ارشد، ۱۳۹۳، پرعیارسازی نمونه کانسنگ هماتیتی هنشک آباده شیراز، دانشکده

فنی و مهندسی، گروه معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات

2- USGS, Mineral Statistics: Iron Ore 2021

3- Cheng, C. Y., Dephosphorization of western australian iron ore by hydrometallurgical process, Mineral Engineering 12, 1999

4- Gooden, J. E. A. , Achemical process for dephosphorization of iron ore, Proceedings of National Chemical Engineering Conference, 1974

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور