نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره سیزدهم شماره ۳۹، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۵۴ تا ۶۷
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol. 13, No. 39, 2018, pp 54-67

مطالعات کانی شناسی فرآیند کانسنگ معدن آهن اجت آباد سمنان

آرزو عابدی[1*]، فرج‌اله فردوست[2]، سودابه سعیدی[3]

[1] استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود arezooabedi@shahroodut.ac.ir
[2] استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود faraj_fardoost@yahoo.com
[3] کارشناس دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود sodabehsaidi@yahoo.com

(دریافت ۲۶ شهریور ۱۳۹۶، پذیرش ۰۶ تیر ۱۳۹۷)

چکیده

معدن آهن اجت‌آباد در ۷۳ کیلومتری شرق سمنان در کمربند کانی‌زایی آهن استان سمنان واقع شده است. بخش اعظم کانی‌زایی آهن، هماتیت است که در داخل سنگ میزبان آهکی و ماسه‌سنگی در مجاورت توده‌های آندزیتی و بازالت-آندزیتی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی، سنگ معدن آهن به فرم‌های هماتیت سخت و متراکم همراه مگنتیت، هماتیت نرم، هماتیت گرهکی و اخری در محدوده معدنی وجود دارد که گرهک‌های هماتیت در داخل زون هماتیت‌های نرم و پودری قرار می‌گیرد. مهم‌ترین کانی‌های باطله شامل کربنات‌های کلسیم و منیزیم، کوارتز و فلدسپار است. کربنات‌ها به صورت سیمان کربناته در گرهک‌های هماتیتی، رگه و رگچه‌های کربناته و نیز سنگ میزبان آهکی و آهکی-دولومیتی است. کوارتز و فلدسپار در همراهی هماتیت اخرایی بوده و هم‌چنین از کانی‌های اصلی سنگ‌ساز در ماسه‌سنگ‌های سنگ میزبان است. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی بر روی هماتیت‌ها نشان می‌دهد که هماتیت سخت دارای بالاترین میزان Fe_2O_3 است و هماتیت اخرایی بیشترین میزان SiO_2 را در بردارد. مجموع میزان MnO، P_2O_5، و SO_3 در ماده معدنی کمتر از یک درصد است. با بررسی آنالیز نقطه‌ای مایکروپروپ الکترونی بر روی کانی هماتیت، میزان آرسنیک تا ۱۲۰۰ گرم بر تن آشکار شد.

کلمات کلیدی

کانی‌شناسی فرآیند، هماتیت، اجت‌آباد، آرسنیک

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱-مقدمه

کاربرد علم کانی‌شناسی در فرآوری مواد معدنی یا همان کانی‌شناسی فرآیند، بهره‌گیری از اطلاعات مربوط به شناسایی ترکیبات، رفتار کانی‌ها و فازهای مختلف آن در طی عملیات فرآوری مواد معدنی فلزی و غیرفلزی است [۱]. مطالعات کانی‌شناسی فرآیند شامل شناسایی مواد معدنی و باطله، بافت ماده معدنی و تعیین درجه آزادی است که اولین مرحله از فرآیند فرآوری مواد معدنی است و نقش بسیار مهمی در بهبود وضعیت فعلی تکنولوژی فرآوری مواد معدنی دارد. ماده معدنی پس از استخراج با سنگ میزبان و تعدادی کانی‌های همراه و یا پاراژنز با کانسنگ مخلوط است که باطله محسوب می‌شود. باطله‌ها ممکن است، سنگ میزبان آذرین، دگرگونی، رسوبی و یا رگه‌های هیدروترمالی کوارتز، کلسیت و یا کانی‌های تیپومورف و نیز سایر کانی‌های ثانویه ایجاد شده در طی فرآیندهای تشکیل کانسار باشد، بنابراین زمین‌شناسی یک ذخیره معدنی همواره با معدنکاری ارتباط تنگاتنگی دارد [۲]. در این مقاله به بررسی اولین مرحله از مطالعات کانی‌شناسی فرآیند، شامل شناسایی نوع سنگ معدن و باطله، روابط ساخت ـ بافت و بررسی شیمی سنگ معدن در محدوده معدنی آهن اجت‌آباد واقع در شرق سمنان پرداخته می‌شود.

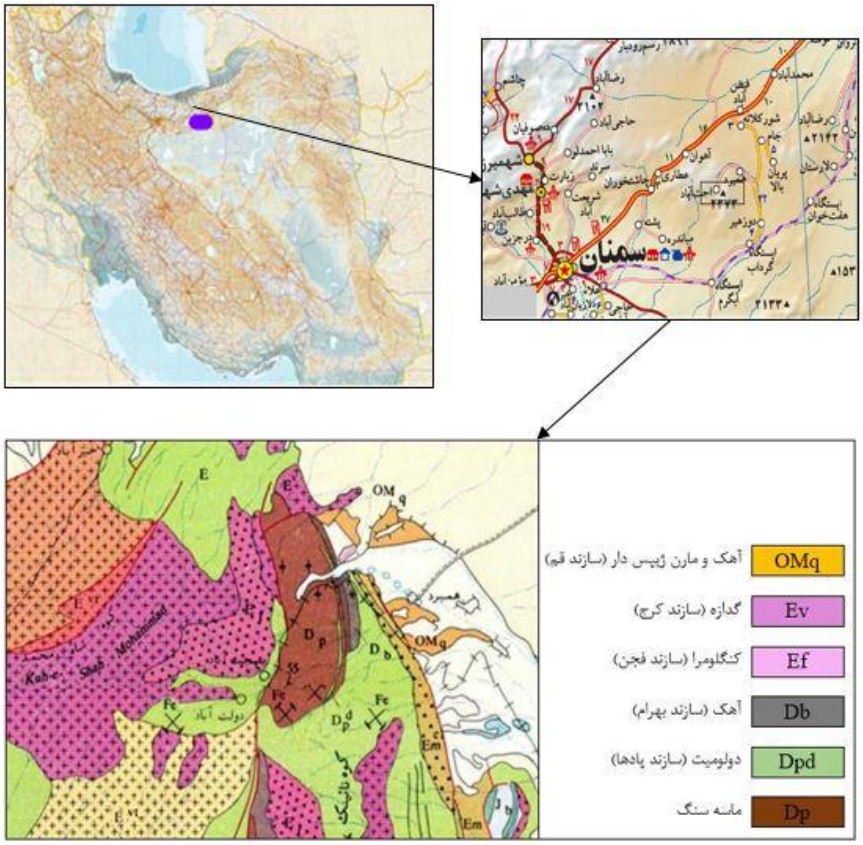
در استان سمنان یک کمربند کانی‌زایی آهن وجود دارد که از شمال سمنان شروع می‌شود و تا جنوب و جنوب‌شرق شاهرود ادامه دارد. در قسمت شمال و شمال‌شرق سمنان معادن نوکه، شیخاب و همیرد قرار دارند و در جنوب دامغان معادن پنج کوه، رباعی و چالود واقع شده است و به سمت جنوب ـ جنوب‌غرب شاهرود معدن آهن لجنه قرار دارد [۳]. معدن آهن اجت‌آباد نیز در کمربند آهن یاد شده بین معادن همیرد و شیخاب واقع شده است. کانسارهای آهن شمال و شمال‌شرق سمنان بیشتر از نوع اسکارن و نیز متاسوماتیزم تراوشی معرفی شده‌اند [۳،۴،۵]. کانسار آهن اسپیکولاریت ـ باریت احمدآباد در شمال‌شرقی سمنان از نوع گرمابی ـ ماگمایی رگه‌ای [۶]، کانسار آهن تویه دروار در شمال‌غرب دامغان از نوع متاسوماتیزم در داخل سنگ میزبان کربناته [۷] و کانسارآهن پنج کوه در جنوب‌شرق دامغان از نوع اسکارن [۸] گزارش شده‌اند.

معدن آهن اجت‌آباد (بهجت آباد) در۷۳ کیلومتری شرق سمنان (منطقه جام- دوزهیر) و در مختصات جغرافیایی ”00 ’48 530 “ طول شرقی و ”00 ’43 350“ عرض شمالی واقع شده است. از نظر تقسیمات نقشه‌های زمین‌شناسی این کانسارزایی در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰,۰۰۰ جام [۹] قرار می‌گیرد (شکل ۱). در این منطقه مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی در سال‌های پس از ۱۳۱۰ شمسی توسط آلمان‌ها، با توجه به ذخیره بالای سنگ آهن و بررسی فنی و اقتصادی انجام شد. برای آغاز بهره‌برداری و حمل ماده معدنی، زیرسازی جاده راه آهن انشعابی از خط اصلی تهران ـ مشهد و نیز احداث پل‌ها انجام شد که به دلیل مسائل ناشی از جنگ جهانی دوم، پروژه تعطیل شد. در سال‌های ۱۳۵۵ تا ۱۳۷۰ شرکت سهامی کل معادن ایران و در سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۷ شرکت همراه تولید از معدن بهره‌برداری می‌کردند. مساحت محدوده معدن ۶٫۶ کیلومتر مربع است. ذخیره قطعی معدن ۲۰۰ هزار تن و ذخیره احتمالی آن۳۰۰ هزار تن با عیار ۵۵ درصد برآورد شده است [۱۰]. نتایج حاصل از تفسیر داده‌های مغناطیسی منطقه حاکی از آن است که توده‌های مغناطیسی آهن‌دار منطقه اجت‌آباد که تعدادی دقیقا به وسیله رخنمون‌ها و ترانشه‌های موجود تأیید می‌شوند، اکثرا در اعماق کمتر از ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر واقع شده‌اند [۱۱].

بر اساس مطالعات صحرایی انجام شده در این پژوهش، کانسار آهن اجت‌آباد در دو افق مختلف داخل سازند پادها با سن دونین زیرین قرار گرفته است. این سازند اساسا از ماسه‌سنگ، شیل و به صورت پراکنده، ماسه آهکی، دولومیت و آهک تشکیل شده است که به عنوان سنگ درونگیر ماده معدنی محسوب می‌شوند.

۲- روش انجام مطالعات

این پژوهش بر مبنای مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. برای شناسایی انواع کانی‌سازی‌های آهن و باطله‌ها، عملیات صحرایی و نمونه‌برداری طی چند مرحله از افق‌های کانه‌سازی و سنگ‌های دربرگیرنده در محدوده معدن آهن اجت‌آباد انجام گرفت. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و بررسی نمونه‌های دستی، تعداد ۵۰ نمونه برای تهیه مقاطع نازک و صیقلی و تعداد ۱۰ نمونه برای آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) انتخاب شد. همچنین برای تعیین ترکیب شیمیایی سنگ معدن تعداد ۱۳ نمونه برای آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و برای بررسی دقیق‌تر عناصر در داخل هماتیت، یک نمونه آنالیز به روش مایکروپروپ الکترونی (EPMA) انجام گرفت.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه برروی نقشه ایران و بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ جام [۱۲]

آنالیزهای XRD در دانشگاه علوم پایه دامغان، XRF در شرکت طیف کانساران بینالود و EPMA در مرکز تحقیقات فرآوری کرج انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- فرم قرارگیری ماده معدنی (ساخت و بافت)

بر اساس بررسی‌های صحرایی و مطالعات مقاطع صیقلی و نیز آنالیز پراش اشعه ایکس هماتیت، مگنتیت،گوتیت و لیمونیت مهم‌ترین کانسنگ‌های آهن در محدوده معدن اجت‌آباد است که فرم قرارگیری آن‌ها به شرح زیر است:

کانسنگ سخت هماتیت ـ مگنتیت

مهم‌ترین حجم اصلی کانه‌زایی در معدن آهن اجت‌آباد کانسنگ سخت و متراکم هماتیت ـ مگنتیت است که به صورت لایه‌ای و عدسی در درون سنگ میزبان آهک، آهک دولومیتی و ماسه‌سنگ آهکی و در مجاورت توده‌های بازالتی و آندزیتی ـ بازالتی قرار گرفته است. این بخش از کانی‌سازی مهم‌ترین بخش استخراج ماده معدنی در گذشته است که به روش اتاق ـ پایه در سال ۱۹۳۰ توسط آلمان‌ها نیز بهره‌برداری شده است (شکل ۲ ـ الف).

کانسنگ به فرم گرهک‌های هماتیت

در منطقه معدنی اجت‌آباد گرهک‌های هماتیت داخل زون هماتیت‌های خرد شده مشاهده می‌شوند. گرهک‌ها که از جمله ساخت‌های رسوبی ثانویه‌اند، طی مرحله دیاژنز در داخل افق نرم اکسید آهن تشکیل شده‌اند. مکانیزم تشکیل گرهک‌ها به این ترتیب است که آب‌های غنی از کربنات کلسیم در بخش های دارای تخلخل جمع شده و در حالت اشباع ته‌نشین می‌شود، فضای خالی ما بین اکسیدآهن را پر می‌کند و مانند سیمانی آن‌ها را به یکدیگر می‌چسباند و تجمعات سختی را به وجود می‌آورد. گرهک‌های موجود به دو شکل منفرد و تجمعی اند که معرف فاصله مراکز تجمع‌اند. هرگاه مراکز تجمع از یکدیگر فاصله داشته‌اند، گرهک‌های منفرد و زمانی که به یکدیگر نزدیک بوده‌اند، انواع تجمعی را تشکیل داده‌اند. گرهک‌ها از وسط برش داده شد و بافت متحدالمرکز درآنها مشاهده نشد (شکل ۲- ب).

کانسنگ نرم هماتیت

در محدوده معدنی اجت‌آباد در زون تشکیل گرهک‌های هماتیتی اکثر واحدهای سنگی رخنمون یافته دگرسان شده‌اند و یک افق سیاهرنگ تا الوان با ضخامت حدود ۱٫۵ متر حاوی کانی‌سازی نرم و پودری هماتیت در بخش فوقانی تشکیلات آهک ماسه‌ای و دولومیتی مشاهده شد. در این زون کانی‌سازی نرم هماتیت، گرهک‌های هماتیتی مشاهده می‌شود (شکل ۲ ـ ج).

کانسنگ هماتیت اخرایی و لیمونیت

در بخشی از محدوده معدنی، کانی‌سازی زون اخری مشاهده شد که شامل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن قرمز، زرد و نارنجی است (شکل۲ ـ د).

شکل ۲- الف) کانسنگ سخت هماتیت – مگنتیت که به فرم لایه‌ای و هم شیب با واحد رسوبی آهک ماسه‌ای قرارگرفته است. در شکل استخراج اتاق – پایه ماده معدنی نیز مشاهده می‌شود، ب) گرهک‌های هماتیتی منفرد و تجمعی، ج) افق سیاه رنگ مربوط به هماتیت‌های نرم میزبان گرهک‌ها که با کنتاکت موجدار به آهک‌های ماسه‌ای اتصال دارد، د) کانسنگ هماتیت اخری و لیمونیت

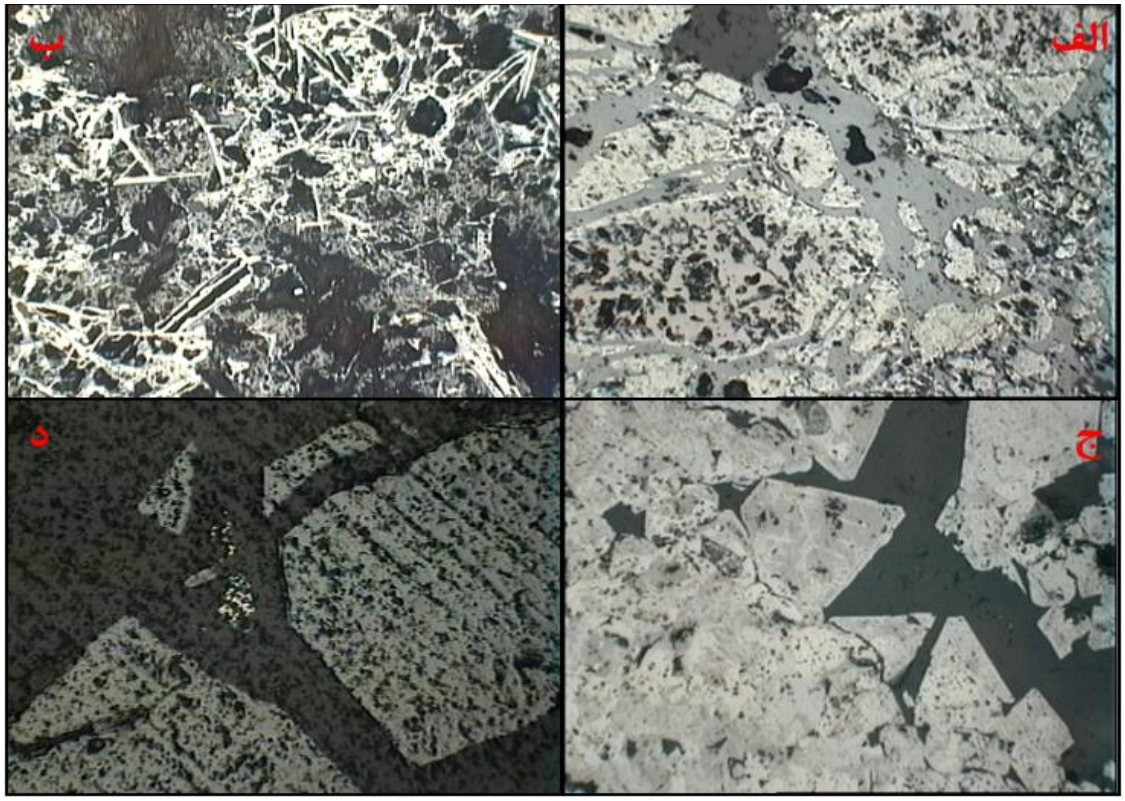
۳-۲- مطالعات کانی‌شناسی

کانی‌شناسی فاز سخت هماتیت ـ مگنتیت

فراوانترین کانی‌های مربوط به این فاز شامل هماتیت، مگنتیت و مارتیت است که بخش اعظم ذخیره معدن مربوط به این فاز است. در مقاطع صیقلی مشاهده شده بلورهای سوزنی هماتیت در اندازه‌های ریز و درشت به صورت پراکنده، دارای بافت اسکلتی، بافت استوک‌ورک و نیز به صورت جدایی در فاز جامد همراه با مگنتیت دیده می‌شوند. مگنتیت در برخی نمونه‌ها به شکل بلورهای مستقل مشاهده شد، ولی در اکثر نمونه‌ها از حاشیه با هماتیت جانشین شده است. پدیده مارتیتی شدن یا تبدیل مگنتیت به هماتیت در خیلی از مقاطع قابل تشخیص است. کانی پیریت نیز به مقدار جزئی در کنار هماتیت مشاهده شد (شکل ۳).

برای تأکید مطالعات میکروسکوپی و همچنین شناسایی کانی‌های احتمالی که با میکروسکوپ نوری قابل تشخیص نیستند، نمونه‌ها با دستگاه پراش اشعه ایکس آنالیز شدند.

مطالعه دقیق‌تر این فاز سخت کانی‌سازی با اشعه ایکس حاکی از وجود هماتیت، مگنتیت و کلسیت است که در ادامه نمودارهای پراش اشعه ایکس آورده شده است (شکل ۴ ـ الف و ب).



شکل ۳- تصاویر مقاطع صیقلی مربوط به کانسنگ سخت هماتیت- مگنتیت، الف) دانه خاکستری تیره مگنتیت و در سایر قسمت‌ها مگنتیت که تبدیل به مارتیت شده به رنگ سفید قابل مشاهده است. درشت‌نمایی۱۰۰، ب) تیغه های هماتیت به رنگ سفید به صورت بافت داربستی در زمینه کربنات و اکسید سیلیسیم. درشت‌نمایی ۱۰۰، ج) بلورهای مگنتیت که در سطح آن‌ها پدیده جدایی در فاز جامد (تیغه‌های هماتیتی جدا شده) مشاهده می‌شود. درشت‌نمایی۱۰۰، د) قطعات ریزپیریت به رنگ زرد در کنار هماتیت. درشت‌نمایی ۴۰

کانی‌شناسی زون هوازده

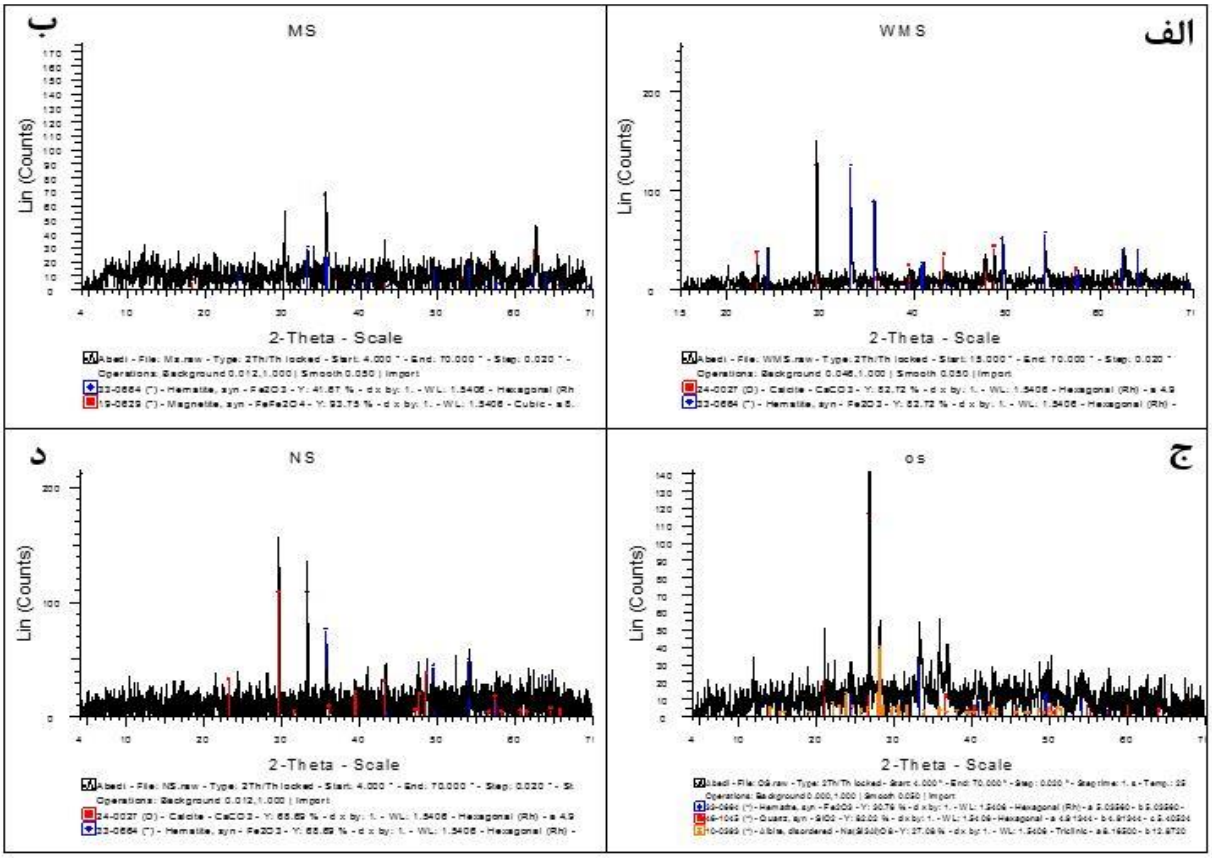
اصلی‌ترین کانی‌های این زون که در محدوده معدنکاری قرار دارند شامل اکسیدها و ئیدروکسیدهای قرمز، زرد و نارنجی رنگ لیمونیت، گوتیت، هیدروگوتیت و اخری است. اخری ترکیبی از کانی‌های آهن به طور مخلوط با رس، آلومینوسیلیکات‌ها و کانی‌های دیگر است. در آنالیز XRD بر روی دو نمونه از این زون علاوه بر هماتیت،کوارتز، آلبیت و کربنات نیز آشکارشد (شکل ۴ ـ ج)

کانی‌شناسی زون گرهک‌های هماتیتی

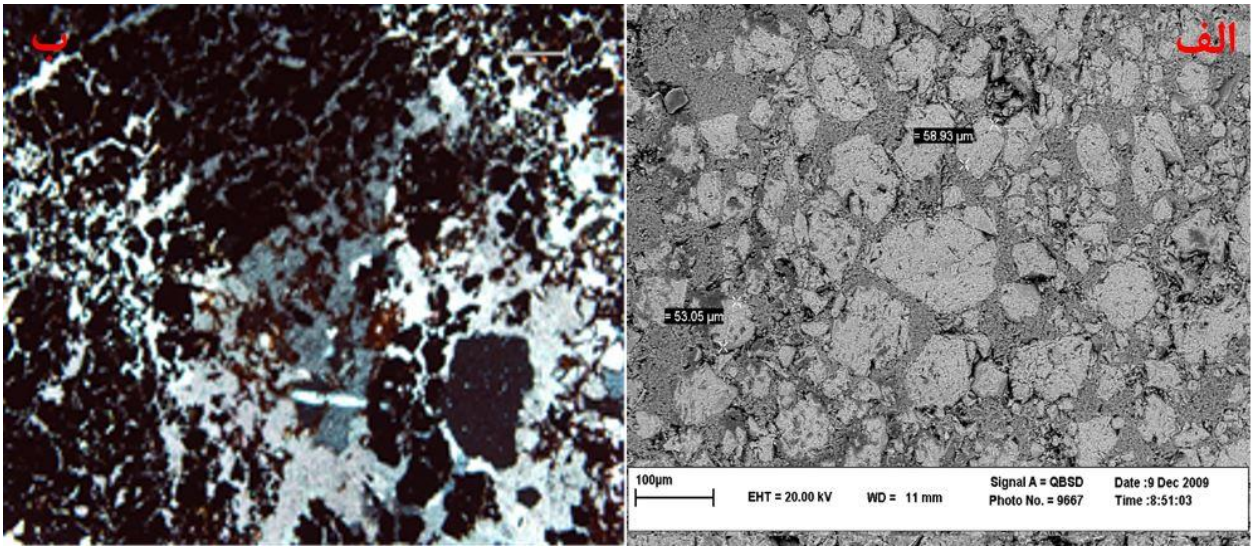
گرهک‌های از جنس هماتیت داخل هماتیت‌های نرم و خردشده قرار گرفته‌اند و در محدوده این گرهک‌ها تمامی سنگ‌ها به طور شدیدی دگرسان شده‌اند. مطالعه مقاطع نازک این گرهک‌های هماتیتی نشان می‌دهد که خود گرهک‌ها از تجمع ذرات هماتیت دانه‌ریز که با سیمان کلسیتی به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است (شکل ۵ ـ الف و ب). در منطقه زون گرهکی، هماتیت‌های پودری آبی رنگ و الوان که میزبان گرهک‌های هماتیتی‌اند نیز مشاهده شده است که به نظر می‌آید از نظر خواص فیزیکی در رده آهن blue dust قرار می‌گیرد که در استرالیا و هند برای توصیف هماتیت صفحه ریز و یا مارتیت شسته شده به رنگ خاکستری و ریزدانه (۰/۲- ۰/۰۰۵ میلی‌متر) به کار می‌رود [۱۲]. نتایج به دست آمده از آنالیز چهار نمونه اشعه ایکس از نمونه‌های گرهکی حاکی از وجود هماتیت و کلسیت است (شکل ۴ ـ د).

۳-۳- بررسی شیمی سنگ معدن

بررسی کیفیت کانسنگ آهن و ارزش آن از نظر اقتصادی نیاز به تعیین ترکیب شیمیایی دارد. برای بررسی ترکیب شیمیایی سنگ معدن (عناصر اصلی و جزئی)، آنالیز XRF بر روی نمونه‌های کانسنگ هماتیت نرم، سخت، گرهک هماتیتی، لیمونیت و اخری انجام گرفت. با توجه به برخی گزارش‌های منتشر نشده که حاکی از میزان آرسنیک بالا در کانسارهای آهن منطقه دامغان است، یک مقطع نیز برای بررسی ترکیب شیمیایی دقیق هماتیت با مایکروپروپ الکترونی مورد بررسی قرارگرفت.



شکل ۴- نمودارهای پراش اشعه ایکس، الف) نمونه سخت هماتیت، ب) نمونه سخت هماتیت همراه با مگنتیت ، ج) نمونه اخری، د) گرهک‌ها



شکل ۵- الف)تصویر میکروسکوپ الکترونی از گرهک‌های هماتیتی که درآن دانه‌های هماتیت با سیمان کربناته به هم متصل شده‌اند، ب) تصویر میکروسکوپ نور عبوری، تبلور سیمان کربناته(رنگ روشن) در بین قطعات هماتیت (رنگ تیره) که به صورت سیمان آن‌ها را به یکدیگر چسبانده است.

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز XRF (جدول ۱) بررسی تغییرات عناصر اصلی بیانگر آن است که میزان Fe_2O_3 در هماتیت سخت بیشتر از سایر فرم‌های کانسنگ است. مقدار CaO به طور قابل ملاحظه‌ای در گرهک‌ها و هماتیت نرم افزایش یافته است و در نمونه‌های گرهکی به ۲۹ درصد نیز می‌رسد که علت این افزایش وجود سیمان کربناتی در گرهک‌ها است. مقدار P_2O_5، MnO و SO_3 در نمونه‌ها کمتر از ۱ درصد است که عدم مشاهده کانی‌های فسفاته، منگنزدار و سولفیدی این مطلب را

تأیید می‌کند، البته پیریت به میزان خیلی کم در دو نمونه مشاهده شد. در نمونه‌های هماتیت سخت تا ۷ درصد SiO_2 آشکار شد. در نمونه اخری مقدار SiO_2 تا ۳۰ درصد افزایش داشته و علاوه بر آن نیز میزان Al_2O_3 و Na_2O نسبت به سایر نمونه‌ها افزایش نشان می‌دهد.

جدول ۱- ترکیب اکسیدهای اصلی (درصد وزنی) و عناصر فرعی(گرم بر تن) نمونه‌های سنگ معدن اجت‌آباد. دستگاه XRF

اکسیدهای اصلی /درصدوزنی	هماتیت نرم	هماتیت سخت	اخری	گرهک	لیمونیت
SiO_2	۴٫۰۲	۷٫۲۱	۳۲٫۴۶	۲٫۳۳	۰٫۳۶
Al_2O_3	۲٫۱۴	۰٫۴۶	۵٫۲۹	۱٫۱۱	۰٫۱۳
Na_2O	۰٫۱۶	۰٫۱۰	۲٫۱۷	۰٫۰۵	۰٫۰۰
MgO	۰٫۷۱	۰٫۳۵	۰٫۲۶	۰٫۳۵	۰٫۰۷
K_2O	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۰۶	۰٫۱۷	۰٫۰۰
TiO_2	۰٫۰۵	۰٫۱۰	۰٫۷۵	۰٫۰۴	۰٫۰۱
MnO	۰٫۰۹	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۲	۰٫۰۰
CaO	۱۷٫۵۳	۰٫۱۴	۰٫۳۷	۲۹٫۷۴	۰٫۰۸
P_2O_5	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۰٫۰۳
Fe_2O_3	۶۸٫۲۱	۸۹٫۸۴	۵۲٫۸۹	۵۳٫۴۱	۸۶٫۹۹
So_3	۰٫۰۰	۰٫۶۶	۰٫۲۶	۰٫۱۱	۰٫۱۸
LOI	۶٫۹۱	۰٫۹۲	۵٫۱۴	۱۲٫۵۴	۱۲٫۰۸
عناصرفرعی/ گرم برتن					
Ba	۹۷	۴۶	۲۳۳	۱۰۹	۲۳۲
Ce	N	N	۲۵	۲۴	N
Co	۱۰	۱	۴۸	۳۵	۳
Cr	۵۳	۱۵۵	۲۹۱	۷۶	۵۹
Cu	۱۷	۳۸	۸۰	۳۷	N
Nb	۱۷	N	۲۱	N	۸
Mo	۱۲	۵	۹	۶	۲۵
U	۸	۲	۳	۲	۳
Th	N	۲	۳	۱	N
Cl	۳۷۴	۸۰۸	۵۱۳	۵۳۰	۱۸۶
Ni	۸	N	N	N	N
Pb	۱۵۶	۶۱	۲۴	۳۸	۳۱
Rb	۶	۲	۷	۵	۳
Sr	۴۵	۱۸	۱۳۷	۸۵	۲۷
V	۷۹	۱۱۸	۳۰۷	۴۵	۱۲
W	N	۲۵	N	۳	۱۶
Y	۹	۹	۱۳	۱۰	۹
Zr	۱۲	۷	۴۲۲	۷	۱

از آنجا که در ترکیب شیمیایی هماتیت‌های کریپتوکریستالین و فشرده Si و Al به صورت ناخالصی مکانیکی یا غیرجانشینی ممکن است وجود داشته باشد [۱۳]، بنابراین وجود SiO_2 در نمونه‌ها به صورت ناخالصی مکانیکی قابل توجیه است.

براساس ترکیب شیمیایی ارائه شده توسط برلین در سال ۱۹۶۹ برای هماتیت از نوع اخری، دامنه تغییرات عناصر اصلی در کانی اخری مطابق جدول ۲ است [۱۴].

جدول ۲- دامنه تغییرات عناصر اصلی در کانی اخری

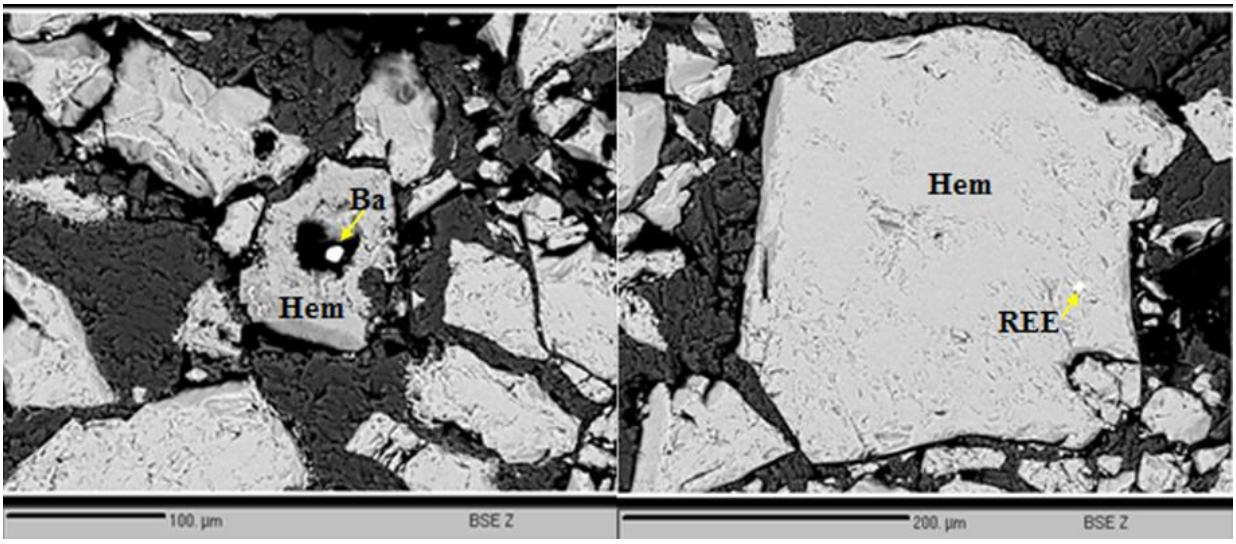
SiO_2	۵۸- ۲ درصد	Fe_2O_3	۸۴ –۱۴/۵ درصد
TiO_2	۱۰- ۰/۵ درصد	Al_2O_3	۱۸/۵ –۰/۲ درصد
CaO	۲/۷- ۰/۱۵ درصد	MgO	۴/۴۵- ۰/۱۵ درصد

با مقایسه با آنالیزهای فوق، میزان SiO_2 و Al_2O_3 در نمونه‌های اخری معدن اجت‌آباد کاملا با ترکیب شیمیایی اخری تطابق دارد و این افزایش به صورت آشکار شدن فاز کوارتزی و آلبیتی در آنالیز XRD نمونه‌های اخری مورد مطالعه ظاهر شده است.

بررسی ترکیب شیمیایی کانی هماتیت با مایکروپروپ الکترونی (جدول ۳) نشان می‌دهد که در ترکیب کانی هماتیت عنصر آرسنیک از کمتر از ۱۰۰ تا ۱۳۰۰ گرم بر تن وجود دارد و ترکیبات اکسید منگنز تا ۰/۲۴درصد، گوگرد تا ۰/۰۵ درصد، اکسید فسفر و وانادیم تا ۰/۰۹ درصد و اکسید سیلیسیم تا۲/۵۱ درصد آشکار شده است. علاوه بر آن در زمان مطالعات انجام گرفته با مایکروپروپ الکترونی برخی فازهای مرتبط با کانی‌های عناصر کمیاب آشکار شد که شناسایی دقیق آن با دستگاه موجود امکان‌پذیر نبود. هم‌چنین در قسمتی از بررسی‌های کانی‌شناسی با مایکروپروپ الکترونی کانی باریت نیز در داخل هماتیت مشاهده شد (شکل۶)

جدول۳- آنالیز مایکروپروپ الکترونی هماتیت برحسب درصد وزنی (حد تشخیص ۱۰۰ گرم برتن)

شماره نقطه	MnO	FeO	Al_2O_3	V_2O_3	Cr_2O_3	As	SiO_2	S	TiO_2	P_2O_5	Total
۱/۱	۰/۰۲	۹۰/۳۹	۰	۰	۰	۰/۱	۰/۰۳	۰	۰	۰	۹۰/۵۴
۲/۱.	۰	۹۰/۳۱	۰/۰۳	۰	۰	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۹۰/۴۶
۳/۱.	۰/۳	۸۵	۰/۱۳	۰	۰	۰/۰۴	۲	۰/۰۵	۰	۰/۰۹	۸۷/۶۱
۴/۱.	۰/۲۴	۸۳/۹۱	۰/۲۲	۰	۰	۰	۲/۵۱	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۷	۸۷
۵/۱.	۰	۹۰/۲۵	۰	۰	۰	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۹۰/۴
۶/۱.	۰/۰۱	۹۰/۱	۰	۰	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰	۰/۰۳	۹۰/۳۱
۷/۱.	۰	۹۸/۸	۰	۰	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۰۵	۰	۰	۰/۰۱	۹۰
۸/۱.	۰	۹۱/۴	۰	۰/۰۹	۰	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۸	۰	۹۱/۷
۹/۱.	۰	۹۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۰۷	۰	۰/۱	۰/۰۶	۰	۰	۰	۹۰/۴۳
۱۰/۱.	۰	۸۹/۷۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۰۹	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۱	۸۹/۹۱
۱۱/۱.	۰	۸۹/۶	۰	۰/۰۲	۰	۰/۱۳	۰/۰۲	۰	۰	۰	۸۹/۷۷
۱۲/۱.	۰	۸۹/۷۲	۰	۰	۰	۰/۰۹	۰/۰۴	۰	۰	۰/۰۲	۸۹/۸۷
۱۳/۱.	۰	۹۰/۷	۰	۰/۰۳	۰	۰/۰۷	۰	۰	۰/۰۲	۰	۹۰/۸۲
۱۴/۱.	۰	۸۹/۵۳	۰	۰/۰۳	۰	۰/۰۹	۰/۰۳	۰	۰/۰۱	۰	۸۹/۶۹
۱۵/۱.	۰	۹۰/۳۶	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۹	۰/۰۵	۰	۰/۰۱	۰	۹۰/۵۲
۱۶/۱.	۰	۹۰/۰۸	۰	۰	۰	۰/۱۲	۰/۰۳	۰	۰/۰۱	۰	۹۰/۲۴



شکل۶- در شکل سمت راست دانه هماتیت (Hem) و قسمت سفید براق روی سطح آن مربوط به فاز کانی‌سازی عناصر کمیاب مشاهده می‌شود و در شکل سمت چپ کانی باریت (Ba) قطعه سفید رنگ در همراهی با هماتیت دیده می‌شود (تصاویر مایکروپروپ الکترونی).

۳-۴- مطالعات کانی‌شناسی باطله

از آنجا که در طی استخراج مواد معدنی، سنگ معدن با سنگ‌های میزبان کانی‌سازی آلوده می‌شود و خوراک ورودی به کارخانه فرآوری مجموعه‌ای از ماده معدنی اصلی همراه با باطله‌های سنگ میزبان، محصولات دگرسانی و هوازدگی است، در این قسمت به بررسی سنگ میزبان و کانی‌های موجود در منطقه به عنوان باطله پرداخته می‌شود.

مطالعات صحرایی، میکروسکوپی و ژئوشیمیایی در کانسار اجت‌آباد نشان می‌دهد که افق‌های مختلف آهن‌دار با سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگ آهکی، گدازه‌های آندزیت و آندزیت ـ بازالت و نیز آهک دولومیتی همراه‌اند. در اکثر نقاط گدازه‌های آندزیتی و آندزیتی ـ بازالتی به رنگ سبز در کنار کانسنگ آهن رخنمون دارند (شکل ۷ ـ الف و ب). مطالعات میکروسکوپی انجام شده نشان می‌دهد ماسه‌سنگ‌ها بیشتر از نوع کوارتز وک، ساب ـ آرکوز و وکی‌فلدسپاتی‌اند. آهک‌ها که به رنگ نخودی در مجاور توده آهن یافت می‌شود، اغلب از نوع میکرایت‌اند که گاهی تبلور مجدد در آنها مشاهده می‌شود و رگچه‌های کلسیتی در برخی نمونه‌ها شکستگی‌های موجود را پر کرده است.

شکل ۷- الف) واحد آهکی به رنگ زرد نخودی در سطح بالایی توده آهن‌دار سخت هماتیتی (محل چکش) قرار گرفته و واحد آندزیتی-بازالتی در مجاورت آن به رنگ سبز دیده می‌شود، ب)ماده معدنی آهن‌دار (محل چکش) در مجاورت ماسه‌سنگ (سمت چپ)

در اکثر نمونه‌های مقاطع نازک گدازه‌های آندزیتی و آندزیتی ـ بازالتی، فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز و گاهی شیشه‌ای قرار گرفته‌اند و بافت پورفیری نشان می‌دهند. بعضی پلاژیوکلازها حالت منطقه‌بندی نشان می‌دهند و به شدت دگرسان شده‌اند. بلور درشت آپاتیت نیز در برخی نمونه‌ها مشاهده شد (شکل ۸).

۳-۵- تاثیر کانی‌شناسی و شیمی کانسنگ بر فرآوری

عملیات فرآوری پس از استخراج سنگ معدن برای افزایش عیار سنگ معدن و حذف ناخالصی‌های موجود در آن انجام می‌گیرد، بنابراین براساس نوع ماده معدنی و شرایط زمین‌شناسی کانسار که کنترل‌کننده بافت ماده معدنی، باطله‌ها و عناصر مزاحم است، عملیات مختلف فرآوری از جمله شستشو، جدایش ثقلی، مغناطیسی و فلوتاسیون انجام می‌گیرد [۱۵].

سنگ معدن آهن و محصولات کنستانتره آن دامنه گسترده‌ای از ترکیبات شیمیایی دارند که بر روی کیفیت سنگ معدن آهن و ارزش اقتصادی آن تأثیر به سزایی دارد. مهم‌ترین ترکیبات حائز اهمیت شامل آهن ۶۷-۵۶ درصد و مواد آلاینده اکسیدسیلیسیم ۵٫۷-۰٫۶ درصد و اکسید آلومینیوم ۳٫۷-۰٫۶ درصد وزنی است [۱۶]. کلوت[1] در سال ۱۹۹۸ تأثیرات مضر برخی عناصر و کانی‌های باطله را بر صنایع پایین‌دستی فرآوری آهن بیان کرد که افزایش یکی یا بیشتر از این عناصر زیان‌آور می‌تواند قابلیت استفاده محصول را محدود کند. رقیق‌سازی مخلوط در صنایع میل فولاد یک استراتژی مناسب برای قابل استفاده کردن سنگ آهنی است که به نظر مناسب نیست. البته رقیق‌سازی مخلوط اغلب تأثیر عناصر مضر را محدود می‌کند ولی حذف نمی‌کند [۱۷].

در سنگ معدن آهن اجت‌آباد علاوه بر عناصر آهن، اکسید سیلیسیم و آلومینیوم، میزان دیگر عناصر نیز تعیین شده که به بررسی اثر آنها براساس استانداردهای ارائه شده توسط کلوت در سال ۲۰۱۵ پرداخته می‌شود (جدول ۴).

شکل۸- تصاویر میکروسکوپی مربوط به واحدهای زمین‌شناسی در برگیرنده فاز کانی‌سازی سخت آهن

الف) ماسه‌سنگ ساب‌آرکوز متشکل از ذرات ریز و درشت با جورشدگی ضعیف که به وسیله رگچه کلسیت قطع شده است (بزرگ‌نمایی ۴۰). ب) ماسه‌سنگ کوارتزوکی. با ماتریکس رسی و سیمان کلسیتی، جورشدگی ضعیف (بزرگ‌نمایی۴۰). ج) گدازه آندزیتی با بافت پورفیری که بلور آپاتیت در مرکز آن مشاهده می‌شود.(بزرگ‌نمایی ۴۰). د)آهک میکروکریستالین حاوی رگه‌های کلسیت و در برخی قسمت‌ها میکرایت که در حال تبدیل شدن به اسپارایت است (بزرگ‌نمایی ۴۰)

جدول۴- تاثیر باطله‌ها و عناصر ناخالص/کمیاب در عملکرد صنایع پایین‌دستی فرآوری سنگ معدن آهن (اقتباس از کلوت ۲۰۱۵)

تأثیرات	مراحل فرآوری	کنترل‌کننده‌های زمین‌شناختی	عناصر مضر
بسته به افزایش تخلخل در زمان کلسینه شدن کربنات‌ها باعث پایین آوردن استحکام سینترها و پلت می‌شود.	سینتره کردن و پلتی شدن	سازند آهن نواری کربناته یا آلتراسیون کربناته،گسترش جانشینی/لیچینگ	کربنات‌های سیدریتی
بسته به افزایش ویسکوزیته مذاب مرتبط با میزان Al2O3 منجر به استحکام سینترها و پلت می‌شود.	سینتره کردن و پلتی شدن	باندهای شیلی و آلوموسیلیکات‌های سازندهای آهن نواری	رس >۵ درصد
کاهش حرارت ذوب، خوردگی آجرهای نسوز کوره بلند	سینتره کردن و پلتی شدن، کوره بلند	K2O: میکاهای سازندهای آهن نواری و اسپیتوملان Na: آب‌های خیلی شور	عناصرآلکالی ۰/۰۹ درصد<K2O و Na
هزینه‌های حذف فلز	محصول فلز	آپاتیت در سازندهای آهن نواری،گسترش لیچینگ سوپرژن فسفر	۰/۰۹ درصد<P
هزینه‌های جانبی به ویژه برای فرآوری مجدد، گرد و غبار فلزات پایه و سنگین	-	سازندهای آهن نواری، منشأ هیدروترمال	فلزات پایه (سرب و روی بیشتر از ۱۰۰ گرم بر تن و فلزات سنگین)
میزان بالاتر آن به طور تصاعدی باعث افزایش ویسکوزیته مذاب شده که منجر به افزایش میزان سوخت می‌شود.	سینتره کردن، کوره بلند	باندهای شیلی و آلوموسیلیکات‌های سازندهای آهن نواری	۲/۸ درصد <Al2O3
افزایش حجم سرباره و نیز افزایش حجم آهک مصرفی برای ثابت نگه داشتن میزان CaO/SiO2	سینتره کردن، کوره بلند	سازندهای آهن نواری و شیل، گسترش لیچینگ سوپرژن	۵ درصد <SiO2
اگرچه برخی از انواع فولاد نیاز به منگنز دارد ولی حد بالاتر آن نیاز به رقیق‌سازی با سنگ معدن حاوی میزان کم منگنز دارد تا خواص فولاد را نگه دارد.	ساخت فولاد	تحرک مجدد منگنز از دولومیت‌های ناخالص بالا یا پایین کانی‌سازی، سازندهای آهن نواری کربناته	۰/۰۹ درصد <Mn
منجر به افزایش سرعت تشکیل دی‌اکسین در طی فرآیند سینترینگ می‌شود. باید با سنگ معدن حاوی میزان کم مس رقیق شود تا کیفیت فولاد را نگه دارد.	سینتره کردن، ساخت فولاد	سازند آهن نواری، منشا هیدروترمال	Cu>۱۰۰ ppm
منجر به افزایش انتشار دی‌اکسین سمی و NOX، عملکرد ته‌نشست غبارهای الکترواستاتیکی را کاهش داده و نیز منجر به افزایش سایندگی پوشش نسوز کوره بلند می‌شود.	سینتره کردن، کوره بلند	آب‌های زمینی خیلی شور	Cl >۵۰۰ppm
منجر به افزایش انتشار SO2 می‌شود که خود نیز نیاز به سطح بالاتری از MgO برای انتقال گوگرد به سرباره دارد.	سینتره کردن، کوره بلند	سازند آهن نواری، گوگرد ارگانیک در پوشش سخت یا مارتیت - گوتیت نزدیک سطح	۰/۰۸ درصد > S
باعث کاهش قدرت فیزیکی پلت‌ها و سینترها می‌شود.	سینتره کردن و پلتی شدن	باندهای شیلی، ایلمنیت‌های توده‌های نفوذی یا آهن ماسه‌ای	یک درصد <Ti

مجموع عناصر آلکالی (K2O+Na2O) درانواع کانسنگ‌های هماتیتی اجت‌آباد به استثنای کانسنگ لیمونیتی بالاتر از ۰/۰۹ درصد است، بنابراین در فرآیند سینتره و پلتی کردن مؤثر است و می‌تواند منجر به کاهش حرارت ذوب و نیز خورندگی آجرهای نسوز کوره شود. میزان عنصر فسفر (P) در تمام نمونه‌های کانسنگ آهن اجت‌آباد از ۰/۰۸ درصد پایین‌تر است و بنابراین در فرآیند فرآوری تولید فلز اثری ندارد و هزینه‌های جانبی در این مرحله ایجاد نمی‌کند.

محتوی فلزات پایه و سنگین بیشتر از ۱۰۰ گرم بر تن در سنگ معدن آهن مضر شناخته شده است که بر فرآیند کوره بلند و سینترینگ تأثیر دارد و می‌تواند منجر به ایجاد هزینه‌های جانبی به ویژه برای دوباره فرآوری کردن برخی غبارهای غنی از فلزات پایه و سنگین شود. در نمونه‌های کانسنگ آهن اجت‌آباد میزان روی در نمونه هماتیت گرهکی و سخت به ترتیب ۲۸۸ و ۱۲۶ گرم بر تن است که حدود دو برابرحد مجاز است ولی میزان سرب فقط در نمونه هماتیت نرم ۱۵۶ گرم بر تن است.

در انواع هماتیت‌های منطقه اجت‌آباد فقط در نمونه اخری میزان Al_2O_3 بیشتر از ۲٫۸ درصد است. سیلیس عنصری مزاحم در فرآوری سنگ آهن و حد مجاز آن ۵ درصد است، سیلیس در فرآیند کوره بلند و سینترینگ اثر می‌گذارد و منجر به افزایش حجم سرباره و نیز افزایش حجم آهک مصرفی برای ثابت نگه داشتن میزان CaO/SiO_2 می‌شود. کانسنگ لیمونیت منطقه اجت‌آباد با ۰٫۳۶ درصد SiO_2 حاوی کمترین میزان اکسید سیلیسم و در نمونه اخری با ۳۲٫۴۶ درصد SiO_2 بیشترین مقدار سیسلیم است که این مقدار اکسید سیلسیم در نمونه اخری طبیعی است. در نمونه هماتیت سخت که بیشترین حجم سنگ معدن در منطقه است، میزان ۷٫۲۱ درصد اکسید سیلیسم آشکار شد ولی در نمونه‌های هماتیت نرم وگرهک میزان سیلیس کمتر از ۵ درصد تعیین شده است. افزایش عنصر منگنز بیشتر از ۰٫۹ درصد در مراحل ساخت فولاد اثر می‌گذارد. مقدار عنصر منگنز در تمام انواع کانسنگ معدن اجت‌آباد کمتر از ۰٫۹ درصد است. غلظت عنصر مس در سنگ معدن اجت‌آباد کمتر از صد گرم بر تن است، بنابراین در مراحل سینترینگ و ساخت فولاد بی‌اثر است. افزایش میزان کلر بیشتر از۵۰۰ گرم بر تن در فرآیند سینترینگ و کوره بلند مؤثر است که منجر به انتشار دی‌اکسین سمی و NOX، کاهش عملکرد ته‌نشست غبارهای الکترواستاتیکی و نیز منجر به افزایش سایندگی پوشش نسوز کوره بلند می‌شود.

در نمونه‌های معدن آهن اجت‌آباد در سنگ معدن سخت هماتیت که اصلی‌ترین نوع ماده معدنی است، غلظت کلر به ۸۰۰ گرم بر تن می‌رسد ولی در سایر نمونه‌ها کمتر است. میزان گوگرد بالاتر از ۰٫۰۸ درصد در مرحله سینترینگ و نیز کوره بلند تأثیر گذار است که منجر به افزایش انتشار SO_2 می‌شود که خود نیز نیاز به سطح بالاتری از MgO برای انتقال گوگرد به سرباره دارد. در نمونه‌های اجت‌آباد در سنگ معدن سخت هماتیت که اصلی‌ترین نوع ماده معدنی است، غلظت گوگرد به ۰٫۲ درصد می‌رسد ولی در سایر نمونه‌ها کمتر از حد مضر است. میزان عنصر Ti در تمام نمونه‌ها کمتر از ۱ درصد است. افزایش بالاتر از یک درصد تیتانیوم در مرحله سینترینگ و پلتی شدن اثر گذاشته و باعث کاهش قدرت فیزیکی پلت‌ها و سینترها می‌شود.

در بررسی ترکیب نقطه‌ای هماتیت در معدن اجت‌آباد با مایکروپروپ الکترونی، عنصر آرسنیک از ۱۰۰ تا ۱۳۰۰ گرم بر تن آشکار شد. غلظت بالای آرسنیک در بسیاری از اکسیدهای فلزی چه به صورت بخشی از ساختار کانی و یا جذب وجود دارد که در برخی نمونه‌ها به حد درصد هم می‌رسد، به ویژه زمانی که نتیجه اکسیداسیون محصولات سولفیدی آهن باشد. آرسنیک به جای Ti_4 ,Al_3 ,Fe_3, Si_4 در ساختار بسیاری ازکانی‌ها ممکن است جایگزین شود [۱۸]. میزان غلظت آرسنیک در کانی هماتیت تا۱۶۰ گرم بر تن گزارش شده است [۱۹]. وجود آرسنیک در کنستانتره آهن باعث می‌شود تا چدن و فولاد شکننده شوند [۱۵].

۴- نتیجه گیری

معدن آهن اجت‌آباد با عیار ۵۵ درصد آهن جزء ذخایر کم عیار آهن طبقه‌بندی می‌شود. در رده‌بندی‌های ارائه شده، کانسارهای آهن با میزان آهن بالای ۶۵ درصد از رده کانسارهای آهن پر عیار، بین ۶۲-۶۴ درصد در رده کانسارهای عیار متوسط و کمتر از ۵۸ درصد با عنوان کانسارهای کم عیار آهن در نظر گرفته می‌شوند [۲۰]. ماده معدنی اصلی در معدن آهن اجت‌آباد هماتیت است. هماتیت از مهم‌ترین کانسنگ‌های آهن است و از طرفی هماتیت مانند یک سینک[۲] برای عناصر کمیاب می‌تواند باشد [۲۱]. در آنالیز مایکروپروپ الکترونی هماتیت معدن اجت‌آباد نیز در پیک مربوط به عناصر کمیاب ظاهر شد که برای تشخیص دقیق‌تر آن نیاز به دستگاه پیشرفته‌تر دارد. از آنجا که کانی‌سازی هماتیت به هر دو فرم سخت و پودری در منطقه وجود دارد، بنابراین در فرآیند خردایش و نیز پرعیارسازی ممکن است ایجاد نرمه کندکه تاثیر منفی بر فرآوری دارد. با توجه به نوع سنگ میزبان که اغلب سنگ‌های کربناته، ماسه‌سنگ و آندزیت مشهود است، باطله‌ها بیشتر کربنات‌های آهن و منیزیم، سیلیس و فلدسپار است. افزایش میزان آرسنیک تا ۱۳۰۰ گرم بر تن در هماتیت بسیار بالاست که ممکن است در طی عملیات فرآوری و متالورژی منجر به آلودگی محیط زیست شود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی میزان عناصر کمیاب و ناخالص موجود در هماتیت‌های منطقه به دقت بررسی شود.

قدردانی

این تحقیق با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است.

منابع و مراجع

[۱] عابدی، آرزو؛ شفایی، سید ضیاء الدین؛ ۱۳۹۴؛ «**نقش کانی‌شناسی در فرآوری مواد معدنی (کانی‌شناسی فرآیند)**»، بیست و سومین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دامغان.

[2] Das, Avimanyo, Singh, Ratnakav, Saho, K.K.; Goswami, N.G.; 2008; "*Importance of Mineralogy in Mineral Processing*". In: Training Course on Mineral Processing and Nonferrous Extractive Metallurgy, 2008, June30 – July5,

[۳] حاجی بهرامی، مریم؛ تقی‌پور، نادر؛ قربانی، قاسم؛ ۱۳۹۴؛ «**منشا کانسار آهن همیرد، شمال خاور سمنان: با استفاده از مطالعه میانبارهای سیال و ایزوتوپ‌های پایدار(O, C, S)**»، مجله علوم زمین، شماره ۹۷، سال بیست و پنجم، ۷۰-۶۱

[۴] شهری، مریم.؛ صادقیان، محمود.؛ میرباقری، رضا؛ فردوست، فرج الله؛ ۱۳۸۹؛ «**پتروژنز کانسارهای آهن شمال سمنان**»، چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و بیست و هشتمین گردهمایی علوم زمین، ارومیه.

[۵] غیاثوند، علیرضا ؛ قادری، مجید؛ رشید نژاد عمران، نعمت الله؛ ۱۳۸۸؛ «**کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانسارهای آهن شمال سمنان**»، مجله علوم زمین، شماره ۷۲، سال هجدهم، ۴۴-۳۳.

[۶] حاجی بابایی، امیرعلی؛ دیداری عباس آباد، حسن؛ گنجی، علیرضا؛ حق نظر، شهروز؛ ۱۳۹۲؛ «**بررسی خاستگاه تشکیل کانسار آن احمدآباد (شمال خاوری سمنان)**»، سی و دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.

[۷] لطفی، زهرا؛ حسن‌نژاد، علی اکبر؛ حسین‌نژاد، سیدمحمود؛ ۱۳۹۳؛ «**مطالعات زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی در کانی‌سازی آهن منطقه تویه درروار**»، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۲۰، سال پنجم، ۸۷-۶۲.

[۸] اسماعیلی، داریوش؛ شیبی، مریم؛ کنعانیان، علی؛ ۱۳۸۵؛ «**سنگ‌زایی و روند تکامل اسکارن آهن پنج کوه (خاور ایران)**»، مجله علوم زمین، شماره ۵۹، سال پانزدهم، ۴۹-۳۸

[۹] نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ جام.

[۱۰] گزارش فنی معدن اجت‌آباد؛ ۱۳۷۱.

[۱۱] مرادزاده، علی؛ دولتی ارده جانی، فرامرز ؛ طیبی، بیت الله؛ ۱۳۸۵؛ «**تفسیر کمی داده‌های مغناطیسی کانسار آهن اجت‌آباد سمنان**»، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی

[12] Holmes, R.J.; Lu L; 2015; "Overview *of the Global Iron Ore Industry",* Chapter 1, In: Liming, Lu; 2015; *"Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability",* WOODHEAD Publishing (imprint of Elsevier) series in Metals and surface engineering, 647p.

[13] Bethekhtin, V.I; 1957; **"***A Course of Mineralogy***"**, 457.

[14] Berlin, B; 1969; *"Application of special analyses to study pigments and paint Dyes",* Translated from Zhurnal Prikladnoi Spektroskopii, 10, 6, 899.

[۱۵] رضایی، بهرام؛ ۱۳۷۸؛ «**تکنولوژی فراوری مواد معدنی**».

[16] Clout, J.M.F.; Manue, J.R.; 2015; "*Mineralogical, Chemical, and Physical Characteristics of Iron Ore",* Chapter 2, In: Liming Lu; 2015; *"Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*", WOODHEAD Publishing (imprint of Elsevier) series in Metals and surface engineering, 647p.

[17] Clout, J.M.F.; 1998;*"The effects of ore petrology on downstream processing performance: a review*". In: Liming Lu; 2015; **"***Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability",* WOODHEAD Publishing (imprint of Elsevier) series in Metals and surface engineering, 647p.

[18] Smedley, P.L.; Kinniburgh, D. G.; 2002; *"A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters",* Applied Geochemistry, 17, 517-568

[19] Baur, W. H.; Onishi, B. M. H.; 1969; *"Arsenic",* In: Smedley, P.L.; Kinniburgh, D. G.; 2002; *"A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters*", Applied Geochemistry, 17, 517-568

[20] Biswas, A.K.; 2005; *"Principles of blast fuenace Iron Making",* In: Muwanguzi; 2012; *"Characterization of chemical composition and microstructure of natural Iron ore from Muko Deposits*", International Scholary reseach Network. ISRN Materils science, 9p

[21] Cave, M. R.; Harmon, K.; 1997; *"Determination of Trace Metal Distributions in the Iron Oxide Phases of Red Bed Sandstones by Chemometric Analysis of Whole Rock and Selective Leachate Data Analyst",* Issue 6., 122, 501-512

پی‌نوشت‌ها

1- Clout

2- Sink