دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
26 بهمن ماه 1401 - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023

مطالعات کانی شناسی و تاثیر آن بر فرآوری سنگ آهن

(مطالعه موردی معدن سنگ آهن کم عیار واقع در استان یزد)

مهدی استادرحیمی[1]
خدایار کریم نژاد[1]
سمانه سادات گجراتی[2]
امینه اسدزاده[2]

چکیده

با توجه به مصارف روز افزون آهن در صنایع مختلف به ناچار می بایست از ذخایر کم عیار آهن استفاده کرد و به دلایلی معمولا فراوری اینگونه ذخایر با چالش همراه است. ایران ذخایر متعددی از سنگ آهن های کم عیار دارد که نمونه مورد آزمایش مربوط به یکی از معادن در استان یزد بود. پس از آنکه نمونه معرف تهیه شد جهت بررسی فراوری آن ابتدا آنالیز عنصری و مطالعات کانی شناسی بر روی نمونه صورت گرفت. مطالعات نشان داد عیار آهن نمونه در حدود 24% با اکسید آهن کمتر از 2% است. همچنین کانی های آهن دار در مقاطع ثیقلی عمدتا هماتیت و مگنتیت تشخیص داده شد. بنابراین روش پیشنهادی جهت فراوری آن استفاده از روش های ثقلی و جداکننده مغناطیسی بود. نتایج آزمایش های فراوری مطلوب نبود به طوری که در حداکثر عیار و بازیابی آهن در جداکننده مغناطیسی شدت بالا 32 و 33 درصد بدست آمد. همچنین پرعیار سازی در روش های ثقلی مناسب نبود و به شکل معکوس عمل کرد، به طوری که عیار آهن در بخش باطله نسبت به محصول 6/1 برابر شد. با توجه به نتایج مطالعات کانی شناسی این بار آزمایش پراش اشعه ایکس کمی انجام شد که کانی های آهن دار هماتیت، گوتیت، آنکریت و لیمونیت و کانی های باطله آن عمدتا کلسیت و دولومیت تشخیص داده شد که می توان دلیل کارایی نامناسب آزمایش های فراوری مربوط به کانی های موجود در نمونه باشد.

واژه‌هاي كليدي: کانی های آهن دار، جداکننده ثقلی، جداکننده مغناطیسی، مطالعات میکروسکپی، پراش اشعه ایکس کمی

1- مقدمه

صنعت ذوب آهن و فولاد پيوسته خواهان مواد اوليه و به خصوص سنگ آهن با كيفيت بهتر ميباشد. از آنجايي كه اغلب سنگهاي معدني استخراج شده شرايط مورد نياز صنعت را برآورده نميكنند، لذا فرآوري سنگهاي آهن اهميت فراوان داشته و به طور پيوسته مورد بررسي و تحقيق به منظور توسعه و پيشرفت تكنولوژي مربوط به آن قرار دارد كه اثر بسياري در كاهش هزينهي ذوب و تصفيه و هزينهي مصرف

[1] شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران- تهران
[2] مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران- یزد

انرژي در كل توليد را دارد. همچنين با انجام عمليات فرآوري، ميتوان بعضي از روشهاي حرارتي را حـذف و يا شدت آلايندگي آنها را كاهش داد. مجموعهي اين اهـداف بـاعث شـده اسـت كـه امـروزه فـرآوري در صنايع معدني و متالورژي آهن از اهميت فـراواني برخـوردار بـوده و در بسـياري از مـوارد نـيز كـاربرد آن شرط اصلي براي انجامپذيري و اقتصادي بودن روش صنعتي باشد. شايان ذكر است كه دامنـهي فـرآوري و مراحل آن بستگي به سنگ معدن و پيچيدگي آن دارد. پيچيدگي سنگ ميتوانـد ناشـي از عوامـل متعـددي همچون پيچيدگي تركيب كاني شناسي، دانه بندي كانسنگ و پيچيدگي ناشي از هوازدگي باشد [1].

عیار آهن در سنگ معدن یکی از مهمترین پارامترهای ارزشیابی کاربرد سـنگ آهن و روش فـرآوری آن میباشد. مقدار عیار آهن و مصارف و روشهای مختلف تولید آهن متفاوت است. بدیهی است، بـازده تولیـد بستگی به عیار آهن دارد و هر میزان عیار آهن بیشتر باشد، ظرفیت تولیدی بالاتر بـوده و کـار اقتصـادیتـر خواهد بود.

اغلب کانی های آهن دار به دلیل دارا بودن خاصیت مغناطیسی امکان جدایش آنها میسر اسـت [5-1]. در این روش بـا ایجـاد یـک میـدان مغناطیسـی و عبـور مـاده معـدنی از این میـدان، ذرات دارای خاصـیت مغناطیسی جدا شده و کنسانتره ماده معدنی تولید می‌شـود. جـدایش مغناطیسـی بـه هـر دو روش تـر و خشک و با شدت‌های میدان مغناطیسی مختلف انجام می‌شود. برای این منظور از میـدان هـای بـا شـدت پایین تر برای مواد فرومغنـاطیس و از میـدان‌های بـا شـدت بـالا جهت پرعیاریسـازی مـواد پارامغنـاطیس استفاده می شود. روش پرعیارسازی از طریق جداکننده های مغناطیسی روشی کارامد جهت حذف کانی های باطله از کانسنگ آهن است [1].

در مطالعه ای که توسط چن[3] و همکارانش [5] در سـال 2008 انجـام شـده اسـت، باطلـه همـاتیت بـا درصد آهن 76/28 % با اندازه ذرات کمتر از 74 میکرومتر، جهت پرعیار سـازی بـا اسـتفاده از جداکننـده مغناطیسی شدت بالای پالسی[4] (PHGMS) با شدت 2/1 تسلا و دور 0 تا 300 rpm استفاده شد کـه از نتایج این آزمایش، کنسانتره با درصد آهن 35/54 % و بازیابی 89/35 %به دست آمد [5].

استفاده از جداکننده های ثقلی روش دیگری برای فـراوری کـانی آهن می باشـد. روش هـای ثقلی بـر اساس اختلاف وزن مخصوص کانی آهن دار و باطلـه ی آن پایـه گـذاری شـده انـد. بـازدهی و کـارآیی این روش ها بستگی به اختلاف وزن مخصوص باطله و ماده معدنی است. از آنجایی کـه این اختلاف در مـورد کانی های آهن دار و باطله قابل توجه است لذا بیشـتر روش هـای فـیزیکی پرعیـار کـردن را می تـوان در مورد سنگ های معدنی آهن به کار برد [11-7].

ترکیب روش های ثقلی و مغناطیسی نیز روشی متـداول جهت پرعیارسـازی سـنگ آهن هـای کم عیـار است [13-12، 10]. به عنوان مثال در تحقیقی که ژاو[5] و همکاران [12] بر روی نمونه سنگ آهن با عیار آهن 64/18% و اکسید آهن 48/7% انجام دادند موفـق شـدند بـا اسـتفاده از جداکننـده هـای مغناطیسـی و ثقلی محصولی باعیار آهن 79/60 % و بازیابی 23/60 % به دست آورند [12].

در مواردی از روش تشویه جهت افزایش خاصیت مغناطیسی کانی های همـاتیتی اسـتفاده می شـود [17-14]. به عنوان مثال چون[6] و همکارانش [14]، به منظور پرعیارسازی سنگ معدن هماتیت با درصـد آهن 94/48% و سیدریت با درصد آهن 92/35%، از روش تشویه به همـراه جداکننـده مغناطیسـی اسـتفاده کرده اند. آن ها مخلوط سیدریت و هماتیت با نسبت جرمی متفاوت را در دمای 850 درجه سـانتی گـراد تحت حرارت قرار دادند؛ سیدریت در کوره با تولید CO و هماتیت با مصرف CO به مگنتیت تبدیل شد. سپس با استفاده از جداکننـده مغناطیسـی بـا شـدت 08/0 تسـلا محصـولی بـا عیـار آهن 6/61 % و بازیـابی 1/91% بدست آوردند [14].

یکی دیگر از روش های که برای بازیابی سنگ آهن های ریز مغناطیسی استفاده می شـود اسـتفاده از فرآیند جداسازی مغناطیسی لخته سازی است. در این روش با استفاده از مـواد لختـه سـاز، لختـه سـازی

[3] . Chen
[4] . Pulsating high-gradient magnetic separation
[5] . Zhao
[6] . Chun

ذرات ریز سنگ آهن صورت گرفته و سپس به کمک جداکننده مغناطیسی بازیابی سنگ آهن انجام می شود [18-19].

2- شناسایی نمونه

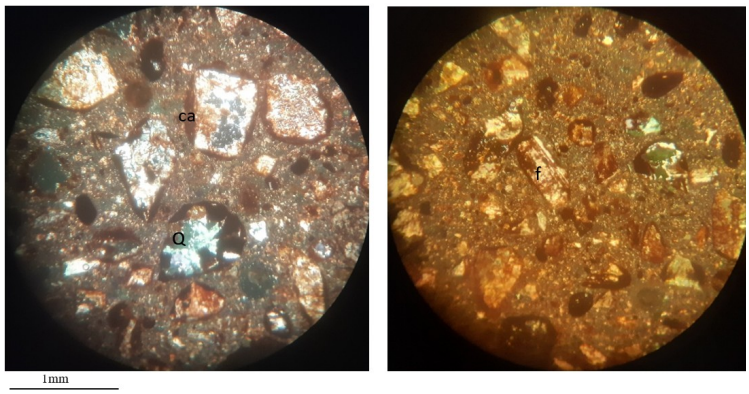
نمونه مربوط به یکی از معادن استان یزد بود که پس از تهیه نمونه معرف از آن، آنالیز شیمیایی انجام شد. نتایج نشان داد عیار متوسط آهن در نمونه در حدود 24% و حاوی منگنز است (جدول 1).

جدول 1- نتایج آنالیز عنصری نمونه

عنصر	آهن (Fe)	اکسید آهن (FeO)	منگنز (Mn)	منیزیم (Mg)	کلسیم (Ca)	**سیلیس (SiO_2)**
عیار (%)	94/23	59/1	30/3	51/3	40/17	07/4

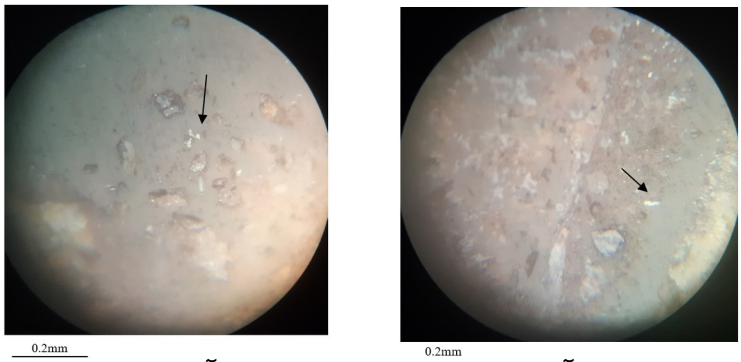
جهت شناسایی کانی های موجود در نمونه، از آن مقطع نازک و صیقلی تهیه و مطالعات میکروسکپی انجام شد.

الف) مقطع نازک: مقطع تهیه شده نشان داد کانی هایی به صورت تیره در نمونه وجود دارد که به رنگ سیاه و حاوی آهن است. همچنین از بررسی دانه های تیره و اپک می توان گفت درجه آزادی در حد 55 درصد است. به عبارتی نیمی از کانه‌های فلزی درگیر با کانی‌های گانگ می باشند. کانی های باطله عمدتا کانیهای کلسیت و سپس کوارتز و بندرت فلدسپات در مقطع بود و به نظر می آید کانی فلدسپات به کلسیت و گاها به رس و سریسیت تبدیل شده است و کانه های فلزی با کانی کلسیت بیشتر از سایر کانی های باطله درگیر می باشند (شکل 1).



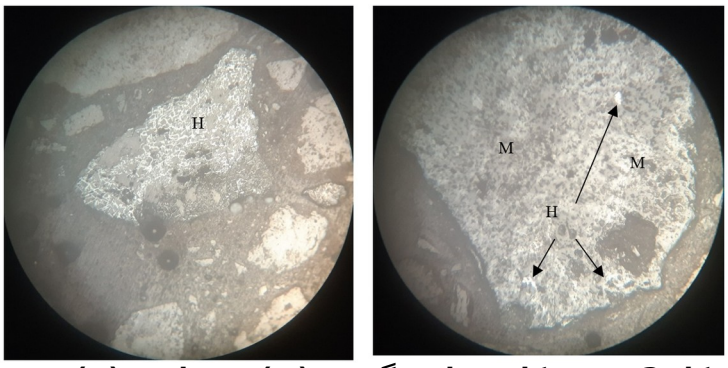
شکل 1- کانه های تیره همراه با کوارتز (Q)، کلسیت (ca) و فلدسپات (f).

ب) مقطع صیقلی: جهت تشخیص کانه های آهن دار از نمونه مقطع صیقلی تهیه شد. ابعاد دانه ها یا خرده سنگ ها از 5 میلی متر تا بسیار دانه ریز در زمینه مقطع مشاهده شد و اغلب کانه های فلزی درگیر با کانیهای گانگ بودند ولی در بزرگنمایی بالا کانه های بسیار دانه ریز فلزی (در حد چند میکرون) در زمینه مقطع و بصورت آزاد شده و فراوان دیده شد (شکل 2).



شکل 2- کانه های آهن بسیار دانه ریز بصورت آزاد در اطراف دانه ها

کانه مگنیتیت و هماتیت مطابق شکل (3) در نمونه مشاهده شد. مگنتیت با شدت بازتابش کمتر از هماتیت و بصورت انبوهه بی وجه دیده شد. به طوری که مگنتیت دارای تیغه های عدم آمیزشی هماتیت بود و هماتیت با انبوهه های سوزنی و با شدت بازتابش متوسط مشاهده گردید.



شکل 3- وجود کانی های مگنتیت (M) و هماتیت (H) در نمونه

3- آزمایش های فراوری

در مطالعات میکروسکپی کانی های آهن دار را عمدتا هماتیت و مگنتیت تشخیص داده شد. به همین منظور جهت بررسی روش های ثقلی و مغناطیسی به ترتیب از مارپیچ[7] و اسلون[8] استفاده شد.

3-1- روش ثقلی

در روش های فرآوری مواد معدنی یکی از ساده ترین و در عین حال پربازده ترین روش ها در بین روش های جدایش ثقلی، روش اسپیرال و استفاده از شوت های مارپیچ است. مبنای جدایش در این روش، حرکت مواد تحت تاثیر جریان لایه نازک آب می باشد که بر اساس آن ذرات سنگین از سبک با توجه به اختلاف وزن مخصوص کانی ها جدا می شود.

جهت بررسی تاثیر دانه بندی، آزمایش ها با استفاده از دو نوع دانه بندی صورت گرفت که بر اساس 100% عبور کرده آن از سرند (d_{100}) برابر 300 میکرو متر بود. برای این منظور در حدود 10 کیلوگرم

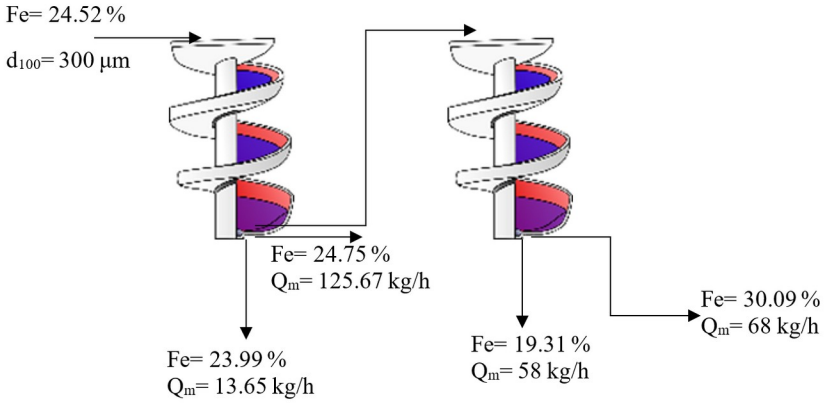
[7]. Spiral
[8] . Slon magnetic separator

نمونه به عنوان خوراک اولیه وارد مارپیچ شد، سپس باطله وارد اسپیرال دوم گردید و پس از آنکه شرایط آزمایش تثبیت شد نمونه برداری صورت گرفت (شکل 4).

الف) اسپیرال اول ب) اسپیرال دوم

شکل 4- تصاویر مربوط به آزمایش با اسپیرال

نتایج به دست آمده در شکل (5) آمده است و نشان می دهد پرعیارسازی مناسبی صورت نگرفته و برای هر دو نمونه با دانه بندی مختلف علاوه بر اینکه اختلاف عیار محصول و باطله ناچیز بود، اسپیرال به صورت معکوس عمل کرده به طوری که عیار بخش باطله بیشتر از محصول شده است.



شکل 5- نتایج پرعیارسازی نمونه با اسپیرال

اگر چه مهمترین دلیل این نتیجه به نوع ماده معدنی مرتبط می شود ولی به طور کلی روشهاي ثقلي نسبت به نرمه بسیار حساس می باشند. زیرا باعث افزایش وپسکوزیته محیط و در نتیجه کاهش دقت جدایش مي شوند [20]. به همین دلیل در اکثر موارد قبل از جدایش ثقلی نرمه را از مواد معدنی جدا می کنند.

3-2- جداکننده مغناطیسی شدت بالا

کانی های حاوی آهن در نمونه مطابق مطالعات کانی شناسی از خاصیت مغناطیسی بالای برخوردار نبودند؛ لذا نیاز بود از جداکننده مغناطیسی شدت بالا جهت بررسی بازیابی آهن استفاده شود. برای این

منظور از جداکننده مغناطیسی اسلون استفاده شد. با استفاده از این دستگاه می توان کانی های دارای خاصیت مغناطیسی ضعیف و متوسط را پرعیارسازی کرد و علاوه بر این برای جداسازی مواد دانه ریز مناسب می باشد [2]. به همین منظور ذرات ریزتر از 50 میکرون با استفاده از الک 325 مش مربوط به نمونه جدا شد و با استفاده از جداکننده مغناطیسی اسلون میزان پر عیارسازی آن بررسی گردید (شکل 6).

شکل 6- تصویر مربوط به آزمایش با جداکننده مغناطیسی اسلون

نتایج به دست آمده نشان داد مقدار افزایش عیار نسبت به نمونه خوراک کمتر از 9% و بازیابی وزنی 30% است. بنابراین پرعیارسازی قابل قبولی انجام نشده است. در جدول (2) نتایج و شرایط انجام آزمایش بیان شده است.

جدول 2- نتایج پرعیارسازی نمونه با جداکننده مغناطیسی اسلون

ردیف	محصول	وزن مواد (%)	عیار آهن (%)	بازیابی آهن (%)	شرایط انجام آزمایش
1	کنسانتره	30	38/32	58/32	شدت میدان: G 1000
2	باطله	70	72/28	42/67	پالس: 200 rpm
مجموع		100	82/29	100	درصد جامد: %20

3-3- مقایسه نتایج

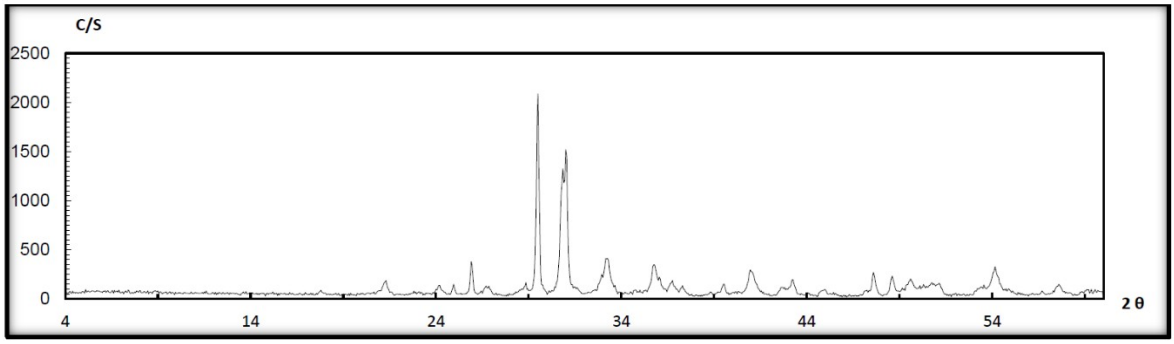
در شکل (7) نتایج پرعیارسازی با استفاده از مارپیچ و جداکننده مغناطیسی اسلون با یکدیگر مقایسه شده است؛ مشاهده می شود در روش های پرعیارسازی میزان افزایش عیار آهن حداکثر 32% بود. همچنین در بین روش های بررسی شده، اسپیرال در دو مرحله بازیابی آهن بیشتری نسبت به روش دیگر داشت که برابر با 63% بود.

شکل 7- مقایسه روش های پرعیارسازی انجام شده بر روی نمونه

یاداوری می شود در تمام روش های ثقلی بررسی شده، فرایند به صورت معکوس عمل کرده است یعنی عیار کنسانتره نسبت به باطله کمتر بوده است و می توان گفت روش های معمول جهت پرعیارسازی سنگ آهن نمونه مناسب نیست.

4- آزمایش پراش اشعه ایکس کمی[9]

با توجه به نتایج بدست آمده به نظر کانی های میزبان آهن در نمونه با آنچه در مقاطع نازک و صیقلی تشخیص داده شده بود متفاوت بود. به همین منظور نمونه به یکی از آزمایشگاه های معتبر جهت انجام آزمایش طیف سنجی پرتو ایکس کمی ارسال شد (شکل 8). مطابق نتایج بدست آمده در جدول (3) کانی های آهن دار نمونه هماتیت، گوتیت، آنکریت و لیمونیت می باشد که مقدار این کانی ها در نمونه به ترتیب 16، 14، 15 و 3% می باشد. همچنین منگنز در کانی پیرولوسیت قرار گرفته است که 5% نمونه را شامل می شود.



شکل 8- مطالعات پراش اشعه ایکس (XRD) بر روی نمونه

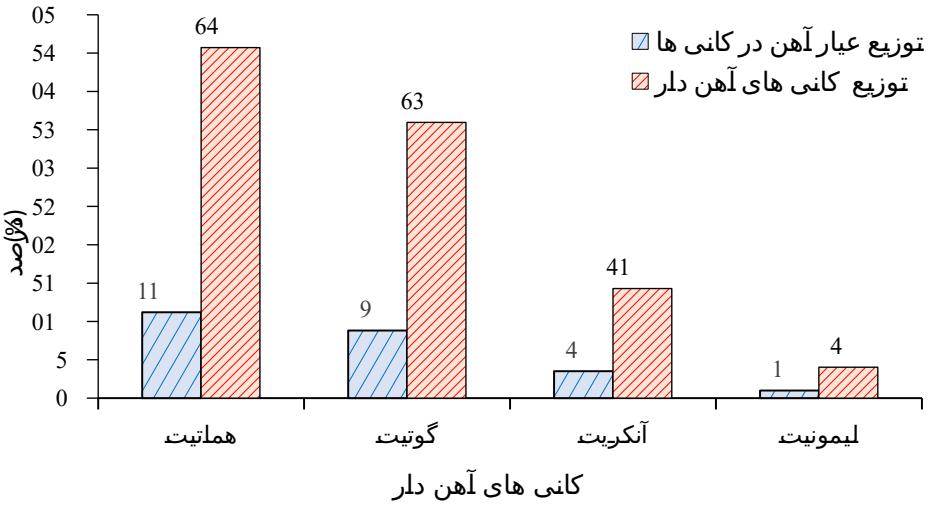
جدول 3- مقدار و مشخصات کانی ها در نمونه بر اساس آزمایش طیف سنجی پرتو ایکس کمی

ردیف	کانی	مقدار در	مشخصات کانی شناسی [21]

[9] . Quantitative X-ray diffraction

ف		نمونه (%)	فرمول شیمیایی	وزن مخصوص (g/cm^3)	سختی موس	خاصیت مغناطیسی
1	کلسیت	21	$CaCO_3$	7/2	3	ندارد
2	دولومیت	13	$CaMg(CO_3)_2$	85/2	5/3 -4	ندارد
3	باریت	5	$BaSO_4$	48/4	3 -5/3	ندارد
4	کوارتز	4	SiO_2	65/2	7	ندارد
5	کانی های رسی	1				ندارد
6	آنکریت	15	$Ca\ (Fe,Mg)(CO_3)_2$	3	5/3 -4	پارامغناطیس
7	گوتیت	14	$FeO(OH)$	8/3	5 -5/5	پارامغناطیس
8	هماتیت	16	Fe_2O_3	3/5	-5/6 5/5	پارامغناطیس
9	لیمونیت	3	$?Fe_2O_3(H_2O)_n$	3/4- 7/2	4 -5/5	پارامغناطیس
10	پیرولوسیت	5	MnO_2	5- 4/4	6 -5/6	پارامغناطیس

در شکل (9) با توجه به مقدار کانی های آهن دار در نمونه میزان توزیع عیار و کانی های آهن دار مشخص شده است. مطابق نتایج در حدود 46% آهن نمونه متعلق به کانی هماتیت است که در حدود 11% عیار آهن نمونه را شامل می شود.



شکل 9- درصد آهن متعلق به کانی های آهن دار در نمونه

5- نتیجه گیری

کانی های آهن دار نمونه در ابتدا هماتیت و مگنتیت تشخیص داده شده بود که بر این مبنا روش های فراوری شامل روش های ثقلی و مغناطیسی برنامه ریزی شد. مطابق نتایج آزمایش های فراوری امکان پرعیارسازی مطلوب به روش های ثقلی میسر نشد و مشاهده شد که اسپیرال به صورت معکوس عمل کرده و عیار بخش شسته شده به مراتب بیشتر از عیار بخش باقی مانده شده است. به طوری که عیار آهن بخش باقی مانده (که در اصطلاح کنسانتره نامیده می شود) 19% و عیار آهن بخش شسته شده

(که در اصطلاح باطله اسپیرال نامیده می شود) 30% شد. نتایج آزمایش های مغناطیسی نیز مطلوب نبود و بازیابی عیاری در حدود 33% شد.

با توجه به نتایج آزمایش های فراوری احتمال می رفت که کانی های آهن دار در مطالعات میکروسکپی به طور کامل تشخیص داده نشده باشد به همین منظور کانی شناسی به روش پراش اشعه ایکس کمی انجام شد. نتایج نشان داد هماتیت، گوتیت، آنکریت و لیمونیت کانی های آهن دار نمونه می باشند که علت عدم نتایج مناسب در آزمایش های فراوری مربوط به مشخصات کانی شناسی آنها می باشد. بنابراین به نظر می رسد روش های معمول فراوری برای پرعیارسازی نمونه مناسب نیست و با توجه به نوع کانی های آهن دار و عیار آهن نمونه استفاده از روش های تشویه جهت تبدیل هماتیت به مگنتیت در ابتدای کار به نظر صرف اقتصادی ندارد؛ شاید استفاده از ترکیب روش مغناطیسی و ثقلی برای ذرات سنگین تر با نرمه زدایی از نمونه مناسب باشد. البته بایستی توجه کرد که بخشی از آهن نمونه به دلیل قرارگیری در کانی های سبک از بین خواهد رفت. همچنین حضور کانی گوتیت در نمونه، معمولا روش های ثقلی را با چالش همراه می کند.

با توجه به اینکه در کوره بلند همراه با سنگ آهن پرعیار شده از کانی دولومیت و کلسیت به همراه منگنز استفاده می شود، پیشنهاد می شود نمونه فوق به دلیل کانی های باطله همراه (عمدتا کلسیت و دولومیت)، عیار آهن و حضور کانی پیرولوسیت (MnO_2) و نیز نتایج فراوری آن، بدون فراوری از آن به عنوان خوراک کارخانه های کوره بلند استفاده شود؛ البته برای این منظور نیاز به تحقیق و مطالعه بیشتر است.

6- تشکر و قدردانی

نویسندگان برخود لازم می دانند از پرسنل آزمایشگاه مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران صمیمانه تشکر نمایند.

7- منابع

1. Wills, B. A., 2011, Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Elsevier
2. Xiong, D., S. Liu, and J. Chen, New technology of pulsating high gradient magnetic separation. International journal of mineral processing, 1998. 54(2), 111-127.
3. Dahe, Xiong; 2010,"A New Technology OF Applying SLon-2500 Magnetic Separator to Recovery Iron Concentrate from Abandoned Tails", IMPC2010, 1405-1412
4. Dahe, Xiong, 2008, "Slon Magnetic Separators Applied to Beneficiate Low Grade Oxidized Iron Ores", China, IMPC2008, 813-818
5. Chen, L., D. Xiong, and H. Huang, Pulsating high-gradient magnetic separation of fine hematite from tailings. Mining, Metallurgy & Exploration, 2009. 26(3), 163-168.
6. Tripathy, S.K., Veerendra Singh, V., Murthy, Y, R., Banerjee, P, K., Sureshet, N., Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite. International Journal of Mineral Processing, 2017. 160, 16-31.
7. Bazin, C., Sadeghi, M., Bourassa, M., Roy, P., Lavoie, P., Cataford, D., Rochefort, Ch., Gosselin, C., 2014, Size recovery curves of minerals in industrial spirals for processing iron oxide ores, Minerals Engineering, 65, 115-123
8. Mansar, R. J., Barley, R.W., Wills, B. A., 1991, The shaking Table concentrator- The influence of operating conditions and table parameters on mineral separation - The development of a mathematical model for normal operating conditions", Mineral Engineering, 4, 369-381.
9. Das, B., Prakash, S., Das, S. K., Reddy, P. S. R., 2007, Effective Beneficiation of Low-Grade Iron Ore Through Jigging Operation, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 7, 1, 27-37

10. Srivastava, R. and R. Prasad, Studies on characterization and beneficiation of banded hematite Jasper of Joda Area, Eastern India. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020. 73(1), 215-221.
11. Roy, S., 2009, Recovery Improvement of Fine Iron Ore Particles by Multi Gravity Separation, The Open Mineral Processing Journal, 2, 17-30
12. Liu, S., et al., Beneficiation of a low-grade, hematite-magnetite ore in China. Mining, Metallurgy & Exploration, 2014. 31(2), 136-142.
13. Roy, S., Das, A., 2013, Recovery of Valuables from Low-Grade Iron Ore Slime and Reduction of Waste Volume by Physical Processing, Particulate Science and Technology: An International Journal, 31, 256–263
14. Chun, T., D. Zhu, and J. Pan, Simultaneously roasting and magnetic separation to treat low grade siderite and hematite ores. Mineral processing and extractive metallurgy review, 2015. 36(4), 223-226.
15. Yu, J., et al., Beneficiation of an iron ore fines by magnetization roasting and magnetic separation. International journal of mineral processing, 2017. 168, 102-108.
16. Li, Ch., Sun, H., Bai, J., Li, L., 2010, Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting, Journal of Hazardous Materials 174, 71–77
17. Zhang, H., et al., Application of multi-stage dynamic magnetizing roasting technology on the utilization of cryptocrystalline oolitic hematite: A review. International Journal of Mining Science and Technology, 2022.
18. Song, S., S. Lu, and A. Lopez-Valdivieso, Magnetic separation of hematite and limonite fines as hydrophobic flocs from iron ores. Minerals engineering, 2002. 15(6), 415-422.
19. Da Corte, C., Bergmann, C., Woollacott, L., 2019. Improving the separation efficiency of Southern African haematite from slimes through selective flocculation coupled with magnetic separation. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 119(11), 963-972.
20. Gupta, A., Yan, D. S., 2006, Mineral Processing Design and Operation, Chapter 15 - Gravity Separation, Elsevier, 494-554
21. Hurlbut, C, S., 1944, Manual of mineralogy, Chapman & Hall, 7