

بررسی امکان کاهش گوگرد کانسنگ آهن معدن سورک

فاطمه شجاع^۱، محمود عبدالهی^{۲*}، امیر اسکانلو^۳

- ۱- کارشناسی ارشد، فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد، فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشجوی دکترا، فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۱۶، پذیرش ۱۳۹۷/۰۲/۰۵)

چکیده

در مطالعه حاضر، نمونه کانسنگ منیتیتی معدن سورک با هدف کاهش عیار گوگرد به کمتر از ۰/۱ درصد مورد فرآوری قرار گرفت. با توجه به شناسایی و خواص سنجی نمونه، عیار آهن ۵۰/۳۷ و عیار گوگرد ۴/۱۲ درصد به دست آمد. طبقه‌بندی ابعادی نمونه در کنار آزمایش‌های اولیه جدایش مغناطیسی تر در جهت تعیین درجه آزادی نشان داد که در $d_{80}=106 \mu\text{m}$ منیتیت، آزادشدگی مناسب دارد. آزمایش‌های جدایش مغناطیسی در $d_{80}=106 \mu\text{m}$ با شدت میدان مغناطیسی ۸۰۰ گوس، زمان خوراک‌دهی ۳ دقیقه و دبی آب خوراک ۴ لیتر در دقیقه، سرعت چرخش استوانه ۵۴ دور در دقیقه و با خوراک‌دهی در جهت موافق چرخش استوانه، انجام شد و کنسانتره‌ای با عیار ۶۳ درصد آهن و ۰/۵۲ درصد گوگرد با بازیابی آهن ۹۶ درصد به دست آمد. در ادامه و برای کاهش بیشتر گوگرد، کنسانتره حاصل از جدایش مغناطیسی تحت فلوتاسیون معکوس پیریت قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون، آزمایش‌های تعیین زمان بهینه فلوتاسیون انجام شد و در نهایت در شرایط زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه در $\text{pH}=9$ با مصرف 100 g/ton کلکتور آمیل گزنات پتاسیم، کاهش عیار گوگرد تا کمتر از ۰/۱ درصد حاصل شد. میزان بازیابی وزنی کنسانتره آهن و میزان بازیابی کلی آهن به ترتیب برابر با ۹۵/۹۶ و ۹۴/۹ درصد به دست آمد.

کلمات کلیدی

جدایش مغناطیسی تر، سنگ آهن سورک، حذف گوگرد، فلوتاسیون پیریت.

۱- مقدمه

ذخایر سنگ آهن سورک واقع در استان یزد با تولید سالیانه بیش از یک میلیون و پانصد هزار تن سنگ آهن، یکی از بزرگترین معادن خصوصی و در عین حال تولیدکننده سنگ آهن مرکز ایران محسوب می‌شود. عیار گوگرد این معدن بالا (حدود ۵ درصد) است، در حالی که حد مجاز گوگرد برای تولید فولاد ۰/۱ درصد است [۱]. گوگرد به صورت پیریت و به شکل قطعات جدا، همراه و ادخال در منیتیت وجود دارد. پیریت جزو کانی‌های پارامنیته است و هنگامی که در مجاورت کانی فرومنیتیتی مانند منیتیت قرار می‌گیرد به شدت دارای خاصیت مغناطیسی می‌شود؛ بنابراین بعید به نظر می‌رسد که با میکرونیزه کردن سنگ آهن و جدایش مغناطیسی بتوان میزان گوگرد را به حد استاندارد رساند [۲]. سنگ آهن ارسالی به صنایع ذوب و فولاد باید شرایط ویژه‌ای از نظر درصد آهن و عناصر و ترکیب‌های مزاحم مانند فسفر و گوگرد، اکسید پتاسیم و نظایر باشد. میزان فسفر و گوگرد برای مصرف در فرآیند احیای مستقیم به ترتیب نباید بیشتر از ۰/۵ و ۰/۱ درصد باشد، در فرآیند کوره بلند نیز این میزان نباید از ۰/۳ و ۱ درصد تجاوز کند. گوگرد باعث شکنندگی و تردی فولاد در دمای بالا می‌شود و سوختن آن در گندله‌سازی باعث آلودگی هوا و در احیای مستقیم خوردگی فولاد را نیز به دنبال دارد [۳]. در زمینه گوگردزدایی از کانسنگ آهن تاکنون مطالعات متعددی توسط محققان مختلف انجام شده است. لطفی و همکاران (۱۳۹۰) کاهش عیار گوگرد کانسنگ آهن منیتیتی پر پیریت با عیار گوگرد ۴/۵ درصد سنگان را با روش فلوتاسیون بررسی کردند. آن‌ها موثرترین پارامترها در فلوتاسیون را مدت زمان آماده‌سازی کلکتور، pH و ابعاد ذرات شناسایی کردند و در شرایط عملیاتی شامل ابعاد ۲۰۰ میکرون $pH=3.79$ و زمان آماده‌سازی کلکتور (آمیل گزنتات پتاسیم) ۱۲ دقیقه، عیار گوگرد در کنسانتره ۰/۳۷ درصد و بازیابی وزنی کنسانتره حدود ۹۴ درصد را نتیجه گرفتند که در ادامه در ابعاد ۹۰ میکرون، زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه و $pH=5$ مقدار گوگرد برابر با ۰/۲۱ درصد به دست آمد [۴]. سام و همکاران (۱۳۹۱) برای تولید کنسانتره برای تهیه خوراک کارخانه گندله‌سازی سنگ آهن از باطله‌های کم‌عیار و بسیار پرگوگرد کارخانه فرآوری منیتیت گل‌گهر از روش فلوتاسیون استفاده کردند که نتایج نشان داد $d_{80}=80 \mu m$ اندازه بهینه ذرات برای کسب حداکثر عیار آهن و حداقل گوگرد در

کنسانتره است [۵]. شهریاری و همکاران (۱۳۹۱)، با تحقیقی بر روی پارامترهای موثر بر فرآیند فلوتاسیون با استفاده از روش تاگوچی، نشان دادند که با مصرف ۱۷۵ گرم بر تن آمیل گزنتات پتاسیم به عنوان کلکتور و ۱۱۰ گرم بر تن MIBC به عنوان کف‌ساز، در pH اسیدی ۲/۵، عیار گوگرد کنسانتره به میزان ۷۲ درصد کاهش می‌یابد [۶]. دینگ^۱ و همکاران (۲۰۱۳) دو روش جدایش مغناطیسی و جدایش مغناطیسی-فلوتاسیون را برای بازیابی آهن و کاهش گوگرد کنسانتره آهن با یکدیگر مقایسه کردند و دریافتند که روش جدایش مغناطیسی-فلوتاسیون بیشترین تاثیر را بر افزایش عیار آهن کنسانتره نهایی و کاهش گوگرد دارد [۷]. سلطان‌محمدی و همکاران (۲۰۰۹) امکان‌سنجی کاهش پیریت و آپاتیت به عنوان مهم‌ترین منبع گوگرد و فسفر کنسانتره آهن مجتمع گل‌گهر را با استفاده از فلوتاسیون مطالعه کردند. تحت شرایط بهینه، با نرمه‌زدایی کنسانتره با عیار آهن ۷۲/۲۴ درصد، عیار گوگرد ۰/۴۱ و عیار فسفر ۰/۴۳ درصد به دست آمد. بازیابی آهن ۹۵/۱۱ درصد و حذف گوگرد ۹۲/۲۴ درصد بود [۸]. مرمیلود-بلوندین^۲ و همکاران (۲۰۰۵) از فلوتاسیون پیریت با استفاده از گزنتات تحت شرایط قلیایی برای گوگردزدایی محیطی از باطله‌های معدنی حاوی پیریت استفاده کردند. آن‌ها تاثیر هوادهی و غلظت گزنتات را بر فلوتاسیون پیریت در $pH=11$ با استفاده از آهک به عنوان قلیا بررسی کردند. نتایج نشان داد که گوگردزدایی محیطی می‌تواند با کنترل هوادهی و اکسیداسیون پیریت و کاهش pH برای رسیدن به شرایط بهینه فلوتاسیون در غلظت نسبتاً پایین گزنتات اتفاق افتد [۹]. پناهی و همکاران (۲۰۱۲) تاثیر نوع کلکتور، pH پالپ، غلظت کلکتور، زمان فلوتاسیون و میزان خردایش را بر گوگردزدایی کانسنگ هماتیت بررسی و شرایط بهینه را تعیین کردند. نتایج نشان داد که در شرایط بهینه بازیابی آهن غیر پیریتهی ۹۳/۲۳ درصد، عیار گوگرد ۰/۱۷۷ درصد و بازیابی گوگرد ۹۵/۵ درصد به دست می‌آید [۱۰].

به طور کلی، برای کاهش گوگرد کانسنگ آهن دو راه‌حل وجود دارد: اول کاهش گوگرد موجود در پیریت به روش تشویه و تبدیل آن به گاز SO_2 که از معایب این روش می‌توان به مصرف بالای انرژی و آلودگی‌های ناشی از پراکندگی گاز SO_2 در صورت عدم کنترل آن نام برد. روش دوم حذف گوگرد کنسانتره مغناطیسی به روش فلوتاسیون است که موضوع انجام این مطالعه است [۴].

هدف از انجام این مطالعه کاهش عیار گوگرد کانسنگ آهن معدن سورک به کمتر از حد مجاز صنایع فولادسازی (۰٫۱ درصد) به روش فلوتاسیون با تاکید بر بهینه‌سازی فرآیند از دیدگاه زمان و هزینه عملیاتی است به طوری که بتوان با صرف کمترین هزینه و زمان ممکن به نتایج مطلوب دست یافت. با توجه به مطالعات خواص سنجی و شناسایی نمونه، گوگرد موجود در این کانسنگ عمدتاً به صورت کانی پیریت است. به دلیل قابلیت بالای کانی‌های سولفیدی در شناور شدن، برای جدایش، سعی در بازداشت آن‌ها می‌شود اما در این مطالعه از این خاصیت برای حذف آن از نمونه سنگ آهن منیتیتی استفاده شده است. در این مطالعه، آزمایش‌های خردایش، مطالعات کانی‌شناسی، تعیین درجه آزادی، آزمایش‌های مغناطیسی برای تهیه کنسانتره آهن و در نهایت آزمایش‌های فلوتاسیون و بهینه‌سازی شرایط فلوتاسیون انجام و تلاش شد تا با مصرف حداقل مواد شیمیایی، نتایج قابل قبولی به دست آید.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- تجهیزات

تجهیزات مورد استفاده شامل آسیای گلوله‌ای، جداکننده مغناطیسی تر شدت بالا مدل SEPOR (باقابلیت تنظیم در شدت میدان پایین)، جداکننده مغناطیسی تر مدل ERIEZ، سلول فلوتاسیون مکانیکی مدل دنور، ترازو، ریفل، سرنده آزمایشگاهی، pH متر، فیلترهای فشاری و آون (خشک‌کن) است.

۲-۲- مواد

در این تحقیق از نمونه سنگ آهن منیتیتی پرگوگرد معدن سورک با دانه‌بندی $d_{80}=10\text{ mm}$ استفاده شد. برای شناسایی ترکیب شیمیایی نمونه، آنالیز XRF بر روی نمونه انجام شد. از آنالیز XRD برای تشخیص فازهای موجود در نمونه اولیه استفاده شد. مواد شیمیایی مورد استفاده عبارتند از اسید سولفوریک و سدیم هیدروکسید به عنوان تنظیم‌کننده pH، آمیل گزنات پتاسیم و دی‌گزنوتوزن به عنوان کلکتور و کف‌ساز MIBC.

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون، ۳۸۸ گرم کنسانتره حاصل از جدایش مغناطیسی با دانه‌بندی $d_{80}=106\text{ }\mu\text{m}$ میکرون به عنوان خوراک فلوتاسیون در نظر گرفته شد. درصد جامد ۲۱٫۵ در نظر گرفته شد. دور همزنی برای سلول فلوتاسیون برابر با ۱۰۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شد. تنظیم

هدف از انجام این مطالعه کاهش عیار گوگرد کانسنگ آهن معدن سورک به کمتر از حد مجاز صنایع فولادسازی (۰٫۱ درصد) به روش فلوتاسیون با تاکید بر بهینه‌سازی فرآیند از دیدگاه زمان و هزینه عملیاتی است به طوری که بتوان با صرف کمترین هزینه و زمان ممکن به نتایج مطلوب دست یافت. با توجه به مطالعات خواص سنجی و شناسایی نمونه، گوگرد موجود در این کانسنگ عمدتاً به صورت کانی پیریت است. به دلیل قابلیت بالای کانی‌های سولفیدی در شناور شدن، برای جدایش، سعی در بازداشت آن‌ها می‌شود اما در این مطالعه از این خاصیت برای حذف آن از نمونه سنگ آهن منیتیتی استفاده شده است. در این مطالعه، آزمایش‌های خردایش، مطالعات کانی‌شناسی، تعیین درجه آزادی، آزمایش‌های مغناطیسی برای تهیه کنسانتره آهن و در نهایت آزمایش‌های فلوتاسیون و بهینه‌سازی شرایط فلوتاسیون انجام و تلاش شد تا با مصرف حداقل مواد شیمیایی، نتایج قابل قبولی به دست آید.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- تجهیزات

تجهیزات مورد استفاده شامل آسیای گلوله‌ای، جداکننده مغناطیسی تر شدت بالا مدل SEPOR (باقابلیت تنظیم در شدت میدان پایین)، جداکننده مغناطیسی تر مدل ERIEZ، سلول فلوتاسیون مکانیکی مدل دنور، ترازو، ریفل، سرنده آزمایشگاهی، pH متر، فیلترهای فشاری و آون (خشک‌کن) است.

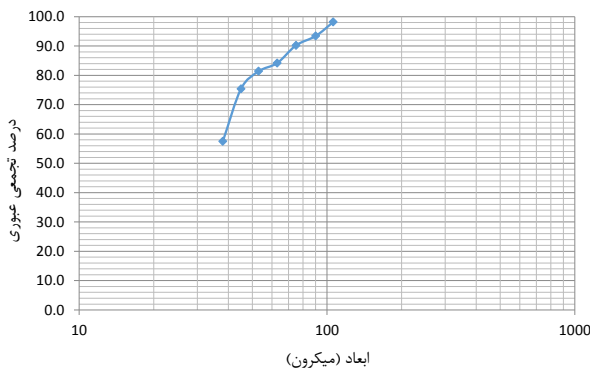
۲-۲- مواد

در این تحقیق از نمونه سنگ آهن منیتیتی پرگوگرد معدن سورک با دانه‌بندی $d_{80}=10\text{ mm}$ استفاده شد. برای شناسایی ترکیب شیمیایی نمونه، آنالیز XRF بر روی نمونه انجام شد. از آنالیز XRD برای تشخیص فازهای موجود در نمونه اولیه استفاده شد. مواد شیمیایی مورد استفاده عبارتند از اسید سولفوریک و سدیم هیدروکسید به عنوان تنظیم‌کننده pH، آمیل گزنات پتاسیم و دی‌گزنوتوزن به عنوان کلکتور و کف‌ساز MIBC.

۳-۲- شرح آزمایش

نمونه ۳۰ کیلوگرمی تهیه شده از معدن با ابعاد $d_{80}=10\text{ mm}$ به‌وسیله تقسیم کن به دو قسمت ۱۵ کیلوگرمی تقسیم

به شکل ۲، d_{80} نمونه ۵۰ میکرون است.



شکل ۲: نمودار توزیع دانه‌بندی خوراک آسیا شده

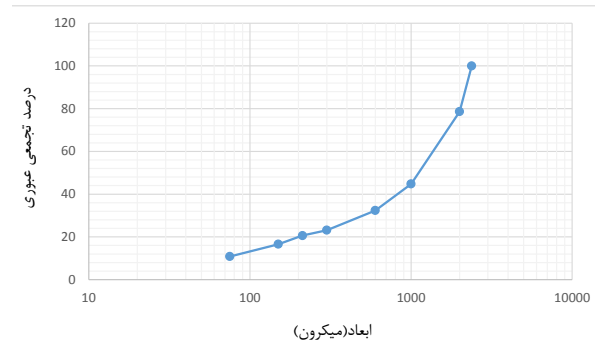
پس از تقسیم‌بندی و خردایش نمونه تا ابعاد $d_{80}=50 \mu\text{m}$ ، ۱۰ گرم نمونه معرف از آن تهیه و به وسیله پودر کن، پودر شد و تحت آنالیز XRF برای تعیین ترکیب شیمیایی و تشخیص عنصری قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، نتایج آنالیز XRD که برای تعیین فازهای کانی‌شناختی نمونه انجام گرفت، در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس مطالعه انجام شده توسط پناهی و همکاران [۵] مبنی بر درجه آزادی آهن در ابعاد حدود ۸۰ میکرون، برای اعتمادسازی آزمایش‌های مغناطیسی در سه دانه‌بندی ۳۸-، ۶۳+۳۸- و ۱۰۶+۶۳- میکرون و در هر دانه‌بندی ۱۰ گرم نمونه معرف به عنوان خوراک، به وسیله جداکننده مغناطیسی تر آزمایشگاهی با شدت میدان ۸۰۰ گوس برای جدایش کانی‌های آهن انجام شد. کنسانتره و باطله تر حاصل در آن قرار داده شد تا پس از خشک شدن توزین شوند. نتایج عیار و توزیع آهن حاصل از جدایش مغناطیسی تر در محدوده‌های ابعادی مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۲، ملاحظه می‌شود که عیار کنسانتره با کاهش ابعاد افزایش یافته است. از طرفی دیگر، مشاهده می‌شود که دانه‌بندی ۱۰۶+۶۳- میکرون نیز دارای آزادی مناسب است. در نهایت با انجام بررسی‌های تکمیلی از قبیل آنالیز میکروسکوپی و اعمال ملاحظات مانند میزان بازیابی آهن و مشکلات ناشی از حضور ذرات نرمه در فرآیند فلوتاسیون، نتیجه گرفته شد که $d_{80}=106 \mu\text{m}$ برای ادامه کار مناسب است. در ادامه کار، آزمایش‌های جدایش مغناطیسی تر با شدت میدان ۸۰۰ گوس بر روی نمونه انتخابی انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

pH پالپ با اضافه کردن اسیدسولفوریک برای حالت اسیدی و هیدروکسید سدیم برای فراهم کردن شرایط قلیایی انجام گرفت. کلکتور (آمیل‌گزنات‌پتاسیم یا دی‌گزنوژن) به میزان ۱۰۰ گرم بر تن با زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه و کف‌ساز MIBC به میزان ۵۰ گرم بر تن با زمان آماده‌سازی ۱ دقیقه استفاده شدند. برای تعیین زمان بهینه فلوتاسیون، چهار آزمایش فلوتاسیون به صورت جداگانه با استفاده از گزنات در $\text{pH}=9$ طبق شرایط قبلی (وزن خوراک ۳۸۸ گرم، درصد جامد ۲۱،۵ درصد، سرعت همزن ۱۰۰۰ دور در دقیقه و میزان کف‌ساز ۵۰ گرم بر تن MIBC) و با در نظر گرفتن زمان‌های ۳، ۵، ۹ و ۱۲ دقیقه به عنوان زمان کف‌گیری، انجام شد. مطالعات کانی‌شناسی و آنالیزهای گوگرد توسط مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران و آنالیزهای آهن توسط آزمایشگاه شیمی معدن سنگ‌آهن سورک انجام شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج تجزیه سرنندی خوراک اولیه پس از خردایش به وسیله سنگ‌شکن غلتکی تا ابعاد کمتر از ۸ مش (۲،۳۸ میلی‌متر) در شکل ۱ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار توزیع دانه‌بندی، d_{80} نمونه خوراک اولیه ۲۰۲۵ میکرون است.

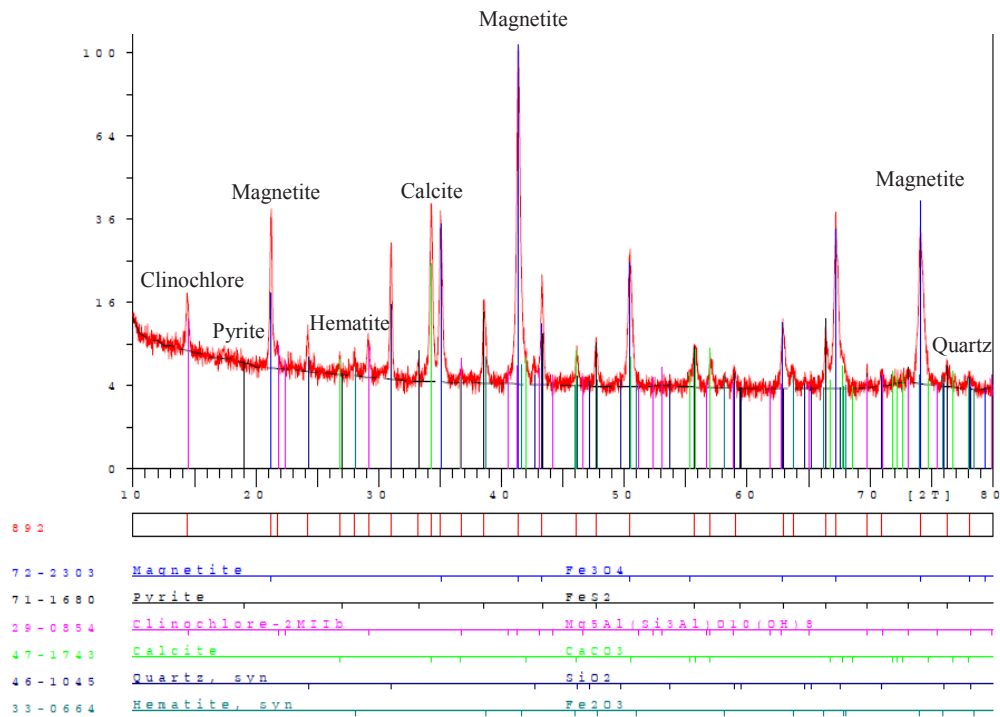


شکل ۱: نمودار توزیع دانه‌بندی خوراک اولیه پس از خردایش بوسیله سنگ‌شکن غلتکی تا ابعاد کمتر از ۸ مش

با توجه به درشت بودن نمونه خوراک اولیه ($d_{80}=2025 \mu\text{m}$)، به منظور آماده‌سازی دانه‌بندی‌های ۳۸-، ۶۳+۳۸- و ۱۰۶+۶۳- میکرون برای استفاده در بخش تعیین درجه آزادی، ۵۰۰ گرم نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در آسیای گلوله‌ای مورد خردایش قرار گرفت و به وسیله الک‌های ۳۸، ۴۵، ۵۳، ۶۳، ۷۵، ۹۰ و ۱۰۶ میکرون، تجزیه سرنندی شد. نتایج تجزیه سرنندی تر در شکل ۲ قابل مشاهده است. با توجه

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF کانسنگ منیتیتی

L.O.I	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Sr
۴,۰۱	۰,۲۸	۲,۲۶	۱,۹۷	۱۳,۹۱	۰,۱۱	۶,۴۱	۸,۱۱	۶۲,۹۱	۰,۰۳



شکل ۳: نتایج آنالیز XRD نمونه

جدول ۲: نتایج عیار و توزیع آهن حاصل از جدایش مغناطیسی تر

آهن		وزن (درصد)	شرح	
بازیابی (درصد)	عیار (درصد)			
۱۰۰	۵۶,۳۹	۱۰۰	خوراک	+63-106 μm
۹۸,۹	۶۰,۰۴	۹۲,۸۶	کنسانتره	
۱,۱	۸,۹۶	۷,۱۴	باطله	
۱۰۰	۵۸,۹۹	۱۰۰	خوراک	+38-63 μm
۹۹,۰	۶۳,۲۸	۹۲,۳۴	کنسانتره	
۱,۰	۸,۲۹	۷,۶۶	باطله	
۱۰۰	۵۱,۸۶	۱۰۰	خوراک	-38 μm
۹۶,۵	۶۴,۹۶	۷۷,۰۳	کنسانتره	
۳,۵	۷,۹۳	۲۲,۹۷	باطله	

جدول ۳: نتایج آزمایش مغناطیسی تر بر روی خوراک با ابعاد $d_{80}=106 \mu\text{m}$

شرح	وزن (درصد)	آهن		گوگرد	
		عیار (درصد)	بازیابی (درصد)	عیار (درصد)	بازیابی (درصد)
کنسانتره	۷۶٫۹۰	۶۳٫۴۷	۹۶٫۹	۰٫۵۲	۹٫۷
باطله	۲۳٫۱۰	۶٫۷۹	۳٫۱	۱۶٫۱۲	۹۰٫۳
خوراک	۱۰۰	۵۰٫۳۷	۱۰۰	۴٫۱۲	۱۰۰

جدول ۴: نتایج و شرایط آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون

آزمایش	مقدار کلکتور (gr/t)	نوع کلکتور	ابعاد (d_{80}) $m\mu$	pH	توضیحات	عیار گوگرد خوراک (درصد)	عیار گوگرد کنسانتره آهن (درصد)
۱	۱۰۰	گزنات	۱۰۱	۷	-	۰٫۵۲	۰٫۱۳
۲	۱۰۰	گزنات	۱۰۱	۵	pH در طول آزمایش تا ۷ افزایش یافت.	۰٫۵۲	۰٫۱۷
۳	۱۰۰	گزنات	۱۰۱	۹	-	۰٫۵۲	۰٫۰۸
۴	۱۰۰	دی‌گزنوتوزن	۱۰۱	۷	-	۰٫۵۲	۰٫۱
۵	۱۰۰	دی‌گزنوتوزن	۱۰۱	۵	با افزودن اسید در طول آزمایش pH=5 تنظیم شد.	۰٫۵۲	۰٫۱۳
۶	۱۰۰	دی‌گزنوتوزن	۱۰۱	۹	NaOH به‌عنوان تنظیم‌کننده pH استفاده شد.	۰٫۵۲	۰٫۱

روند انجام آزمایش‌ها بدین ترتیب بود که ابتدا در pH خنثی و با کلکتور گزنات آزمایش شماره یک انجام شد، آزمایش دوم در pH=5 انجام شد و در حین آزمایش مشاهده شد که تنظیم pH بسیار دشوار بوده و همچنان با افزودن اسید، pH در حال بالا رفتن بود. طبق نتایج آنالیز XRD کلسیت در نمونه وجود دارد وجود کلسیت باعث مصرف اسید شده و بدین ترتیب pH در طول آزمایش افزایش می‌یابد و تنظیم pH اسیدی را دشوار می‌سازد. آزمایش سوم در pH=9 و با گزنات انجام شد که میزان کف تولیدشده کاملاً مطلوب بود و بازیابی وزنی بالاتری از کنسانتره نسبت به آزمایش‌های قبلی مشاهده شد. برای انجام آزمایش‌ها در pH خنثی و اسیدی از دی‌گزنوتوزن استفاده شد. بنابراین آزمایش چهارم در pH=7 و به‌وسیله کلکتور دی‌گزنوتوزن انجام شد. آزمایش شماره پنج در pH=5 در حضور همین کلکتور انجام شد. آزمایش شماره

در ادامه با تعیین توزیع دانه‌بندی کنسانتره حاصل از جدایش مغناطیسی‌تر بواسطه تجزیه سرنندی‌تر، مشخص شد که d_{80} نمونه ۱۰۱ میکرون است، سپس کنسانتره حاصل از فرآیند جدایش مغناطیسی به عنوان خوراک فرآیند فلوتاسیون مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به هدف تحقیق مبنی بر کاهش گوگرد نمونه آهن منیتیتی و اینکه گوگرد به صورت سولفیدی (پیریت) در کانسنگ قرار دارد، فرآیند فلوتاسیون معکوس برای کاهش گوگرد موجود در کنسانتره آهن به کار گرفته شد. برای انجام عملیات فلوتاسیون، ابتدا چندین آزمایش اولیه انجام شد. در آزمایش‌های ابتدایی سعی شد تا روش‌ها و پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گیرد تا در نتیجه، پارامترها، محدوده تغییرات و شرایط انجام آزمایش‌های بعدی تعیین شود. نتایج و شرایط آزمایش‌های اولیه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۵: شرایط و نتایج حاصل از فلوتاسیون با استفاده از گزنتات در pH=9

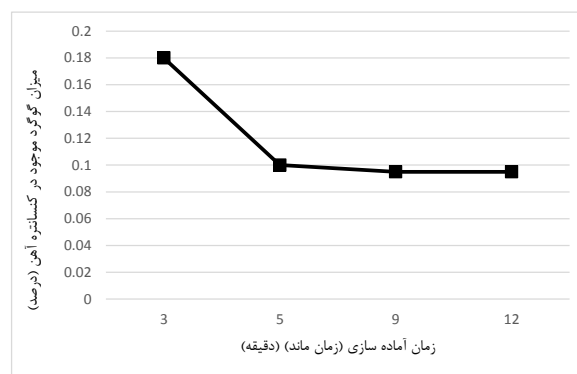
مقدار کلکتور	نوع کلکتور	ابعاد (d_{80})	pH	عیار گوگرد خوراک	عیار گوگرد کنسانتره آهن	عیار آهن کنسانتره
(gr/t)	-	m μ		درصد	درصد	درصد
۱۰۰	گزنتات	۱۰۱	۹	۰٫۵۲	۰٫۰۷	۶۵٫۱۳

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، با تکرار آزمایش فلوتاسیون در شرایط بهینه، عیار گوگرد در کنسانتره آهن به ۰٫۰۷ کاهش یافت که این نتیجه با آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون در همین شرایط مطابق جدول ۴ که میزان عیار گوگرد آن ۰٫۰۸ درصد شده بود بسیار نزدیک و حتی مطلوب‌تر است. همچنین، نتایج این آزمایش تاییدکننده نتایج آزمایش قبل با زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه به‌عنوان زمان بهینه فلوتاسیون که عیار گوگرد موجود در کنسانتره آهن ۰٫۱ درصد شده بود، است. در نتیجه این آزمایش، میزان بازیابی وزنی کنسانتره آهن برابر با ۹۵٫۹۶ درصد، میزان افت آهن در حدود ۲ درصد و میزان بازیابی کلی آهن ۹۴٫۹ درصد حاصل شد، بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که با آزمایش‌های فلوتاسیون تحت شرایط بهینه یاد شده می‌توان به عیار مطلوب گوگرد در کنسانتره آهن (کمتر از ۰٫۱ درصد) دست یافت.

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان داد که در کانسنگ آهن معدن سورک که گوگرد موجود به صورت پیریت است، در دانه‌بندی $106 \mu\text{m} + 63 - 10$ با توجه به بازیابی بسیار بالای کنسانتره حاصل از جدایش مغناطیسی (۹۸٫۹ درصد)، خردایش نمونه تا این ابعاد ضروری است. آزادشدگی مناسب منیتیت در کنار توجه به ملاحظات دیگر در ابعاد $d_{80} = 106 \mu\text{m}$ اتفاق می‌افتد که بالا بودن میزان بازیابی در آزمایش جدایش مغناطیسی برای این دانه‌بندی این امر را تایید می‌کند. نتایج نشان داد که با یک مرحله جدایش مغناطیسی‌تر شدت پایین عیار آهن $63 \mu\text{m} + 47$ درصد با بازیابی ۹۶٫۹ درصد و عیار گوگرد ۰٫۵۲ درصد دست یافت. با انجام فلوتاسیون معکوس بر روی

شش نیز در pH=9 در حضور کلکتور دی‌گزن‌توزن انجام شد تا نتیجه آن با نتیجه حاصل در شرایط یکسان در حضور کلکتور گزنتات، مقایسه شود. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، مشاهده می‌شود که استفاده از گزنتات در pH=9 موجب کاهش بیشتر عیار گوگرد در کنسانتره آهن می‌شود. برای تعیین زمان بهینه فلوتاسیون، چهار آزمایش فلوتاسیون به صورت جداگانه با استفاده از گزنتات در pH=9 طبق شرایط قبلی (وزن خوراک ۳۸۸ گرم، درصد جامد ۲۱٫۵ درصد، سرعت همزن ۱۰۰۰ دور در دقیقه و میزان کف‌ساز ۵۰ گرم بر تن) و با در نظر گرفتن زمان‌های ۳، ۵، ۹ و ۱۲ دقیقه به عنوان زمان آماده‌سازی کلکتور، انجام شد. تعداد ۴ نمونه معرف حاصل از کنسانتره آهن به دست آمده در زمان‌های یاد شده برای آنالیز گوگرد تهیه شد. نتایج حاصل از تغییرات عیار گوگرد در کنسانتره آهن به عنوان تابعی از زمان آماده‌سازی (زمان ماند فلوتاسیون) در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: تغییرات میزان گوگرد موجود در کنسانتره آهن نسبت به زمان آماده‌سازی (زمان ماند)

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در مدت زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه عیار گوگرد در کنسانتره آهن ۰٫۱ درصد شده است. برای حصول اطمینان از نتیجه آزمایش بهینه‌سازی زمان در pH=9، با زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه و با استفاده از کلکتور گزنتات، آزمایش فلوتاسیون تحت شرایط قبلی (وزن خوراک ۳۸۸ گرم، درصد جامد ۲۱٫۵ درصد، سرعت همزن ۱۰۰۰ دور در دقیقه و میزان کف‌ساز ۵۰ گرم بر تن) به منظور کاهش عیار گوگرد در کنسانتره آهن تکرار شد که نتیجه حاصل از آن در جدول ۵ قابل مشاهده است.

[۶] شهریاری، م. ع.، سام، ع.، نخعی، ف.، عزت آبادی پور، ج.؛ ۱۳۹۱؛ "بررسی عوامل موثر بر فلوتاسیون هماتیت در خط فرآوری باطله خشک DTP مجتمع سنگ آهن گل گهر". چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، تهران، ص ۲۵۶-۲۴۵.

[7] Ding, P., Liu, Q. J., and Pang, W. H. (2013). "Desulfurization Study of an Iron Mine in Yunnan". *Advanced Materials Research*, 756: 76-79.

[8] Soltanmohammadi, V., Nouparrast, M., Hossein, K. A., and Zamani, F. (2009). "Determination of optimum conditions to remove sulfur and phosphor from Gol-E-Gohar iron ore concentrate". *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 33: 267-278.

[9] Mermillod-Blondin, R., Kongolo, M., De Donato, P., Benzaazoua, M., Barrès, O., Bussière, B., and Aubertin, M. (2005). "Pyrite flotation with xanthate under alkaline conditions-application to environmental desulfurization". *Centenary of Flotation Symposium, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne*, 683-692.

[10] Panahi, E., Abdollahzadeh, A., Sam, A., Jahani, M., Moghaddam, M. Y., and Mehrani, A. (2012). "Desulfurization of hematitic concentrate of iron ore of the Gol-E-Gohar mine using reverse flotation method". *Technical Report*, 1-5.

کنسانتره حاصل از مرحله جدایش مغناطیسی با عیار گوگرد ۰٫۵۲ درصد با استفاده از گزنتات به عنوان کلکتور با زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه و در شرایط pH=9، درصد جامد ۲۱٫۵، سرعت همزن ۱۰۰۰ دور در دقیقه و میزان کف‌ساز ۵۰ گرم بر تن، می‌توان به عیار گوگرد کمتر از ۰٫۱ درصد در کنسانتره نهایی دست یافت.

۵- مراجع

[۱] شرکت ذوب آهن جنوب شرق ایران؛ ۱۳۹۲؛ "گزارش پایان عملیات اکتشاف حین استخراج معدن سنگ آهن سووک (سادات ۲) ندوشن". کرمان.

[۲] رضایی، ب.؛ ۱۳۷۸؛ "فلوتاسیون". انتشارات دانشگاه هرمزگان.

[۳] توحیدی، ن.، وقار، ر.؛ ۱۳۹۱؛ "آماده سازی بار کوره های تولید آهن و فولاد". انتشارات دانشگاه تهران.

[۴] لطفی، م.؛ ۱۳۹۰؛ "افزایش عیار آهن و کاهش میزان گوگرد از سنگ آهن های کم عیار سنگان". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

[۵] پناهی، ا.، عبدالله زاده، ع.، ا.، سام، ع.، مهرانی، ا. پ.؛ ۱۳۹۱؛ "تولید کنسانتره خوراک کارخانه گندله سازی سنگ آهن از باطله های کم عیار و بسیار پرسولفور کارخانه فرآوری مگنتیت گل گهر سیرجان و ارائه فلوشیت". اولین کنفرانس فناوری های معدنکاری ایران، یزد، ص ۶۹-۶۱.

^۱ Ding

^۲ Mermillod-Blondin