

بررسی کاهش میزان گوگرد کنسانتره منتیتی کارخانه تغلیظ سنگ آهن همدان

رامین حق محمدی پسند^۱، جواد وظیفه مهربانی^{۲*}، پرویز پورقهرمانی^۳

- ۱- کارشناسی ارشد، گروه مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
۲- استادیار، گروه مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
۳- استاد، گروه مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

(دریافت ۱۳۹۸/۰۷/۰۱، پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۰۵)

چکیده

در این تحقیق، امکان کاهش گوگرد موجود در کنسانتره نهایی آهن واحد تغلیظ باباعلی همدان مورد بررسی قرار گرفت. وقتی کانسنگ ورودی به کارخانه از معدن گلالی خوراک‌دهی می‌شود، مقدار گوگرد در کنسانتره نهایی بالاتر از حد مجاز است و در برخی شرایط، عیار آن از ۲٫۳ درصد نیز تجاوز می‌کند. بررسی‌ها نشان داد که حدود ۴۷ درصد گوگرد موجود در خوراک کارخانه، به کنسانتره نهایی آهن راه می‌یابد و منبع اصلی آن، کانی سولفیدی پیروتیت و به مقدار جزئی، کانی پیریت درگیر در ابعاد بزرگ‌تر از ۷۵ میکرون است. آزمایش‌های مغناطیسی اولیه انجام گرفته با استفاده از دستگاه دیویس تیوب نشان داد که با کاهش شدت میدان مغناطیسی و خردایش بیشتر، ۳۲ درصد از گوگرد موجود در کنسانتره حذف و عیار گوگرد در کنسانتره به ۱٫۷ درصد می‌رسد. ولی در این شرایط، آهن بیشتری هدر می‌رود. در ادامه، آزمایش‌های شناورسازی کانی‌های سولفیدی در شرایط مختلف با استفاده از فلوتاسیون انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مقدار مصرف کلکتور، فعال‌کننده و واکنش بین آنها، بیشترین تاثیر را در فلوتاسیون پیروتیت از کنسانتره منتیتی دارند. شرایط بهینه آزمایش‌ها در حضور ۱۱۰۰ گرم برتن کلکتور پتاسیم امیل گزنتات، ۲۰۰ گرم برتن فعال‌کننده سولفات مس، pH=6، درصد جامد فلوتاسیون ۴۵ درصد و ترکیب کف‌ساز MIBC و A65 (با نسبت مساوی) به مقدار ۱۳۰ گرم برتن حاصل شد که در این شرایط بیش از ۹۸ درصد گوگرد از کنسانتره منتیتی حذف شده و عیار گوگرد از ۲٫۳ درصد در کنسانتره اولیه به ۰٫۴ درصد کاهش یافت.

کلمات کلیدی

کنسانتره منتیتی، گوگرد، فلوتاسیون، پیروتیت.

۱- مقدمه

اثرگذاری معیارهای مختلف از قبیل نوع کانی‌شناسی و ساختار شبکه پیرویت، نوع و مقدار کلکتورها، کف‌سازها، فعال‌کننده‌ها، دانه‌بندی، زمان‌های آماده‌سازی مواد شیمیایی، pH و پتانسیل محیط، مورد بررسی قرار گرفته است [۶-۱۱، ۴، ۲].

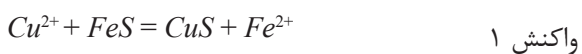
آسیابنی با گلوله‌های فولادی یا هم‌جواری پیرویت با منتیت، می‌تواند باعث تشکیل گونه‌های مختلف هیدروکسیدهای آهن روی سطح پیرویت و مانع جذب مناسب کلکتور در فلوتاسیون شود و از نرخ شناورشدگی پیرویت بکاهد [۱۳، ۱۲، ۸].

برخی از محققان بیان کرده‌اند که سرعت اکسیداسیون پیرویت ۱۰۰ برابر بیشتر از پیریت است و یون‌های فریک و اکسیژن، دو عامل مهم اکسیداسیون پیرویت هستند. همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نرخ اکسیداسیون سطح پیرویت مونوکلینیک بیشتر از هگزاگونال است و همین امر منجر به کاهش نرخ فلوتاسیون پیرویت مونوکلینیک می‌شود [۱۷-۱۴].

در شرایط معمول، به‌جز اسفالریت و پیرویت که نیاز به فعال‌سازی دارند، سایر کانی‌های سولفیدی به‌راحتی با گزنتات‌های زنجیر کوتاه شناور می‌شوند [۱۸].

برای بهبود بازیابی کانی‌های سولفیدی با استفاده از کلکتورهای گزنتات، یون‌های مس به‌عنوان فعال‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. سولفات مس هم به‌عنوان فعال‌کننده اسفالریت، پیریت و پیرویت شناخته شده است [۲۰، ۱۹، ۱۶، ۱۱، ۹، ۷].

در خصوص روش فعال‌سازی پیرویت توسط یون‌های مس، جذب این یون‌ها بر روی پیرویت و تشکیل سولفید مس مطابق واکنش گزارش شده است [۲۱، ۱۱]:



در pH‌های قلیایی و خنثی، اضافه‌کردن یون‌های مس به محیط، باعث تشکیل می‌شود که در ادامه با گزنتات واکنش و تشکیل می‌دهد. برخی محققان گزارش کرده‌اند که آزمایش فعال‌سازی با یون‌های مس مربوط به تشکیل یون‌های مس یک‌ظرفیتی و تبدیل به و است (واکنش ۲) [۲۰، ۱۹، ۱۱، ۷].



انحلال لایه‌های هیدروفیل هیدروکسید آهن تشکیل شده بر سطح پیرویت با استفاده از اسید سولفوریک و اگزالیک و بهبود میزان شناورشدگی پیرویت هم گزارش شده است [۲۲].

مهم‌ترین کانسارهای آهن، کانسارهای منتیتی و هماتیتی هستند و بیشتر به‌روش مغناطیسی فرآوری می‌شوند. کنسانتره تولیدی از مراحل فرآوری باید دارای مشخصات خاصی از جمله حداقل عیار آهن حدود ۶۲٪ برای روش ذوب و حد مجاز ناخالصی گوگرد موجود در کنسانتره زیر ۰٫۱٪ باشد. گوگرد بیش از حد مجاز، به‌عنوان عنصر اصلی مزاحم در فرآیندهای تولید گندله و فولاد محسوب و منجر به مشکلات زیست محیطی، خوردگی تجهیزات و کاهش ارزش و کیفیت محصولات تولیدی در فرآیندهای مذکور می‌شود [۲، ۱].

گوگرد راه‌یافته به کنسانتره‌های آهن اغلب در فاز کانی‌های سولفیدی پیرویت، پیریت و بندرت در قالب کانی‌های کالکوپیریت، ارسنوپیریت و مارکازیت است. از میان این سولفیدها، پیرویت و پیریت فراوان‌ترین سولفیدهای موجود در کنسانتره‌های آهن هستند. پیرویت کانی سولفیدی-مغناطیسی است که به هر دو شکل مونوکلینیک و هگزاگونال متبلور می‌شود؛ نوع مونوکلینیک نسبت به نوع هگزاگونال، درصد اتمی گوگرد کمتر در ترکیب کانی و حساسیت مغناطیسی بیشتری دارد. از نظر خاصیت مغناطیسی، پیرویت مونوکلینیک، فرومغناطیس و نوع هگزاگونال آن، پارامغناطیس است. دلیل راه‌یابی پیرویت مونوکلینیک به کنسانتره منتیتی، خاصیت شدید مغناطیسی آن است؛ بنابراین به‌راحتی قابل حذف به‌روش جدایش مغناطیسی نمی‌باشد [۴، ۳].

سایر سولفیدها مانند پیرویت هگزاگونال و پیریت که خاصیت مغناطیسی شدید ندارند، به‌دلیل نرسیدن به درجه آزادی و درگیری با کانی بالارزش (منتیت) به کنسانتره منتیتی راه پیدا می‌کنند و می‌توان با بهینه‌سازی فرایند خردایش و رساندن کانی سولفیدی به درجه آزادی مناسب، با استفاده از روش مغناطیسی آن‌ها را حذف کرد. برای بررسی امکان‌پذیری حذف گوگرد از کنسانتره و ارزیابی عملکرد تجهیزات به روش مغناطیسی، می‌توان از دستگاه‌های مغناطیسی آزمایشگاهی مانند دیویس تیوب استفاده کرد [۵]. به‌طور کلی پیریت و پیرویت، عمده‌ترین سولفیدهای موجود در کنسانتره‌های منتیتی و عامل بالابودن میزان عیار گوگرد در این کنسانتره‌ها هستند. فلوتاسیون، رایج‌ترین روش حذف این کانی‌ها از کنسانتره‌های منتیتی است. تحقیقات مختلفی در خصوص شناورسازی پیرویت و نیز کاهش عیار گوگرد از کنسانتره‌های آهن با استفاده از روش فلوتاسیون انجام گرفته که در آنها شرایط

۲- مواد و روش‌ها

در بازه‌های زمانی مختلف از کنسانتره منتیتی پرگوگرد کارخانه (محصول نهایی کارخانه)، نمونه معرف تهیه شد. آنالیز شیمیایی کنسانتره تهیه‌شده، عیار آهن و گوگرد را به‌طور متوسط به ترتیب حدود ۶۶٪ و ۲۳٪ نشان داد. آنالیزهای عیاری آهن و اکسید آهن، به‌روشنی شیمی تر و آنالیز عیار گوگرد، توسط دستگاه الترا^۱ مدل CS800، ساخت کشور آلمان انجام گرفت.

مطالعات میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ ژاپنی OLYMPOST انجام گرفت. مطالعات میکروسکوپی مقاطع تهیه‌شده، نشان داد که نمونه‌ها به‌طور عمده از منتیت تشکیل شدند و درگیری بسیار کمی با گانگ سیلیکاته دارند. پیرویت و پیریت، به‌عنوان منبع کانی‌های سولفیدی شناسایی شدند که مقدار پیرویت بسیار بیشتر از پیریت بود. همچنین نتایج کانی‌شناسی نشان داد بخش عمده نمونه کنسانتره تهیه شده، متشکل از کانی منتیت است که بیش از ۹۰٪ در ابعاد زیر ۷۵ میکرون، آزاد هستند. شکل ۱ نمایی از سه کانی منتیت، پیریت و پیرویت را در یک مقطع صیقلی نشان می‌دهد.

آزمایش‌های جدایش مغناطیسی در سه شدت میدان مختلف ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۱۰۰ گوس و دانه‌بندی خوراک در مقادیر ۸۰ درصد عبوری از ۹۰ و ۴۳ میکرون، توسط دستگاه دیویس تیوپ، ساخت شرکت اریز^۲ انجام شد. این وسیله از یک لوله شیشه‌ای به قطر ۳ تا ۴ سانتی‌متر تشکیل شده که با زاویه تقریباً ۴۵ درجه در مجاورت دو قطب مغناطیسی مخروطی شکل قرار گرفته است. فاصله دو قطب مغناطیسی از یکدیگر، ۱ تا ۳ سانتی‌متر و شدت میدان مغناطیسی در وسط دو قطب از ۰ تا ۴۰۰۰ گوس متغیر و قابل تنظیم است و توسط سیم‌پیچ الکتریکی با جریان یک‌سو تامین می‌شود. این لوله شیشه‌ای، شامل یک حرکت طولی با دامنه ۸ سانتی‌متر و حرکت دورانی حول محور خود با دامنه ۹۰ درجه و با سرعت متغیر و قابل تنظیم صفر تا ۱۰۰ نوسان در دقیقه است. محدوده دبی جریان آب شستشو نیز بین ۰٫۱ تا ۱ لیتر در دقیقه است. برای انجام آزمایش‌ها در ۲۰ گرم نمونه جامد، شرایط مدت زمان شستشو ۱۰ دقیقه، دبی آب شستشو ۰٫۵ لیتر در دقیقه و سرعت نوسان لوله ۳۰ نوسان در دقیقه، ثابت طراحی شد.

آزمایش‌های فلوتاسیون باهدف بررسی امکان‌پذیری و بهینه‌سازی فرایند فلوتاسیون برای کاهش درصد گوگرد از کنسانتره منتیتی در سه مرحله آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون،

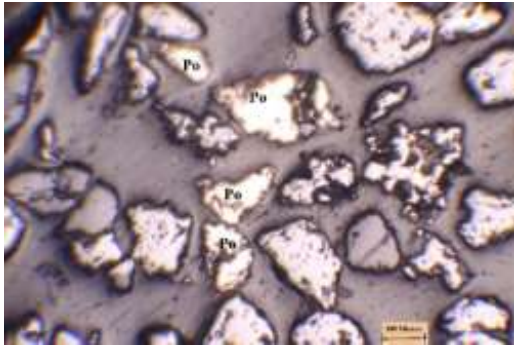
به‌همین دلیل در مورد کانسنگ‌های آهن، برای فلوتاسیون پیریت و پیرویت، pH اسیدی تا خنثی مورداستفاده قرار می‌گیرد. تاثیرگذاری فعال‌کننده سولفات مس در فلوتاسیون پیرویت وابسته به مقدار مصرف، pH و زمان آماده‌سازی است. [۲۱،۲۰،۱۱،۹،۷].

آمیل‌گزنات‌پتاسیم، موثرترین کلکتور برای فلوتاسیون پیرویت و تقریباً در تمام شرایط، به‌ویژه در pH طبیعی معرفی شده است که شناورسازی آن، مقدار بالایی کلکتور وابسته به مصرف فعال‌کننده، نیاز دارد. همچنین برای فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی آهن، در کنار گزنات، به‌عنوان کلکتور اولیه از دی تیوفسفاتها، تیو کربامات‌ها، مرکاپتان‌ها به‌عنوان کلکتور ثانویه استفاده می‌شود. روغن کاج (Pine oil)، متیل‌ایزوبوتیل‌کربونیل (MIBC) و پلی‌پروپیلن‌گلیکول (A65) از رایج‌ترین کف‌سازهایی هستند که در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی آهن مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۱-۲۵،۱۱،۷].

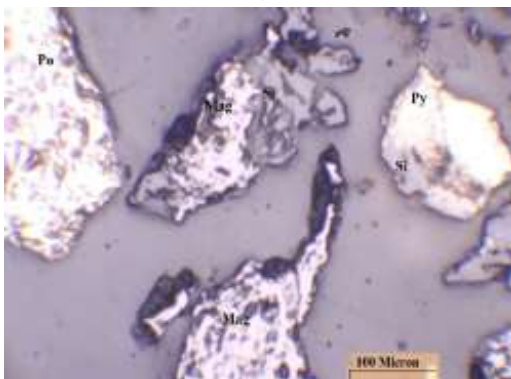
با توجه به مطالب بیان‌شده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد هم‌جواری پیرویت با کانی‌های اکسید آهن، تماس با گلوله‌های فولادی در هنگام آسیاب‌کنی و نیز اکسیداسیون سریع سطح پیرویت (به‌ویژه با ساختار مونوکلینیک) و تشکیل فازهای مختلف هیدروفلیل هیدروکسیدهای آهن بر روی آن، نرخ فلوتاسیون پیرویت را کاهش می‌دهد. به‌همین دلیل، شناورسازی پیرویت از کنسانتره‌های آهن، برای کاهش عیار گوگرد، کار آسانی نیست و انتخاب شرایط بهینه فلوتاسیون و مواد شیمیایی مصرفی مناسب، به‌منظور افزایش نرخ فلوتاسیون پیرویت ضروری است.

در تحقیقاتی که برای کاهش گوگرد از کنسانتره‌ها در کشور صورت پذیرفته، عمدتاً درصد گوگرد در کنسانتره آهن، زیر ۱٫۲ درصد است [۲۳-۲۵،۱۰،۵،۲]. ولی این تحقیق، کاهش عیار گوگرد بر روی کنسانتره تولیدی پرگوگرد از معدن گلالی همدان را بررسی می‌کند که عیار گوگرد در خوراک ورودی و کنسانتره آهن تولیدی، به ترتیب بالای ۳٫۵ و ۲٫۳ درصد است. کاهش عیار گوگرد موجود به‌گونه‌ای که مطابق استانداردهای لازم صنایع پایین دستی تولید کنسانتره باشد، کار چالش‌برانگیزی است و برای کاهش عیار گوگرد کنسانتره نهایی آهن کارخانه همدان، از روش اختلاف شدت میدان مغناطیسی با استفاده از آزمایش‌گر دیویس تیوپ و نیز فلوتاسیون بهره گرفته شد. شدت میدان مغناطیسی، دانه بندی، نوع و میزان مواد شیمیایی مصرفی، pH، درصد جامد، از جمله عواملی بودند که مورد بررسی قرار گرفته و بهینه شدند.

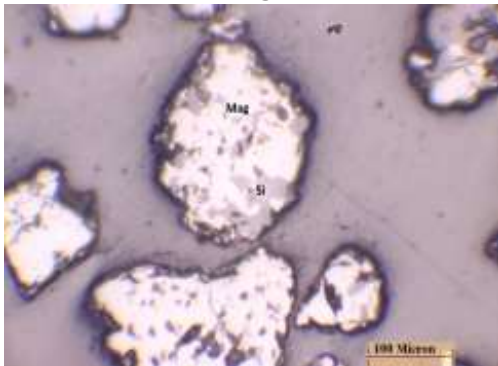
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۱: (الف) تصویری از پیروتیت‌های آزاد، (ب) تصویری از درگیری کانی منتیت (Mag) با گانگ سیلیکاته (Si)، پیروتیت آزاد و پیریت (Py) درگیر با گانگ سیلیکاته (ج) تصویری از درگیری منتیت با گانگ سیلیکاته

تکمیلی و سینتیکی انجام شد. با توجه به مطالعات گذشته و آزمایش‌های مقدماتی انجام گرفته [۲۶]، شرایط انجام آزمایش‌ها تعیین و معیارهای pH، میزان مصرف فعال‌کننده، کلکتور و درصد جامد، به‌عنوان متغیرهای آزمایش، انتخاب و هرکدام در دو سطح، تغییر داده شدند. در این راستا، ۱۶ آزمایش براساس طراحی آزمایش فاکتوریل کامل (۲^۴)، طراحی شد و ۳ آزمایش در نقطه مرکزی انجام پذیرفت. مقدار دانه‌بندی مورد استفاده در فلوتاسیون، ۸۰٪ ذرات ریزتر از ۹۰ میکرون انتخاب شد. جدول ۱، عوامل موثر در طراحی و سطوح آنها را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها با استفاده از نرم افزار DX7، طراحی و نتایج در آن تحلیل شدند. میزان حذف گوگرد از کنسانتره، به‌عنوان پاسخ آزمایش‌ها انتخاب شد.

لازم به‌ذکر است که آزمایش‌ها با استفاده از ماشین فلوتاسیون مکانیکی دنور با سرعت روتور ۱۴۰۰ دور در دقیقه و داخل سلولی با حجم ۵ لیتر انجام گرفت. از پتاسیم‌امیل‌گزنتات (PAX)، به‌عنوان کلکتور کانی‌های سولفیدی آهن، از سولفات مس به‌عنوان فعال‌کننده، از سیلیکات سدیم (۲۰۰ گرم برتن) به‌عنوان بازداشت‌کننده اکسیدها و متفرق‌کننده نرمه‌ها، از اسید سولفوریک به‌عنوان تنظیم‌کننده pH و از MIBC و A65 به‌ترتیب به‌عنوان کف‌سازهای پایه الکلی و پایه پلی‌گلیکولی (۱۳۰ گرم برتن) استفاده شد. زمان‌های آماده‌سازی در تمامی تست‌ها، ثابت و برای بازداشت‌کننده، فعال‌کننده، کلکتور و کف‌ساز به‌ترتیب ۴، ۱۰، ۷ و ۱ دقیقه در نظر گرفته شد. ۶۰ درصد از مواد شیمیایی (فعال‌کننده، کلکتور و بازداشت‌کننده) در ابتدای فلوتاسیون و ۴۰ درصد آن پس از ۸ دقیقه کف‌گیری اضافه شدند. زمان‌های آماده‌سازی نیز در هر دو مرحله آماده‌سازی، یکسان و در آزمایش‌هایی که از ترکیب کف‌سازهای MIBC و A65 استفاده شد، نسبت اختلاط یک در نظر گرفته شد.

آزمایش‌های سینتیکی در شرایط بهینه و کف‌گیری به‌طور جداگانه در زمان‌های ۰-۲، ۲-۴ و ۴-۸ دقیقه انجام گرفت.

جدول ۱: شاخص‌های مورد بررسی در طراحی آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون

متغیر	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
pH	۴٫۵	۵٫۲۵	۶
درصد جامد	۳۰	۳۷٫۵	۴۵
کلکتور (پتاسیم‌امیل‌گزنتات) (تن/گرم)	۳۰۰	۶۵۰	۱۰۰۰
سولفات مس (تن/گرم)	۳۰۰	۶۵۰	۱۰۰۰

پس از مرحله دوم اضافه کردن مواد و آماده سازی، کف گیری در زمان های ۱۰-۸، ۱۲-۱۰، ۱۶-۱۲ ادامه یافت.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی عیار و توزیع گوگرد و آهن در جریان های مختلف مدار مغناطیسی کارخانه

شکل ۲، عیارها و توزیع گوگرد و آهن را در قسمت های مختلف کارخانه نشان می دهد. سنگ ورودی استخراجی از معدن گلالی به کارخانه، دارای عیار گوگرد حدود ۳.۷٪ با عیار آهن ۵۳٪ است. چنانچه از نتایج مشخص است حدود ۵۳٪ از کانی های سولفیدی، جذب میدان مغناطیسی نشده و به باطله هدایت می شوند. این بخش عمدتاً می تواند پیریت، پیروتیت هگزگونال است که در میدان مغناطیسی ضعیف جذب نمی شوند. پس از پرعیارسازی در بخش های مختلف، ۹۱٪ آهن و ۴۷٪ از ناخالصی گوگرد موجود در خوراک اولیه به کنسانتره نهایی منتقل و نهایتاً کنسانتره ای با عیار آهن حدود ۶۶٪ و عیار گوگرد ۲.۳٪ تولید می شود.

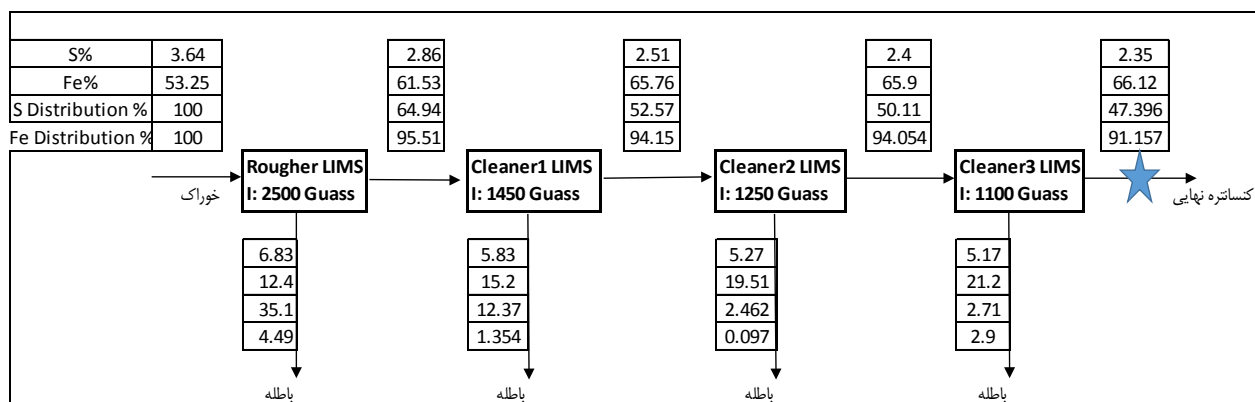
لازم به ذکر است، جریان نمونه گیری برای انجام آزمایش ها از کنسانتره نهایی، با علامت ستاره در شکل ۲ مشخص شده است.

۳-۲- گوگردزدایی به روش مغناطیسی

با در نظر گرفتن حساسیت های مغناطیسی پیریت، پیروتیت هگزگونال و منوکلینیک، می توان انتظار داشت بخش اعظم پیریت و پیروتیت های هگزگونال موجود در خوراک کارخانه،

در مدار مغناطیسی صنعتی حذف شده و تنها بخش کوچکی از آن ها به دلیل درگیری با کانی فرومنیتیت و یا دقت جدایش پایین مدار صنعتی، به کنسانتره مغناطیسی راه یافته اند. با وجود آن که بخش عمده ای از پیروتیت های منوکلینیک به علت حساسیت مغناطیسی بالا وارد کنسانتره شده اند، (هرچند که شدت مغناطیسی جداکننده نهایی در مدار صنعتی ۱۱۰۰ گوس بود) با این حال با توجه به اختلاف در حساسیت شدت میدان مغناطیسی پیروتیت و منیتیت [۲۷] و نیز امکان بررسی عملکرد جداکننده های مغناطیسی در مدار کارخانه، سعی شد که امکان جدایش انتخابی این دو کانی در شدت میدان های مختلف، با استفاده از آزمایش گر دیویس تیوب، بررسی شود.

جدول ۲، نتایج این آزمایش ها را نشان می دهد. همان طور که از نتایج مشخص است، در شرایط آزمایشگاهی مشابه کارخانه با دانه بندی $d_{80}=90$ میکرون و شدت مغناطیسی ۱۱۰۰ گوس در آزمایش دیویس تیوب، ۱۶.۸۶٪ از گوگرد موجود حذف می شود که علت آن را می توان بالابودن دقت جدایش تست های آزمایشگاهی دیویس تیوب نسبت به مدار صنعتی دانست. هم چنین در همان شدت مغناطیسی با خردایش بیشتر و دانه بندی کوچک تر ($d_{80}=43$)، میزان حذف گوگرد نسبت به زمانی که دانه بندی درشت تر بود، بیش از ۱.۵ برابر افزایش پیدا کرد، به گونه ای که در این شرایط، ۲۶.۷۳ درصد از گوگرد موجود در کنسانتره مغناطیسی در آزمایش دیویس تیوب حذف شده است که علت آن را می توان درگیری کانی های سولفیدی غیرمغناطیسی با کانی های مغناطیسی دانست.



شکل ۲: عیار و توزیع گوگرد و آهن در جریان های مختلف مدار مغناطیسی کارخانه فرآوری سنگ آهن همدان (علامت ستاره مربوط به جریان نمونه برداری شده برای انجام آزمایش ها)

است. افزایش میزان سولفات مس به عنوان فعال کننده کانی‌های سولفیدی آهن، در سطح مشخصی از کلکتور باعث افت قابل توجهی در میزان شناورشدگی کانی‌های سولفیدی آهن همراه کنسانتره شده است؛ به گونه‌ای که کاهش درصد حذف گوگرد در سطح بالای مصرف سولفات مس (۱۰۰۰ گرم برتن)، به دو برابر نسبت به سطوح پایین (۳۰۰ گرم برتن) می‌رسد. با توجه به مطالب بیان شده در بخش مقدمه، می‌توان عنوان کرد مقدار مصرف سولفات مس، بسیار حساس است و در صورتی که از مقدار مشخصی بیشتر مورد استفاده قرار گیرد، می‌تواند باعث ناپایداری کف‌ها شود و اتصال ذرات به حباب را مختل کند [۱۱،۷]. هم‌چنین شکل ۳ نشان می‌دهد در واکنش بین میزان کلکتور مصرفی و فعال کننده، در سطوح بالای فعال کننده، افزایش میزان کلکتور، تاثیر معنی‌داری در حذف گوگرد ندارد (به دلیل هم‌پوشانی بازه‌های اطمینان نشان داده شده در شکل ۳)، در حالی که در صورت استفاده از مقادیر پایین فعال کننده، افزایش کلکتور تاثیر به‌سزایی در حذف گوگرد از کنسانتره دارد. این مطلب بیان‌گر واکنش دو متغیر کلکتور و فعال کننده است. با توجه به سطوح انتخابی در آزمایش‌ها و نتایج حاصله، می‌توان عنوان کرد که در آزمایش‌های تکمیلی می‌توان مقدار فعال کننده را کاهش و مقدار کلکتور را افزایش داد.

بر اساس بهینه‌سازی انجام گرفته روی مدل برازش شده، شرایط بهینه آزمایش‌ها با مصرف ۱۰۰۰ گرم برتن کلکتور پتاسیم آمیل‌گزنات، ۳۰۰ گرم برتن سولفات مس، $pH=4.5$ و درصد جامد ۴۲٪ حاصل شد (جدول ۵). در این شرایط با توجه به پیش‌بینی مدل برازش شده از نتایج آزمایش‌ها، بیش از ۹۲٪ گوگرد موجود در کنسانتره قابل حذف و عیار گوگرد در کنسانتره از ۲/۳ درصد به حدود ۰/۲ درصد قابل دسترسی است. با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی (مصرف اسید و حجم سلول‌های انتخابی در صنعت) و با توجه به اینکه

نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد با کاهش شدت مغناطیسی و دانه‌بندی، حذف گوگرد افزایش یافته و در نهایت، حداکثر مقدار گوگرد حذف شده در شدت مغناطیسی ۵۰۰ گوس و دانه‌بندی ۴۳ میکرون، به مقدار ۳۲/۷ درصد و عیار ۱/۷٪ می‌رسد و در این روش ۶۷/۳ درصد از گوگرد، حذف نمی‌شود. از طرفی با ریزتر شدن دانه‌بندی و کاهش میدان مغناطیسی، هدررفت آهن افزایش می‌یابد؛ به طوری که در شدت میدان مغناطیسی ثابت، با کاهش اندازه ذرات کنسانتره از ۹۰ به ۴۳ میکرون، هدررفت آهن به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. بخش عمده‌ای از این افزایش هدررفت آهن در اندازه‌های ریزتر، می‌تواند مربوط به انتقال ذرات کانی‌های مغناطیسی آهن همراه با آب شستو، به بخش باطله باشد.

۳-۳- گوگردزایی به روش فلوتاسیون

نتایج آزمایش‌های طراحی شده فلوتاسیون (جدول ۳)، توسط نرم‌افزار DX7 مورد بررسی قرار گرفت. به پاسخ‌ها، مدل مناسب برازش شد و مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. آنالیز واریانس مدل برازش شده برای پاسخ درصد حذف گوگرد در جدول ۴ نشان داده شده است. چنانچه از نتایج آنالیز واریانس مشخص است، مدل برازش شده در سطح اعتماد بالای ۹۹٪، معنی‌دار است و شاخص‌های مقدار مصرف کلکتور، فعال کننده و واکنش‌های دوگانه کلکتور- فعال کننده و نیز واکنش‌های سه‌گانه کلکتور- فعال کننده- pH، بیشترین تاثیر را بر حذف گوگرد از کنسانتره آهن (در محدوده‌های انتخابی) داشته و به‌عنوان مولفه‌های تاثیرگذار مدل انتخاب شده‌اند.

باتوجه به نتایج شکل ۳، افزایش مقدار کلکتور از ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم برتن در سطح پایین مقدار سولفات مس، باعث افزایش بیش از دو برابری حذف گوگرد از کنسانتره آهن شده و میزان حذف گوگرد از حدود ۴۲٪ به ۹۲٪ افزایش یافته

جدول ۲: نتایج حاصل از آزمایش‌های دیویس تیوب (میانگین عیار آهن و گوگرد در خوراک ورودی به دیویس تیوب به ترتیب ۶۵/۹۴٪ و ۲/۲۷٪)

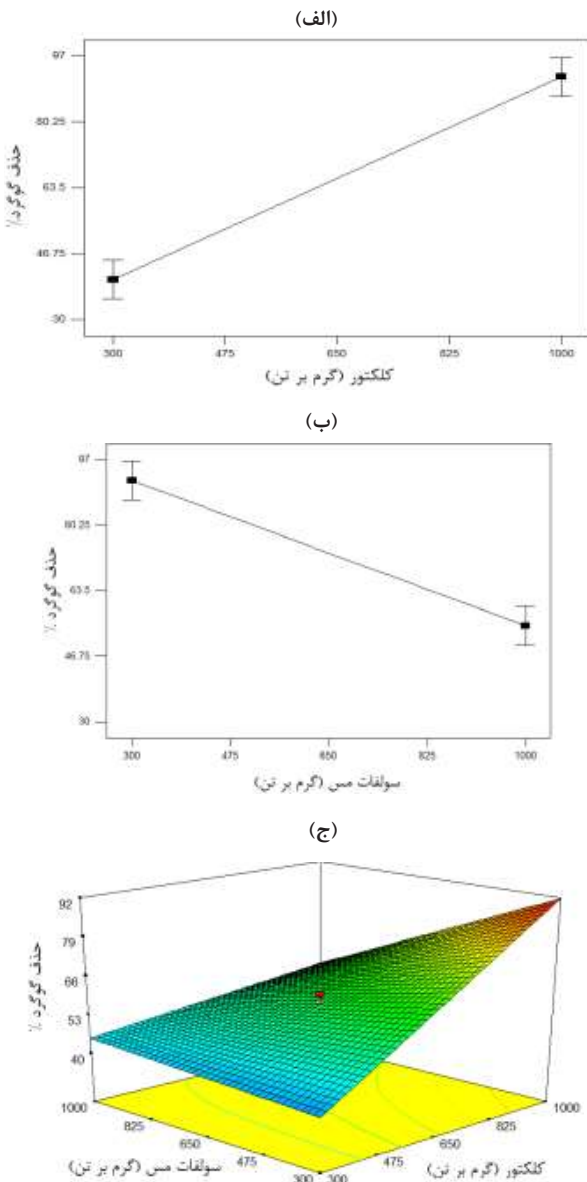
شماره آزمایش	شدت مغناطیسی (گوس)	D ₈₀ (میکرون)	بازیابی وزنی (%)	Fe (%)	S (%)	میزان حذف گوگرد (%)	هدرروی کل آهن (%)
۱	۵۰۰	۹۰	۹۵،۰۱	۶۸،۱۸	۱،۹۴	۱۸،۸۰	۱،۷۶
۲	۷۵۰	۹۰	۹۵،۷۷	۶۸،۱۵	۱،۹۶	۱۷،۳۱	۱،۰۲
۳	۱۱۰۰	۹۰	۹۵،۸۰	۶۸،۱۴	۱،۹۷	۱۶،۸۶	۱،۰۰
۴	۵۰۰	۴۳	۸۹،۸۷	۶۸،۷	۱،۷	۳۲،۷	۶،۳۶
۵	۷۵۰	۴۳	۹۱،۲۱	۶۸،۵	۱،۷۵	۲۹،۶۸	۵،۲۴
۶	۱۱۰۰	۴۳	۹۲،۴۰	۶۸،۳	۱،۸	۲۶،۷۳	۴،۲۹

جدول ۳: نتایج آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون

حذف گوگرد (%)	کنسانتره منتهی (بخش شناور نشده)			درصد وزنی جامد	pH	فعال کننده سولفات مس (گرم بر تن)	کلکتور پتاسیم امیل گزنتات (گرم بر تن)	شماره آزمایش
	عیار گوگرد (%)	عیار آهن (%)	بازیابی وزنی (%)					
۳۰٫۲۷	۱٫۶۴	۶۶٫۶۸	۹۷٫۷۹	۳۰	۴٫۵	۳۰۰	۳۰۰	۱
۳۸٫۹۴	۱٫۴۶	۶۷٫۰۱	۹۶٫۱۹	۴۵	۴٫۵	۳۰۰	۳۰۰	۲
۴۰٫۹۱	۱٫۴۱	۶۷٫۰۹	۹۶٫۳۸	۳۰	۶	۳۰۰	۳۰۰	۳
۵۱٫۲۸	۱٫۱۸	۶۷٫۰۶	۹۴٫۹۷	۴۵	۶	۳۰۰	۳۰۰	۴
۵۳٫۶۸	۱٫۱۲	۶۶٫۹۱	۹۵٫۱۲	۳۰	۴٫۵	۱۰۰۰	۳۰۰	۵
۴۲٫۰۶	۱٫۴	۶۶٫۸۷	۹۵٫۱۹	۴۵	۴٫۵	۱۰۰۰	۳۰۰	۶
۳۷٫۸۵	۱٫۴۹	۶۶٫۸۳	۹۵٫۹۴	۳۰	۶	۱۰۰۰	۳۰۰	۷
۴۶٫۹۸	۱٫۲۸	۶۶٫۵۶	۹۵٫۲۷	۴۵	۶	۱۰۰۰	۳۰۰	۸
۹۲٫۱۴	۰٫۲	۶۷٫۶۶	۹۰٫۴۱	۳۰	۴٫۵	۳۰۰	۱۰۰۰	۹
۸۹٫۵۴	۰٫۲۶	۶۷٫۲۱	۹۲٫۵۶	۴۵	۴٫۵	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۰
۹۲٫۳۶	۰٫۱۹	۶۷٫۱	۹۲٫۴۷	۳۰	۶	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۱
۹۲٫۷۹	۰٫۱۸	۶۷٫۰۵	۹۲٫۱۵	۴۵	۶	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۲
۴۷٫۲۵	۱٫۲۷	۶۷٫۱۶	۹۵٫۵۳	۳۰	۴٫۵	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۳
۴۳٫۵۰	۱٫۳۶	۶۷٫۱۶	۹۵٫۵۴	۴۵	۴٫۵	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۴
۵۶٫۲۷	۱٫۰۶	۶۷٫۰۴	۹۴٫۸۸	۳۰	۶	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۵
۷۲٫۱۳	۰٫۶۹	۶۶٫۹۵	۹۲٫۹۲	۴۵	۶	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۶
۵۷٫۵۳	۱٫۰۲	۶۷	۹۲٫۳۲	۳۷٫۵	۵٫۲۵	۶۵۰	۶۵۰	۱۷
۶۰٫۲۱	۰٫۹۷	۶۶٫۸۵	۹۴٫۳۵	۳۷٫۵	۵٫۲۵	۶۵۰	۶۵۰	۱۸
۵۶٫۱۳	۱٫۰۶	۶۷٫۱	۹۵٫۱۹	۳۷٫۵	۵٫۲۵	۶۵۰	۶۵۰	۱۹

جدول ۴: جدول ANOVA مدل حذف گوگرد

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
					Prob > F	
Model	6960.31	5	1392.06	32.21	< 0.0001	significant
A-PAX	3721.92	1	3721.92	86.11	< 0.0001	
B-CuSo4	1032.50	1	1032.50	23.89	0.0001	
C-pH	176.96	1	176.96	4.09	0.0396	
AB	1739.52	1	1739.52	40.25	< 0.0001	
ABC	289.43	1	289.43	6.70	0.0121	
Curvature	46.91	1	0.03	0.001	0.9751	not significant
Residual	518.65	12	33.21			
Lack of Fit	389.73	10	38.97	8.830	0.1059	not significant
Pure Error	128.92	2	4.41			
Cor Total	7525.87	18				



شکل ۳: تاثیر عوامل مختلف بر حذف گوگرد از کنسانتره آهن (الف) تاثیر کلکتور، (ب) تاثیر فعال کننده سولفات مس، (ج) اندرکنش کلکتور و فعال کننده

اختلاف معنی دار قابل توجهی در مقدار درصد جامد و pH در محدوده‌های انتخابی مشاهده نشد، شرایط بهینه آزمایش‌ها با استفاده از ۱۰۰۰ گرم بر تن کلکتور، ۳۰۰ گرم بر سولفات مس و pH=6 و درصد جامد ۴۵٪ انتخاب و آزمایش‌های تکرار و تایید و نیز آزمایش‌های تکمیلی در این شرایط صورت پذیرفت. نتایج آزمایش تکرار در شرایط انتخابی، تایید کننده پیش‌بینی مدل بود که بالای ۹۰٪ گوگرد از کنسانتره آهن حذف شد.

با توجه به نتایج، آزمایش‌ها در شرایط بهینه گوگرد تا حدود ۰٫۲٪ کاهش داده شد؛ ولی از آنجاکه هدف از سولفورزدایی، کاهش عیار گوگرد در کنسانتره آهن تا زیر ۰٫۱ درصد بود، آزمایش‌های تکمیلی در شرایط بهینه انتخابی و با بررسی تاثیر دانه‌بندی، افزایش میزان کلکتور و اختلاط کف‌سازها صورت پذیرفت.

۳-۴- آزمایش‌های تکمیلی

براساس آزمایش‌های مقدماتی، شرایط بهینه آزمایش‌ها مطابق جدول ۵ حاصل شد. اما در این شرایط عیار حد گوگرد مورد نظر حاصل نشد و به همین دلیل در شرایط بهینه آزمایش‌ها، برخی از عوامل تغییر داده شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌های اولیه نشان داد که بیشترین میزان حذف گوگرد در حداکثر مقدار کلکتور و کمترین مقدار سولفات مس حاصل می‌شود. از این رو در چند سری از آزمایش‌ها، میزان کلکتور به ۱۱۰۰ گرم بر تن، افزایش و از طرفی میزان فعال کننده به ۲۰۰ گرم بر تن کاهش داده شد (شکل ۴). نتایج حاصل نشان داد که در شرایط مذکور، بیش از ۹۶٪ گوگرد توسط فلوتاسیون حذف شد و عیار گوگرد تا ۰٫۰۹ درصد کاهش یافت. بنابراین، نتایج افزایش مقدار کلکتور و کاهش سولفات مس را در pH=6 در درصد جامد ۴۵٪ نشان دادند و چون آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون با اندازه ذرات کنسانتره ۸۰ درصد ریزتر از ۹۰ میکرون انجام گرفتند، آزمایش‌هایی با اندازه ذرات ۷۶ و ۵۰ میکرون نیز صورت پذیرفتند. نتایج نشان داد که با خردایش بیشتر و کاهش اندازه ذرات کنسانتره، درصد حذف

جدول ۵: شرایط بهینه پیش‌بینی شده مدل براساس آزمایش‌های اولیه فلوتاسیون

	PAX تن/گرم	CuSo4 تن/گرم	pH	S.P (%)	Fe (%)	S (%)	S reduction (%)
پیش‌بینی مدل	1000	300	4.5	42	67.38	0.21	92.63
انتخابی	1000	300	6	45	67.04	0.21	90.75
تکرار	1000	300	6	45	66.58	0.17	93.57

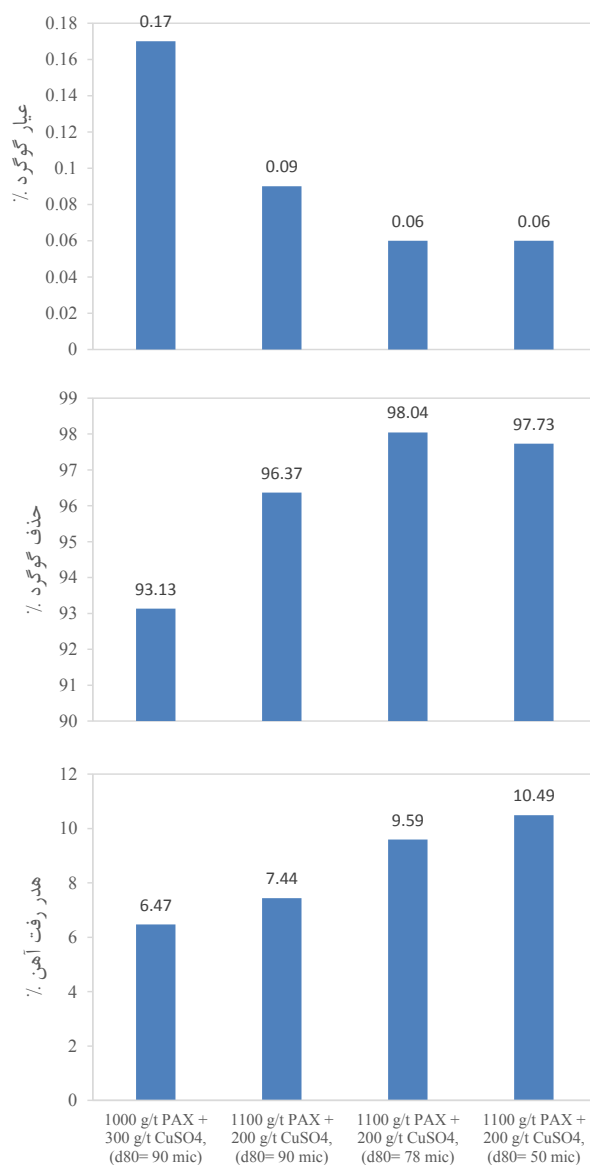
تن کف‌ساز MIBC، اندازه ذرات ۸۰٪ ریزتر از ۷۶ میکرون، pH=6 در درصد وزنی جامد ۴۵٪ حاصل شد.

در ادامه، با توجه به تنظیم pH به ۶، حدود ۸۰۰ گرم بر تن کنسانتره آهن، اسید سولفوریک مصرف می‌شد (بدون در نظر گرفتن آب برگشتی و با فرض اینکه اسید به آب خام اضافه شود). به همین منظور با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی تصمیم گرفته شد، آزمایش‌هایی در pH طبیعی پالپ (pH=8) و درصد وزنی جامد ۴۵٪ کنسانتره آهن صورت پذیرد. در کنار تغییر pH پالپ فلوتاسیون، اثر کف‌سازها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد به‌طور کلی اگر شرایط فلوتاسیون در pH طبیعی (۸) انجام شود، حداکثر ۸۷٪ کانی‌های سولفیدی آهن، می‌توانند حذف شوند که در این شرایط، عیار گوگرد در کنسانتره به کمتر از ۰/۴۱ درصد نمی‌رسد (شکل ۵)؛ در حالی که در همین شرایط و در pH=6، بیش از ۹۸٪ کانی‌های سولفیدی از کنسانتره حذف می‌شوند و عیار گوگرد تا ۰/۰۶ درصد هم می‌رسد. هرچند اثر فعال‌کنندگی یون‌های مس، جایگزینی این یون‌ها با یون‌های آهن در سطح پیروتیت عنوان شده است ولی بنا به مطالب بیان شده در بخش مقدمه، pH، نقش موثری در فعال‌سازی پیروتیت دارد و آماده‌سازی پالپ در شرایط اسیدی با استفاده از اسید سولفوریک، می‌تواند باعث حذف لایه‌های هیدروفیل اکسیدهای آهن از سطح پیروتیت شده و نرخ فلوتاسیون این کانی را افزایش دهد [۲۲،۷].

نتایج شکل ۵، بهبود حذف سولفور در صورت اختلاط کف‌سازهای MIBC و A65 را نیز نشان می‌دهد؛ این بهبود حذف گوگرد، در شرایط pH طبیعی بیشتر دیده می‌شود. در نتیجه، در صورت اختلاط کف‌سازهای MIBC و A65 (به نسبت یک‌به‌یک) در حضور ۱۱۰۰ گرم بر تن کلکتور، ۲۰۰ گرم بر تن سولفات مس، pH=6 و درصد جامد ۴۵٪، عیار گوگرد تا ۰/۰۴ درصد کاهش می‌یابد و در این شرایط ۹۸/۷۴ درصد گوگرد، قابل حذف از کنسانتره است.

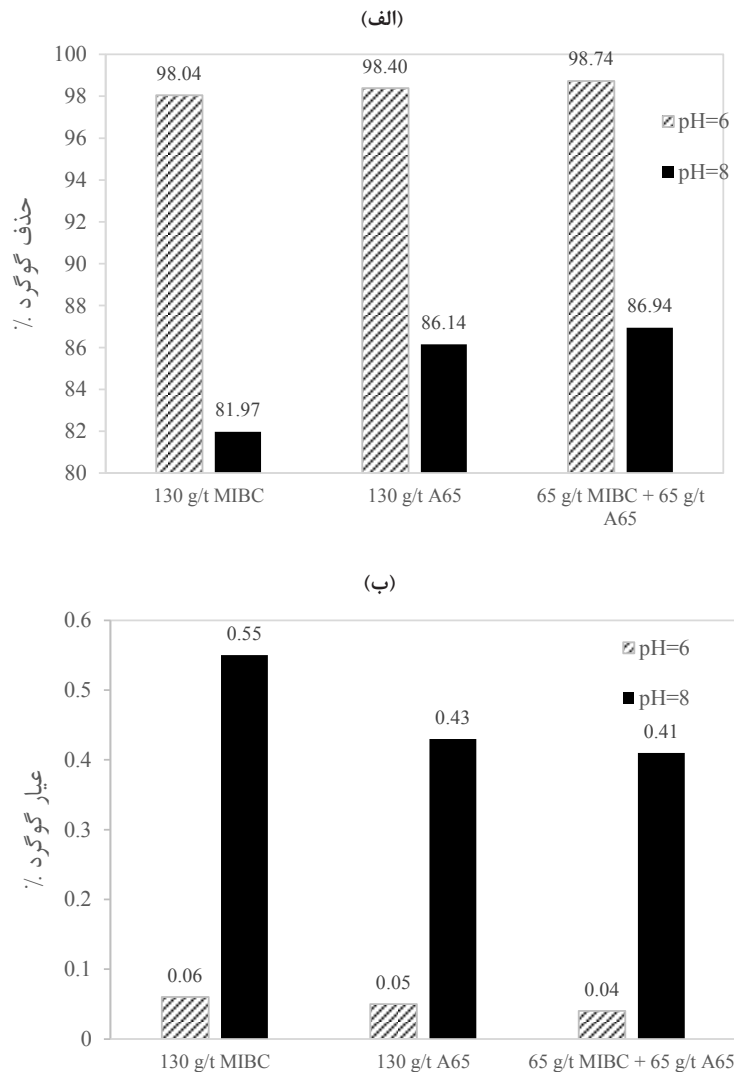
۳-۵- آزمایش سینتیکی

برای بررسی میزان حذف گوگرد و نیز هدررفت آهن، آزمایش سینتیکی در بازه‌های زمانی مختلف صورت پذیرفت. نتایج حاصل در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، در دو دقیقه اول فلوتاسیون، ۶۰٪ گوگرد شناور می‌شود و هدرروی آهن، ۴/۲ درصد است. پس از مدت زمان ۸ دقیقه، ۷۷/۵ درصد گوگرد شناور می‌شود. از زمان ۸



شکل ۴: تاثیر تغییر مقادیر مواد شیمیایی و اندازه ذرات کنسانتره بر عیار و درصد حذف گوگرد و هدررفت آهن بر شرایط آزمایش بهینه حاصل از آزمایش‌های فلوتاسیون اولیه (۲۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم، pH=6، درصد وزنی جامد ۴۵٪، ۱۳۰ گرم بر تن MIBC)

گوگرد افزایش و عیار گوگرد در کنسانتره تا ۰/۰۶ درصد کاهش می‌یابد. در مقابل با کاهش اندازه ذرات، هدررفت آهن به بخش شناور شده بیشتر می‌شود و تا ۱۰٪ نیز می‌رسد. این هدررفت آهن با ریزتر شدن اندازه کنسانتره، می‌تواند در اثر دنباله‌روی حباب‌های هوا باشد. در نهایت با توجه به نتایج، شرایط بهینه آزمایش‌ها در این قسمت با ۱۱۰۰ گرم بر تن کلکتور پتاسیم آمیل‌گزنات، ۲۰۰ گرم بر تن سولفات مس، ۱۳۰ گرم بر



شکل ۵: تاثیر pH طبیعی پالپ و اختلاط کفسارها بر الف) درصد حذف گوگرد، ب) عیار گوگرد (۱۱۰۰ گرم بر تن پتاسیم آمیل گزنات، ۲۰۰ گرم بر تن سولفت مس، ۲۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم، pH=6، درصد وزنی جامد ۴۵٪، $d_{80}=76 \text{ mic}$)

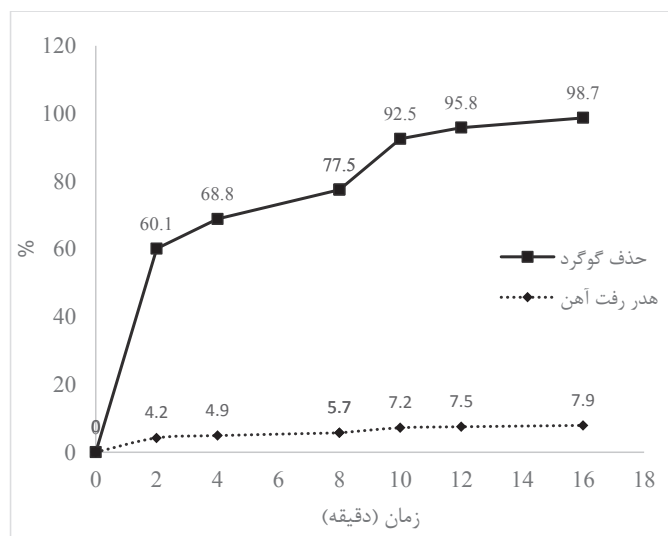
حدود ۴۷ درصد گوگرد موجود در خوراک اولیه در مدار صنعتی حذف نشده و وارد کنسانتره نهایی می‌شود. عیار گوگرد موجود در کنسانتره بسیار بیشتر از حد مجاز بوده و اکثراً در حدود ۲/۳ درصد است. به همین دلیل، در بازه‌های مختلف از کنسانتره نهایی نمونه برداری شد و آزمایش‌های دیویس تیوب، فلوتاسیون اولیه، تکمیلی و سنتیکی صورت پذیرفت. مطالعات کانی‌شناسی نشان داد که عمده گوگرد موجود در کنسانتره مربوط به پیروتیت و درصد کمی مربوط به پیریت‌های درگیر است.

در آزمایش‌های دیویس تیوب با تنظیم شدت میدان مغناطیسی به میزان ۵۰۰ گوس و با ریزتر کردن کنسانتره

تا ۱۰ دقیقه نیز افزایش نرخ شناورشدگی کانی‌های سولفیدی قابل مشاهده است که این افزایش مربوط به اضافه کردن مواد شیمیایی با توجه به توضیحات داده شده در بخش مواد و روش‌ها است. اضافه کردن کلکتور و فعال‌کننده و کف‌گیری به مدت دو دقیقه در این مرحله، میزان حذف گوگرد حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. پس از مدت زمان کف‌گیری (۱۶ دقیقه)، ۹۸٪ گوگرد از کنسانتره حذف می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نمونه برداری اولیه از مدار صنعتی کارخانه آهن همدان نشان داد وقتی کارخانه از معدن گلالی خوراک‌دهی می‌شود،



شکل ۶: میزان حذف جمعی گوگرد و هدر رفت آهن نسبت به زمان در آزمایش سینتیکی

۶- مراجع

- [1] Devaney, F. D. (1985). "Iron ore". Edited by: Weiss, N. L., SME Mineral Processing Handbook, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Section 20, 2-3.
- [2] Soltanmohamadi, V., Noaparart, M., Kohsari, A. H., and Zamani, F. (2011). "Influence of flotation parameters on decreasing sulfur and phosphorus content in the Golegohar iron ore concentrate". Physicochemical Problems of Mineral Processing, 46: 173-190.
- [3] Norrgran, D. A., and Mankosa, M. J. (2002). "Bench Scale and Pilot Plant Tests for Magnetic Concentration Circuit Design". Edited by: Mular, A. L., Haibe, D. N., and Barrett, D. J., Mineral Processing plant design, 1: 176-177.
- [4] Manouchehri, H. R. (2014). "Pyrrhotite flotation and its selectivity against pentlandite in the beneficiation of nickeliferous ores: An electrochemistry perspective". Minerals & Metallurgical Processing, 31: 115-125.

[۵] ارغوانی، ا.، حجتی، ا.، بنیسی، ص.؛ ۱۳۹۴؛ "کاهش میزان سولفورکنسانتره با بهبود کارایی مدار آسیا تر کارخانه فرآوری مجتمع سنگ آهن گل گهر". نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن ایران، دوره ۱۰، شماره ۲۷، ص ۶۷-۶۱.

- [6] He, M. F., Qin, W. Q., Li, W. Z., and Jiao, F. (2012). "Flotation performance of polymorphic pyrrhotite". Journal of Central South University, 19: 238-243.
- [7] Allison, S. A., and O'Connor, C. T. (2011). "An investigation into the flotation behaviour of pyrrhotite".

تا ۴۳ میکرون، امکان حذف حدود ۳۲٪ گوگرد از کنسانتره مشاهده شد و در این شرایط، عیار گوگرد به کمتر از ۱٫۷ درصد کاهش نیافت.

بهینه‌سازی شرایط آزمایش‌ها به روش فلوتاسیون در دو مرحله اولیه و تکمیلی، با استفاده از میزان مواد شیمیایی، درصد جامد، pH، اندازه ذرات کنسانتره، اختلاط کف‌سازها انجام شد. در نهایت در شرایط بهینه آزمایش‌ها با مصرف ۱۱۰۰ گرم بر تن کلکتور پتاسیم آمیل‌گزنتات، ۲۰۰ گرم بر تن سولفات مس، ۲۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم، ۶۵ گرم بر تن از هر کدام از کف‌سازها MIBC و A65، در pH=6 و درصد وزنی جامد ۴۵٪، موفق به حذف بیش از ۹۸٪ گوگرد از کنسانتره پرگوگرد آهن شد. به گونه ای که عیار گوگرد پس از حذف توسط روش فلوتاسیون در شرایط مذکور از ۲٫۳ به ۰٫۴ درصد رسید. نتایج حاصل، امکان موفقیت‌آمیز حذف گوگرد به روش فلوتاسیون را در مقیاس آزمایشگاهی با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی نشان داد؛ به گونه‌ای که کنسانتره تولیدی مطابق استاندارد مورد نیاز واحدهای ذوب (عیار گوگرد زیر ۰٫۱ درصد) بود.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از مجموعه شرکت صابنور، به‌ویژه رییس مجتمع سنگ آهن همدان جناب آقای مهندس میرزایی و کارشناس فرآیند آقای مهندس بهمنی و سایر کارشناسان را دارند.

- "Froth flotation, A century of innovation". SME, 23-24.
- [19] Chandra, A. P., and Gerson, A. R. (2009). "A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite". *Advances in Colloid and Interface Science*, 145: 97-110.
- [20] Leppinen, J. O. (1990). "FTIR and flotation investigation of the adsorption of ethyl xanthate on activated and non-activated sulfide minerals". *International Journal of Mineral Processing*, 30(3-4): 245-263.
- [21] Chang, C. S., Cooke, S. R. B., and Iwasaki, I. (1954). "Flotation characteristics of pyrrhotite with xanthate". *Transactions AIME, Mining Engineering*, 199: 209-217.
- [22] Liu, J., Li, E. L., Jiang, K., Li, Y. J., and Han, Y. (2018). "Effect of acidic activators on the flotation of oxidized pyrrhotite". *Minerals Engineering*, 120: 75-79.
- [23] Rezaee, B., Sarvi, A., Eslamian, A., Jebraeli, S. M., and Zabihi, A. (2017). "Sulfur reduction in Sangan iron ore by flotation". *MEC, E3S Web of Conferences*, 18: 1-4.
- [24] Noiranta, G., Benzaazouaa, M., Kongoloa, M., Bussièrea, B., and Frenetteb, K. (2019). "Alternatives to xanthate collectors for the desulphurization of ores and tailings: Pyrite surface chemistry". *Colloids and Surfaces Colloids and Surfaces*, 577: 333-346.
- [۲۵] کردستانی، م.، سام، ع.، اربابیان، م. ع.؛ ۱۹۹۱؛ "تعیین شرایط بهینه فلوتاسیون، جهت طراحی مدار سولفور و کلر زدایی از کنسانتره تر کارخانه منتیت مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر". اولین کنفرانس فناوری‌های معدنکاری، دانشگاه یزد، ۶ صفحه.
- [۲۶] حق محمدی پسند، ر.؛ ۱۳۹۶؛ "کاهش سولفور موجود در کنسانتره کارخانه همدان به روش فلوتاسیون". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.
- [27] Rosenblum, S., and Brownfield, I. K. (2000). "Magnetic Susceptibilities of Minerals". U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- International Journal of Mineral Processing, 98: 202-207.
- [8] Yu J., Ge, Y., and Cai, X. (2016). "The Desulfurization of Magnetite Ore by Flotation with a Mixture of Xanthate and Dixanthogen". *Minerals*, 6: 1-13.
- [9] Arvidson, B., Klemetti, M., Knutinen, T., Kuusisto, M., Man, Y. T., and Hughes-Narborough, C. (2013). "Flotation of pyrrhotite to produce magnetite concentrates with a sulphur level below 0.05% w/w". *Minerals Engineering*, 50-51: 4-12.
- [10] Faraj, H., Taheri, B., and Abdollahzadeh, A. A. (2017). "Desulfurization of the Gole Gohar iron ore by controlling the electrochemical conditions of pulp". *Iranian Journal of Mining Engineering*, 12: 27-34.
- [11] Miller Li, J. D., Davidtz, J. J. C., and Vos, F. (2005). "A review of pyrrhotite flotation chemistry in the processing of PGM ores". *Minerals Engineering*, 18: 855-865
- [12] Adam, K., and Iwasaki, I. (1984). "Pyrrhotite grinding media interaction and its effect on floatability at different applied potentials". *Minerals and Metallurgical Processing*, 1(1): 81-87.
- [13] Adam, K., Natarajan, K. A., and Iwasaki, I. (1984). "Grinding media wear and its effect on the flotation of sulphide minerals". *International Journal of Mineral Processing* 12: 39-54.
- [14] Nicholson, R. V., and Scharer, J. M. (1994). "Laboratory studies of pyrrhotite oxidation kinetics". In Alpers, C. N., and Blowes, D. W. (Eds.), *Environmental Geochemistry of Sulphide Oxidation*, ACS Symposium Series, Washington, DC, 550: 1430-.
- [15] Belzile, N., Chen, Y. W., Cai, M. F., and Li, Y. (2004). "A review on pyrrhotite oxidation". *Journal of Geochemical Exploration*, 84: 6576-.
- [16] Qi, C., Liu, J., Malainey, J., Kormos, L. J., Coffin, J., Deredin, C., Liu, Q., and Fragomeni, D. (2019). "The role of Cu ion activation and surface oxidation for polymorphic pyrrhotite flotation performance in Strathcona Mill". *Minerals Engineering*, 134: 87-96
- [17] Bultovich, S. M. (2010). "Handbook of flotation reagent". Elsevier, Amsterdam, 2: 19- 26.
- [18] Fuerstenau, M. C., Jameson, G., and Yoon, R. H. (2007).

¹ ELTRA

² Eriez



An Investigation on Removing Sulfur from Hamadan Magnetite Concentrate

Haghmohamadipasan R.¹, Vazifeh Mehrabani J.^{2*}, Pourghahramani P.³

1- M.Sc, Dept. of Mineral Processing, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Sahand New Town, Tabriz, Iran

raminhaghpasand@yahoo.com

2- Assistant Professor, Dept. of Mineral Processing, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Sahand New Town, Tabriz, Iran

mehrabani@sut.ac.ir

3- Professor, Dept. of Mineral Processing, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Sahand New Town, Tabriz, Iran

pourghahramani@sut.ac.ir

(Received: 23 Sep. 2019, Accepted: 25 Jan. 2020)

Abstract: In the concentration plant of Hamadan, magnetite concentrate is produced by low intensity magnetic separators (LIMS). As a result, 47% of feed sulfur was recovered in magnetite concentrate, keeping sulfur at higher content than that is commercially desired. Mineralogical investigations revealed that Pyrrhotite and Pyrite are the most abundant sulfur minerals, respectively. Davis Tube investigations indicated that by decreasing magnetic field intensity and particles size, sulfur content in magnetite concentrate could be decreased to 1.7%, which is still much more than desired. Further investigations were performed using flotation method and based on statistical design. Modelling and analysis of design data revealed that the dosage of collector and activator and their interaction have statistically significant effects on the process with 95% confidence level. It was found that the optimum condition of removing sulfur would be achieved using 1100 g/t of Potassium amyl xanthate (collector), 200 g/t of copper sulfate (activator), 65 g/t MIBC and 65 g/t of A65 (frothers), at pH=6 and solid percent of 45%. At the given condition, 98% of sulfur in magnetite concentrate (2.3% sulfur) was successfully removed and the product with 0.04% sulfur was obtained.

Keywords: Magnetite Concentrate, Sulfur, Flotation, Pyrrhotite.

INTRODUCTION

Iron concentrate should often have at least 62% Fe with minimum impurities such as silica, sulfur and phosphor. It is recommended that sulfur content in iron concentrate must be less than 0.1% to avoid severe process problematic while iron smelting process [1-2]. Sufficiently removal of sulfur by low intensity magnetic separators is often impossible when Pyrrhotite mineral in the form of monoclinic lattice presents as source of sulphur. This is due to, Pyrrhotite is a ferromagnetic mineral which is quit similar to magnetite [3-4].



Flotation is a well-established economical approach for Pyrrhotite removal from magnetite concentrate. However, it is well-known that Pyrrhotite has low flotation kinetics and therefore, the activation of Pyrrhotite surface is required before the flotation. Generally, copper sulphate is used as activator in Pyrrhotite flotation [5-8].

The objective of this study was to decrease sulfur content in Hamadan magnetite concentration plant. Magnetic separations as well as flotation were applied to removing sulfur in the forms of Pyrrhotite and Pyrite minerals.

MATERIALS AND METHODS

A representative sample of magnetite concentrate was collected from Hamadan iron plant. The chemical analysis of the sample indicated that the magnetite concentrate comprise of 66% Fe and 2.3% S. Magnetite and Pyrrhotite were detected as the main minerals of iron and sulfur, respectively. Magnetic separation tests were performed using Davis Tube with different magnetic intensity and particles size. Flotation test were conducted using a Denver flotation cell machine.

Results and discussion

Figure 1 presents iron and sulfur distributions in different flows of process. It was observed that 47% of total sulfur in feed transferred to the final magnetite concentrate.

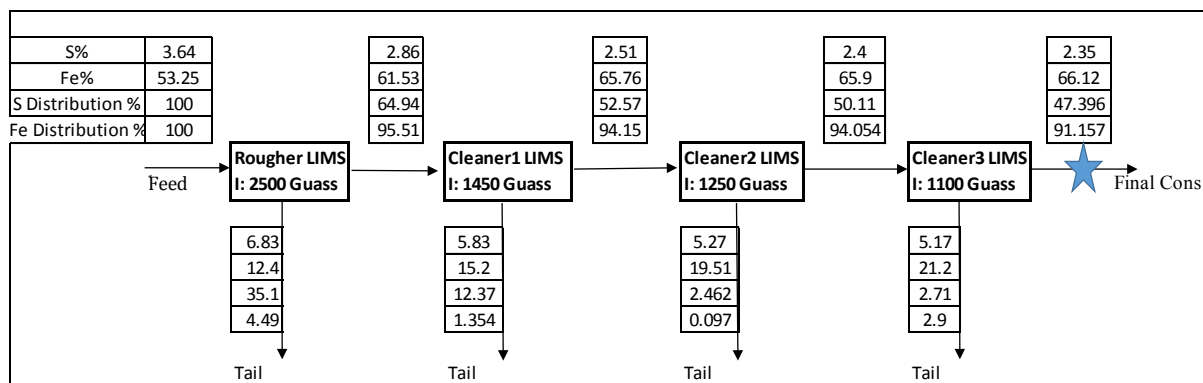


Figure 1. Distributions of sulfur and iron in the Hamadan iron concentration plant (A representative sample was collected from the final magnetite concentrate, as shown by Star.)

The obtained results from magnetic separation test using Davis Tube are summarized in Table 1. It is clear that 32.7% of sulfur can be removed from the magnetite concentrate by employing magnetic intensity of 500 Guass on particles size of $d_{80} = 43 \mu\text{m}$. With increase of particles size and magnetic intensity, the removal of sulfur is vanished. As a result, less than 16% of total sulfur would be removed from the magnetite concentrate. At the best given condition in Table 1, sulfur assay decreased to 1.7% which is still much more than desired level. It is pointed out that removing of Pyrrhotite, as main sulfur source, is practically

Table 1. The results obtained from magnetic separation using Davis Tube

No.	Magnetic Intensity (Guass)	d_{80} (μm)	S (%)	Fe (%)	Rate of concentration (C/F), %	Reduction of Sulfur (%)	Fe loss (%)
1	500	90	1.94	68.18	95.01	18.80	1.76
2	750	90	1.96	68.15	95.77	17.31	1.02
3	1100	90	1.97	68.14	95.80	16.86	1.00
4	500	43	1.70	68.70	89.87	32.7	6.36
5	750	43	1.75	68.50	91.21	29.68	5.24
6	1100	43	1.80	68.30	92.40	26.73	4.29

impossible using magnetic separation method.

Further investigations were made by flotation method to decrease sulfur level in the magnetite concentrate. It was found that by decreasing pH from 8 to 6, removing of sulfur improved significantly (Figure 2). In addition, using a mixture of MIBC and A65 frothers resulted in more sulfur reduction. Using an statistically desing analysis it was found that more than 98% of sulfur can be removed successfully by using 1100 g/t of PAX (Potassium Amyl Xanthate), 200 of g/t copper sulfate, 200of g/t sodium silicate and adjusting solid percent at 45% and pH=6.

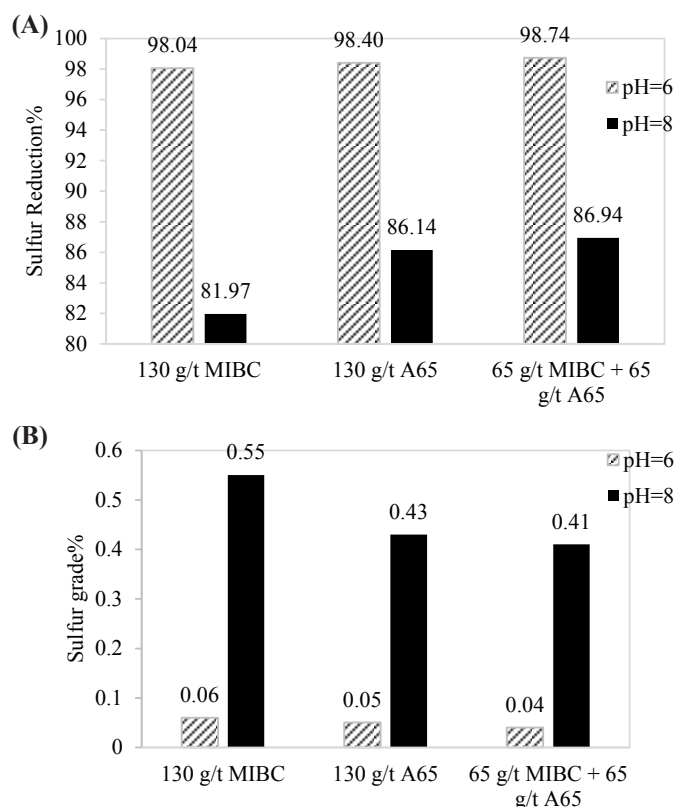


Figure 2. Effects of pH and combination of frothers on sulfur reduction, **A:** Sulfur reduction percent, **B:** sulfur grade (using 1100 g/t of PAX, 200 g/t of copper sulfate, 200 of g/t sodium silicate, solid percent of 45%, pH=6 and $d_{80}=76$ mic)

CONCLUSION

From current study it can be concluded that sulfur in Hamadan magnetite concentrate can not be removed fairly using magnetic separation. In contrast, by employing floatation approach sulfur in the form of pyrrhotite is successfully decreased to desired level and still to lower than that, resulting in decreasing sulfur from 2.3% in floatation feed to 0.04% in magnetite concentrate.

REFERENCES

- [1] Devaney, F. D. (1985). "Iron ore". Edited by: Weiss, N. L., SME Mineral Processing Handbook, Vol. 2., Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Section 20, 2-3.
- [2] Soltanmohamadi, V., Noaparati, M., Kohsari, A. H., and Zamani, F. (2011). "Influence of flotation parameters on decreasing sulfur and phosphorus content in the Gole-gohar iron ore concentrate". Physicochemical Problems of Mineral Processing, 46:173-190.
- [3] Norrgran, D. A., and Mankosa, M. J. (2002). "Bench Scale and Pilot Plant Tests for Magnetic Concentration Circuit Design". Edited by: Mular, A. L., Haibe, D.N., and Barrett, D. J., Mineral Processing Plant Design, 1:176-177.

- [4] Manouchehri, H. R., (2014). "*Pyrrhotite flotation and its selectivity against pentlandite in the beneficiation of nickeliferous ores: An electrochemistry perspective*". Minerals & Metallurgical Processing, 31: 115-125.
- [5] Allison, S. A., and O'Connor, C. T. (2011). "*An investigation into the flotation behaviour of pyrrhotite*". International Journal of Mineral Processing, 98: 202-207.
- [6] Bultovich, S. M. (2010). "*Handbook of flotation reagent*". Elsevier, Amsterdam, 2: 19- 26.
- [7] Fuerstenau, M. C., Jameson, G., and Yoon, R. H. (2007). "*Froth flotation , A century of innovation*". SME, 23-24.
- [8] Chandra, A. P., and Gerson, A. R. (2009). "*A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite*". Advances in Colloid and Interface Science, 145: 97-110.