سولفورزدایی از کنسانتره‌های مغناطیسی آهن به روش فلوتاسیون معکوس

مهران غلامی[1]، سید محمد سید علیزاده گنجی[2*]

۱-کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه لرستان: Mehrangholami280@yahoo.com

۲*-دانشیار، گروه فرآوری، دانشگاه لرستان، گروه معدن: sms_ag@yahoo.com و Ganji.m@lu.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

چکیده

مجتمع معدنی سراب یکی از تولیدکنندگان کنسانتره آهن در استان کردستان است و در بخش حسن آباد یاسوکند شهرستان بیجار واقع شده‌است. d_{80} محصولات کنسانتره جدایش مغناطیسی دارای ابعادی حدود ۴۲/۳۸ میکرون بوده است و میانگین‌های عیار گوگرد و عیار آهن آن به ترتیب حدود ۷/۲ و حدود ۶۳/۲۴ می‌باشد. نتایج XRD نشان داد که این کنسانتره از کانی‌های مگنتیت، پیروتیت، پیریت، گروسولار، سرپانتین و دولومیت تشکیل شده است. وجود گوگرد به صورت کانی‌های پیروتیت و پیریت، انعطاف‌پذیری و مقاومت فولاد را کاهش می‌دهد و باعث شکنندگی فولاد می‌شود، لذا برای حذف گوگرد موجود در کنسانتره از روش فلوتاسیون معکوس استفاده شده است و پارامترهایی مانند مقادیر کلکتور، کف‌ساز، درصد جامد پالپ، فعال‌کننده و pH به روش طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده در شرایط بهینه نشان می‌دهد تحت شرایط غلظت آمیل گزنتات پتاسیم ۱۳۱۵ گرم بر تن، pH حدود ۴/۵، غلظت کف‌ساز حدود ۱۲۶ گرم بر تن، درصد جامد پالپ ۳۵ درصد و غلظت فعال کننده ۲۱۰ گرم بر تن عیار سولفور از ۷/۲ به ۴/۱ درصد کاهش می‌یابد. قبل از عملیات فلوتاسیون با انجام فعال‌سازی سطوح پیروتیت بوسیله اسید اگزالیک با غلظت ۰/۰۰۴ مول بر لیتر در آب به مدت یک ساعت می‌توان عیار سولفور کنسانتره مغناطیسی را به روش فلوتاسیون معکوس (تحت شرایط بهینه) از ۷/۲ درصد به ۱/۲ درصد رساند و حدود ۸۳/۳۳ درصد از سولفور موجود در کنسانتره مغناطیسی را حذف کرد به عبارتی قبل از عملیات فلوتاسیون تنها با آماده سازی نمونه کنسانتره مغناطیسی بوسیله اسید اگزالیک می‌توان درصد حذف سولفور موجود در کنسانتره مغناطیسی را به اندازه ۲/۹ درصد بهبود بخشید.

کلمات کلیدی: کنسانتره مغناطیسی، پیروتیت، فلوتاسیون معکوس، حذف گوگرد، طراحی آزمایش

۱-مقدمه

بیش از ۳۰۰ نوع کانی آهن در پوسته زمین وجود دارد و کانی‌های مگنتیت (Fe_3O_4)، هماتیت (Fe_2O_3)، لیمونیت ($FeOOH$)، سیدریت ($FeCO_3$) و ایلمنیت ($FeTiO_3$) از اهمیت بیشتری برخوردار هستند [۱]. گوگرد به عنوان یکی از ناخالصی‌های اصلی و مضر موجود در کانسنگ‌های آهن بیشتر در فرم کانی‌هایی مانند پیروتیت و پیریت وجود دارد و وجود آن انعطاف‌پذیری و مقاومت فولاد را کاهش داده و باعث شکنندگی فولاد می‌شود. با افزایش میزان گوگرد، میزان سنگ‌آهک

و کک مورد نیاز در فرآیند ذوب افزایش می‌یابد. گازهای مضر مانند دی‌اکسید گوگرد (SO_2) نیز در کوره ذوب تولید و انتشار می‌یابد و باعث باران‌های اسیدی و آلودگی هوا می‌شود[۲،۳]. به عبارتی وجود ناخالصی‌ها در کنسانتره آهن می‌تواند بر خواص مکانیکی و شیمیایی فولاد تولید شده اثرات منفی بگذارد به همین دلیل کنسانتره آهن مورد استفاده در صنعت فولاد باید طبق جدول (۱) استانداردهای لازم را از نظر مقدار ناخالصی‌ها داشته باشد[۴].

جدول (۱) استاندارد لازم برای حد مجاز ناخالصی‌های موجود در کنسانتره آهن مورد استفاده در صنعت فولاد

Table (1) Required standards for impurity limits in iron concentrate used in the steel industry

ناخالصی	عیار (درصد)
سولفور	۰/۱
سیلیس	۲
آلومینا	۲
فسفر	۰/۰۲
آرسنیک	۰/۷
تیتانیوم	۰/۲

پیروتیت یکی از سولفیدهای فراوان آهن است و دارای دو سیستم تبلور مونوکلینیک (Fe_7S_8) و هگزاگونال (Fe_9S_{10}) می‌باشد. درصد اتمی پایین گوگرد پیروتیت نوع مونوکلینیک نسبت به نوع هگزاگونال باعث شده است تا حساسیت مغناطیسی نوع پیروتیت مونوکلینیک بالا باشد. از نظر خواص مغناطیسی، پیروتیت مونوکلینیک، فرومغناطیس و نوع هگزاگونال آن، پارامغناطیس است به همین دلیل کانی پیروتیت (مونوکلینیک) بوسیله جداکننده‌های مغناطیسی همراه دیگر کانی‌های مغناطیسی آهن جدا می‌گردد و وارد کنسانتره آهن می‌شود و درصد سولفور کنسانتره مغناطیسی افزایش می‌یابد[۵] . جداکننده‌های مغناطیسی شدت پایین در پرعیارسازی و بازیابی کانی‌های فرو مغناطیسی (نوع شدت بالا برای جدایش مواد پارامغناطیس) موجود در کانسنگ آهن دارای کارآیی بالایی هستند اما در جدایش گوگرد زمانی که کانی آن پیروتیت مونوکلینیک باشد از کارآیی خوبی برخوردار نیستند[۶] بنابراین استفاده از روش فلوتاسیون معکوس، برای حذف و کاهش سولفور موجود در کنسانتره آهن ضروری است. در فلوتاسیون معکوس آهن جهت حذف سولفیدها عمدتاً از کلکتورهای آنیونی سولفیدریل مانند گزنتات‌ها استفاده می‌شود [۷]. پیروتیت خاصیت آبرانی طبیعی دارد اما هنگامی که در معرض هوا قرار می‌گیرد، سطح پیروتیت به سرعت اکسید می‌شود و با افزایش زمان اکسیداسیون، لایه‌ای از هیدروکسید آهن (III) روی سطح پیروتیت تشکیل می‌شود که مانع از شناورسازی طبیعی پیروتیت می‌شود[۸]. برخی از محققان بیان کرده‌اند که سرعت اکسیداسیون پیروتیت ۱۰۰ برابر بیشتر از پیریت است و یون‌های فریک و اکسیژن، دو عامل مهم در فرآیند اکسیداسیون پیروتیت هستند. همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نرخ اکسیداسیون سطح پیروتیت منوکلینیک بیشتر از هگزاگونال است و همین امر منجر به کاهش نرخ فلوتاسیون پیروتیت منوکلینیک می‌شود[۹،۱۰]. برای افزایش نرخ شناورسازی کانی‌های سولفیدی در فلوتاسیون معکوس با استفاده از کلکتورهای گزنتات، یون‌های مس، سرب، نقره و دیگر فلزات به‌عنوان فعال‌کننده به کار می‌روند [۱۱]. در فلوتاسیون معکوس آهن از یون‌های مس برای فعال‌سازی پیروتیت

ACCEPTED MANUSCRIPT

استفاده می‌شود در این روش یون‌های مس بر سطح پیروتیت جذب می‌شوند و با آن واکنش داده و منجر به تشکیل سولفید مس (CuS) می‌شود. واکنش جذب و تشکیل سولفید مس به صورت فرمول (۱) است.

$$FeS + Cu^{2+} \rightarrow CuS + Fe^{2+} \quad (۱)$$

محدوده فعال‌سازی پیروتیت به وسیله یون‌های مس در محیط‌های اسیدی نسبت به محیط‌های قلیایی وسیع‌تر است. بر اساس مطالعات انجام گرفته بهترین pH برای شناورسازی پیروتیت در محدوده ۴/۵ تا ۶ است که در مورد انواع کلکتورهای مختلف نیز صدق می‌کند[۱۲]. مکانیزم اصلی کاهش شناورسازی پیروتیت تشکیل گونه‌های هیدروکسید یا اکسید و سولفات آهن از طریق واکنش احیای اکسیژن در سطح کاتدی پیروتیت می‌باشد که باعث تشکیل پوششی از هیدروکسید آهن بر روی سطح پیروتیت و کاهش قابلیت شناورسازی آن می‌شود. واکنش‌های این فرآیندها به صورت روابط شماره (۲) تا (۵) گزارش شده است[۱۳].

$$0.5O_2 + H_2O + 2e \leftrightarrow 2OH^- \quad (۲)$$

$$2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2 \quad (۳)$$

$$FeS \leftrightarrow Fe^{2+} + S^{2-} \leftrightarrow Fe_2O(OH)_3 \quad (۴)$$

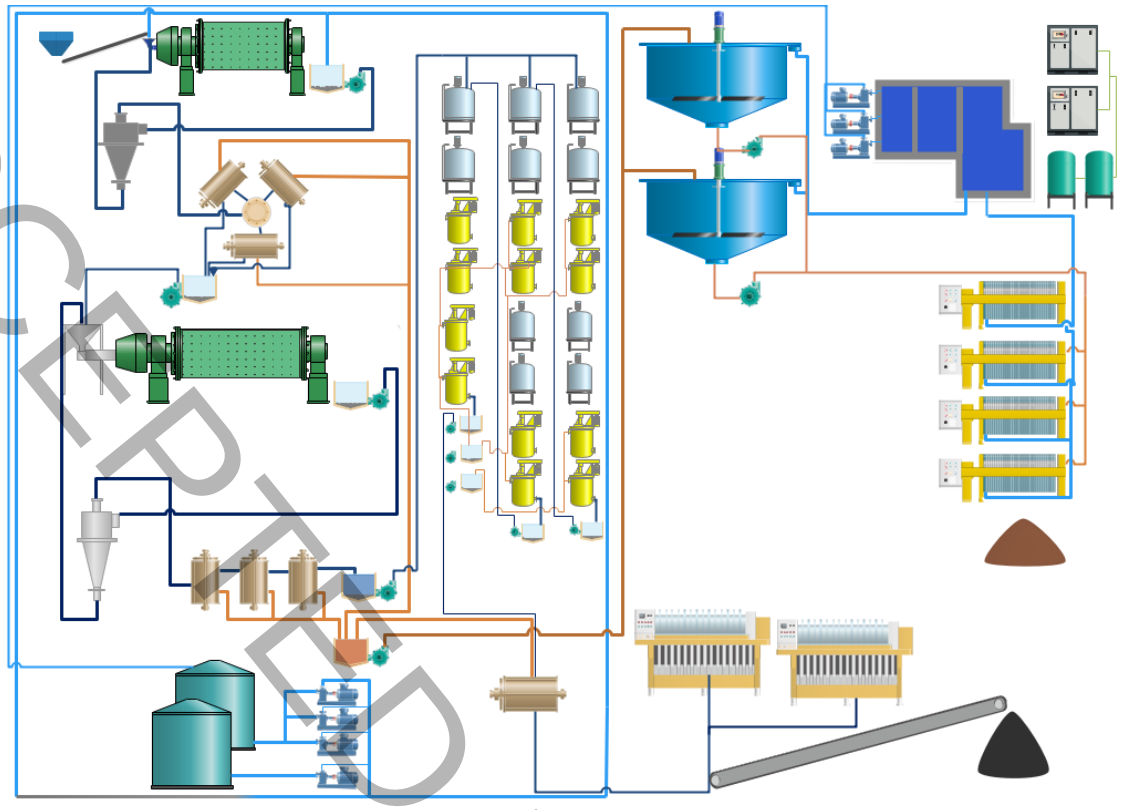
$$FeS \leftrightarrow Fe^{2+} + S^{2-} \leftrightarrow FeO(OH) \leftrightarrow Fe(OH)SO_4 \quad (۵)$$

آبادی پور(۱۳۹۰) بهینه‌سازی عوامل موثر بر فلوتاسیون را بر روی خط فرآوری گل گهر انجام داد و در pH بین ۲ تا ۴ با درصد جامد پالپ ۳۵ درصد تحت شرایط مصرف بهینه کلکتور آمیل گزنتات پتاسیم (PAX) ۸۰ گرم بر تن و کف‌ساز (MIBC) ۱۰۰ گرم بر تن ۸۷ درصد گوگرد کنسانتره حذف گردید[۱۴]. شجاع و همکاران (۱۳۹۶) تحقیقاتی بر روی امکان کاهش گوگرد کانسنگ‌های معدن سورک انجام دادند و در شرایط بهینه کلکتور آمیل گزنتات پتاسیم ۱۰۰ گرم بر تن، زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه به یک کنسانتره‌ای با عیار و بازیابی آهن به ترتیب ۶۳ و ۹۶ درصد و عیار گوگرد ۰/۱ درصد دست یافتند[۱۵]. دینگ و همکاران (۲۰۱۳) عملیات سولفورزدایی بر روی خوراک ورودی (عیار آهن ۳۵/۱۰ درصد و عیار گوگرد از ۱/۱۹ درصد) بوسیله جداکننده مغناطیسی و فلوتاسیون معکوس انجام دادند و در نهایت به یک کنسانتره با عیار و بازیابی آهن به ترتیب ۶۶ درصد و ۷۶/۵۵ درصد با عیار گوگرد ۰/۱۵ درصد دست یافتند[۱۶]. ژائو و همکاران (۲۰۲۱) بر روی مگنتیت پرسولفید عملیات فلوتاسیون انجام دادند و عیار گوگرد کنسانتره مگنتیت از ۳/۲۰ درصد به ۰/۱۸ درصد کاهش و عیار آهن از ۵۷/۲۹ درصد به ۷۱/۱۷ درصد افزایش یافت[۱۷]. منگ و همکاران (۲۰۲۳) در فلوتاسیون معکوس از فعال کننده اسیدی برای حذف گوگرد موجود در کنسانتره آهن استفاده کردند و در نهایت میزان گوگرد در کنسانتره از ۴/۵ درصد به ۰/۱۸ درصد کاهش یافت[۱۸]. صادقی (۱۴۰۲) بر روی تاثیر ساختار کریستالی پیروتیت در حذف گوگرد از کنسانتره آهن تحقیقاتی انجام داد و دریافت که در حذف پیروتیت‌های مونوکلینیک جدایش مغناطیسی کارآیی ندارد و با انجام فلوتاسیون معکوس بوسیله مواد شیمیایی مانند کلکتور های SIPX، PAX، بازداشت‌کننده سیلیکات سدیم، فعال‌کننده سولفات مس و کف‌ساز MIBC حدود ۵۰ درصد از گوگرد موجود در کنسانتره نهایی را حذف کند[۱۹].

ACCEPTED MANUSCRIPT

مجتمع صنعتی و معدنی سراب یکی از تولیدکنندگان کنسانتره آهن در استان کردستان می‌باشد که در بخش حسن آباد یاسوکند شهرستان بیجار واقع شده است. مدار تولید کنسانتره کارخانه فاز ۲ سنگ آهن سراب از چهار بخش خردایش اولیه، خردایش نهایی، جدایش و آبگیری تشکیل شده است. در بخش جدایش، محصول آسیای گلوله‌ای اولیه ابتدا وارد سه جداکننده مغناطیسی تر شدت متوسط (۲۰۰۰ گوس) مرحله کوبر می‌شود. هدف این بخش، پیش عیارکنی و جدا کردن ذراتی است که خاصیت مغناطیسی ندارند. این مواد به مخزن باطله نهایی ارسال می‌شود در نتیجه ظرفیت و عیار خوراک مراحل بعدی افزایش پیدا می‌کند. بخش کنسانتره (مواد با خاصیت مغناطیسی کم تا زیاد) جهت خردایش مجدد به آسیا گلوله‌ای ثانویه منتقل می‌شود. خروجی آسیای گلوله‌ای ثانویه برای طبقه بندی به هیدروسیکلون شماره دو منتقل شده که ته ریز هیدروسیکلون (ذرات درشت و قفل شده) برای رسیدن به درجه آزادی مطلوب به آسیای گلوله‌ای و سرریز هیدروسیکلون برای مرحله اولیه جدایش ارسال می‌گردد. کنسانتره این مرحله وارد جداکننده مغناطیسی‌تر شدت پایین(۱۸۰۰گوس) مرحله ششو می‌شود سپس کنسانتره این مرحله برای رسیدن به عیار مد نظر وارد جداکننده‌های مغناطیسی شدت پایین(۱۲۰۰و ۱۰۰۰گوس) مرحله شستشوی نهایی می شود، کنسانتره نهایی برای سولفورزدایی وارد ۱۲ عدد سلول فلوتاسیون می‌شود. فلوتاسیون در این مجموعه از نوع معکوس می‌باشد بدین منظور که سولفور شناور شده و مواد با ارزش (کنسانتره آهن) به عنوان باطله سلول از آخرین سلول خارج می‌گردد. باطله پرعیار کنی اولیه، شستشو و شستشوی نهایی جهت آبگیری و ارسال به تیکنر باطله وارد مخزن مربوطه می‌شود. کنسانتره آهن پس از رسیدن به حد مجاز عیار سولفور برای آبگیری و ارسال به فیلتر دیسکی ابتدا وارد جداکننده مغناطیسی تر شدت پایین (۱۲۰۰گوس) می‌گردد که کنسانتره این بخش به عنوان کنسانتره نهایی به سمت فیلتر دیسکی و باطله این بخش به مخزن باطله نهایی ارسال می‌گرد (شکل۱).

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱ : شمای کلی مدار خط تولید کنسانتره فاز دو سنگ‌آهن سراب بیجار

Figure 1: Schematic diagram of the iron ore concentrate production line circuit (Phase II) at Sarab- Bijar.

بعد از عملیات خردایش کانسنگ‌های آهن بوسیله سنگ شکنی و آسیای گلوله‌ای عملیات پرعیارسازی بوسیله جدایش مغناطیسی‌تر انجام می‌گیرد و در نهایت یک کنسانتره مغناطیسی با مشخصات عیاری گوگرد ۷/۲ درصد و آهن۶۳/۳۴ درصد تولید می‌گردد. گوگرد موجود در کنسانتره مغناطیسی بیشتر از نوع پیروتیت بوده و جداکننده‌های مغناطیسی به دلیل مغناطیس بودن پیروتیت در عمل ناکارآمد بوده‌اند لذا برای حذف گوگرد موجود در کنسانتره از روش فلوتاسیون معکوس استفاده شده است و پارامترهایی مانند مقادیر کلکتور، کف‌ساز، درصد جامد پالپ، فعال‌کننده و pH به روش طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. از اینکه کانسنگ‌های آهن از چه کانی‌هایی تشکیل شده باشند و نحوه درگیری و درجه آزادی آنها چگونه باشد وکانی‌های سولفیدی از چه نوعی (پیریت یا پیروتیت) و با چه عیاری باشند بر روی نحوه انجام فلوتاسیون معکوس و نتایج آن تاثیرگذار است به همین دلیل بررسی پارامترهای موثر بر حذف پیروتیت به روش فلوتاسیون معکوس به دلیل اکسیدشوندگی بالای پیروتیت و درگیری با کانی‌های مگنیتیت در ابعاد زیر ۵۰ میکرون می‌تواند از نوع آوری‌های این تحقیق باشد.

۲-نمونه‌برداری و شناسایی نمونه

الف- نمونه‌برداری

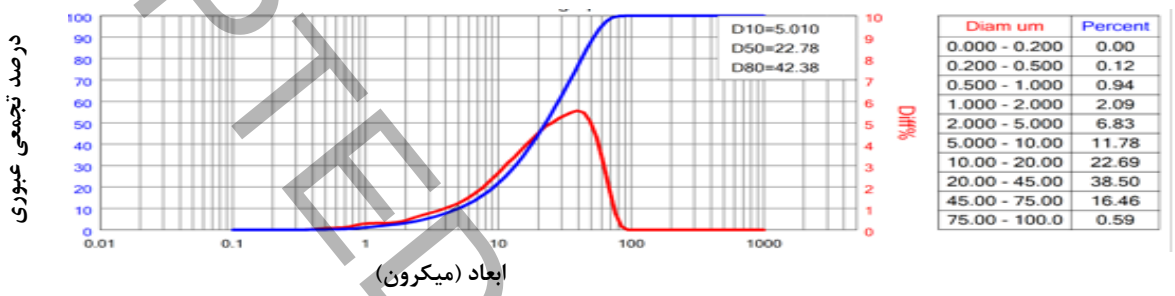
از قسمت کنسانتره نهایی جداکننده مغناطیسی در بازه‌های زمانی ۸ ساعته و به مدت ۸ روز نمونه‌گیری به عمل آمد. نمونه‌های اخذ شده ابتدا فیلتر و سپس در آون خشک گردید، نمونه‌های خشک شده برای همگن‌سازی با هم مخلوط گردید

ACCEPTED MANUSCRIPT

و بوسیله ریفل به نمونه‌های مورد آزمایش تقسیم و برای جلوگیری از هوازدگی بسته‌بندی شد. میانگین عیار آهن و گوگرد نمونه معرف برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون به ترتیب دارای ۶۳/۳۴ و ۷/۲ درصد بوده است.

ب- تجزیه سرندی

برای بررسی دانه‌بندی نمونه معرف در ابعاد ریزدانه از دستگاه آنالیزور لیزری استفاده شده است. بر اساس نتایج این آنالیز، مقدار d_{80} (اندازه ابعادی از سرند است که ۸۰ درصد ذرات از آن ابعاد سرند عبورمی کند) برابر با ۴۲/۳۸ میکرون به دست آمد. همچنین نتایج نشان می‌دهد تمامی نمونه دارای ابعادی کوچک‌تر از ۹۰ میکرون می‌باشد و ابعاد بین ۲۰ تا ۵۰ میکرون بیشترین درصد وزنی را به خود اختصاص می‌دهند. نتایج این آنالیز به‌صورت نمودار در شکل (۲) نشان داده شده است.



Diam um	Percent
0.000 - 0.200	0.00
0.200 - 0.500	0.12
0.500 - 1.000	0.94
1.000 - 2.000	2.09
2.000 - 5.000	6.83
5.000 - 10.00	11.78
10.00 - 20.00	22.69
20.00 - 45.00	38.50
45.00 - 75.00	16.46
75.00 - 100.0	0.59

شکل (۲) نمودار نتایج این آنالیز دانه بندی

Figure (2) shows the results of this grain size analysis.

پ- آنالیز XRD نمونه

به‌منظور شناسایی کانی‌های موجود در نمونه، از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. نتایج این آنالیز نشان می‌دهد کنسانتره مغناطیسی از کانی‌های مگنتیت، پیروتیت، پیریت، گروسولار، سرپانتین و دولومیت تشکیل شده است.

۳-مواد و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های فلوتاسیون بوسیله ماشین فلوتاسیون مکانیکی دنور (سرعت ۱۴۰۰ دور در دقیقه) و با حجم ۲ لیتری موجود در آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه لرستان مطابق شکل (۳) انجام گرفت. از آب‌های مقطر و شهری برای تنظیم درصد جامد پالپ و از اسید سولفوریک برای تنظیم pH استفاده شده است. برای اندازه‌گیری آهن از روش تیتراسیون و برای اندازه‌گیری گوگرد از دستگاه موجود در معدن سراب (ESI مدل WF-88) برای آنالیزها نمونه‌ها استفاده شده است.

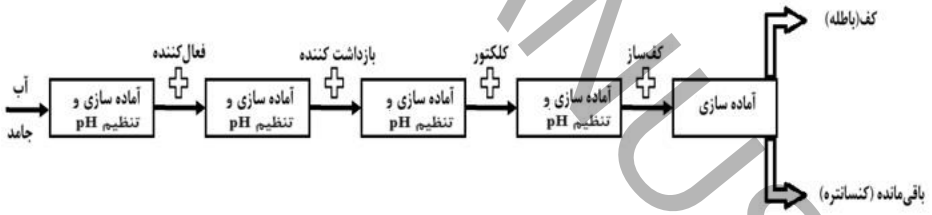
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل (۳) شمایی از انجام آزمایش فلوتاسیون بوسیله ماشین فلوتاسیون مکانیکی دنور

Figure (3) Schematic of the flotation test using a Denver mechanical flotation machine.

ترتیب نحوه آماده‌سازی تمامی آزمایش‌های فلوتاسیون تحت یک شرایط ثابت مطابق شکل (۴) (زمان آماده سازی اولیه پالپ برابر با ۴ دقیقه، زمان آماده سازی فعال کننده ۳ دقیقه، زمان آماده‌سازی بازداشت کننده ۳ دقیقه، زمان آماده سازی کلکتور ۴ دقیقه، زمان آماده سازی کف ساز ۱ دقیقه و زمان کف گیری ۴ دقیقه) انجام گرفت. مواد شیمیایی مورد استفاده در تمامی آزمایش‌های فلوتاسیون از آمیل گزنتات پتاسیم به عنوان کلکتور، سولفات مس به عنوان فعال کننده، سیلیکات سدیم به عنوان بازداشت کننده وMIBC به عنوان کف‌ساز استفاده شده است.



شکل (۴) نمودار ترتیب نحوه آماده‌سازی انجام آزمایش‌های فلوتاسیون معکوس

Figure (4) Flowchart of the preparation procedure for reverse flotation tests.

۴-طراحی آزمایش‌های فلوتاسیون معکوس آهن

۴-۱- تعیین پارامترها و طراحی شرایط انجام آزمایش

برای بررسی تأثیر هر پارامتر و اندرکنش بین پارامترها از روش طراحی آزمایش به کمک نرم‌افزار DX_7 انجام گرفت و پارامترهای مانند، غلظت کلکتور، pH، غلظت کف‌ساز، درصد جامد پالپ و غلظت فعال‌کننده به عنوان ۵ پارامتر مهم و تاثیرگذار انتخاب و سطوح پایین و بالای آن مطابق جدول (۲) انتخاب گردید.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول (۲) پارامتر ها و سطوح انتخاب شده

Table (2) Selected parameters and levels

پارامترها	واحد	نماد	سطح پایین	سطح بالا
کلکتور	گرم بر تن	A	۹۰۰	۱۷۰۰
pH		B	۵/۳	۵/۵
کف‌ساز	گرم بر تن	C	۱۱۰	۱۵۰
درصد جامد	درصد	D	۲۵	۴۵
فعال‌کننده	گرم بر تن	E	۱۸۰	۲۶۰

با در نظر گرفتن دو بار تکرار، مجموعاً ۲۹ آزمایش طراحی گردید. شرایط نحوه انجام این آزمایش‌ها و نتایج مربوط به درصد حذف سولفور به عنوان پاسخ هر آزمایش، در جدول (۳) ارائه شده است.

.

جدول (۳) شرایط نحوه انجام و درصد حذف سولفور

Table (3) Operating conditions and sulfur removal percentage

استاندارد	آزمایش	کلکتور (g/t)	pH	کف‌ساز (g/t)	درصد جامد پالپ	فعال‌کننده (g/t)	درصد حذف سولفور
۱	۶	۱۱۰۰	۴	۱۲۰	۳۰	۲۴۰	۳۹/۷۳
۲	۲۱	۱۵۰۰	۴	۱۲۰	۳۰	۲۰۰	۴۱/۳۷
۳	۲۴	۱۱۰۰	۵	۱۲۰	۳۰	۲۰۰	۳۹/۵۸
۴	۱	۱۵۰۰	۵	۱۲۰	۳۰	۲۴۰	۳۷/۴۱
۵	۱۸	۱۱۰۰	۴	۱۴۰	۳۰	۲۰۰	۴۱/۷۹
۶	۲۷	۱۵۰۰	۴	۱۴۰	۳۰	۲۴۰	۴۱/۸۸
۷	۱۹	۱۱۰۰	۵	۱۴۰	۳۰	۲۴۰	۳۷/۵۱
۸	۱۵	۱۵۰۰	۵	۱۴۰	۳۰	۲۰۰	۳۷/۳۴
۹	۱۶	۱۱۰۰	۴	۱۲۰	۴۰	۲۰۰	۳۱/۵۱
۱۰	۱۳	۱۵۰۰	۴	۱۲۰	۴۰	۲۴۰	۳۱/۴۳
۱۱	۴	۱۱۰۰	۵	۱۲۰	۴۰	۲۴۰	۳۱/۲۸
۱۲	۲۰	۱۵۰۰	۵	۱۲۰	۴۰	۲۰۰	۳۱/۱۴
۱۳	۱۲	۱۱۰۰	۴	۱۴۰	۴۰	۲۴۰	۳۵/۰۵
۱۴	۲۲	۱۵۰۰	۴	۱۴۰	۴۰	۲۰۰	۳۲/۳۸
۱۵	۱۰	۱۱۰۰	۵	۱۴۰	۴۰	۲۰۰	۳۵/۱۴
۱۶	۵	۱۵۰۰	۵	۱۴۰	۴۰	۲۴۰	۳۲/۶۴
۱۷	۲۵	۹۰۰	۴/۵	۱۳۰	۳۵	۲۲۰	۳۸/۲۵
۱۸	۲۸	۱۷۰۰	۴/۵	۱۳۰	۳۵	۲۲۰	۳۸/۴۲
۱۹	۸	۱۳۰۰	۳/۵	۱۳۰	۳۵	۲۲۰	۴۱/۱۸
۲۰	۲۹	۱۳۰۰	۵/۵	۱۳۰	۳۵	۲۲۰	۴۲/۰۰
۲۱	۲	۱۳۰۰	۴/۵	۱۱۰	۳۵	۲۲۰	۴۶/۰۷

ACCEPTED MANUSCRIPT

استاندارد	آزمایش	کلکتور (g/t)	pH	کف‌ساز (g/t)	درصد جامد پالپ	فعال‌کننده (g/t)	درصد حذف سولفور
۲۲	۹	۱۳۰۰	۴/۵	۱۵۰	۳۵	۲۲۰	۴۶/۶۳
۲۳	۷	۱۳۰۰	۴/۵	۱۳۰	۲۵	۲۲۰	۳۹/۳۷
۲۴	۳	۱۳۰۰	۴/۵	۱۳۰	۴۵	۲۲۰	۳۱/۳۵
۲۵	۱۴	۱۳۰۰	۴/۵	۱۳۰	۳۵	۱۸۰	۴۷/۷۱
۲۶	۱۱	۱۳۰۰	۴/۵	۱۳۰	۳۵	۲۶۰	۴۶/۱۲
۲۷	۲۶	۱۳۰۰	۴/۵	۱۳۰	۳۵	۲۲۰	۴۹/۷۹
۲۸	۱۷	۱۳۰۰	۴/۵	۱۳۰	۳۵	۲۲۰	۵۰/۶۲
۲۹	۲۳	۱۳۰۰	۴/۵	۱۳۰	۳۵	۲۲۰	۵۰/۴

۴-۲- آنالیز واریانس

از این تکنیک برای غربال‌کردن فاکتورهای مهم و تعیین معنادار بودن آن‌ها از طریق آنالیز واریانس بر روی پاسخ استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، این تکنیک از آزمایش‌هایی بر پایه نسبت‌های واریانس برای بررسی معنادار بودن یا نبودن اختلافات بین میانگین‌های چند گروه از مشاهدات استفاده می‌کند. نتایج آنالیز واریانس برای پاسخ درصد حذف سولفور در جدول (۴) ارائه شده است که نشان‌دهنده معنادار بودن مدل انتخاب شده است.

جدول (۴) نتایج آنالیز واریانس برای پاسخ درصد حذف سولفور

Table (4) Analysis of variance results for the sulfur removal percentage response.

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	P	
مدل	۹۶۴/۶۲۴۱	۱۰	۹۶/۴۶۲۴۱	۱۷/۸۱۵۰۵	< ۰/۰۰۰۱	معنی‌دار
A	۱/۳۳۴۷۳۸	۱	۱/۳۳۴۷۳۸	۰/۲۴۶۵۰۴	۰/۶۲۵۶	
B	۵/۴۵۳۴۴۴	۱	۵/۴۵۳۴۴۴	۱/۰۰۷۱۶۳	۰/۳۲۸۹	
C	۵/۴۱۱۹۳۷	۱	۵/۴۱۱۹۳۷	۰/۹۹۹۴۹۷	۰/۳۳۰۷	
D	۲۱۶/۴۵۲۲	۱	۲۱۶/۴۵۲۲	۳۹/۹۷۵۲۲	< ۰/۰۰۰۱	
E	۱/۷۵۱۶۴۱	۱	۱/۷۵۱۶۴۱	۰/۳۲۳۵	۰/۵۷۶۵	
A^2	۳۴۳/۸۶۹۱	۱	۳۴۳/۸۶۹۱	۶۳/۵۰۷۰۶	< ۰/۰۰۰۱	
B^2	۲۱۰/۶۲۳	۱	۲۱۰/۶۲۳	۳۸/۸۹۸۶۷	< ۰/۰۰۰۱	
C^2	۷۴/۳۳۹۶۴	۱	۷۴/۳۳۹۶۴	۱۳/۷۲۹۳۳	۰/۰۰۱۶	
D^2	۴۹۳/۹۲۶۵	۱	۴۹۳/۹۲۶۵	۹۱/۲۲۰۲۵	< ۰/۰۰۰۱	
E^2	۶۲/۷۱۰۹۴	۱	۶۲/۷۱۰۹۴	۱۱/۵۸۱۷	۰/۰۰۳۲	
باقی‌مانده	۹۷/۴۶۳۸۵	۱۸	۵/۴۱۴۶۵۸			
نقصان در برازش	۹۷/۰۹۳۴۸	۱۶	۶/۰۶۸۳۴۳	۳۲/۷۶۹۲۴	۰/۰۳	بی‌معنی
خطای خالص	۰/۳۷۰۳۶۸	۲	۰/۱۸۵۱۸۴			
کل	۱۰۶۲/۰۸۸	۲۸				

ACCEPTED MANUSCRIPT

همان طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود تنها پارامتر درصد جامد پالپ (D) به دلیل مقدار F بالاتر وP کمتر از ۰/۰۵ مؤثرترین پارامتر می‌باشد. پارامترهایی مانند غلظت کلکتور (Á) و غلظت فعال کننده (E) به ترتیب کمترین تاثیر را در درصد حذف سولفور دارا می‌باشند. این احتمال وجود دارد که غلظت کلکتور در تمامی آزمایش‌ها بالا بوده و این عامل باعث عدم مشاهده تأثیر آن شده باشد. در ادامه بررسی، باید توجه داشت که مدلی مناسب است که اختلاف مقادیر ضریب همبستگی خط برازش شده (Pre R Squared)و (Adj - Rsquared) کمتر از ۰/۲ باشد. مقدار این کمیت‌ها برای پاسخ درصد حذف سولفور در جدول (۵) ارائه شده است که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل بر داده‌ها است و عدم نقصان در برازش نیز صحت این موضوع را تأیید می‌کند. همچنین، مدل ریاضی ارائه‌شده به وسیله نرم‌افزار برای پیش‌بینی پاسخ‌های آزمایش نیز در جدول (۶) بر اساس مقادیر پارامترهای پیشنهادی آمده است. طبق نرم‌افزار DX_7، ضریب همبستگی داده‌ها (R- Square) نشان‌دهنده تغییرات حول میانگین مدل است و برای پاسخ‌های درصد بازیابی گوگرد حدود ۹۳/۲۷ درصد است. همچنین، مقدار Precision Adequate باید بیش از ۴ باشد که برای بازیابی گوگرد ۲۷/۵۵ به دست آمده است.

جدول (۵) مشخصات آماری مدل برازش شده برای پاسخ درصد حذف سولفور

Table (5) Statistical characteristics of the fitted model for the sulfur removal percentage response.

پاسخ	R squared	Adj-R squared	Pre-R Squared	Adequate Precision	PRESS
درصد حذف سولفور	۰/۹۳۲۷	۰/۷۶۴۶	۰/۵۸۲۸	۹/۴۲۰	۱۶۸۱/۰۳

جدول (۶) مدل ریاضی پیشنهادی بر حسب مقادیر پارامترها برای پیش‌بینی پاسخ درصد حذف سولفور

Table (6) Proposed mathematical model based on parameter values for predicting the sulfur removal percentage response.

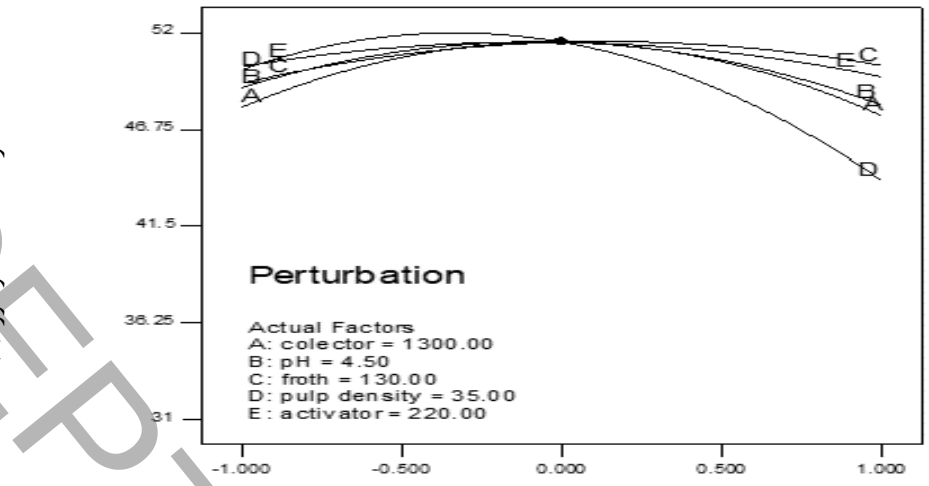
پاسخ	مدل ریاضی
درصد حذف سولفور	$956.77+0.26A+110.22B+4.27C+8.87D+1.53E-2.46E-003AB-1.41E-004AC-2.98E-004AD+8.71E-005AE-0.05BC+0.32BD-0.03BE+0.01CD+1.31E-003CE+2.35E-003DE-9.36E-005A^2-11.72B^2-0.02C^2-0.18D^2-3.99E-003E_2$

۵- بررسی تأثیر هر پارامتر و اندرکنش آنها بر روی درصد حذف سولفور در فلوتاسیون معکوس آهن

۵-۱- مقایسه تاثیر پارامترها بر روی درصد حذف سولفور

نمودار (۵) تاثیر کلی پارامترها را بر روی درصد حذف سولفور زمانی که سایر پارامترهای تأثیرگذار بر فلوتاسیون معکوس آهن در سطح میانی خود قرار دارند با همدیگر مقایسه می‌کند. نمودار نشان می‌دهد روند کلی پارامترهای مورد بررسی شبیه به هم بوده و با افزایش مقدار پارامترها درصد حذف سولفور افزایش می‌یابد و به حداکثر مقدار خود می‌رسد و از یک مقدار بیشتر به بعد تمامی پارامترها بر روی درصد حذف سولفور تاثیر منفی خواهند داشت و افزایش درصد جامد پالپ نسبت به سایر پارامترها دارای بیشترین تاثیر منفی بوده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

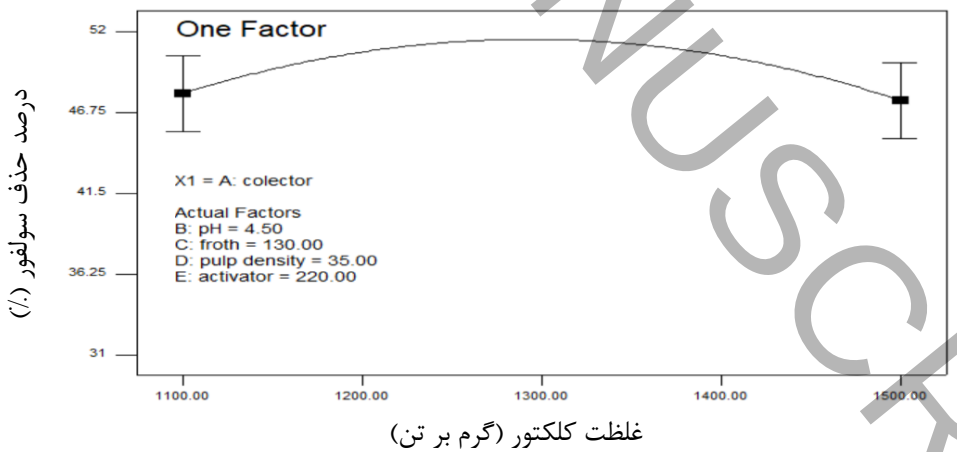


شکل (۵) مقایسه پارامترها بر روی درصد حذف سولفور

Figure (5) Comparison of parameters regarding sulfur removal percentage.

۵-۲- تأثیر غلظت کلکتور بر درصدحذف سولفور

زمانی که سایر پارامترها در سطح میانی خود قرار دارند، با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که افزایش غلظت کلکتور از ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ گرم بر تن منجر به افزایش نرخ شناورسازی پیروتیت و در نتیجه افزایش میزان می‌شود. با این حال، درصورتی‌که غلظت کلکتور از ۱۳۰۰ گرم بر تن فراتر رود، شاهد کاهش در درصد حذف سولفور خواهیم بود. این کاهش نشان‌دهنده تأثیر منفی استفاده از غلظت بالای کلکتور بر کارآیی فرآیند فلوتاسیون معکوس است و به نظر می‌رسد افزایش غلظت باعث تشکیل پدیده میسلیزاسیون در داخل پالپ و روی سطوح کانی‌ها شده است که مانع هیدروفوب شدن سطوح کانی‌های سولفیدی و کاهش درصد حذف سولفور می‌گردد.



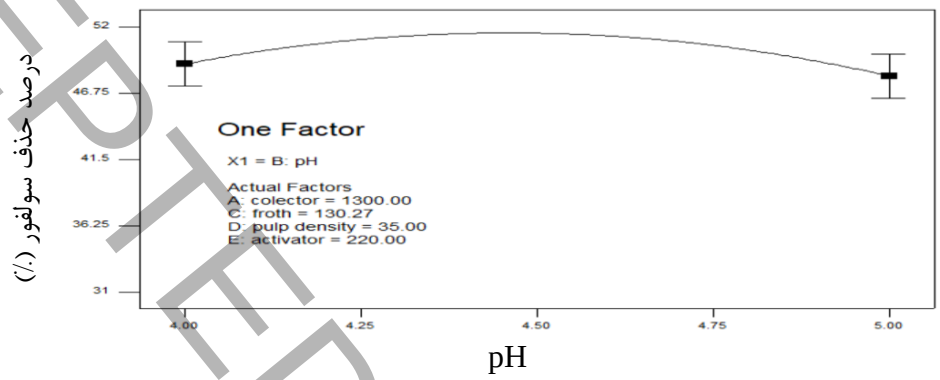
شکل (۶) تاثیر غلظت کلکتور بر درصد حذف سولفور

Figure (6) Effect of collector concentration on sulfur removal percentage

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵-۳- تأثیر pH بر درصد حذف سولفور

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، هنگامی که سایر پارامترها در سطح میانی خود قرار دارند، افزایش میزان pH تا حدود ۴/۵ منجر به افزایش شناورسازی پیروتیت و در نتیجه افزایش درصد حذف گوگرد می‌شود. اما با افزایش بیشتر pH از ۴/۵، شاهد کاهش درصد حذف سولفور خواهیم بود ترکیبات سولفیدی مانند پیریت بوسیله دی‌گزنتوژن هیدروفوب می‌گردد و تولید دی‌گزنتوژن در pH های قلیایی کاهش می‌یابد. به همین دلیل، نرخ شناورسازی پیروتیت نیز کاهش یافته و این موضوع منجر به کاهش درصد حذف سولفور می‌شود. این روند نشان‌دهنده وجود یک نقطه بهینه در pH است که در آن حداکثر درصد حذف سولفور حاصل می‌شود.

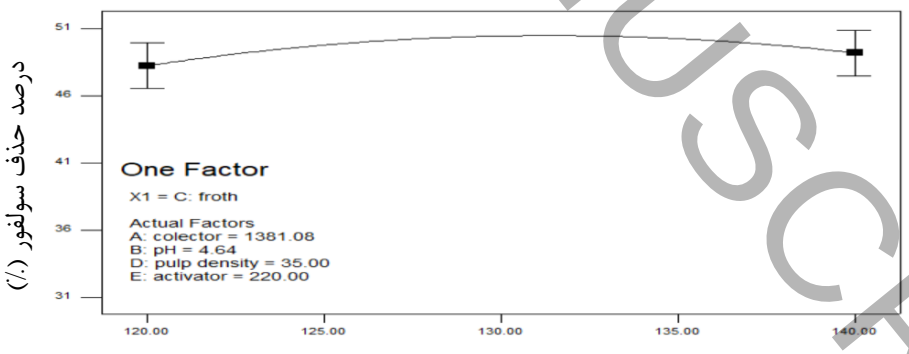


شکل (۷) تاثیر pH پالپ بر درصد حذف سولفور

Figure (7) Effect of pulp pH on sulfur removal percentage.

۵-۴- تأثیر غلظت کف‌ساز بر درصد حذف سولفور

شکل (۸) تأثیر غلظت کف‌ساز بر میزان درصد حذف سولفور هنگامی که سایر پارامترها در سطح میانی قرار دارند، را نشان می‌دهد. افزایش غلظت کف‌ساز تا حدود ۱۳۰ گرم بر تن منجر به افزایش نرخ شناورسازی پیروتیت و در نتیجه تا حدودی باعث افزایش میزان درصد حذف سولفور می‌شود و افزایش بیش از ۱۳۰ گرم بر تن از کف‌ساز بر روی درصد حذف سولفور تقریبا بی‌تاثیر است و هزینه فلوتاسیون را افزایش می‌دهد.



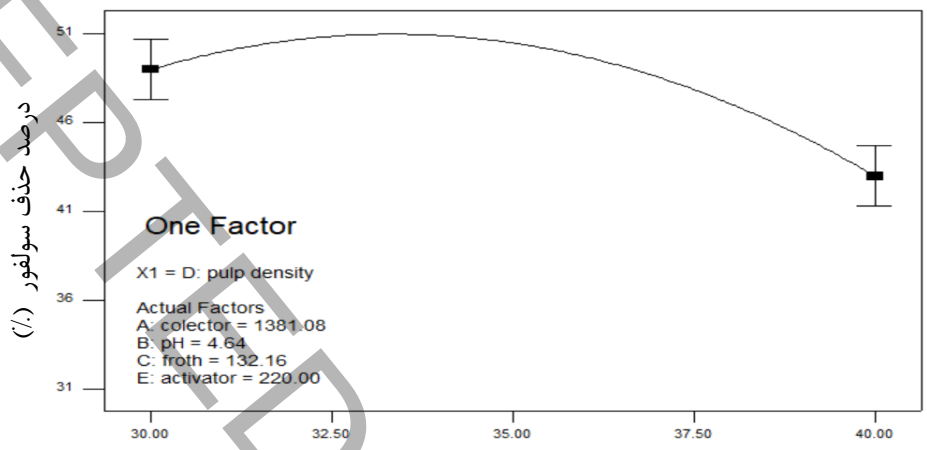
شکل (۸) تاثیر غلظت کف‌ساز بر درصد حذف سولفور

Figure (8) Effect of frother concentration on sulfur removal percentage.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵-۵- تأثیر پارامتر درصد جامد پالپ بر درصد حذف سولفور

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، زمانی که سایر پارامترها در سطح میانی خود قرار دارند، افزایش درصد جامد پالپ تا ۳۵ درصد منجر به افزایش نرخ شناورسازی پیروتیت و در نتیجه افزایش میزان درصد حذف سولفور می‌شود. با توجه به اینکه حضور مقداری اکسیژن برای جذب کلکتورهای سولفیدریل و تولید دی گزنتوژن ضروری است با افزایش درصد جامد پالپ از ۳۵ درصد معمولاً باعث کاهش اکسیژن محلول در سیستم می‌شود که می‌تواند یکی از دلایل کاهش درصد حذف سولفور باشد.

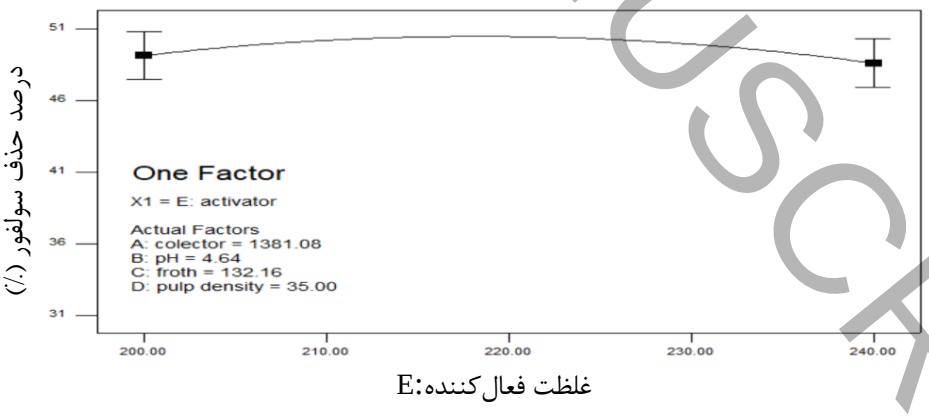


شکل (۹) تاثیر درصد جامد پالپ بر درصد حذف سولفور

Figure (9) Effect of pulp solids percentage on sulfur removal percentage.

۵-۶- تأثیر پارامتر فعال‌کننده بر درصد حذف سولفور

شکل (۱۰) تأثیر غلظت فعال کننده بر میزان درصد حذف سولفور را نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت فعال‌کننده تا ۲۲۰ گرم بر تن، میزان درصد حذف سولفور تا حدی افزایش می‌یابد. اما غلظت مصرف فعال کننده حساس بوده و با افزایش بیشتر فعال‌کننده از ۲۲۰ گرم بر تن، درصد حذف سولفور به صورت نزولی کاهش می‌یابد و این تغییرات زیاد نمی‌باشد.



شکل (۱۰) تاثیر غلظت فعال‌کننده بر درصد حذف سولفور

Figure (10) Effect of activator concentration on sulfur removal percentage.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۶-تعیین شرایط بهینه درصد حذف سولفور

بعد از بررسی پارامترها و مدل‌سازی، بهینه‌سازی نتایج آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار DX_7 انجام شد. هدف اصلی در این بهینه‌سازی، دستیابی به حداکثر درصد حذف سولفور است .برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از طراحی آزمایش، آزمایش‌هایی با شرایط بهینه در آزمایشگاه تکرار گردید. شرایط بهینه پیشنهادی انجام فلوتاسیون معکوس و مقادیر پیش‌بینی و واقعی درصد حذف سولفور در جدول (۶) آمده است. با توجه به مقادیر موجود در جدول (۶)، مشخص شد که نتایج واقعی آزمایش‌ها به مقادیر پیش‌بینی‌شده بوسیله نرم‌افزار نزدیک است؛ بنابراین مدل ارزیابی‌شده از دقت کافی برخوردار بوده و قابل قبول می‌باشد. نتایج بدست آمده در شرایط بهینه نشان می‌دهد تحت شرایط غلظت آمیل گزنتات پتاسیم ۱۳۱۵ گرم بر تن، pH حدود ۴/۵، غلظت کف‌ساز حدود ۱۲۶ گرم بر تن، درصد جامد پالپ ۳۵ درصد و غلظت فعال کننده ۲۱۰ گرم بر تن عیار و درصد بازیابی آهن به ترتیب ۶۵ درصد ۹۱/۱۶ با عیار سولفور ۴/۱ درصد می‌رسد.

جدول (۶) نتایج شرایط بهینه سازی

Table (6) Results of optimization conditions

ردیف	کلکتور (g/t)	pH	کف‌ساز (g/t)	درصد جامد	فعال‌کننده (g/t)	مقدار پیش‌بینی شده درصد حذف سولفور	مقدار واقعی درصد حذف سولفور
۱	۱۳۱۴/۷۰	۴/۳۸	۱۲۶/۳۴	۳۴/۹۹	۲۱۰/۳۳	۵۰/۷۵	۴۹/۲۱
۲	۱۳۱۴/۷۰	۴/۳۸	۱۲۶/۳۴	۳۴/۹۹	۲۱۰/۳۳	۵۰/۷۵	۵۰/۰۱
۳	۱۳۱۴/۷۰	۴/۳۸	۱۲۶/۳۴	۳۴/۹۹	۲۱۰/۳۳	۵۰/۷۵	۴۹/۶۷
			میانگین			۵۰/۷۵	۴۹/۶۳

.

.

۷- آماده‌سازی سطح پیروتیت با اسید اگزالیک

مطالعات لیو و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که وقتی پیروتیت به مدت ۳۰ روز اکسید می‌شود، میزان بازیابی آن به ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. آن‌ها برای فعال‌سازی مجدد پیروتیت اکسیدشده، از اسید سولفوریک و اسید اگزالیک استفاده کردند و دریافتند که پس از استفاده از این اسیدها، بازیابی پیروتیت به ترتیب به ۵۶ درصد و ۸۴ درصد افزایش می‌یابد[۲۰]. به همین دلیل به‌منظور فعال‌سازی پیروتیت اکسیدشده از اسیدهای اگزالیک استفاده شده است تا تأثیر این آماده‌سازی بر فرآیند درصد حذف سولفور در فلوتاسیون معکوس آهن مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور، نمونه‌های خوراک فلوتاسیون به مدت یک ساعت در یک لیتر آب حاوی اسید اگزالیک با غلظت ۰/۰۰۴ مول بر لیتر قرار گرفتند تا به منظور حذف لایه‌های آب‌دوست بر روی سطوح پیروتیت و بهبود جذب کلکتور در فرآیند فلوتاسیون معکوس آماده‌سازی انجام گیرد.

سپس برای شناورسازی پیروتیت تحت شرایط بهینه پارامترهایی مانند pH برابر ۴/۳۸،کلکتور آمیل گزنتات پتاسیم با غلظت ۱۳۱۴ گرم بر تن، کف‌ساز MIBC به میزان ۱۲۶ گرم بر تن و فعال‌کننده به میزان ۲۱۰ گرم بر تن عملیات فلوتاسیون معکوس انجام گرفت و نتایج نشان داد که با آماده‌سازی سطوح پیروتیت با اسید اگزالیک منجر به حذف سطوح آب‌دوست و بهبود درصد حذف سولفور

ACCEPTED MANUSCRIPT

می‌شود. درصد حذف سولفور در مرحله رافر ۸۳/۳۳ درصد افزایش یافت و میزان گوگرد در کنسانتره نهایی از ۷/۲ به ۱/۲ درصد کاهش پیدا کرد. این امر نشان می‌دهد که اسید اگزالیک به‌عنوان یک عامل آماده‌ساز می‌تواند فرآیند شناورسازی پیروتیت را بهبود ببخشد و به حذف مؤثرتر گوگرد یا سولفور کمک کند.

۸- نتیجه گیری:

کنسانتره جدایش مغناطیسی دارای ۷/۲ درصد گوگرد بوده است. نتایج XRD نشان می‌دهد که این کنسانتره از کانی‌های مگنتیت، پیروتیت، پیریت، گروسولار، سرپانتین و دولومیت تشکیل شده است و d_{80} این نمونه حدود ۴۲/۳۸ میکرون است. برای حذف سولفور موجود در کنسانتره از روش فلوتاسیون معکوس استفاده شده است. پارامترهایی مانند مقادیر کلکتور، کف‌ساز، درصد جامد پالپ، فعال‌کننده و pH به روش طراحی ازمایش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده در شرایط بهینه نشان می‌دهد تحت شرایط بهینه، عیار سولفور کنسانتره جدایش مغناطیسی آهن به ۴/۱ درصد می‌رسد و با آماده‌سازی سطح پیروتیت موجود در کنسانتره مغناطیسی بوسیله اسید اگزالیک با با غلظت ۰/۰۰۴ مول بر لیتر به مدت یک ساعت قبل از فلوتاسیون عیار سولفور کنسانتره مغناطیسی را (تحت شرایط بهینه با عملیات فلوتاسیون معکوس) از ۷/۲ به ۱/۲ درصد کاهش می‌دهد به عبارتی با آماده سازی بوسیله اسید اگزالیک می توان به اندازه ۲/۹ درصد از حذف سولفور موجود در کنسانتره مغناطیسی را در شرایط بهینه فلوتاسیون معکوس بهبود بخشید.

مراجع

[1]- M. H. Karimpour, Industrial Minerals and Rocks, Ferdowsi University of Mashhad Press, (1999).

[2]- H. Asli, M. Noparast, S. Z.Shafaei, Optimization of the Flotation Circuit at the Chadormalu Iron Ore Complex to Reduce Silica and Phosphorus in Iron Concentrate, Master's Thesis in Mineral Processing Engineering, University of Tehran, (2009).

[3]- R. Vaghar, Preparation of Furnace Feed for Iron and Steel Production, University of Tehran Press, (1997).

[4]- F. Nakhaei, M. Irannajad, Removal of Pyrite from Iron Ore Concentrate via Column Flotation, Journal of Mineral Resources Engineering, 1(2016)1–11.

[5]- D. A. Norrgran, and M. J. Mankosa, Bench Scale and Pilot Plant Tests for Magnetic Concentration Circuit Design, Mineral Processing plant design, 1(2002) 176-177.

[6]- E. Panahi, Magnetic Mineral Beneficiation Technology: Recent Advances, M.Sc. Seminar in Mineral Processing Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, (2009).

[7]- B. Rezaei, Magnetic Beneficiation, Amirkabir University Press, (1999).

[8]- A. N. Buckley and R. Woods, X-ray photoelectron spectroscopy of oxidised pyrrhotite surfaces, pplications of surface science 20(1985) 472-480.

[9]- R. V. Nicholson, and J. M. Scharer, Laboratory studies of pyrrhotite oxidation kinetics, Environmental Geochemistry of Sulphide Oxidation, ACS Symposium Series, Washington, DC, 550: 1430 (1994).

[10]- S. M. Bultovich, Handbook of flotation reagent, Elsevier, Amsterdam, 2: 19- 26, (2010).

[11]- C. S. Chang, S. R. B. Cooke, I. Iwasaki, Flotation characteristics of pyrrhotite with xanthate, Transactions AIME, Mining Engineering, 199: 209-217 (1954).

[12]- A. M. Buswell, M. J. Nicol, Some aspects of the electrochemistry of the flotation of pyrrhotite, J. Appl. Sci. 32 (2002b)1321-1329.

[13]- B. A. Wills, T. J. Napier-Munn, Mineral Processing Technology, 7th Edition, Science & Technology Books (2006).

ACCEPTED MANUSCRIPT

[14]- M. Ezzat-Abadi-Pour, Optimization of factors affecting the flotation circuit of the desulfurization processing line (SRP) at Golgohar Iron Ore Company, Master's thesis in Mineral Processing Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman (2011).
[15]- F. Shoja, Investigation into the Feasibility of Sulfur Reduction in Iron Ore from the Sourak Mine, Journal of Mineral Resources Engineering, 2 (2017) 67–74.
[16]- P. Ding, Q. Liu, W. Pang, Desulfurization study of an iron mine in Yunnan, Advanced Materials Research, 756–759(201376–79.
[17]- Y. Zhao, W. Zhou, T. Sun, A. Ahmadzai, Study on recovery of iron and sulfur from high-sulfur magnetite ore, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 58 (2021).
[18] -Q. Meng, Sulfuric acid pretreatment of oxidized pyrrhotite in flotation desulphurization of magnetite concentrate,Minerals Engineering, 203(2023)108347.
[19]- Sh .Sadeghi, A .Bahrami, The Effect of Pyrrhotite Crystal Structure on the Selection of Processing Method and Its Performance in Sulfur Removal from Iron Concentrate, 42nd National Geosciences Conference, (2023).
[20]- J. Liu, Effect of acidic activators on the flotation of oxidized pyrrhotite, Minerals Engineering, 120(2018).

ACCEPTED MANUSCRIPT