نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دوره سوم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۷۷ تا ۸۶
Vol. 3, No. 3, Autumn 2018, pp. 77-86

سولفورزدایی کنسانتره سنگ آهن سنگان به روش فلوتاسیون

سپیده جوانشیر[1*]، محمد مسینایی[2]، محمد توکلی[3]

۱- استادیار، فراوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند
۲- دانشیار، فراوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند
۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن ،دانشگاه بیرجند

(دریافت ۱۳۹۷/۰۵/۱۳، پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۱۷)

چکیده

فلوتاسیون مرسوم‌ترین روش گوگردزدایی کنسانتره آهن در کارخانه‌های فرآوری سنگ آهن است. هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی امکان افزایش کارآیی متالورژیکی مدار فلوتاسیون کارخانه فرآوری سنگ آهن سنگان است. بررسی داده‌های عملیاتی کارخانه نشان داد که عیار گوگرد کنسانتره کارخانه سنگ آهن سنگان در برخی شرایط بیش از حد مجاز (۰٫۲۵٪>) برای مصرف واحدهای گندله‌سازی است. برای این منظور آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی و صنعتی در شرایط عملیاتی مختلف انجام شدند. در آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی اثر پارامترهایی از قبیل غلظت کلکتور (۱۰۵-۶۵ g/t)، غلظت کف‌ساز (۷۵-۴۵ g/t)، درصد جامد پالپ (۳۳-۲۷٪) و pH (۱۰-۶) بررسی شد. نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون ناپیوسته نشان داد که غلظت کلکتور، pH پالپ، غلظت کف‌ساز و درصد جامد پالپ به ترتیب بیشترین تاثیر بر بازیابی گوگرد را دارند. کارآیی متالورژیکی فرآیند شناورسازی ناپیوسته با افزایش غلظت کلکتور، افزایش غلظت کف‌ساز و کاهش pH محیط افزایش یافت. در آزمایش‌های صنعتی تاثیر نحوه توزیع کلکتور در مدار، غلظت کلکتور (۱۰۵-۶۵ g/t)، غلظت کف‌ساز (۸۵-۳۷ g/t) و درصد جامد پالپ (۳۳-۲۵٪) بر کارآیی متالورژیکی فرآیند بررسی شد. نتایج آزمایش‌های صنعتی نشان داد که بهترین کارآیی متالورژیکی فرآیند در شرایط اضافه کردن ۵۰٪ کلکتور در ورودی رافر، ۳۰٪ در ورودی مدار کلینر و ۲۰٪ در ورودی مدار اسکاونجر حاصل شد. افزایش غلظت کلکتور و کف‌ساز، باعث افزایش بازیابی گوگرد و همچنین کاهش عیار گوگرد در کنسانتره آهن شد. با افزایش درصد جامد پالپ، بازیابی گوگرد و البته عیار گوگرد در کنسانتره آهن افزایش یافت.

کلمات کلیدی

سنگ آهن، فلوتاسیون، گوگردزدایی، کارآیی متالورژیکی، مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: sjavanshir@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

مجتمع سنگ آهن سنگان، یکی از بزرگترین تولیدکننده‌های سنگ آهن دانه‌بندی شده و کنسانتره آهن در ایران است. کنسانتره آهن تولید شده به عنوان خوراک ورودی به کارخانه گندله‌سازی است. کنسانتره سنگ آهن قابل فروش به واحدهای گندله‌سازی باید دارای عیار آهن بیش از ۶۷٪، عیار فسفر کمتر از ۰٫۰۲٪ و عیار گوگرد کمتر از ۰٫۲۵٪ باشد. اصلی‌ترین ناخالصی این کانسار گوگرد است که به طور عمده در کانی پیریت (FeS_2)، به صورت قفل شده با مگنتیت تجمع دارد. افزایش بیش از حد مجاز گوگرد در کنسانتره آهن باعث افزایش تردی و شکنندگی فولاد می‌شود. در صورت وجود ناخالصی در کنسانتره، برای کاهش یا حذف این عناصر معمولا از فلوتاسیون استفاده می‌شود[۱].

خوراک ورودی به کارخانه فرآوری سنگان در ابتدا وارد یک آسیای خودشکن می‌شود که به روش تر کار می‌کند. محصول آسیای خودشکن پس از دو مرحله سرندکنی وارد جداکننده‌های مغناطیسی مرحله اول (کوبر لیمز[۱]) می‌شود. محصول این جداکننده‌ها وارد مدار خردایش ثانویه شامل آسیای گلوله‌ای مدار بسته با هیدروسیکلون‌ها می‌شود. سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه با d_{80}=۷۰ mμ وارد مدار جدایش مغناطیسی مرحله دوم (رافر و اسکاونجر لیمز) می‌شود. کنسانتره این مدار وارد مرحله خردایش نهایی در آسیاهای برجی مدار بسته با هیدروسیکلون‌ها می‌گردد. سرریز هیدروسیکلون‌های ثانویه با d_{80}=۳۸ mμ وارد مدار جدایش مغناطیسی مرحله سوم (فینیشر[۲]) می‌شود. کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی فینیشر برای گوگردزدایی وارد مدار فلوتاسیون می‌شود. در کارخانه فرآوری سنگ آهن سنگان از روش فلوتاسیون معکوس برای کاهش عیار گوگرد در کنسانتره آهن استفاده می‌شود. مدار فلوتاسیون شامل سلول‌های رافر (۶ سلول ۵۰ مترمکعبی)، کلینر (۳ سلول ۵۰ مترمکعبی) و اسکاونجر (۳ سلول ۵۰ مترمکعبی) است. کنسانتره (بخش مغناطیسی شناور نشده) مدار رافر به مدار کلینر و باطله (بخش غیرمغناطیسی شناور شده) به مدار اسکاونجر منتقل می‌شود. کنسانتره مدار اسکاونجر به ابتدای مدار رافر و باطله آن به سد باطله منتقل می‌شود. کنسانتره مدار کلینر به آخرین مرحله جدایش مغناطیسی کلینر و باطله آن به ابتدای مدار رافر پمپاژ می‌شود. در حال حاضر از کلکتور سدیم ایزوپروپیل گزنتات و کفساز متیل ایزوبوتیل کربونیل (MIBC) در مدار فلوتاسیون استفاده می‌شود. سیستم هوادهی سلول‌های فلوتاسیون نیز از نوع خود هواده است. فلوشیت کارخانه فرآوری سنگ آهن سنگان در شکل ۱ ارایه شده است [۱].

در روش فلوتاسیون معکوس اکسیدهای آهن، کانی سولفیدی حاوی گوگرد (عمدتا پیریت) به کمک کلکتورهای سولفیدریل شناور شده و اکسیدهای آهن به عنوان کنسانتره از کف سلول خارج می‌شوند. تحقیقات گسترده‌ای تاکنون در مورد مکانیزم فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی آهن انجام شده است[۶-۲]. بررسی‌ها نشان داده است که پیریت در pHهای قلیایی (عمدتا در pH>۱۱) بازداشت شده اما در pHهای اسیدی و خنثی با جذب کلکتور گزنتات شناور می‌شود. در بسیاری تحقیقات، جذب دی‌گزنتوژن (محصول اکسیداسیون گزنتات) روی سطح ذرات پیریت به عنوان عامل شناورسازی پیریت بیان شده است. جذب دی‌گزنتوژن (X_2) روی سطح ذرات پیریت بر اثر واکنش اکسیداسیون آندی گزنتات (X^-) و احیاء کاتدی اکسیژن مطابق واکنش‌های زیر انجام می‌گیرد [۵]:

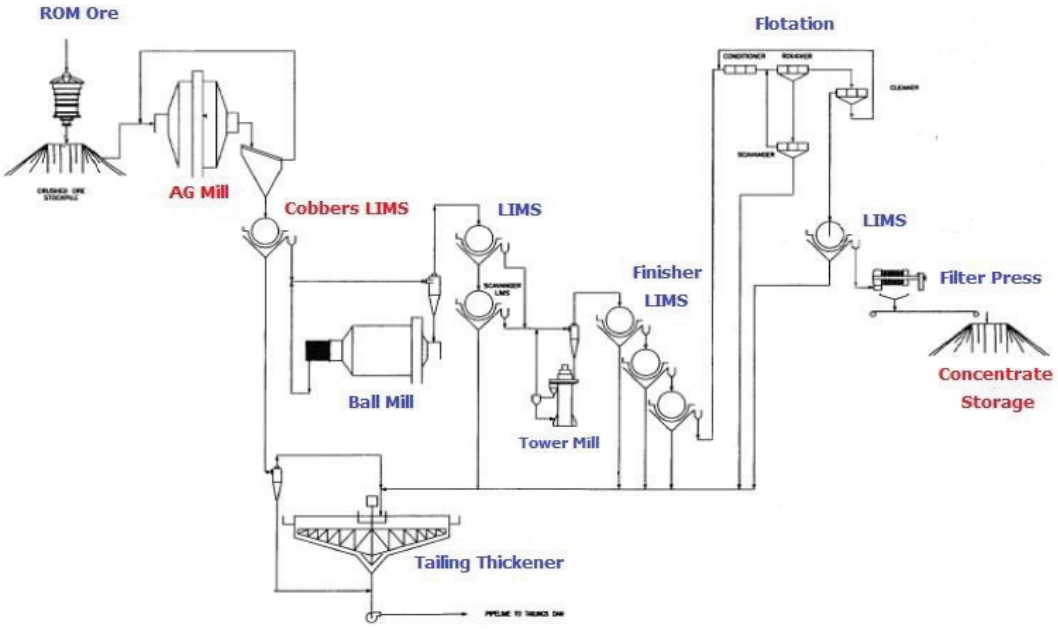
$$2X^- \leftrightarrow X_2 + 2e^- \quad (۱)$$

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \leftrightarrow 2OH^- \quad (۲)$$

$$2X^- + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \leftrightarrow X_2 + 2OH^- \quad (۳)$$

بررسی‌ها نشان داده است که این واکنش تا pH=۱۱ انجام‌پذیر است. در pHهای بالاتر دی‌گزنتوژن به یون گزنتات تجزیه می‌شود. همچنین در pHهای قلیایی رسوب هیدروکسیدهای آهن و نمک‌های کلسیم (FeOH، FeOOH، $CaCO_3$، $CaSO_4$) بر روی سطح ذرات پیریت نیز از جذب گزنتات بر روی سطح ذرات پیریت جلوگیری می‌کند[۶].

عزت‌آبادی‌پور و همکاران (در سال ۱۳۹۱) در تحقیقی عوامل موثر بر کارایی مدار فلوتاسیون خط سولفورزدایی کارخانه فرآوری سنگ آهن گل‌گهر را مورد بررسی قرار دادند[۷]. در این پژوهش تاثیر پارامترهایی از قبیل نوع (پتاسیم آمیل گزنتات: PAX، سدیم اتیل گزنتات: NaEX و سدیم ایزوپروپیل گزنتات: Z11) و میزان مواد شیمیایی اضافه شده بر بازیابی گوگرد در مدار فلوتاسیون مورد آزمایش و تحقیق قرار گرفت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با مصرف ۸۰ g/t پتاسیم آمیل گزنتات (PAX) و ۱۰۰ g/t



شکل ۱: فلوشیت کارخانه فرآوری سنگ آهن سنگان[۱]

کف‌ساز MIBC عیار گوگرد از ۰٫۶۲۵٪ به ۰٫۱۰۵٪ کاهش یافت. آرویدسون و همکاران (در سال ۲۰۱۳) پژوهشی را با هدف فلوتاسیون پیروتیت از کنسانتره مگنتیت به منظور تولید محصولی با عیار سولفور کمتر از ۰٫۰۵٪ انجام دادند[۲]. فلوشیت پیشنهادی آن‌ها شامل خردایش نمونه تا ابعاد ریز (به منظور آزادسازی کانی‌های باارزش)، جدایش مغناطیسی شدت پایین (به منظور جدایش مگنتیت) و در نهایت فلوتاسیون (به منظور جدایش پیروتیت) بود. آزمایش‌های فلوتاسیون در pHهای ۷-۴، درصد جامد پالپ ۵۰-۴۵٪، غلظت‌های بالای مواد شیمیایی و زمان‌های نسبتاً طولانی انجام شدند. یو و همکاران (در سال ۲۰۱۶) از ترکیب کلکتورهای گزنتات و دی‌گزنتوژن به منظور فلوتاسیون پیروتیت و جداسازی آن از کنسانتره مگنتیت استفاده نمودند[۸]. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از ترکیب کلکتورهای گزنتات و دی‌گزنتوژن (به نسبت ۶۰ به ۴۰) منجر به حداکثر کارایی متالورژیکی فرایند فلوتاسیون می‌گردد. نخعی و ایران‌نژاد (در سال ۱۳۹۵) پژوهشی را با هدف کاهش عیار گوگرد کنسانتره آهن گل‌گهر (از حدود ۰٫۵٪ به کمتر از ۰٫۱٪) با استفاده از یک سلول فلوتاسیون ستونی آزمایشگاهی انجام دادند [۹]. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که در شرایط بهینه، امکان تولید کنسانتره آهن با عیار گوگرد ۰٫۰۸٪ و بازیابی آهن ۹۹٫۵٪ قابل دستیابی است. کردستانی و همکاران (در سال ۱۳۹۱) تحقیقی را با هدف تعیین دانه‌بندی بهینه جهت طراحی مدار کلر و سولفورزدایی از کنسانتره تر کارخانه مگنتیت مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر انجام دادند[۱۰]. حد مجاز سولفور و کلر در کنسانتره نهایی (خوراک کارخانه گندله‌سازی)، به ترتیب ۰٫۳٪ درصد و ۷۰ppm است. آزمایش‌های فلوتاسیون و لوله دیویس نشان داد که d_{80}=۹۰ mμ، اندازه بهینه ذرات به منظور رسیدن به حداکثر بازیابی آهن و حداقل بازیابی سولفور در کنسانتره است. با استفاده از روش شستشوی نمونه‌ها، میزان کلر تا حد قابل توجهی کاهش یافت.

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی امکان افزایش کارایی متالورژیکی مدار فلوتاسیون کارخانه فرآوری سنگ آهن سنگان است. برای این منظور آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی و صنعتی در شرایط مختلف انجام می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- نمونه‌برداری از مدار

با توجه نوسانات در ترکیب خوراک ورودی به کارخانه فرآوری، به منظور تهیه نمونه معرف از خوراک ورودی مدار فلوتاسیون نمونه‌برداری به مدت ۸ روز و هر روز ۸ ساعت (هر ۱۵ دقیقه یک‌بار) انجام گردید. نمونه‌های مربوط به هر روز

پس از خشک کردن و توزین با یکدیگر مخلوط و نمونه همگنی بدست آمد. نمونه‌های حاصل برای آنالیز سرندی و شیمیایی و همچنین مطالعه کانی‌شناسی به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال شدند. در مجموع ۵۰ کیلوگرم نمونه برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی آماده‌سازی گردید.

۲-۲- شناسایی خوراک مدار فلوتاسیون

دانه‌بندی به روش آنالیز سرندی تر با استفاده از سری سرندهای استاندارد ASTM ۹۰ (۱۷۰ مش)، ۶۳ (۲۴۰ مش)، ۴۵ (۳۵۰ مش)، ۳۸ (۴۰۰ مش)، ۲۵ (۶۲۵ مش) میکرون انجام شدند. داده‌های خروجی توسط نرم‌افزار RETSCH Sieve Analysis تجزیه و تحلیل شدند. آنالیز شیمیایی نمونه به منظور تعیین درصد عناصر و ترکیبات محتوی به روش XRF و مطالعه کانی‌شناسی به منظور تعیین کیفی نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده به روش XRD انجام گردید.

۲-۳- آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی

جهت انجام آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی از یک سلول فلوتاسیون ۲ لیتری استفاده شد. از کلکتور سدیم ایزوپروپیل گزنتات و کفساز MIBC (مشابه کارخانه) در مرحله آماده‌سازی پالپ استفاده گردید. تنظیم pH پالپ با اسید سولفوریک و سود انجام شد. در آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی اثر غلظت کلکتور (g/t ۱۰۵-۶۵)، غلظت کفساز (g/t ۷۵-۴۵)، درصد جامد پالپ (٪۳۳-۲۷) و pH (۱۰-۶) بر کارایی متالورژیکی فرایند مورد ارزیابی قرار گرفت. هر متغیر در سه سطح مورد بررسی قرار گرفت و الگوی انجام آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Statistica به صورت تصادفی در بلوک‌های مختلف طراحی گردید (جدول ۱). به منظور انتخاب سطوح مختلف هر متغیر از تحقیقات پیشین و همچنین داده‌های عملیاتی کارخانه استفاده شد و نهایتاً تعداد ۲۳ آزمایش در چهار بلوک طراحی گردید.

جدول ۱: شرایط انجام آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی

شرح پارامتر	حد بالا	حد میانی	حد پایین
غلظت کلکتور (g/t)	۱۰۵	۸۵	۶۵
غلظت کفساز (g/t)	۷۵	۶۰	۴۵
درصد جامد پالپ (٪)	۳۳	۳۰	۲۷
pH پالپ	۱۰	۸	۶

روش انجام آزمایش‌های فلوتاسیون به این ترتیب بود که در ابتدا پالپی با درصد جامد مشخص آماده‌سازی گردید. سپس pH پالپ در مقدار مطلوب تنظیم و مواد شیمیایی شامل کلکتور و کفساز با غلظت معلوم به پالپ مورد نظر اضافه گردید. آماده‌سازی پالپ با مواد شیمیایی به مدت ۲ دقیقه انجام شد. کف‌گیری در زمان‌های ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه انجام گرفت. پس از انجام هر آزمایش، نمونه‌های کنسانتره و باطله خشک و توزین شده و برای اندازه‌گیری محتوی گوگرد به آزمایشگاه مربوطه ارسال شدند. میزان گوگرد نمونه‌ها به وسیله دستگاه لکو مستقر در مجتمع سنگان انجام گرفت. مقدار حذف گوگرد (به عنوان شاخص کارایی متالورژیکی فرایند) در آزمایش‌های فلوتاسیون مختلف از رابطه ۴ محاسبه گردید:

$$Sulfur\ Rejection\ (\%) = R\ (\%) = \frac{c(f-t)}{f(c-t)} \times 100 \quad (۴)$$

در رابطه فوق f، c و t به ترتیب، عیار گوگرد در نمونه‌های خوراک، کنسانتره و باطله است.

۲-۴- آزمایش‌های فلوتاسیون صنعتی

هدف از انجام آزمایش‌های صنعتی، تعمیم یافته‌های آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی با هدف یافتن راه‌کارهایی به منظور بهبود کارایی متالورژیکی مدار فلوتاسیون است. در آزمایش‌های صنعتی، تاثیر نحوه توزیع کلکتور در مدار فلوتاسیون، غلظت کلکتور (g/t ۱۰۵-۶۵)، غلظت کف‌ساز (g/t ۸۵-۳۷) و درصد جامد پالپ (٪۳۳-۲۵) بر کارایی متالورژیکی فرایند مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل برخی مشکلات عملیاتی، امکان بررسی سایر پارامترها از قبیل دبی هوادهی، سطح سلول‌های فلوتاسیون و pH پالپ وجود نداشت. تمامی آزمایش‌های صنعتی در pH طبیعی کارخانه (حدود ۸) انجام شد. شرایط انجام آزمایش‌های صنعتی در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲: شرایط انجام آزمایش‌های فلوتاسیون صنعتی

خوراک ورودی کارخانه (t/h)	۷۰۰
خوراک ورودی به فلوتاسیون (t/h)	۴۲۰
غلظت کلکتور (g/t)	۶۵-۱۰۵
غلظت کفساز (MIBC) (g/t)	۳۷-۸۵
درصد جامد پالپ (٪)	۲۵-۳۳
pH پالپ	۸

روش انجام آزمایش‌ها بدین ترتیب بود که پس از اعمال تغییرات لازم در مدار، نمونه‌برداری از جریان‌های خوراک، کنسانتره و باطله مدار فلوتاسیون به مدت ۲ ساعت هر ۱۵ دقیقه یک‌بار (پس از اطمینان از پایداری سیستم) انجام گرفت. نمونه‌ها پس از توزین و خشک شدن برای آنالیز گوگرد به آزمایشگاه ارسال شدند.

برای بررسی تاثیر نحوه توزیع کلکتور در مدار فلوتاسیون در یک مدت زمان مشخص، کلکتور سدیم ایزوپروپیل گزنتات با دو شیوه متفاوت در مدار توزیع شد و با شرایط فعلی توزیع کلکتور (اضافه شده در تانک آماده‌سازی ورودی مدار رافر) مقایسه شد.

الف) اضافه کردن ٪۱۰۰ کلکتور در ورودی مدار رافر (شرایط فعلی)

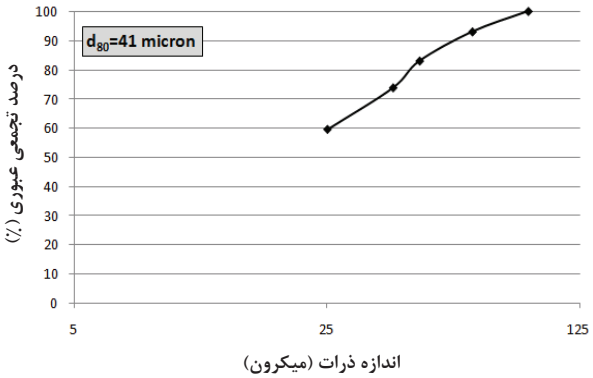
ب) اضافه کردن ٪۵۰ کلکتور در ورودی رافر و ٪۵۰ در ورودی مدار کلینر

ج) اضافه کردن ٪۵۰ کلکتور در ورودی رافر، ٪۳۰ در ورودی مدار کلینر و ٪۲۰ در ورودی مدار اسکاونجر

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی خوراک مدار فلوتاسیون

منحنی توزیع دانه‌بندی خوراک مدار فلوتاسیون در شکل ۲ ترسیم شده است. مطابق شکل، مقادیر شاخص‌های ابعادی منحنی توزیع دانه‌بندی (d_{80} ، d_{50} و d_{20}) نمونه مورد نظر شامل d_{80}=۴۱ mμ، d_{50}=۲۰ mμ و d_{20}=۷ mμ است. نتایج آنالیز XRF نمونه خوراک مدار فلوتاسیون در جدول ۳ ارایه شده است. مطابق نتایج ارایه شده، بیش از ٪۹۳ خوراک مدار فلوتاسیون را اکسیدهای آهن و کمتر از ٪۷ را سایر ترکیبات تشکیل می‌دهند. متوسط عیار گوگرد و فسفر نمونه خوراک به ترتیب ۰٫۳۶ و ۰٫۰۰۸٪ است. میزان فسفر خوراک ناچیز و کمتر از حد مجاز بوده ولی مقدار گوگرد بیشتر از حد مجاز در کنسانتره آهن (۰٫۲۵٪>) است. آنالیز XRD نمونه خوراک مدار فلوتاسیون نشان داد که فازهای اصلی تشکیل دهنده نمونه خوراک مگنتیت، هماتیت، گوتیت، کلسیت، کوارتز، کلریت و پیریت‌اند. بنابراین سولفور موجود در خوراک مدار فلوتاسیون عمدتا در کانی سولفیدی پیریت وجود دارد.



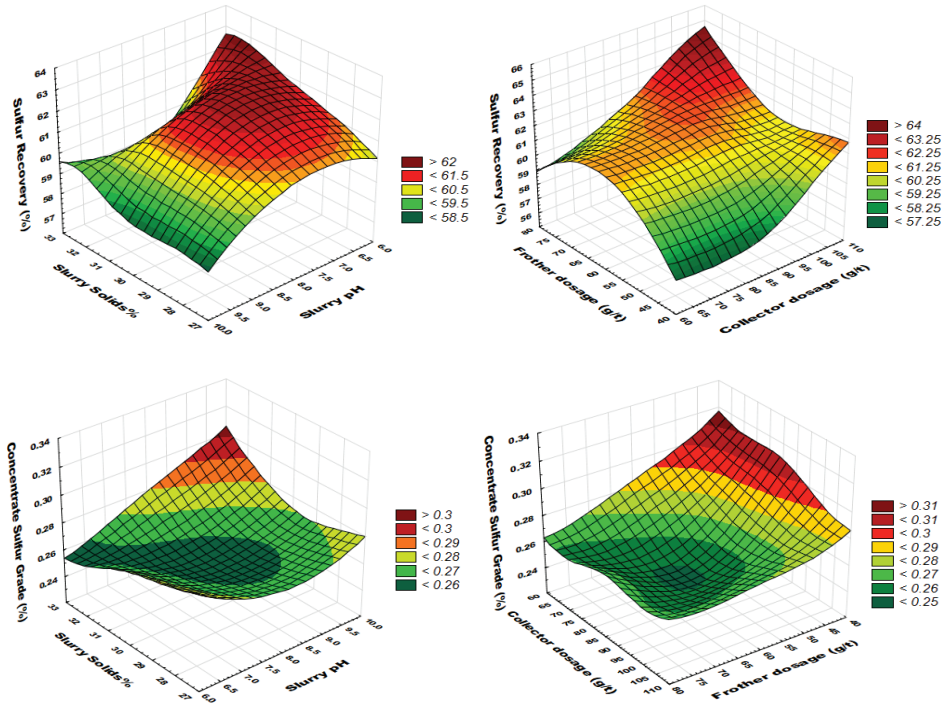
شکل ۲: منحنی دانه‌بندی خوراک مدار فلوتاسیون

۳-۲- نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی

نتایج آنالیز واریانس اثرات اصلی و متقابل متغیرهای مختلف بر بازیابی گوگرد در فرایند فلوتاسیون (در سطح اطمینان ٪۹۵) نشان داد به ترتیب پارامترهای غلظت کلکتور، pH پالپ، غلظت کف‌ساز و درصد جامد بیشترین تاثیر را بر بازیابی گوگرد دارند. در بین اثرات متقابل، فقط اثر متقابل بین pH و درصد جامد پالپ در سطح اطمینان ٪۹۵ اهمیت آماری دارد. شکل ۳ منحنی‌های سه‌بعدی اثر متغیرهای مختلف موثر بر بازیابی گوگرد و عیار گوگرد کنسانتره آهن در فرآیند شناورسازی ناپیوسته را نشان می‌دهند. مطابق نتایج ارایه شده، افزایش غلظت کلکتور باعث افزایش بازیابی گوگرد شده است. افزایش غلظت کلکتور باعث افزایش هیدروفوبیسیته ذرات و در نتیجه بهبود آهنگ جمع‌آوری آن‌ها با حباب‌های هوا می‌شود. با افزایش بازیابی گوگرد (در اثر افزایش غلظت کلکتور)، عیار گوگرد در کنسانتره آهن کاهش می‌یابد [۷]. افزایش غلظت کف‌ساز نیز باعث بهبود آهنگ شناورسازی ذرات پیریت شده است. کشش سطحی محیط با افزایش غلظت کف‌ساز کاهش یافته که این امر از

جدول ۳: نتایج آنالیز شیمیایی (XRF) خوراک مدار فلوتاسیون

عنصر (ترکیب)	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	CaO	MnO	S	MgO	Na_2O	V_2O_5
عیار (٪)	۹۳٫۴	۰٫۴۳	۰٫۳۷	۰٫۰۰۸	۰٫۲۹	۰٫۱۳	۰٫۳۸	۴٫۴۱	۰٫۵۵	۰٫۰۱۳



شکل ۳: تاثیر پارامترهای مختلف بر بازیابی گوگرد و عیار گوگرد کنسانتره آهن در فرآیند فلوتاسیون ناپیوسته

الحاق و به هم پیوستن حباب‌ها جلوگیری می‌کند. حباب‌های ریزتر (به دلیل سطح ویژه بیشتر) توانایی حمل و انتقال مقدار بیشتری از ذرات مورد نظر از زون پالپ به زون کف را دارند. افزایش آهنگ شناورسازی ذرات پیریت (با افزایش غلظت کف‌ساز)، موجب کاهش عیار گوگرد کنسانتره آهن می‌شود [۱۱].

کاهش pH پالپ باعث افزایش بازیابی گوگرد شده است. علت این است که دی‌زنتوژن (محصول اکسیداسیون گزنتات) مطابق رابطه (۳) عامل شناورسازی ذرات پیریت است. افزایش pH باعث کاهش غلظت دی‌زنتوژن در محیط و در نتیجه کاهش آهنگ شناورسازی پیریت می‌شود. همچنین رسوب هیدروکسیدهای آهن و نمک‌های کلسیم ($FeOOH$ ،$FeOH$، $CaSO_4$ ،$CaCO_3$) روی سطح ذرات پیریت نیز ممکن است دلیلی بر عدم شناوری آن در pHهای قلیایی باشد[۷،۶]. افزایش درصد جامد پالپ باعث افزایش کارآیی شناورسازی پیریت شده است. با افزایش درصد جامد پالپ، مقدار کانی‌های قابل شناور شدن موجود در سلول افزایش می‌یابد که موجب افزایش بازیابی فرآیند می‌شود. اما این روند تا رسیدن سلول به ظرفیت حمل خود ادامه دارد. با رسیدن سلول به ظرفیت حمل، دیگر حباب‌های هوا ظرفیت حمل کانی‌های باارزش را نداشته و هرگونه افزایش بیشتر درصد جامد باعث هدرروی کانی‌های باارزش به جریان باطله و کاهش کارآیی فرآیند می‌شود[۱۲].

نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون ناپیوسته آزمایشگاهی نشان داد که بهترین کارآیی متالورژیکی فرآیند گوگردزدایی کنسانتره آهن (بیشترین بازیابی گوگرد و کمترین عیار کنسانتره آهن) در غلظت‌های کلکتور و کف‌ساز بیشتر و pHهای کمتر حادث می‌شود. با افزایش درصد جامد پالپ اگر چه بازیابی گوگرد افزایش می‌یابد اما تاثیر آن بر عیار گوگرد کنسانتره آهن به دلیل اثرات متقابل بین متغیرها کاملا مشخص نیست. در نهایت شرایط بهینه آزمایش‌های فلوتاسیون ناپیوسته به شرح زیر تعیین شد:

غلظت کلکتور: ۸۵ g/t، غلظت کف‌ساز: ۶۵ g/t، pH=۶ و درصد جامد پالپ: ۳۳٪.

۳-۳- نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون صنعتی

۳-۳-۱- اثر نحوه توزیع کلکتور در سیستم

با توجه به تفاوت در هیدروفوبیسیته ذرات در بخش‌های مختلف مدار فلوتاسیون، توزیع کلکتورها در مدار تاثیر قابل

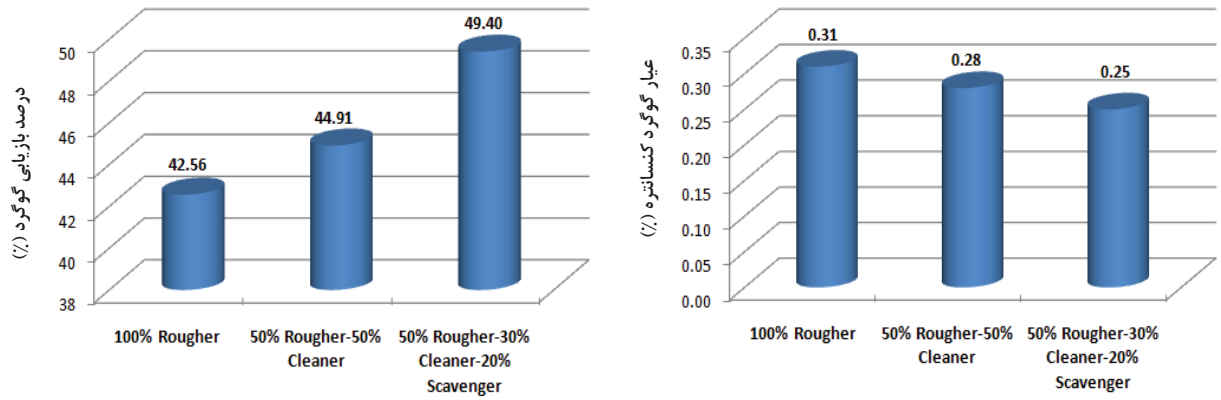
ملاحظه‌ای بر بهبود شناوری ذرات دارد. برای بررسی اثر این پارامتر اثر نحوه توزیع کلکتور بر کارآیی متالورژیکی مدار فلوتاسیون در سه وضعیت بررسی شد. شکل ۴ تاثیر نحوه توزیع کلکتور در مدار فلوتاسیون بر بازیابی و عیار کنسانتره گوگرد در مدار فلوتاسیون را نشان می‌دهد. کمترین بازیابی گوگرد در فرآیند فلوتاسیون (معادل ۴۲٫۵۶٪) در شرایطی که تمام کلکتور در ورودی مدار رافر (تانک آماده‌سازی) اضافه شده و بیشترین بازیابی (معادل ۴۹٫۴۰٪) در شرایط توزیع کلکتور در کل مدار (۵۰٪ رافر، ۳۰٪ کلینر و ۲۰٪ اسکاونجر) حاصل شده است. در بخش‌های ابتدایی مدار ذرات ریز با درجه آزادی بالا (هیدروفوبیسیته قوی) بخش عمده کلکتور موجود در سیستم را جذب می‌کند. به همین دلیل غلظت کلکتور باقی‌مانده در محیط برای شناورسازی ذرات درشت‌تر با هیدروفوبیسیته ضعیف‌تر کافی نیست. بنابراین توزیع کلکتور در مدار فلوتاسیون از هدرروی کانی‌های باارزش به ویژه در فراکسیون‌های ابعادی درشت‌تر جلوگیری می‌شود[۱۳]. تغییرات عیار گوگرد کنسانتره آهن (بخش شناور نشده در کف سلول) روندی معکوس تغییرات بازیابی آن است. با افزایش بازیابی گوگرد در بخش محصول شناور شده، بدون شک عیار گوگرد در بخش کنسانتره آهن کاهش می‌یابد که این امر باعث بهبود کیفیت محصول می‌شود. عیار گوگرد کنسانتره از ۰٫۳۱٪ در شرایط افزودن تمامی کلکتور در ورودی مدار رافر به ۰٫۲۵٪ در شرایط توزیع آن در کل مدار کاهش یافته است. بنابراین با توزیع کلکتور در کل مدار شرایط رسیدن به بازیابی و عیار گوگرد مطلوب فراهم می‌شود.

۳-۳-۲- اثر غلظت کلکتور

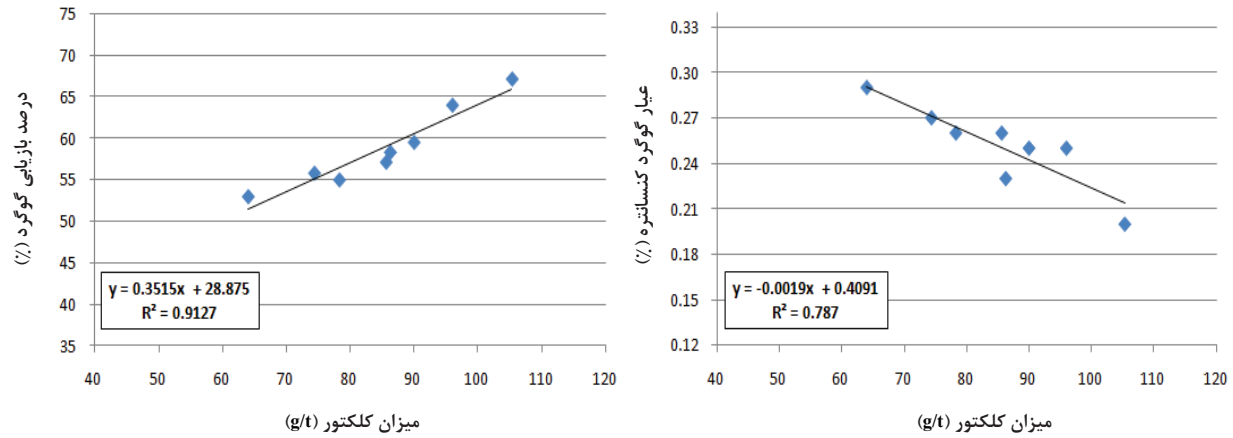
نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داد که غلظت کلکتور مهم‌ترین پارامتر موثر بر آهنگ شناوری سولفیدهای آهن در سلول فلوتاسیون است. اثر غلظت کلکتور در آزمایش‌های صنعتی در محدوده g/t ۱۰۵-۶۵ بررسی شد. شکل ۵ تاثیر مقدار کلکتور مصرفی مدار فلوتاسیون بر بازیابی و عیار کنسانتره گوگرد در مدار فلوتاسیون را نشان می‌دهد. مطابق نتایج ارایه شده، افزایش غلظت کلکتور باعث افزایش پیوسته بازیابی گوگرد و البته کاهش عیار گوگرد در کنسانتره آهن شده است. با افزایش غلظت کلکتور از ۶۵ به ۱۰۵ گرم بر تن، مقدار بازیابی گوگرد از ۵۳٪ به ۶۷٫۱٪ و عیار گوگرد کنسانتره آهن از ۰٫۲۹٪ به ۰٫۲۰٪ رسیده است. افزایش غلظت کلکتور گزنتات باعث افزایش هیدروفوبیسیته و شناوری ذرات پیریت می‌شود که موجب بهبود بازیابی و کاهش بیشتر عیار گوگرد کنسانتره آهن می‌شود. مطابق نتایج به‌دست آمده غلظت ۹۰-۸۰ گرم بر تن کلکتور برای رسیدن به کنسانتره‌ای با عیار گوگرد کمتر از ۰٫۲۵٪ مناسب است.

۳-۳-۳- اثر غلظت کف‌ساز

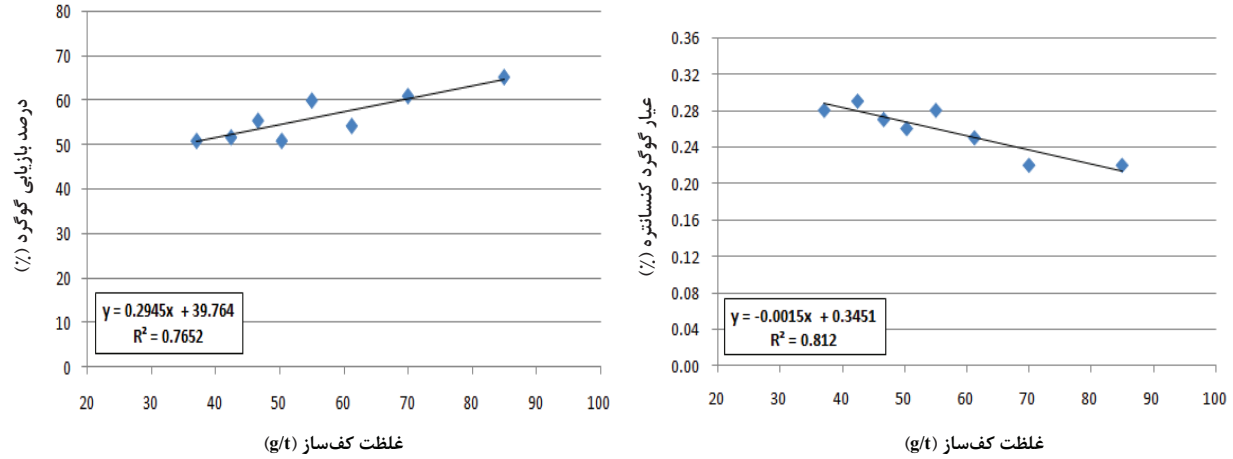
نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داد که افزایش غلظت کف‌ساز تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بازیابی گوگرد در فرآیند فلوتاسیون دارد. اثر غلظت کف‌ساز بر کارآیی متالورژیکی مدار فلوتاسیون در محدوده g/t ۸۵-۳۷ بررسی شد. تاثیر غلظت کف‌ساز بر بازیابی و عیار کنسانتره گوگرد در مدار فلوتاسیون در شکل ۶ ارایه شده است. مشابه کلکتور، افزایش غلظت کف‌ساز باعث افزایش بازیابی گوگرد و کاهش عیار آن



شکل ۴: اثر نحوه توزیع کلکتور بر بازیابی و عیار کنسانتره گوگرد در مدار فلوتاسیون



شکل ۵: تاثیر غلظت کلکتور بر بازیابی و عیار گوگرد کنسانتره مدار فلوتاسیون



شکل ۶: تاثیر غلظت کفساز بر بازیابی و عیار گوگرد کنسانتره مدار فلوتاسیون

در کنسانتره آهن شده است. افزایش غلظت کفساز از ۳۷ تا ۸۵ گرم بر تن، باعث افزایش بازیابی گوگرد از ۵۱٪ به ۶۵٫۲٪ و کاهش عیار گوگرد کنسانتره آهن از ۰٫۲۹ به ۰٫۲۲٪ می‌شود. افزایش غلظت کفساز باعث کاهش کشش سطحی محیط، جلوگیری از الحاق حباب‌ها و همچنین پایداری کف می‌شود. با کاهش ابعاد حباب‌ها سطح ویژه آن‌ها و در نتیجه آهنگ جمع‌آوری ذرات افزایش می‌یابد. بهبود پایداری کف نیز باعث افزایش آهنگ انتقال ذرات باارزش از زون کف به خارج سلول و در نتیجه افزایش بازیابی فرآیند می‌شود[۱۱]. بر طبق نتایج بدست آمده غلظت ۶۰-۷۰ گرم بر تن کفساز برای رسیدن به کارآیی متالورژیکی مطلوب مدار فلوتاسیون پیشنهاد می‌شود.

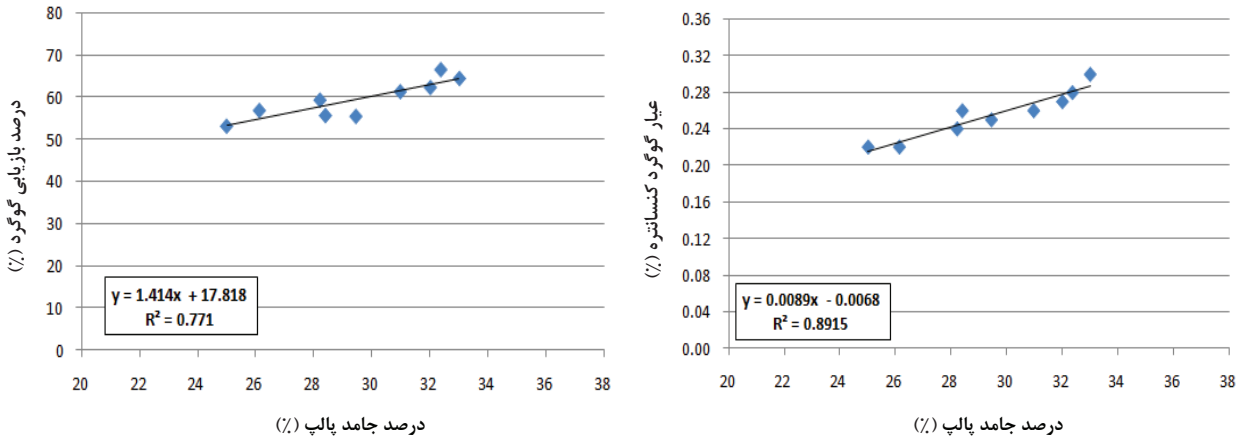
۳-۳-۴- اثر درصد جامد پالپ

با افزایش تدریجی تناژ خوراک ورودی به کارخانه‌های فرآوری، درصد جامد پالپ مدارهای خردایش، طبقه‌بندی و پرعیارسازی افزایش می‌یابد. افزایش تدریجی درصد جامد اگر چه باعث افزایش ظرفیت و تولید می‌شود اما ممکن است تاثیر سوئی بر کارآیی متالورژیکی مدارهای پرعیارسازی و درنتیجه بهره‌وری اقتصادی فرآیند داشته باشد. در مدارهای فلوتاسیون نیز درصد جامد پالپ از جمله پارامترهای عملیاتی موثر بر ویسکوزیته (گرانروی) محیط، ابعاد حباب‌ها، ماندگی گاز، ظرفیت حمل و کارآیی فرآیند شناورسازی است[۱۶-۱۴]. اثر درصد جامد پالپ ورودی مدار فلوتاسیون بر کارآیی فرآیند در محدوده ۲۵-۳۳ g/t بررسی شد.

شکل ۷ تاثیر درصد جامد پالپ بر بازیابی و عیار کنسانتره گوگرد در مدار فلوتاسیون را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، افزایش درصد جامد پالپ باعث افزایش بازیابی گوگرد و البته افزایش عیار گوگرد در کنسانتره آهن شده است. با افزایش درصد جامد پالپ از ۲۵ تا ۳۳٪، مقدار بازیابی گوگرد از ۵۳٫۲٪ به ۶۶٫۶٪ و عیار گوگرد کنسانتره آهن از ۰٫۲۲٪ به ۰٫۳۰٪ رسیده است. با افزایش درصد جامد پالپ، تا حدی که حباب‌های هوا در سلول فلوتاسیون به ظرفیت حمل خود نرسیده‌اند بازیابی فرآیند افزایش می‌یابد، اما با رسیدن حباب‌ها به ظرفیت حمل هر گونه افزایشی در تناژ یا درصد جامد خوراک ورودی موجب کاهش کارآیی متالورژیکی فرآیند می‌شود[۱۲]. افزایش پیوسته بازیابی گوگرد با افزایش درصد جامد پالپ نشان می‌دهد که در محدوده درصد جامدهای بررسی شده سلول‌های فلوتاسیون موجود هنوز در شرایط محدودیت ظرفیت حمل قرار ندارند. افزایش عیار گوگرد کنسانتره آهن در درصد جامدهای بالا را می‌توان به افزایش میزان دنباله‌روی ذرات باارزش ریز اکسیدآهن به همراه حباب‌های هوا به بخش شناورشده نسبت داد. نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون صنعتی انجام شده در این بخش نشان داد که برای رسیدن به کارآیی متالورژیکی مطلوب، درصد جامد خوراک ورودی مدار فلوتاسیون باید در محدوه ۳۰-۲۸٪ تنظیم شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان افزایش کارآیی متالورژیکی مدار فلوتاسیون کارخانه فرآوری سنگ آهن سنگان بررسی شد. برای این منظور آزمایش‌های فلوتاسیون آزمایشگاهی و صنعتی در شرایط مختلف انجام شد. نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون ناپیوسته نشان داد که غلظت کلکتور، pH پالپ، غلظت کف‌ساز و درصد جامد پالپ به ترتیب بیشترین تاثیر بر بازیابی گوگرد را دارند. کارآیی متالورژیکی فرآیند شناورسازی با افزایش غلظت کلکتور (از ۶۵ به ۱۰۵ گرم بر تن)، افزایش غلظت کف‌ساز (از ۴۵ به ۷۵ گرم بر تن) و کاهش pH محیط (از ۱۰ به ۶) افزایش یافت. نتایج آزمایش‌های صنعتی توزیع کلکتور در بخش‌های مختلف مدار فلوتاسیون نشان داد که بهترین کارآیی متالورژیکی فرآیند در شرایط اضافه کردن ۵۰٪ کلکتور در ورودی رافر، ۳۰٪ در ورودی مدار کلینر و ۲۰٪ در ورودی مدار اسکاونجر حاصل می‌شود. با افزایش غلظت کلکتور مصرفی در مدار فلوتاسیون (از ۶۵ به ۱۰۵ گرم بر تن)، مقدار بازیابی گوگرد از ۵۳٪ به ۶۷٫۱٪ افزایش و عیار گوگرد کنسانتره آهن از ۰٫۲۹٪ به ۰٫۲۰٪ کاهش یافت. غلظت ۹۰-۸۰ گرم بر تن کلکتور برای رسیدن به کنسانتره‌ای با عیار گوگرد کمتر از ۰٫۲۵٪ پیشنهاد شد. افزایش غلظت کف‌ساز (از ۳۷ تا ۸۵ گرم بر تن) باعث افزایش بازیابی گوگرد از ۵۱٪ به ۶۵٫۲٪ و کاهش عیار گوگرد کنسانتره آهن از ۰٫۲۹٪ به ۰٫۲۲٪ شد. غلظت مطلوب کف‌ساز برای رسیدن به کارآیی متالورژیکی مطلوب مدار فلوتاسیون، ۷۰-۶۰ گرم بر تن است. افزایش درصد جامد پالپ (از ۲۵ تا ۳۳٪) باعث افزایش بازیابی گوگرد از ۵۳٫۲٪ به ۶۶٫۶٪ و همچنین افزایش عیار گوگرد کنسانتره آهن از ۰٫۲۲٪ به ۰٫۳۰٪ شد. افزایش عیار گوگرد کنسانتره آهن در درصد جامدهای بالا به دلیل دنباله‌روی ذرات باارزش ریز اکسیدآهن



شکل ۷: اثر درصد جامد پالپ بر بازیابی و عیار گوگرد کنسانتره مدار فلوتاسیون

به همراه حباب‌های هوا به بخش شناورشده است. محدوده مناسب درصد جامد پالپ خوراک ورودی مدار فلوتاسیون برای رسیدن به کنسانتره‌ای با کیفیت مطلوب، ۳۰-۲۸٪ است.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری و پشتیبانی کلیه پرسنل مجتمع سنگ آهن سنگان در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی کنند.

۶- مراجع

[۱] شرکت مهندسی کانی کاوان شرق؛ ۱۳۸۹؛ **"گزارش عملکرد کارخانه فرآوری سنگ آهن سنگان"**. شرکت ملی فولاد ایران.

[2] Arvidson, B., Klemetti, M., Knuutinen, 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.

[3] Woods, R. (1988). "*Flotation of sulfide minerals*". In: P. Somasundaran and B. Moudgil (Editors), Reagents in Mineral Technology. Marcel Dekker, New York, NY, 39-77.

[4] Finkelstein, N. P. (1997). "*The activation of sulphide minerals for flotation: a review*". International Journal of Mineral Processing, 52: 81-120.

[5] Bulatovic, S. M. (2007). "*Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Volume 1: Flotation of Sulfide Ores*". Amsterdam, Elsevier Science & Technology Books.

[6] Wills, B. A., and Finch, J. (2016). "*Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (8th Edition)*". Butterworth-Heinemann.

[۷] عزت آبادی پور، ج.؛ سام، ع.؛ نخعی، ف.؛ شهریاری، م.؛ ۱۳۹۱؛ **"بررسی عوامل موثر در مدار فلوتاسیون خط فرآوری سولفورزدایی (SRP) شرکت سنگ آهن گلگهر"**. فصلنامه پژوهشی پژوهشگر، شماره ۳، ص ۳۳-۲۹.

[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(3): 70.

[۹] نخعی، ف.؛ ایران نژاد، م.؛ ۱۳۹۵؛ **"حذف پیریت از کنسانتره سنگ اهن با فلوتاسیون ستونی"**. نشریه مهندسی منابع معدنی، شماره ۲، ص ۱۱-۱.

[۱۰] کردستانی، م.؛ سام، ع.؛ اربابیان، م.؛ ۱۳۹۱؛ **"تعیین دانه‌بندی بهینه جهت طراحی مدار کلر و سولفورزدایی از کنسانتره تر کارخانه مگنتیت مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر"**. اولین کنفرانس فناوری‌های معدنکاری ایران، دانشگاه یزد.

[11] Melo, F., and Laskowski, J. S. (2006). "*Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation*". Minerals Engineering, 19: 766-773.

[12] Uribe-Salas, A., Perez-Garibay, R., and Nava-Alonso, F. (2007). "*Operating parameters that affect the carrying capacity of column flotation of a zinc sulfide mineral*". Minerals Engineering, 20: 710-715.

[13] Bazin, C., and Proulx, M. (2001). "*Distribution of reagents down a flotation bank to improve the recovery of coarse particles*". International Journal of Mineral Processing, 61: 1-12.

[14] Shabalala, N. Z. P., Harris, M. Leal Filho, L. S., and Deglon, D. A. (2011). "*Effect of slurry rheology on gas dispersion in a pilot-scale mechanical flotation cell*". Minerals Engineering, 24: 1448-1453.

[15] Banisi, S., Finch, J. A., Laplante, A. R., and Weber, M. E. (1995a). "*Effect of Solid Particles on Gas Hold-up in Flotation Columns-I. Measurement*". Chemical Engineering Science, 50(14): 2329-2334.

[16] Banisi, S., Finch, J. A., Laplante, A. R., and Weber, M. E. (1995b). "*Effect of Solid Particles on Gas Hold-up in Flotation Columns-II. Investigation of Mechanism of Gas Hold-up Reduction in Presence of Solids*".Chemical Engineering Science, 50(14): 2335-2342.

---

[۱] Cobber LIMS

[۲] Finisher