

مطالعه و بررسی پرعیارسازی کانسنگ سولفیدی-اکسیدی سرب کم عیار به روش‌های فلوتاسیون و ثقلی

آویشن عطرفی^۱، هایده حجت‌الاسلامی^۲، محمد نوع پرست^{۳*}، ضیاءالدین شفائی^۴، علی قربانی^۵، گلناز جوزانی کهن^۶

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، avishanatrafi@gmail.com

۲- کارشناس ارشد استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه شاهرود.

۳-۴ استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

۵- کارشناس آزمایشگاه کانه آرایبی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

۶- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(دریافت ۳ دی ۱۳۸۲، پذیرش ۱۴ دی ۱۳۸۸)

چکیده

نمونه کانسنگ کم عیار سولفیدی-اکسیده معدن چنگرزه نطنز اصفهان، با عیار ۲/۳٪ سرب و ۱/۹۸٪ روی، مورد پرعیارسازی به روش‌های فلوتاسیون و ثقلی قرار گرفت. هدف در این مطالعه تولید کنسانتره سرب با حداکثر بازیابی بود و میزان تاثیر پارامترهای کیفی مانند نوع کلکتور، کف ساز و همچنین میزان بهینه پارامترهای کمی زمان ماند ذرات در آسیا، میزان کلکتور، سولفور سدیم، سیلیکات سدیم، زمان آماده‌سازی، میزان pH و درصد جامد همراه با پرعیارسازی محصول رافر مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که در حالت بهینه فلوتاسیون جمعی با استفاده از ۲۰۰۰ گرم بر تن سولفور سدیم به عنوان سولفید کننده، ۵۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده، ۲۰۰ گرم بر تن کلکتور آمیل گزنتات پتاسیم و ۳۰ گرم بر تن کف‌ساز MIBC در pH ۱۰، کانی‌های اکسیدی و سولفیدی سرب بازیابی بیشتری (۹۴٪ در مرحله رافر) نسبت به فلوتاسیون تفریقی به دست می‌آید و با ۳ مرحله شستشو کنسانتره رافر، عیار را می‌توان به حدود ۷۰٪ سرب رساند. همچنین در بررسی سینتیکی فرآیند فلوتاسیون مرحله رافر، چگونگی شناور شدن ذرات بارزش در بازه زمانی پیاپی، زمان بهینه کف‌گیری ۱۸ دقیقه به دست آمد. روش‌های ثقلی با هدف تولید محصول قابل فروش یا محصول میانی قابل باردهی به فلوتاسیون با بررسی تاثیر شیب، آب مصرفی انجام شد. نتیجه پرعیارسازی ثقلی با میز لرزان، برای خوراک پرعیار با ۵/۷٪ سرب، کنسانتره سرب با عیار ۴۶٪ و بازیابی ۸۰٪ بود که می‌تواند تنها جهت تولید پیش کنسانتره عملیات فلوتاسیون به کار رود. از آنجایی که محدوده جداسازی جیگ ابعاد درشت است، اما محتوای سرب نمونه مورد مطالعه در بخش دانه ریز کانسنگ متمرکز بود، لذا نتایج قابل توجهی به دست نیامد.

کلمات کلیدی

کانسنگ کم عیار سولفیده-اکسیده سرب، فلوتاسیون، ثقلی، چنگرزه.

۱- مقدمه

روش متداول بازیابی کانی‌های اکسیده سرب مانند سروزیت، آنگلیت و پلامبوژاروسیت، فلوتاسیون است [۱]. قابلیت شناوری کم کانسنگ‌های مخلوط اکسیده سولفور و در نتیجه پاسخ ضعیف این گونه کانسنگ‌ها به فلوتاسیون حتی در مقادیر بالای ترکیبات تیوفسفات به عنوان کلکتور، مربوط به حلالیت نسبتاً زیاد کانی‌های سرب نوع اکسیده و گالن اکسیده-کربناته و آب، پوشیدگی بسیار زیاد سطوح آنها می‌باشد [۲]. یون‌های سرب حل شده از شبکه کانی با کلکتور واکنش داده و بصورت گزنتات سرب نامحلول رسوب کرده و باعث مصرف بالای کلکتور می‌شوند. برای شناور کردن سروزیت، مصرف کلکتور چند برابر مقدار مورد نیاز برای فلوتاسیون گالن است. دلیل اصلی برای مصرف زیاد کلکتور احتمالاً واکنش بین X^- و $PbCO_3$ و در نتیجه هدر رفتن کلکتور است. بنابراین کانی‌های اکسیده سرب معمولاً قبل از فلوتاسیون با عوامل سولفیدکننده عمل‌آوری می‌شوند. افزودن نمک‌های سولفید به سیستم، سطح را به سولفید سرب نامحلول تبدیل می‌کند و در نتیجه مصرف کلکتور کاهش می‌یابد [۱].

اگر کانی‌های اکسیده سرب در مقادیر قابل توجه موجود باشند، معمولاً ابتدا سولفیدهای سرب و سپس سولفید روی، در صورت وجود، شناور می‌شوند. سولفید سدیم یا هیدروسولفید سدیم به عنوان عامل سولفید کننده، با تبدیل سطح کانی‌های اکسیدی به سولفیدی، سطح آنها را هیدروفوب کرده و شناور می‌شوند. میزان عامل سولفید کننده در کانسارهای مختلف معمولاً بین ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ گرم بر تن می‌باشد. کنترل دقیقی در افزودن عامل سولفیدکننده ضروری است، زیرا کمبود یون سولفید موجب ناکارآمدی سولفیداسیون سطح کانی شده و بازیابی ضعیفی را به همراه دارد. از سوی دیگر فزونی سولفید در صورت استفاده از ترکیبات تیوفسفات به عنوان کلکتور باعث بازداشت توام کانی‌های سولفیدی و سولفید شده می‌گردد [۳] و [۴].

آئرو ۴۰۴، ۴۰۷ یا ۴۱۲ به همراه ایزوپروپیل یا آمیل گزنتات کلکتورهای ترجیحی برای کانی‌های سرب هستند. افزودن عامل سولفید کننده و کلکتور به صورت مرحله به مرحله در فلوتاسیون رافر معمول است [۵]. همچنین فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی-اکسیدی با گزنتات‌ها بستگی زیادی به pH پالپ دارد، بدین ترتیب که بازیابی سرب در pH بالاتر از ۱۰ افت می‌کند [۶] و [۷].

فلوتاسیون کانسنگ‌های نیمه اکسیده نیازمند به ترکیب کلکتورهای مختلف، مصرف بالای مواد شیمیایی و استفاده از سولفید سدیم و پیچیده‌تر از کانسنگ‌های اکسیده است. هرچند فلوتاسیون به عنوان روش سنتی فرآوری کانه‌های سولفور-اکسیده شناخته شده است اما به دلیل پاسخ ضعیف کانسنگ‌های سولفور-اکسیده به فلوتاسیون، روش‌های دیگری چون جدایش فیزیکی مانند پری‌عیارسازی ثقلی نیز برای بهینه‌سازی فرآیند قابل استفاده هستند که در مرحله تولید کانسنگ‌ها و پیش کنسانتره به کار می‌روند و استفاده از آنها قبل از فلوتاسیون به عنوان یک روش موثر برای افزایش عیار بار ورودی به فلوتاسیون و همچنین حذف باطله برای کاهش وزن بار ورودی به بخش آسیا و فلوتاسیون و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی مورد توجه می‌باشد [۲].

در مورد کانسنگ سرب در صورتی که درجه آزادی در ابعاد درشت (بالاتر از ۵۰۰ میکرون) حاصل شود می‌توان به روش ثقلی عمل کرد، زیرا در این حالت وزن مخصوص کانه سرب نسبت به باطله بیشتر بوده و با معیار "نسبت چگالی موثر" استدلال کافی برای فرآیند ثقلی وجود خواهد داشت. بدیهی است در سایر موارد، تا ابعاد آزادی حدود ۱۰۰ میکرون، باید به روش فلوتاسیون عمل شود. روش غرق و شناور سازی (ثقلی) بصورت گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، زیرا زمانی که یک بخش شناور با عیار کم حاصل می‌شود، ممکن است با آزاد سازی ذرات با ارزش توسط آسیا و فلوتاسیون محصول آسیا این ذرات نیز قابل بازیابی باشند [۸].

مزایای روش ثقلی عبارتند از پایین بودن هزینه نصب به ازای هر تن ماده معدنی نسبت به فلوتاسیون در شرایط مشابه، هزینه کم انرژی مصرفی، عدم استفاده از مواد شیمیایی گران قیمت، عدم تاثیر نامطلوب زیست محیطی نسبت به روش‌های دیگر مانند فلوتاسیون به دلیل عدم به‌کارگیری مواد شیمیایی آلی طی فرآیند جداسازی، ساده‌بودن فرآیند، ظرفیت و کارایی بالا و هزینه خردایش کمتر می‌باشند [۹].

در این مقاله، نتایج حاصل از مطالعات بازیابی کانی‌های اکسیدی و سولفیده سرب از کانسنگ معدن چنگرزه به کمک روش‌های فیزیکی شیمیایی از جمله فلوتاسیون و ثقلی نیز ارائه شده است.

۲- مواد و روش کار

نمونه مورد مطالعه در این تحقیق از معدن سرب چنگرزه نطنز- اصفهان، با وزن تقریبی ۹۰ کیلوگرم و ابعاد اولیه ۱۵-۱۰ سانتی متر تهیه شد. مطالعات کانی شناسی میکروسکوپی این معدن در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج بررسی های کانی شناسی به روش XRD بر روی نمونه این معدن نیز در جدول ۲ و طیف XRD آن در شکل ۱ آورده شده است. در مطالعات میکروسکوپی خوراک مشاهده شد که بیش از ۵۰٪ گالن در معرض هوازدگی و اکسیداسیون به سروزیت تبدیل شده است. در آنالیز شیمیایی خوراک با روش جذب اتمی، عیار سرب ۲/۳٪ و عیار روی ۱/۹۸٪ گزارش شد. مطالعات میکروسکوپی مربوط به درجه آزادی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱: کانی های شناسایی شده معدن چنگرزه با مطالعات

میکروسکوپی

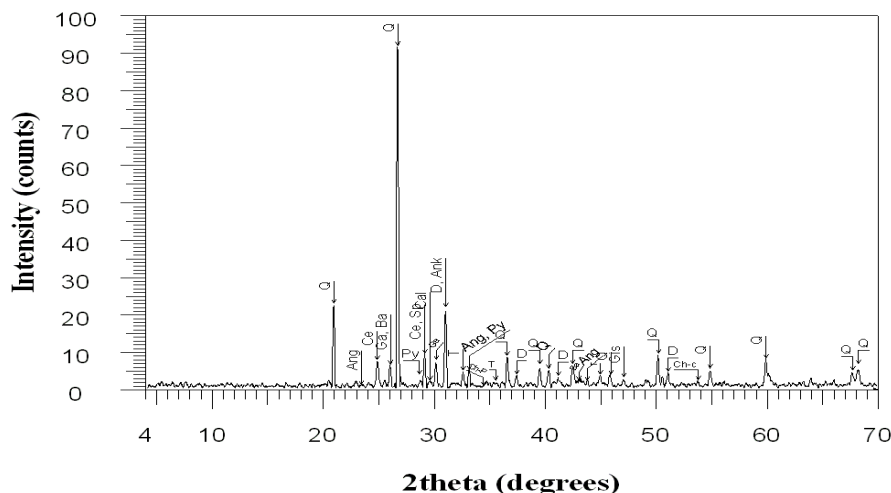
نام کانی	فرمول شیمیایی	نوع
گالن	PbS	اصلی
سروزیت	PbCO ₃	اصلی
کوارتز	SiO ₂	باطله
کولین	CuS	باطله
کالکوسیت	Cu ₂ S	باطله
مالاکیت	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	باطله
پیریت	FeS ₂	باطله
اسفالریت	ZnS	اصلی
اسمیت زونیت	ZnCO ₃	اصلی

جدول ۲: کانی های شناسایی شده معدن چنگرزه به ترتیب فراوانی با

آزمایش XRD

نام کانی	فرمول شیمیایی	نوع
دولومیت	CaMg (CO ₃) ₂	باطله
کوارتز	SiO ₂	باطله
انکریت	Ca(Mg _{0.67} Fe _{0.33})(CO ₃) ₂	باطله
ژیزموندیت	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ .4H ₂ O	باطله
گالن	PbS	اصلی
سروزیت	PbCO ₃	اصلی
تتراهدریت	Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃	باطله
باریت	BaSO ₄	باطله
آنکلیزیت	PbSO ₄	اصلی
پیریت	FeS ₂	باطله
کالکوپیریت	CuFeS ₂	باطله
اسفالریت	ZnS	اصلی
کالکوسیت	Cu ₂ S	باطله
کلسیت	CaCO ₃	باطله

برای رسیدن به درجه آزادی مورد نظر، نمونه ها طی ۳ مرحله سنگ شکنی شامل دو سنگ شکن فکی و یک سنگ شکن استوانه ای برای تولید محصول با ابعاد ذرات ۸۰٪ ریزتر از ۲۳۶۰ میکرون خرد شدند. برای عملیات تغلی چنین ابعادی که در آن بخشی از ذرات آزاد شده اند کافی است. برای تهیه نمونه های آزمایش فلوتاسیون، محصول به دست آمده از سنگ شکنی به مدت ۱۰ دقیقه در آسیای میله ای تا ابعاد ۲۱۲ میکرون تحت خردایش قرار گرفت.



شکل ۱: طیف XRD نمونه معدن چنگرزه

مناسب است ولی با توجه به کم عیار بودن کانسنگ و درگیر بودن ذرات آن در ابعاد مناسب برای جیگ، استفاده از آن برای این کانسنگ چندان مناسب به نظر نمی‌رسد.

جدول ۴: مواد شیمیایی مورد استفاده در فلوتاسیون

نوع	میزان مصرف به گرم بر تن خوراک	فرمول	ماده شیمیایی
مرک	۳۶۰	NaOH	هیدروکسید سدیم
سیانامید	۲۰۰	R-O-C=S-S (Na, K)	کلکتور اتیل گزنتات پتاسیم (KAX)
مرک	۲۰۰۰	Na ₂ S	سولفور سدیم
سیانامید	۶۰ - ۳۰	(CH ₃) ₂ CH CH ₂ CH (OH)CH ₃	MIBC کف ساز
مرک	۵۰۰	Na ₂ SiO ₃	سیلیکات سدیم
مرک	۷۵۰	H ₂ SO ₄	اسید سولفوریک ٪۹۸

آزمایش‌های فلوتاسیون در سلول‌های ۲ لیتری توسط ماشین فلوتاسیون دنور با دور موتور ۸۰۰ دور در دقیقه و با درصد جامد ۳۷٪ انجام شد. در این سری آزمایش‌ها از آمیل گزنتات پتاسیم به عنوان کلکتور، سولفید سدیم به عنوان عامل فعال کننده برای کانی‌های اکسیده، کف‌ساز MIBC و سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده استفاده شد. جدول ۴ میزان بهینه مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمایش‌های اولیه را نشان می‌دهد (اعداد بهینه پس از چند مرحله آزمایش با محدوده‌های مختلف به دست آمد). در آزمایش‌های فلوتاسیون، تاثیر پارامترهای کیفی مختلف مانند بازیابی همزمان یا جداگانه کانی‌های سولفوری و اکسیدی سرب، نوع کلکتور و نوع کف‌ساز بررسی شد و میزان بهینه پارامترهای کمی مانند زمان ماند ذرات در آسیا، میزان کلکتور، میزان سولفور سدیم و زمان آماده‌سازی آن، میزان سیلیکات سدیم و pH برای دستیابی به بازیابی حداکثر، تعیین شد. سپس تست‌های تکمیلی برای شستشوی محصول رافر و بالا بردن عیار آن صورت پذیرفت.

جدول ۳: خلاصه مطالعات درجه آزادی

فراکسیون (میکرون)	درجه آزادی گالن	درجه آزادی گالن + سرزیت
< ۲۳۶۰	درگیر	درگیر
۲۰۰۰	درگیر	درگیر
۸۵۰	درگیر	درگیر
۵۰۰	۳۵-۳۰٪	> ۵۰٪
۳۰۰	۷۵-۷۰٪	۹۰٪
۲۱۲	۹۰-۸۵٪	۹۵٪
۱۵۰	۹۰-۸۵٪	۹۵٪
۷۵	به علت تولید نرمه زیاد غیر قابل مطالعه	

۳- نتایج و تحلیل آنها

۳-۱- فرآوری سرب به روش فلوتاسیون

همانگونه که ذکر شد آزمایش‌های مختلفی برای تعیین مقادیر بهینه پارامترها انجام شد و نتایج حاصل از آنها مورد بررسی لازم قرار گرفت. تاثیر تغییرات هر یک از پارامترها برای افزایش بازیابی در مرحله رافر ذیلاً بررسی شده است.

۳-۱-۱- تاثیر فلوتاسیون تفریقی و تجمعی

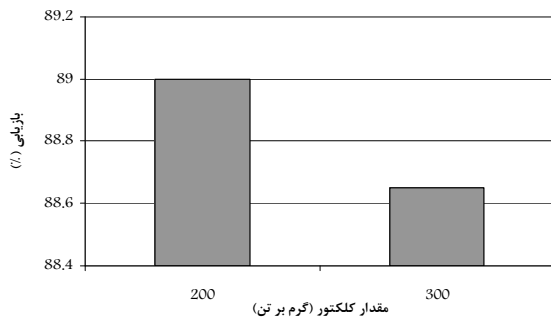
به منظور بررسی فلوتاسیون تفریقی، ابتدا کانی‌های سولفوری سرب شناور شدند، سپس با فعال‌سازی کانی‌های اکسیدی توسط عامل سولفیدی، آنها نیز شناور و بازیابی شدند. عمل سولفوراسیون برای فلوتاسیون تجمعی در ابتدا صورت پذیرفت و کانی‌های سولفوری و اکسیدی به طور همزمان بازیابی شدند. بازیابی سرب در کنسانتره تفریقی ۸۷/۲۷٪ و کمتر از فلوتاسیون تجمعی ۸۸/۹۹٪، به دست آمد (شکل ۲). به طور کلی فلوتاسیون تفریقی در شرایطی نتیجه بهتری به دست می‌دهد که کانی‌های اکسیده سرب در مقادیر قابل توجه موجود باشند [۲].

در مورد کانسنگ سرب چنگرزه اختلاف چگالی کانی‌های سنگین یعنی گالن و سرزیت با کانی‌های سبک محاسبه شده و روش ثقلی برای آن مناسب تشخیص داده شد. از آنجایی که "نسبت چگالی موثر" در محدوده ۱/۷۵ تا ۲/۵ است، طبق شرایط عنوان شده در کتب مرجع جدایش ثقلی در مورد این کانسنگ ممکن بوده و تا ۱۵۰ میکرون و ریزتر قابل استفاده است.

در بین روش‌های ثقلی از میز لرزان استفاده شد. با توجه به ابعاد بار ورودی برای میز لرزان، این روش برای کانسنگ چنگرزه، با توجه به آزاد شدن برخی ذرات در این ابعاد،

آمیل گزنتات در مورد گالن، میزان ۳۱۵-۲۲۰ گرم بر تن بیشترین بازیابی را به دست می‌دهد[۱].

برای به دست آوردن مقدار کلکتور مصرفی بهینه برای کانستگ چنگرزه، میزان آمیل گزنتات پتاسیم از ۲۰۰ گرم بر تن به کار رفته در آزمایش پایه به ۳۰۰ گرم بر تن افزایش یافت، اما تغییر رضایت بخشی در بازیابی سرب در کنسانتره مشاهده نشد (شکل ۴). هم چنین از آنجایی که ۲۰۰ گرم بر تن در دو مرحله به صورت ۱۵۰ و ۵۰ گرم بر تن افزوده می‌شود و با افزودن ۵۰ گرم بر تن باز هم کف باردار بالا می‌آید، افزودن ۵۰ گرم بر تن ضروری است. در نتیجه ۲۰۰ گرم بر تن مقدار کلکتور بهینه در نظر گرفته می‌شود.

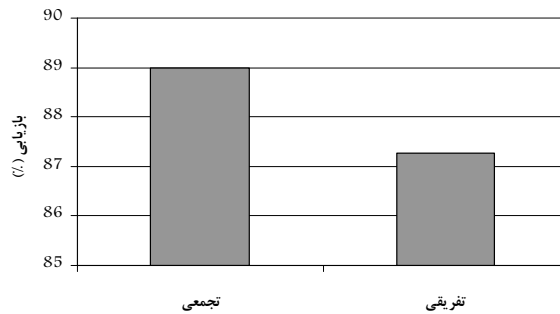


شکل ۴: تاثیر مقدار کلکتور آمیل گزنتات بر بازیابی سرب

۳-۱-۴- اثر مصرف عامل سولفید کننده

اثر مثبت سولفیدی کردن کانی‌های اکسیدی با سولفور سدیم برای مدت زیادی شناخته شده است [۱]. بعد از سولفیدی شدن، سطح در اثر حضور یون سولفیدی جذب شیمیایی شده، خیلی کمتر آپذیر است و در نتیجه بصورت موثرتری شناور می‌گردد. تحت چنین شرایطی مصرف کلکتور بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در ضمن در مورد نمونه کانستگ مورد مطالعه، سولفوراسیون کانی‌های اکسیدی هدف اصلی در استفاده از سولفور سدیم است. وقتی سولفید به میزان بیش از $10^{-4} \times 5/3$ مول در لیتر اضافه شود، به علت اینکه سولفید ترجیحاً به جای گزنتات جذب می‌شود مجدداً بازداشت رخ می‌دهد [۱].

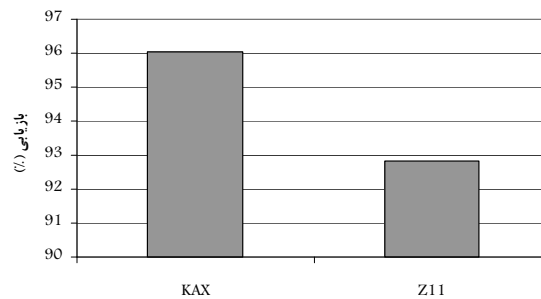
در این سری آزمایش‌ها، مقدار سولفید سدیم بین ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ گرم بر تن تغییر داده شد. افزایش مقدار سولفید سدیم ابتدا باعث افزایش بازیابی سرب در کنسانتره از ۸۳/۷۲٪ به ۸۸/۹۹٪ شد و سپس آن را به ۸۶/۸۷٪ کاهش داد. با توجه به نتایج، ۲۰۰۰ گرم بر تن مقدار بهینه عامل سولفید کننده تعیین شد (شکل ۵).



شکل ۲: تاثیر فلوتاسیون تفریقی سرویت بر بازیابی سرب

۳-۱-۲- اثر نوع کلکتور

گزنتات‌ها پرمصرف‌ترین کلکتورها در فلوتاسیون کانی‌های سرب اکسیده و سولفیده هستند [۷]. با مقایسه دو کلکتور ایزوپروپیل و آمیل گزنتات، تاثیر نامطلوب ایزوپروپیل گزنتات پتاسیم بر بازیابی سرب کاملاً مشهود است. استفاده از مقدار مشابه Z_{11} به جای KAX بازیابی سرب در کنسانتره را از ۹۶/۰۳٪ به ۹۲/۸۳٪ کاهش داد (شکل ۳).

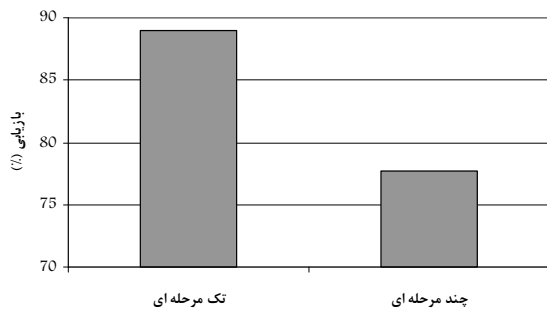


شکل ۳: تاثیر نوع کلکتور آمیل گزنتات بر بازیابی سرب

ایزوپروپیل گزنتات پتاسیم یک کلکتور زنجیر کوتاه بوده و کلکتور آمیل گزنتات پتاسیم یک کلکتور زنجیر بلند است. عموماً هر چه زنجیر هیدروکربن بلندتر باشد، غلظت کمتری از کلکتور برای رسوب نمک آن لازم است. در ضمن هرچه طول زنجیر هیدروکربن بلندتر باشد، آبرانی سطح کانی بیشتر می‌شود [۱۰]. با غلظت ۲۰۰ گرم بر تن کلکتور، دور از انتظار نیست که کلکتور قوی‌تر تاثیر بهتری در آبران کردن سطح کانی داشته باشد.

۳-۱-۳- اثر افزایش مقدار کلکتور

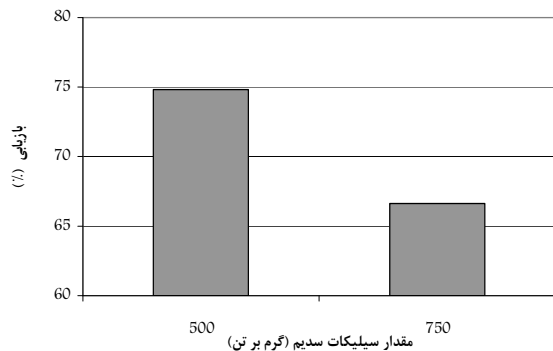
در منحنی بازیابی گالن به عنوان تابع میزان گزنتات، با افزایش گزنتات بازیابی افزایش می‌یابد تا به مقدار مشخص گزنتات برسد که بازیابی ثابت می‌شود. در شرایط استفاده از



شکل ۶: تاثیر افزودن چند مرحله‌ای مواد شیمیایی بر بازایی

همچنین پوشاندن سطح ذرات کانسنگ باعث انتقال کانه به باطله (و یا برعکس) می‌شود. از طرفی از آنجایی که درصد بالایی از مواد با ارزش خوراک در ابعاد ریز در حد نرمه قرار دارد، نرمه‌گیری مفید نخواهد بود. در نتیجه در آزمایش دیگری اثر افزودن سیلیکات سدیم بررسی شد. در فلوتاسیون بعضی از کانی‌ها وقتی مقدار نرمه زیاد باشد، نرمه‌ها به دور هم جمع می‌شوند و گره‌ها را تشکیل می‌دهند. در چنین شرایطی کنترل فلوتاسیون مشکل شده و منجر به کاهش بازایی و عیار کنسانتره می‌گردد. بنابراین در مواردی که مقدار این گره‌ها زیاد باشد از سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده استفاده می‌شود [۱۰].

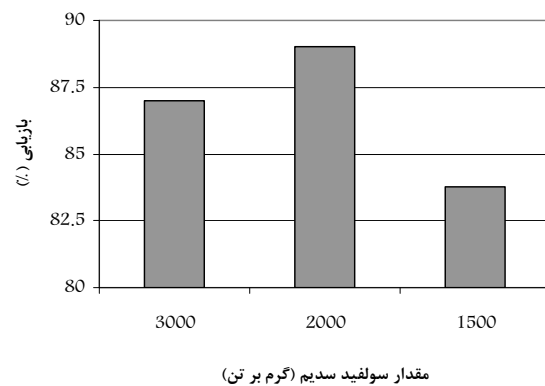
چنان که از نتایج آزمایش استنباط می‌شود، افزودن سیلیکات سدیم تاثیر بسیار مطلوبی در بالا بردن بازایی سرب در کنسانتره از $88/99\%$ به $94/07\%$ دارد. استفاده از سیلیکات سدیم بسیار حساس است به طوریکه با مصرف کم آن می‌توان نتیجه مطلوبی به دست آورد ولی افزایش یا کاهش در مصرف آن نتایج نامطلوبی را به دنبال دارد [۱۰]. در این آزمایش نیز با افزایش مقدار مصرفی سیلیکات سدیم از 500 به 750 گرم بر تن، بازایی از $74/82\%$ به $66/66\%$ کاهش یافت (شکل ۷).



شکل ۷: تاثیر افزایش میزان سیلیکات سدیم بر بازایی

۳-۱-۵- اثر زمان آماده سازی سولفید سدیم

به منظور یافتن زمان بهینه برای سولفید شدن کانی‌های اکسیده، زمان آماده‌سازی ۳، ۶ و ۱۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در زمان ۶ دقیقه آماده‌سازی، بالاترین بازایی ($96/03\%$) به دست آمد. احتمالاً زمان طولانی اثر سولفور سدیم مانند مصرف مقدار زیاد آن منجر به بازداشت گالن می‌شود. محدوده وسیع ۳۰ ثانیه تا ۱۵ دقیقه برای زمان آماده‌سازی سولفور سدیم پیشنهاد شده است. اما زمان سولفوراسیون کامل سروریت حدود ۳۰ ثانیه گزارش شده است [۱].



شکل ۵: تاثیر مقدار سولفید سدیم بر بازایی سرب

۳-۱-۶- افزودن مرحله به مرحله کلکتور و عامل سولفید کننده

افزودن مرحله به مرحله عوامل شیمیایی از این رو مورد توجه محققین است که از بالا رفتن شدید pH که منجر به افت پتانسیل الکتریکی و در نتیجه بازداشت کانی‌های سرب می‌شود، جلوگیری می‌کند [۳]. به این دلیل اثر افزودن مرحله به مرحله کلکتور و عامل سولفید کننده مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور کلکتور و سولفید سدیم در طی ۵ مرحله به پالپ افزوده شد. بر خلاف انتظار، نتایج این آزمایش نسبت به آزمایش مبنا رضایت بخش نیست. به طوریکه بازایی آزمایش چند مرحله‌ای، $77/76\%$ است که نسبت به آزمایش تک مرحله‌ای با بازایی $88/99\%$ ، افت قابل توجهی را نشان می‌دهد (شکل ۶). با توجه به مراحل آماده‌سازی پیچیده‌تر و زمان بیشتر این روش مناسب به نظر نرسید.

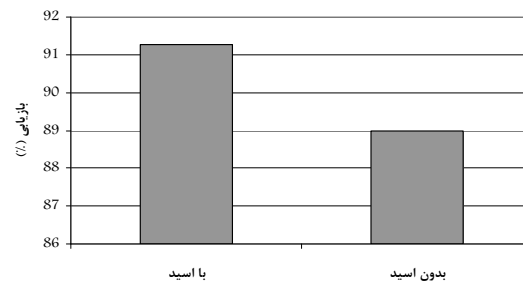
۳-۱-۷- اثر سیلیکات سدیم

تولید نرمه در حین خردایش و آسیاکنی باعث افزایش سطح مخصوص ذرات و افزایش مصرف مواد شیمیایی می‌شود.

۳-۱-۸- اثر کنترل pH

با توجه به ماهیت جذب شیمیایی گزنتات‌ها بر سطح گالن، فلوتاسیون کامل گالن در محدوده $pH=10-2$ صورت می‌گیرد. گالن در pH های بالای ۱۱ به علت تشکیل و پایداری گونه‌های هیدروکسی سرب مانند پلمبیت، بازداشت می‌شود. تشکیل پلمبیت به جای گزنتات سرب بر روی سطح گالن علت بازداشت گالن در این pH است [۱۰]. همچنین در pH های خیلی بالا، هیدروکسید آهن که احتمالاً از آسیای فولادی یا محتوای پیریت کانسنگ به پالپ وارد شده، تشکیل اکسی-هیدروکسیدهای فلزی آب دوست می‌دهد و سطح را آب دوست می‌کند. در نتیجه شناور پذیری کاهش می‌یابد [۱۱].

با تنظیم pH در بازه ۹-۸/۵ (pH قلیایی انتخاب شده تا گانگ کربناته حل نشود) بازیابی سرب در کنسانتره نسبت به آزمایش شاهد که در آن کنترل pH انجام نگرفته، از ۸۸/۹۹٪ به ۹۱/۲۸٪ افزایش یافت (شکل ۸).



شکل ۸: تاثیر کنترل pH با افزودن اسید بر بازیابی سرب

۳-۱-۹- اثر pH پایین و سیلیکات سدیم

به منظور بررسی اثر همزمان "pH پایین" و عامل سیلیکات سدیم، آزمایشی انجام شد. با توجه به نتایج حاصل، مشاهده شد که تاثیر همزمان این دو فاکتور باعث افت بازیابی تا ۷۴/۸۲٪ می‌شود. با توجه به این که هر یک از این دو عامل به تنهایی باعث افزایش بازیابی می‌شوند، انتخاب یکی از آنها برای افزایش بازیابی ضروری است. تایید تاثیر متقابل این دو عامل به کمک طراحی و تحلیل آماری نتایج آزمایش‌ها با استفاده از نرم افزار قابل بررسی است.

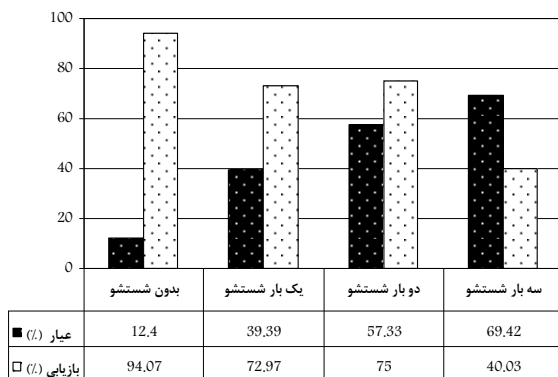
۳-۱-۱۰- اثر نوع کف ساز

به منظور تعیین کف‌سازی که سازگاری بیشتری با شرایط آزمایش دارد از MIBC، روغن کاج و کمک کلکتور آئروفلوت ۶۵ استفاده شد. بهترین نتیجه از MIBC با بازیابی ۹۴/۰۷٪

حاصل گردید. در حالی که بازیابی روغن کاج ۹۰/۴۸٪ گزارش شد. به منظور بهبود شرایط کف و افزودن عمق آن، از کمک کلکتور آئروفلوت ۶۵ با خاصیت کف‌سازی قوی استفاده شد. علیرغم پایدار و عمیق شدن ظاهری کف، بازیابی آن به ۷۲/۲۳٪ کاهش یافت. البته نوع کف ساز مناسب در شرایط مختلف آزمایش متفاوت است. در حالتی که ترکیب دو عامل pH پایین و سیلیکات سدیم بررسی می‌شود، مشاهده شد که بر عکس سایر آزمایش‌ها کف ساز MIBC به خوبی عمل نمی‌کند و کف حالت سوزنی دارد، در همان شرایط با اضافه کردن روغن کاج شرایط کف و بار بهبود یافت.

۳-۱-۱۱- اثر دفعات شستشو

با بدست آوردن مقدار بهینه پارامترها به صورت تجربی، در مرحله آخر بالا بردن عیار کنسانتره با حداقل مرحله شستشو (بدون افزودن ماده شیمیایی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش تعداد دفعات شستشو عیار سرب در کنسانتره افزایش می‌یابد تا در نهایت در مرحله سوم به نزدیک ۷۰٪ می‌رسد که به صورت رضایت بخشی بالاتر از ۶۰٪ برای کنسانتره قابل فروش است (شکل ۹).



شکل ۹: تاثیر تعداد مراحل شستشو بر عیار سرب

جدول ۵: تاثیر تعداد دفعات شستشو بر عیار و بازیابی سرب در کنسانتره

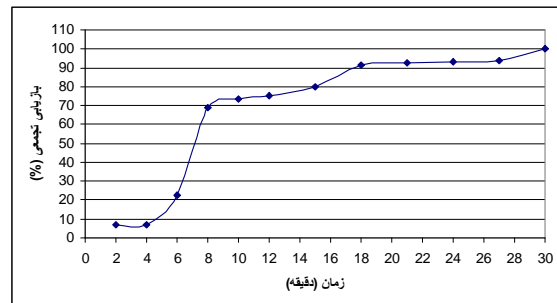
بدون شستشو	یکبار شستشو	دو بار شستشو	سه بار شستشو	
۱۲/۴	۳۹/۳۹	۵۷/۳۳	۶۹/۴۲	عیار سرب در کنسانتره
۹۴/۰۷	۷۲/۹۷	۷۵	۴۰/۰۳	بازیابی سرب در کنسانتره

۳-۱-۱۲- بررسی سینتیکی فرآیند

به منظور بررسی نرخ شناوری ذرات کانی در واحد زمان در فرآیند فلوتاسیون، در فاصله‌های زمانی پیاپی کف‌گیری شد و کف مربوط به هر بازه در ظرف مخصوص خود جمع‌آوری شد. نمودار سینتیکی به صورت بازیابی‌های تجمعی در هر بازه زمانی رسم شد. روند کلی به دست آمده در آزمایش‌های سینتیک انجام شده در شکل ۱۰ آمده است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، بازیابی تجمعی با گذشت زمان یک روند صعودی را طی می‌کند. در ۶ دقیقه اول کف‌گیری، افزایش بازیابی با شیب ملایم صورت می‌گیرد. بعد از دقیقه ۶، یک صعود ناگهانی در بازیابی صورت می‌گیرد. از دقیقه ۱۸ کف‌گیری، تغییرات بازیابی بسیار کند می‌شود. در نتیجه، ۱۸ دقیقه زمان مناسبی برای کف‌گیری است.

علت افزایش چشمگیر بازیابی بعد از دقیقه ۶ می‌تواند مصرف عامل سولفوری توسط سرب محلول در سلول باشد. معمولاً بخشی از سرب به صورت سولفید سرب در پالپ رسوب می‌کند. با افزودن عامل سولفوراسیون ابتدا یون‌های سولفید توسط ذرات محلول سرب مصرف می‌شود. این ذرات کلوئیدی بر سطح سروریت رسوب کرده و به سرعت با کلکتور واکنش می‌دهد، در نتیجه در ابتدای عملیات کف‌گیری، افزایش قابل توجهی در منحنی فلوتاسیون مشاهده می‌شود. فرضیه دیگری نیز در این مورد موجود است و آن زمان تاثیر سیلیکات سدیم می‌باشد که باعث تاخیر در شناور شدن ذرات سرب شده است. مشاهده شده است که در آزمایش‌هایی که تفرق توسط سیلیکات سدیم صورت نگرفته این تاخیر رخ نمی‌دهد. با عبور دادن یک منحنی از داده‌های حاصل از آزمایش سینتیک می‌توان ثابت سینتیک ماده مورد آزمایش را به دست آورد. معادله منحنی عبور داده شده از نقاط به صورت زیر می‌باشد:

$$y = 94.07 (1 - e^{-0.206 t})$$



شکل ۱۰: تغییرات بازیابی بر حسب زمان در آزمایش سینتیک

در نتیجه برای نمونه سرب چنگرزه $k=0.206$ و بازیابی در بینهایت عملی 94.07 درصد می‌باشد.

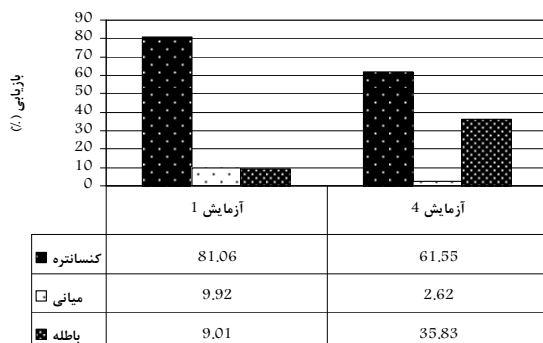
۳-۲- پیش‌فرآوری سرب به روش ثقلی

آزمایش‌های اولیه‌ای برای بررسی قابلیت روش‌های ثقلی جهت تولید پیش‌کنسانتره سرب انجام شد و نتایج حاصل از آنها مورد بررسی قرار گرفت. روند تغییرات پارامترها برای بالا بردن عیار و بازیابی ذیلاً بررسی شده است.

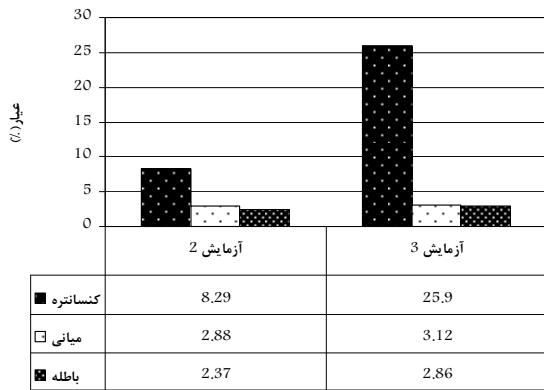
۳-۲-۱- آزمایش‌های میز لرزان

مطالعات میکروسکوپی نشان داد که درجه آزادی حدود 90% در ابعاد 212 میکرون حاصل می‌شود. با توجه به اینکه هرچه دانه‌بندی خوراک میز محدودتر باشد، کارایی میز افزایش می‌یابد، لذا کانسنگ خرد شده به فراکسیون‌های مختلف تقسیم شد.

در فراکسیون $150+850$ میکرون دو آزمایش مقایسه‌ای زیر انجام گردید. در آزمایش ۱ با شرایط شیب 12 درجه، آب خوراک 8 لیتر بر دقیقه و آب شستشو 10 لیتر بر دقیقه، بالاترین عیار و بازیابی کنسانتره به ترتیب برابر با عیار $46/8\%$ سرب و بازیابی 81% به دست آمد. با هدف رسیدن به عیار بالاتر، در آزمایش ۲ شیب از 12 درجه به 10 درجه کاهش و آب خوراک و میز به ترتیب به 10 و 12 لیتر بر دقیقه افزایش یافت. این تغییرات باعث کاهش در بازیابی و عیار شد (نمودارهای ۱۱ و ۱۲). در نتیجه شرایط آزمایش اول بهینه در نظر گرفته شد. عیار به دست آمده با یک مرحله شستشو می‌تواند به عیار 50% سرب برسد.



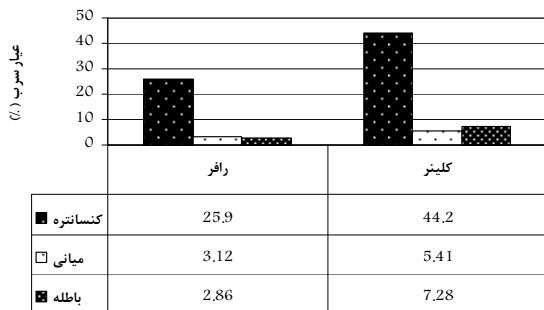
شکل ۱۱: تاثیر کاهش شیب و افزایش آب شستشو و خوراک بر بازیابی (دانه ریز)



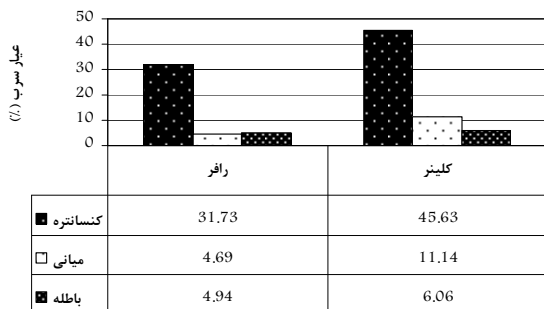
شکل ۱۴: تاثیر کاهش شیب و افزایش آب میز بر عیار (دانه درشت)

۲-۲-۳- بررسی اثر شستشو

به منظور بررسی تاثیر انجام کلینر بر کنسانتره رافر، کنسانتره آزمایش ۲ (معرف دانه بندی ریز) و کنسانتره آزمایش ۳ (معرف دانه بندی درشت) مورد آزمایش قرار گرفت. کنسانتره دانه ریز به دست آمده از آزمایش ۲ تحت شرایط شیب ۱۲ درجه، آب خوراک ۹ و آب شستشوی ۱۰ لیتر بر دقیقه برای دستیابی به عیار بالاتر مورد شستشو قرار گرفت و شستشوی کنسانتره دانه درشت با شرایط شیب ۱۲ درجه، آب خوراک ۱۰ و آب شستشوی ۱۴ لیتر بر دقیقه، منجر به دستیابی به عیار بالاتر شد در هر دو مورد عیار کنسانتره به حدود ۵۰٪ رسید. شکل های ۱۵ و ۱۶ نتایج را بطور مقایسه ای نشان می دهد.

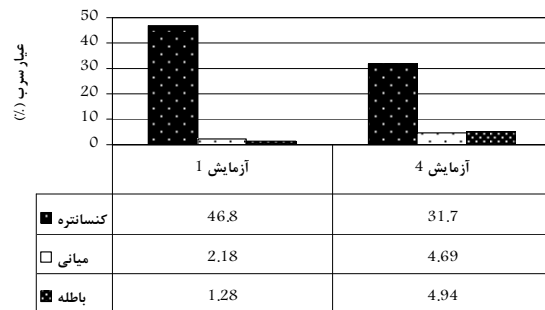


شکل ۱۵: تاثیر اعمال شستشو بر عیار محصول میز (دانه درشت)



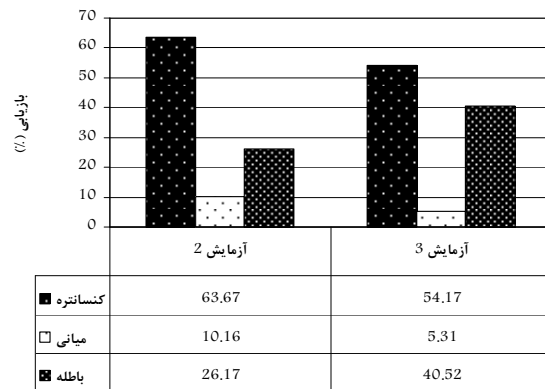
شکل ۱۶: تاثیر اعمال شستشو بر عیار محصول میز (دانه ریز)

برای فراکسیون ۸۵۰+۱۷۰۰- میکرون با توجه به افزایش ابعاد ذرات، آزمایش ۳ با شرایط پایه، شیب ۱۳°، آب خوراک ۸ لیتر بر دقیقه و آب میز ۱۰ لیتر بر دقیقه انجام شد. در این شرایط مقدار زیادی باطله به کنسانتره راه یافت و عیار پایین ۸٪ با بازیابی ۶۳٪ به دست آمد. نتایج مطالعات میکروسکوپی نشان داد که ذرات گالن در بخش میانی و باطله درگیر هستند که نشان دهنده نرسیدن به درجه آزادی مناسب در این محدوده ابعادی است.



شکل ۱۲: تاثیر کاهش شیب و افزایش آب شستشو و خوراک بر عیار (دانه ریز)

در آزمایش ۴، برای رسیدن به عیار بالاتر شیب میز به ۱۲° کاهش یافت و در حین آزمایش بنا به لزوم آب میز به ۱۲/۵ لیتر بر دقیقه افزایش یافت. بدین ترتیب افزایشی در عیار کنسانتره حاصل شد و کنسانتره با عیار ۲۵٪ و بازیابی ۵۴٪ به دست آمد که عیار به دست آمده بالا نیست و باز هم در بخش میانی و باطله تمام ذرات گالن درگیر بودند. در نتیجه این محدوده ابعادی برای میز مناسب نیست. تغییرات بازیابی و عیار در نمودارهای ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده است.



شکل ۱۳: تاثیر کاهش شیب و افزایش آب شستشو بر بازیابی (دانه درشت)

۳-۲-۳- آزمایش‌های جیگ

در مورد جیگ پارامتر محدوده ابعادی بین بازه‌های ۸۵۰+۳۰۰-۸۵۰ میکرون، دبی آب در بازه ۴ تا ۵ لیتر بر دقیقه و فرکانس ضربات در محدوده ۸۰-۲۷۰ تغییر کرده و اثر این پارامترها به همراه میزان گلوله جیگ بر جداسازی ذرات بررسی شد. بهترین نتیجه عیار کنسانتره ۳۷/۳۳٪ بود که در شرایط دانه‌بندی خوراک ۲۳۶۰- میکرون، دبی آب ۴ لیتر بر دقیقه و فرکانس ۲۶۹ با گلوله حاصل شد. این عیار، عیار قابل قبولی برای کنسانتره جیگ نیست. هم چنین با توجه به کم عیار و ریز بودن ذرات کانی سرب در خوراک و در نتیجه از دست رفتن آن در باطله جیگ، استفاده از آن برای تولید پیش کنسانتره سرب پیشنهاد نمی‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نمونه سولفیدی-اکسیده کم عیار سرب چنگرزه مورد مطالعه و بررسی‌های فرآوری با هدف افزایش عیار سرب قرار گرفت. این نمونه با عیار ۲/۳٪ سرب و ۱/۹۱٪ روی، شامل کانی‌های دولومیت، کوارتز، آنکريت، ژیزموندیت، گالن، سروزیت، تتراهدريت، آنگلیزیت، پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، کالکوسیت و کلسیت است. در این ارتباط آزمایش‌های مختلفی برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای موثر صورت پذیرفت که نتایج ذیل ارائه می‌شود:

- بیشترین بازیابی فلوتاسیون کانسنگ سولفوری-اکسیدی چنگرزه در حالت فلوتاسیون تجمعی دو فاز سولفیدی و اکسیدی به دست می‌آید.
- مقدار ۲۰۰۰ گرم بر تن سولفید سدیم برای سولفیدی کردن سطح کانی‌های اکسیده مناسب‌ترین مقدار بوده و زمان آماده سازی مناسب جهت انجام عمل سولفوراسیون ۶ دقیقه است.
- از نظر نوع کلکتور، آمیل گزنتات پتاسیم دارای نتایج بهتری نسبت به ایزوپروپیل گزنتات سدیم است.
- مناسب‌ترین مقدار کلکتور، میزان ۲۰۰ گرم بر تن آمیل گزنتات پتاسیم تشخیص داده شد.
- از بین کف سازهای روغن کاج، MIBC و آئروفلوت‌ها، MIBC بیشترین سازگاری را با شرایط بهینه آزمایش داراست.

- افزودن مواد شیمیایی در چند مرحله، به منظور جلوگیری از افزایش ناگهانی pH و بازداشت گالن، تاثیر قابل توجهی در افزایش بازیابی نداشت.
- استفاده از سیلیکات سدیم جهت تفرق نرمه‌ها، تایید و مقدار آن ۵۰۰ گرم بر تن تعیین شد.
- از آنجایی که افزایش pH در مقادیر بیش از ۱۱ باعث بازداشت گالن می‌شود، کنترل دقیق pH انجام شد که این عمل موجب افزایش بازیابی شد.
- استفاده توأم از سیلیکات سدیم و اسید سولفوریک، باعث کاهش بازیابی شد. در نتیجه به دلیل اینکه تاثیر سیلیکات سدیم بر افزایش بازیابی از عامل "pH پایین" بیشتر است، از بین این دو عامل استفاده از سیلیکات سدیم پیشنهاد شد.
- در نهایت با اعمال سه مرحله شستشو، عیار کنسانتره افزایش یافته و به ۶۹/۴۲٪ رسید و بازیابی به حدود ۴۰٪ رسید.
- میز لرزان می‌تواند تنها جهت تولید پیش کنسانتره عملیات فلوتاسیون به کار رود. با وجود آنکه جیگ نتایج موجهی به دست نداد، ولی به منظور حصول اطمینان از آنکه این وسیله برای پرعیارسازی در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گیرد یا خیر، نیاز بود تا آزمایش‌ها انجام گیرد و از عدم نتیجه‌گیری اطمینان حاصل شود. لذا نتایج حاصل در مقاله ارائه گردید.

منابع

- [1] Fuerstenau, M.C.; Miller, J.D.; Kuhn, M.C.; 1985; *Chemistry of Flotation*, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York, p. 132.
- [2] Onal, G.; Bulut, G.; Gul, A., Kangal, O.; Perek, K.T.; Arslan, F.; 2005; "Flotation of Aladag oxide lead-zinc ores", *Minerals Engineering*, Vol. 18, pp. 279-282.
- [3] Herrera-Urbina, R.; Sotillo, F.J; and Fuerstenau, D.W.; 1998; "Effect of sodium sulfide additions on the pulp potential and amyl xanthate flotation of cerussite and galena", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 55, pp.157-170.
- [4] Herrera-Urbina, R.; Sotillo, F.J; and Fuerstenau, D.W.; 1998; "Amyl xanthate uptake by natural and sulfide-treated cerussite", *International Journal of Mineral Processing*

- [9] Metso Minerals HandBook, 2003, Metso Minerals Co.
- [10] Rezaei, B., 1375, "Flotation", university of Hormozgan.
- [11] Ceylan, H., Hicyilmaz, C., Guler, T., 2002, "Collectorless flotation of lead & zinc sulphide from Derekoy ore deposit", Physicochemical Problems of Mineral Processing, Vol. 36, pp. 197-208.
- [5] Onal G., Abramov A., 2002, *Mining Chemicals Handbook*, CytecIndustriesInc., pp.107-108.
- [6] Quast, K.; Hobart, G., 2006, "Marmattite depression in galena flotation", Minerals Engineering, Vol. 19, pp. 869-880.
- [7] Seke, M.D., 2005; "Optimisation of the selective flotation of galena and sphalerite at Rosh Pinah Mine", Doctorial thesis, university of pretoria.
- [8] Weiss, N.L., 1985, "S.M.E. Mineral Processing Handbook", Society of Mining Engineers, AIMM, New York, Vol. 2.

