

یادداشت فنی

بازداشت پیریت و اسفالریت در فلوتاسیون اولیه گالن از کانسنگ سرب و روی پرپیریت

معدن گوشفیل

علی دهقانی^{*}؛ مرجان شهبازی^۲

۱- دانشیار فرآوری مواد معدنی، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد a.dehghani@yazd.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد marhanshabazi1988@gmail.com
(دریافت ۱۰ مرداد ۱۳۹۴، پذیرش ۵ دی ۱۳۹۴)

چکیده

کانسنگ سرب و روی پرپیریت معدن زیرزمینی گوشفیل ایرانکوه ترکیب کانی‌شناسی پیچیده‌ای دارد. کنسانتره‌ی سرب حاصل از فلوتاسیون این کانسنگ حاوی مقادیر بیش از حد مجاز آهن و روی است. در این تحقیق تأثیر سولفات روی، سیانید سدیم و سولفات آهن در بازداشت اسفالریت و پیریت، در فلوتاسیون گالن از کانسنگ گوشفیل، انجام شده است. آزمایش‌ها روی نمونه‌های کانسنگ در ابعاد کوچک‌تر از ۷۵ و ۹۰ میکرون انجام و مشاهده شد که هنگام فلوتاسیون گالن در نمونه‌های ۷۵ میکرونی و در pH طبیعی، با افزایش مصرف سولفات روی، از ۳۰۰ به ۱۰۰۰ گرم بر تن، عیار سرب در کنسانتره‌ی سرب از ۴/۵ به ۷/۱ درصد افزایش یافته است، در حالی که بازیابی آن بدون تغییر مانده است. از طرف دیگر عیار آهن کنسانتره از ۱۳ به ۱۰ درصد و بازیابی آهن و روی نیز، به ترتیب، حدود ۶/۵ و ۷ درصد کاهش یافته است. در فلوتاسیون نمونه‌های ۹۰ میکرونی، با افزایش سولفات روی، از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ گرم بر تن، عیار آهن و سرب اندکی افزایش یافته ولی عیار روی کاهش یافته است. در این حالت، بازیابی سرب، روی و آهن در کنسانتره‌ی سرب، به ترتیب، حدود ۴، ۷ و ۲ درصد کاهش یافته است. با افزایش بیشتر سولفات روی، بازیابی روی و آهن در کنسانتره سرب، افزایش یافته است. با افزایش مصرف سیانید سدیم از ۱۰۰ به ۲۰۰ گرم بر تن، عیار آهن در کنسانتره سرب تغییری نکرده است ولی عیار سرب و روی آن ۲ و ۴ درصد کاهش یافته است. آزمایش‌های فاکتوریل انجام شده روی نمونه بالا، در دو سطح از پارامترهای سولفات روی، سیانید سدیم و pH نیز نشان داده است که تأثیر پارامترها به pH محیط بستگی دارد. همچنین ماکزیمم بازیابی سرب در این شرایط حدود ۳۰ درصد است در حالی که بازیابی روی و آهن در کنسانتره سرب در این حالت، به ترتیب، حدود ۷/۹ و ۵/۲ به دست آمده است.

کلمات کلیدی

کانسنگ سولفیدی گوشفیل، فلوتاسیون گالن، بازداشت پیریت و اسفالریت

۱- مقدمه

۲- فلوتاسیون کانسنگ‌های سولفیدی سرب و روی

کارخانه‌ی فرآوری باما به منظور پرعیارسازی کانسنگ‌های سولفیدی و اکسیدی سرب و روی منطقه‌ی ایران کوه احداث شده است. عملیات فرآوری این کارخانه شامل دو مرحله خردایش کانسنگ و فلوتاسیون است. کارخانه باما شامل دو مدار موازی برای فرآوری کانسنگ‌های سولفیدی و اکسیدی با ظرفیت، به ترتیب، ۴۵ و ۳۰ تن در ساعت است. خوراک ورودی به مدار سولفیدی کارخانه‌ی باما، بسته به وضعیت استخراج، از زون‌های مختلف معدن تأمین می‌شود. معمولاً سعی می‌شود بار اولیه‌ی با ترکیب نسبتاً همگن، که بازیابی قابل قبولی داشته باشد تهیه شود. تولید سالانه کنسانتره‌های سولفیدی سرب و روی باما به طور متوسط، به ترتیب، ۸۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ تن است. یکی از معادن این ناحیه، معدن زیرزمینی سرب و روی گوشفیل است، که در فصل مشترک شیل‌های ژوراسیک و دولومیت‌های کرتاسه تشکیل شده است و تمرکز ماده معدنی در دولومیت‌ها است. این کانسنگ حاوی مقادیر زیادی پیریت می‌باشد. مطالعات کانی‌شناسی نشان داده است که کانسنگ سولفیدی گوشفیل، شامل انواع کانه‌های سرب و روی دولومیتی، پر پیریت و بیتومین‌دار می‌باشند. بار اولیه فعلی مدار فلوتاسیون سولفیدی اغلب از تیپ دولومیتی است که عیار سرب، روی و آهن آن، به ترتیب، حدود ۱/۵، ۳ و ۳/۵ درصد و عیار کنسانتره سرب و روی آن، به ترتیب، حدود ۵۹ و ۴۷ درصد و بازیابی متوسط مدار سرب ۷۸ درصد و بازیابی روی حدود ۸۲/۵ درصد است. ولی با خوراک‌دهی مخلوط کانسنگ پرپیریت گوشفیل با خوراک فعلی کارخانه، عیار سرب، روی و آهن در بار اولیه، به ترتیب، حدود ۱/۵، ۴ و ۵/۵ درصد، و عیار کنسانتره‌ی سرب و روی تولیدی، به ترتیب، ۴۴ و ۴۵ درصد بوده است. تجربیات صنعتی نشان داده است که با خوراک دهی کانسنگ گوشفیل به مدار بالا، حتی به صورت مخلوط با بار فعلی، عیار سرب و روی کنسانتره‌ها کاهش یافته و مقادیر نسبتاً زیادی آهن به کنسانتره راه می‌یابد. هدف این تحقیق بررسی قابلیت انتخابی بودن فلوتاسیون گالن نسبت به پیریت و اسفالریت، در نمونه کانسنگ پرپیریت گوشفیل، در مقیاس آزمایشگاهی بوده است. بدین منظور آزمایش‌های فلوتاسیون در شرایط مختلف با استفاده از مقادیر متفاوت سولفات روی و سیانید سدیم انجام شده و تأثیر آن‌ها بر بازداشت پیریت و اسفالریت بررسی شده است.

فعال شده توسط یون مس شناخته شده است که ترکیبات مس را از سطح اسفالریت حل می‌کند. ولی سیانید نمی‌تواند با فعال شدن اسفالریت توسط یون سرب مقابله کند. در اکثر مدارهای فلوتاسیون از سیانید سدیم همراه با سولفات روی (با نسبت های مختلف) در محیط قلیایی، برای بازداشت مؤثر اسفالریت در کانسنگ‌های سولفیدی مس-سرب-روی استفاده می‌شود. در pH قلیائی کم (حدود ۸/۵)، که در اکثر کارخانه‌ها استفاده می‌شود، هنگام استفاده از سولفات روی برای بازداشت اسفالریت‌های فعال شده توسط سرب، هیدرواکسید روی عامل بازداشت کننده سولفید روی است. حضور هیدرواکسید روی هیدروفیل در سطح اسفالریت باعث جلوگیری از واکنش سطح اسفالریت فعال شده با کلکتور گزنتات می‌شود. افزایش بیش از حد میزان سولفات روی باعث تشکیل هیدرواکسید روی در سطح گالن و کاهش بازیابی آن نیز می‌شود [۳، ۵، ۱۰].

بعضی از کانسنگ‌های سولفیدی کمپلکس همراه با کانی‌های گانگ کربن‌دار هستند. درگیری کانی‌های سولفیدی به صورت ریزدانه و حضور پیریت کربن‌دار موجب کاهش بازیابی و انتخابی بودن فلوتاسیون گالن، اسفالریت و پیریت می‌شود. در این موارد پیش فلوتاسیون مواد کربن‌دار توصیه می‌شود، ولی در عمل بخشی از سرب و روی نیز همراه آنها فلوته می‌شود [۷، ۲۲].

با توجه به مطالب گفته‌شده، فلوتاسیون کانسنگ‌های سولفیدی، بسته به نحوه درگیری کانی‌های تشکیل دهنده می‌تواند بسیار مشکل باشد. شرایط فلوتاسیون بهینه کانسنگ‌ها مختلف ممکن است متفاوت باشد در ادامه، فلوتاسیون انتخابی کانسنگ سولفیدی سرب و روی پیریت گوشفیل در شرایط مختلف بررسی شده است.

۳- مواد و آزمایش‌ها

۳-۱- آماده سازی و شناسایی نمونه

این تحقیق، روی نمونه‌ای از تیپ پیریت کانسنگ سولفیدی معدن زیرزمینی گوشفیل، که توسط کارشناسان کارخانه‌ی فرآوری باما، از دپوهای استخراجی معدن تهیه شده بود، انجام شده است. مطالعه مقاطع صیقلی (شکل‌های ۱ و ۲) نشان داد که کانی‌های اصلی این کانسنگ، شامل گالن، اسفالریت و پیریت همراه با گانگ‌های کربناته است. در این نمونه دو نسل اسفالریت وجود دارد. گالن و اسفالریت به دو صورت جدا از هم و درگیر مشاهده شده‌اند. در بعضی موارد

پیریت، در غیاب اکسیژن، با تشکیل گزنتات فرو روی سطح آن، فلوته می‌شود. در حضور اکسیژن، ساختمان لایه آبران در سطح پیریت از نوع دی‌گزنتوزن است. در شرایطی که pH محیط بالا باشد، زمان آماده‌سازی طولانی باشد، و یا اکسیداسیون سطحی اتفاق افتاده باشد، پیریت بازداشت می‌شود. بازداشت کننده‌های پیریت شامل: یون‌های هیدروکسیل، سیانید، سولفیت و سولفید، نشاسته و دکسترین‌های اصلاح‌شده هستند [۲، ۳، ۵، ۱۳-۱۵].

هنگام بازداشت پیریت توسط سیانید، واکنش یون‌های سیانید با کاتیون‌های Fe^{2+} در دو مرحله اتفاق می‌افتد. ابتدا نمک‌های غیرمحلول خنثی تشکیل می‌شود. سپس واکنشی بین نمک‌های غیر محللول و سیانیدهای اضافی اتفاق می‌افتد که منجر به تشکیل کمپلکس‌های سیانید قابل حل می‌شود. عمل بازداشت با جلوگیری از تشکیل ترکیب آبران فلز-گزنتات در سطح کانی، با تجزیه کامل آن، انجام می‌شود [۱۰، ۱۶].

پیریت و گالن، به علت تفاوت زیادی که در پتانسیل استراحت خود دارند، یک زوج گالوانیکی تشکیل می‌دهند که منجر به افزایش اکسید شدن گالن، می‌شود. این حالت وقتی که میزان پیریت زیاد باشد، تشدید می‌شود. یکی از نتایج اکسیده شدن گالوانیک گالن به وسیله پیریت، تولید یون‌های سرب است که شرایط لازم برای فعال کردن کانی‌های گانگ به خصوص اسفالریت را فراهم می‌کند. در این صورت ذرات اسفالریت آزادشده به کنسانتره سرب راه می‌یابند [۱۷، ۱۸]. حضور هیدرواکسید فلزات که از اکسیداسیون کانی‌ها تولید شده‌اند، موجب فعال شدن بعضی از کانی‌ها در زمان و مکان نامناسب می‌شود. مثال بارز این رفتار در فعال شدن اسفالریت در کمپلکس‌های مس-روی یا مس-سرب-روی و یا در فلوتاسیون سرب دیده شده‌است. مطالعات نشان داده‌است که تجزیه یا اکسیداسیون کالکوپیریت و گالن موجب حضور یون‌های سرب و مس در محیط فلوتاسیون می‌شود [۱۰، ۱۹].

دو مکانیسم برای فعال شدن اسفالریت به وسیله سرب پیشنهاد شده است. در محیط تقریباً اسیدی، فعال‌سازی اسفالریت با جایگزینی یون‌های روی با یون‌های سرب اتفاق می‌افتد. در محیط‌های قلیایی فعال‌سازی با تشکیل ترکیبات سرب در سطح کانی انجام می‌شود. با اضافه کردن گزنتات به محیط، کلونیدهای گزنتات-سرب در سطح مشاهده شده است [۲۰].

بنابراین روش‌هایی برای کنترل فعال شدن ناخواسته اسفالریت هنگام فلوتاسیون انتخابی گالن در کانسنگ‌های سولفیدی کمپلکس، مورد نیاز است. سیانید به‌عنوان بازدارنده اسفالریت

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF نمونه‌ی کانسنگ پرپیریت گوشفیل
زیرزمینی گوشفیل

S (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Zn (%)	Pb (%)
۶/۶۱	۴/۷۷	۱۲/۵۴	۴/۵۶	۱/۱۸
Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	BaO (%)	CaO (%)	Cu (ppm)
۱/۵۷	۹/۳۷	۱۰/۲۵	۲۱/۳۶	۴۱

به‌منظور بررسی توزیع سرب و روی در بخش‌های ابعادی، بخشی از نمونه‌های فوق در آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی تا ابعاد کوچک‌تر از ۹۰ میکرون و بخش دیگر تا ابعاد کوچک‌تر از ۷۵ میکرون آسیا شدند. این ابعاد با توجه به مطالعه مقاطع، دانه‌بندی بار ورودی به کارخانه‌ی فلوتاسیون باما (d₈₀ ≈ ۷۵ μm) و رسیدن به درجه آزادی مورد نظر، انتخاب شده‌اند.

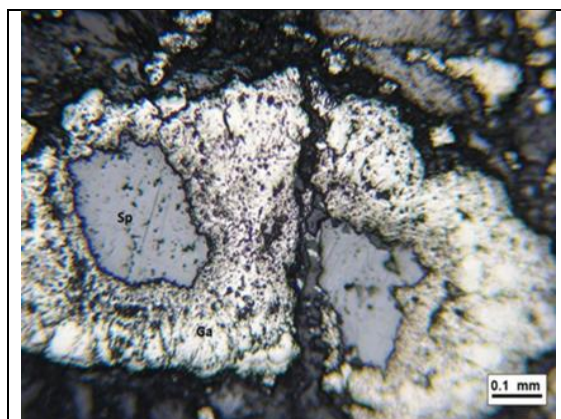
نتایج تجزیه ابعادی و شیمیایی نمونه‌ی کوچک‌تر از ۹۰ میکرون در جدول ۲ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که میزان سرب و روی فراکسیون‌های +۷۵ و -۳۸ میکرون به‌طور نسبی بیشتر است و میزان آهن در فراکسیون +۷۵، بیشتر از بقیه‌ی فراکسیون‌ها است. در این نمونه درصد مواد کوچک‌تر از ۳۸ میکرون بیشتر از ۶۶ درصد نمونه را تشکیل می‌دهد و d₈₀ آن حدود ۵۳ میکرون است.

جدول ۲: تجزیه ابعادی نمونه کوچک‌تر از ۹۰ میکرون کانسنگ گوشفیل و توزیع سرب، روی و آهن در فراکسیون‌های مختلف آن

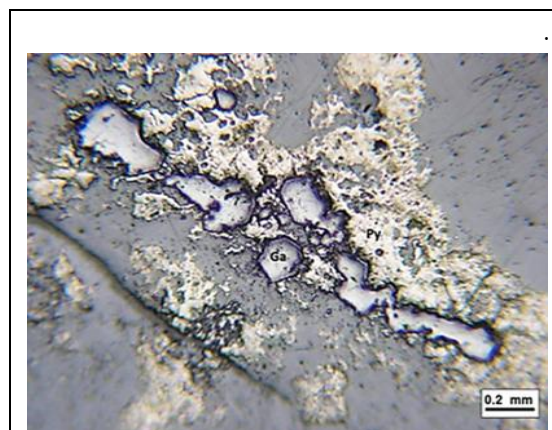
ابعاد سرنده (μm)	درصد وزنی	سرب		روی		آهن	
		عیار (%)	توزیع (%)	عیار (%)	توزیع (%)	عیار (%)	توزیع (%)
+۷۵	۴/۳	۰/۹۰	۳/۴	۴/۱	۴/۶	۹/۴	۵
-۷۵+۵۳	۱۳/۹	۰/۷۶	۹/۲	۲/۹	۱۰/۴	۸/۲	۱۳/۹
-۵۳+۳۸	۱۵/۲	۰/۸۲	۱۰/۸	۳	۱۱/۷	۸/۶	۱۵/۹
-۳۸	۶۶/۷	۱/۳	۷۶/۶	۴/۳	۷۳/۴	۸	۶۵/۲
کل	۱۰۰	۱/۲	۱۰۰	۳/۹	۱۰۰	۸/۲	۱۰۰

نتایج تجزیه سرنده‌ی نمونه‌ی کوچک‌تر از ۷۵ میکرون نیز نشان داد که میزان سرب در تمام فراکسیون‌ها حدود ۱ درصد است.

گالن به‌صورت هسته مرکزی اسفالریت وجود دارد. همچنین پیریت به شکل‌های مختلف به‌صورت قطعات پراکنده و دانه ریز در اسفالریت وجود دارد. در مواردی پیریت به صورت دانه‌های به هم چسبیده و مدور و گاهی نیز روی هسته‌ای از اسفالریت تشکیل شده است (شکل ۱). گالن نیز به‌صورت بلورهای تفکیک شده دیده می‌شود (شکل ۲). به نظر می‌رسد که نمونه‌ی مورد نظر دارای پیچیدگی‌های کانی‌شناسی زیادی است و در بعضی موارد آزاد سازی کانی‌ها نیاز به آسیا کردن ذرات تا ابعاد بسیار ریز (کمتر از ۲۰ میکرون) دارد.



شکل ۱: قطعات نسبتاً مدور پیریت تشکیل شده روی هسته‌ای از اسفالریت در مقطع صیقلی کانسنگ پرپیریت گوشفیل



شکل ۲: گالن‌های شکل دار و نیمه شکل‌دار در متن سنگ همراه با پیریت در مقطع صیقلی کانسنگ گوشفیل

نتایج آنالیز XRD نمونه‌ی فوق نیز نشان داده‌است که علاوه بر کانی‌های اصلی گالن، اسفالریت و پیریت، سایر کانی‌ها مانند دولومیت، کلسیت، اسمیت‌زونیت و کوارتز نیز در این نمونه وجود دارد. نتایج خلاصه شده‌ی آنالیز XRF، در جدول ۱، نیز ترکیبات عمده‌ی موجود در این نمونه را نشان می‌دهد.

میزان روی در بخش ۳۸+ میکرون ۳ درصد ولی در بقیه بخش-ها حدود ۴ درصد است. میزان آهن در بخش‌های مختلف حدود ۹ درصد است. d80 این نمونه حدود ۳۸ میکرون است

۲-۲- آزمایش‌های فلوتاسیون

آزمایش‌های فلوتاسیون اولیه (رافر) در شرایط مختلف روی نمونه‌های با ابعاد کوچک‌تر از ۷۵ و ۹۰ میکرون انجام شده است. آسیاکردن نمونه تا ابعاد کوچک‌تر از ۷۵ میکرون موجب آزاد سازی بیشتر کانی‌ها می‌شود ولی منجر به تولید ذرات نرمه نیز می‌شود که تأثیر منفی بر راندمان فلوتاسیون خواهد داشت. نمونه‌های با ابعاد کوچک‌تر از ۹۰ میکرون نیز از نظر ابعادی ریزتر از بار اولیه مدار فلوتاسیون باما است.

در این آزمایش‌ها تأثیر پارامترهای مؤثر بر بازداشت پیریت و اسفالریت بررسی شده‌اند. آزمایش‌های فلوتاسیون برای بازیابی گالن، با تنظیم pH محیط توسط آهک و تغییر میزان سولفات روی و سیانید سدیم (برای بازداشت اسفالریت و پیریت)، در حضور کلکتور اتیل گزنات پتاسیم انجام شده است. بعد از تنظیم pH محیط، بازداشت کننده‌ها اضافه شده است. حدود ۱ دقیقه بعد کلکتور (اتیل گزنات) و ۳ دقیقه بعد نیز کفساز (روغن کاج) اضافه شده است. بعد از کف‌گیری، باقیمانده‌ی پالپ برای بازیابی اسفالریت آماده‌سازی شده است.

درصد جامد پالپ در آزمایش‌ها حدود ۱۵ درصد و در بعضی موارد ۱۲ درصد بوده است. سرعت همزن ۹۰۰ دور بر دقیقه و کف‌گیری در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه و جمعا حدود ۳ دقیقه (در بعضی موارد ۵ دقیقه) انجام شده است.

سه سری آزمایش‌های فلوتاسیون روی نمونه‌های بالا انجام شده است. سری اول آزمایش‌ها (جدول ۳)، در شرایط مختلف روی نمونه‌های کانسنگ گوشفیل که تا ابعاد کوچک‌تر از ۷۵ میکرون آسیا شده بود، انجام شده است. سری دوم آزمایش‌ها (جدول ۴) روی نمونه‌های با ابعاد کوچک‌تر از ۹۰ میکرون انجام شده است. سری سوم، آزمایش‌های فاکتوریلی هستند (جدول ۵) که روی نمونه‌های کوچک‌تر از ۹۰ میکرون انجام شده است تا ضمن ارزیابی نتایج قبل، تأثیر متقابل پارامترها نیز بررسی شوند.

۴- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی نمونه‌های کوچک‌تر از ۷۵ و ۹۰ میکرون در شرایط مختلف نشان داده شده است. سپس نتایج آزمایش‌های فاکتوریل روی نمونه‌های کوچک‌تر از ۹۰ میکرون آمده است.

۴-۱- اثر سولفات روی و سیانید سدیم بر فلوتاسیون گالن

۴-۱-۱- اثر سیانید سدیم و سولفات روی در نمونه‌های ۷۵ میکرونی

آزمایش‌های شماره ۲ تا ۶ (جدول ۳) در pH طبیعی (حدود ۸٫۵)، با استفاده از ۷۵ گرم بر تن اتیل گزنات پتاسیم، حدود ۲۷ گرم بر تن روغن کاج و در غلظت‌های مختلف سولفات روی و سیانید سدیم انجام شده است. در آزمایش شماره ۱، فلوتاسیون گالن فقط با کفساز و در آزمایش ۲ با استفاده از کلکتور و کف ساز انجام شده است. آزمایش شماره ۳ در شرایط مشابه از ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم استفاده شده است. در آزمایش‌های شماره ۴، ۵ و ۶ علاوه بر ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم، به ترتیب، از ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ گرم بر تن سولفات روی نیز استفاده شده است. در آزمایش شماره ۷ از سولفات آهن به جای سیانید سدیم و از امیل گزنات به جای اتیل گزنات استفاده شده است. عبار و بازیابی آهن، روی و سرب، در کنسانتره‌ی سرب، در شرایط ذکر شده، بعد از ۳ دقیقه کف‌گیری (در بعضی آزمایش‌ها هم ۵ دقیقه کف‌گیری)، در جدول ۳ و بازیابی آهن، روی و سرب در زمان‌های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است.

نتایج آزمایش شماره ۱ در جدول ۳ نشان می‌دهد که فقط با استفاده ۱۴۰ گرم بر تن گازوئیل و حدود ۵۰ گرم بر تن کفساز بخشی از نمونه کانسنگ گوشفیل شناور می‌شود. این آزمایش به منظور بررسی امکان پیش‌فرآوری بخشی از باطله کربن دار، قبل از فلوتاسیون گالن، انجام شد. این بخش از نمونه، به طور طبیعی آبران است و گازوئیل نیز موجب افزایش خاصیت آبرانی آن می‌شود. ولی مشاهده شد که بخش شناور شده، حاوی بیش از ۳۲ درصد سرب، ۲۰ درصد روی و حدود ۵ درصد از آهن نمونه می‌باشد. احتمالاً بخشی از کانی‌های اصلی نیز یا آبران بوده‌اند یا درگیر با ذرات کربن‌دار بوده‌اند، همچنین ممکن است بخشی از نرمه‌های موجود در نمونه از طریق دنباله‌روی حباب‌ها به بخش شناور شده منتقل شده‌اند. در آزمایشی به منظور جلوگیری از شناور شدن گالن همراه با بخش کربن‌دار که از حدود ۵۰۰ گرم بر تن نشاسته و ۱۰۰ گرم بر تن کف ساز استفاده شد، از هدر روی بخشی از سرب و روی همراه بخش شناور شده جلوگیری شد. از نشاسته می‌توان برای بازداشت زغال‌سنگ و مواد کربن دار استفاده کرد. البته تأثیر آن بر فلوتاسیون گالن و اسفالریت در مراحل بعد، نیاز به بررسی بیشتر دارد.

سولفات روی از نظر تئوریک از فعال شدن اسفالریت توسط یون‌های سرب جلوگیری می‌کند. استفاده از ۳۰۰ گرم بر تن سولفات روی همراه با ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم، باعث کاهش شدید بازیابی روی (از ۵۰ به ۱۷ درصد) در کنسانتره سرب شده‌است، ولی بازیابی سرب و آهن را نیز، به ترتیب حدود ۱۰ و ۴ درصد، کاهش داده است. احتمالاً کاهش بازیابی گالن (و حتی پیریت) به خاطر بازداشت ذرات درگیر اسفالریت-گالن و اسفالریت-پیریت به وسیله سولفات روی است.

همچنین با افزایش میزان سولفات روی از ۳۰۰ به ۱۰۰۰ گرم بر تن، عیار سرب در کنسانتره‌ی سرب از ۴/۵ به ۷/۱ درصد افزایش یافته، در حالی که عیار روی تقریباً ثابت مانده (حدود ۸ درصد) و عیار آهن از ۱۲/۷ به ۹/۹ درصد کاهش یافته است. از طرف دیگر بازیابی سرب، با افزایش سولفات روی، بدون تغییر (حدود ۴۰ درصد) باقی مانده است ولی بازیابی آهن و روی در کنسانتره سرب، به ترتیب، از ۱۲ به ۵/۴ درصد و از ۱۷ به ۱۰ درصد کاهش یافته است. افزایش میزان سولفات روی باعث بازداشت بخش بیشتری از اسفالریت هنگام فلوتاسیون گالن شده است. به نظر می‌آید که در این مرحله بیشتر ذرات حاوی اسفالریت و اسفالریت-پیریت بازداشت شده‌اند. این مسئله می‌تواند حضور دو نوع اسفالریت و یا نوع متفاوتی از درگیری این کانی‌ها را نشان دهد. همچنین در این مرحله ذراتی بازداشت شده‌اند که نیاز به غلظت بیشتری از سولفات روی داشته‌اند.

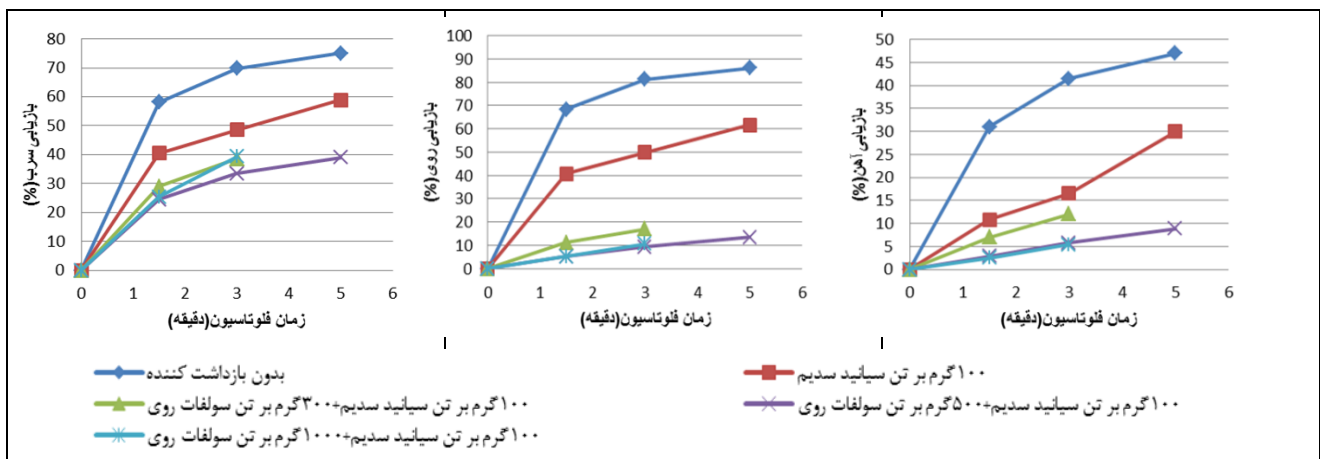
در آزمایش‌های بعدی، فلوتاسیون گالن بدون پیش‌فرآوری مواد کربن‌دار انجام شده است ولی پیش‌بینی می‌شود که حضور این مواد تأثیر منفی بر انتخابی بودن فلوتاسیون و بازیابی سرب داشته باشند.

در آزمایش ۲ (جدول ۳) فقط از کلکتور گزنتات و کف‌ساز استفاده شد ولی در آزمایش ۳ از سیانید سدیم نیز استفاده شده است. از نتایج جدول ۳ و شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزودن تنها ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم، عیار آهن در کنسانتره سرب از ۱۴/۳ به ۹ درصد کاهش یافته ولی عیار سرب و روی آن افزایش ناچیزی (حدود ۰/۵٪) یافته است. از طرف دیگر بازیابی آهن از ۴۱ به ۱۶/۶ درصد، بازیابی روی از ۸۱ به ۵۰ درصد و بازیابی سرب از ۷۰ به ۴۸/۵ درصد کاهش یافته است. سیانید در این آزمایش برای بازداشت پیریت استفاده شده است اگر چه ممکن است باعث جلوگیری از فعال شدن اسفالریت (توسط یون‌های مس که احتمالاً در نمونه وجود دارند) نیز شود. سیانید سدیم در شرایط آزمایش فوق موجب بازداشت بخشی زیادی از پیریت شده است و حتی بازیابی روی را نیز کاهش داده است. ولی کاهش بازیابی سرب در حضور سیانید ممکن است نشان‌دهنده بازداشت ذرات درگیر گالن و پیریت (و یا درگیر با اسفالریت) در این نمونه نیز باشد. بنابراین افزودن سیانید سدیم به تنهایی (در شرایط آزمایش فوق) موجب کاهش بازیابی‌ها شده است ولی میزان آهن کنسانتره سرب را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است اگر چه هنوز میزان روی در کنسانتره سرب زیاد است.

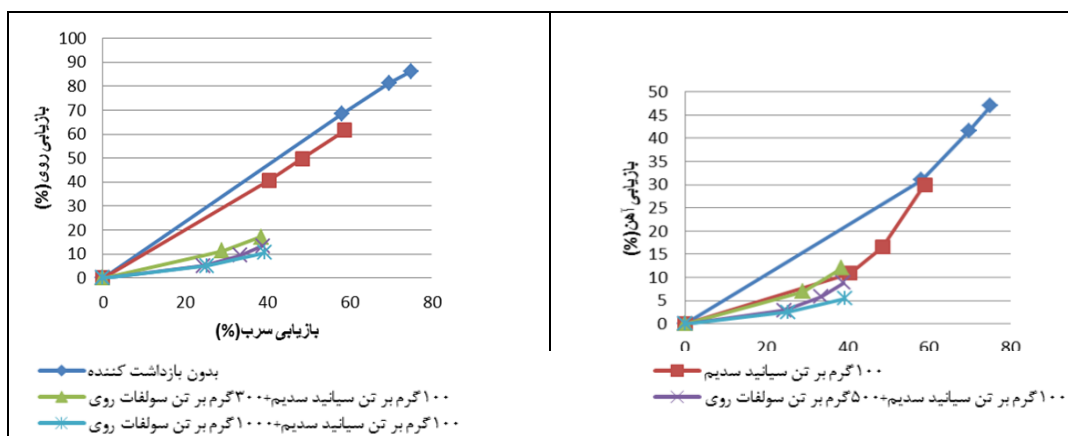
جدول ۳: نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون گالن روی نمونه‌های ۷۵ میکرونی کانسنگ پر پیریت گوشفیل، کف‌گیری در ۳ دقیقه و (۵ دقیقه)

کنسانتره سرب						مواد شیمیایی (گرم بر تن)				آزمایش‌ها
آهن		روی		سرب		کلکتور	بازداشت‌کننده			
بازیابی (%)	عیار (%)	بازیابی (%)	عیار (%)	بازیابی (%)	عیار (%)	اتیل گزنتات پتاسیم	سولفات آهن	سیانید سدیم	سولفات روی	
۴/۷	۶/۵	۲۰/۹	۱۴/۴	۳۲/۳	۶/۵	-	-	-	-	*۱
۴۷	۱۴	۸۶/۱۶	۱۰/۷	۷۵/۱	۲/۴	۷۵				۲
۱۶/۶	۹/۱	۵۰	۱۲/۳	۴۸/۵	۳/۱	۷۵		۱۰۰		۳
(۳۰)	(۹/۵)	(۶۱/۷)	(۸/۸)	(۵۸/۹)	(۲/۲)					
۱۲/۱	۱۲/۷	۱۷	۷/۸	۳۸/۵	۴/۵	۷۵		۱۰۰	۳۰۰	۴
۵/۸	۱۱/۳۰	۹/۴	۶/۵	۳۳/۴	۶/۴	۷۵		۱۰۰	۵۰۰	۵
(۸/۸)	(۱۱/۳)	(۱۳/۳)	(۶/۱۳)	(۳۸/۹)	(۴/۹)					
۵/۴	۹/۹	۱۰/۵	۸/۳	۳۹/۳	۷/۱	۷۵		۱۰۰	۱۰۰۰	۶
۳۹/۹	۱۴/۸	۷۹/۲	۱۲/۶	۶۸	۲/۷	۷۵ (امیل)	۵۰۰			۷

*آزمایش شماره ۱ با استفاده از گازوئیل و کف‌ساز برای جداکردن باطله کربن دار



شکل ۳: تأثیر غلظت سولفات روی بر بازیابی سرب، روی و آهن در کنسانتره‌ی سرب کانسنگ گوشفیل، نمونه ۷۵ میکرونی (در حضور 100 gr/t سیانید سدیم و 75 gr/t اتیل گزنتات پتاسیم)



شکل ۴: انتخابی بودن فلوتاسیون کانسنگ گوشفیل (نمونه ۷۵ میکرونی) در غلظت‌های مختلف سولفات روی و سیانید سدیم:، بازایی سرب و روی: (سمت چپ) و بازایی سرب و آهن (سمت راست) (در حضور 75gr/t اتیل گزنتات پتاسیم و $pH=8.5$)

بودن فلوتاسیون گالن نسبت به پیریت، به خصوص در دقایق اولیه کف‌گیری، دارد، اگرچه با افزایش زمان فلوتاسیون، تأثیر آن به سرعت کم شده است. احتمالاً در زمان‌های کف‌گیری بیشتر، ذرات درگیر گالن و پیریت فرصت شناور شدن پیدا کرده‌اند و یا سطح پیریت اکسید شده است.

۴-۱-۲- اثر سولفات روی بر فلوتاسیون گالن در

نمونه‌های ۹۰ میکرونی

آزمایش‌های شماره ۸، ۹ و ۱۰، جدول ۴، در pH طبیعی (حدود ۸.۵) با استفاده از ۷۵ گرم بر تن اتیل گزنتات پتاسیم، ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم و در غلظت‌های مختلف سولفات روی انجام شده است. در آزمایش‌های بالا میزان سولفات روی مصرفی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ گرم بر تن بوده است. ضمناً درصد جامد آزمایش‌ها ۱۲ درصد بود ولی آزمایش شماره ۱۵ با ۱۵ درصد جامد انجام شده است. عیار و بازایی آهن، روی و سرب در کنسانتره سرب در جدول ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است.

احتمال دارد که به علت حضور بخش زیادی ذرات نرمه در این نمونه، بخشی از سولفات روی (و سایر مواد شیمیائی) توسط آن‌ها مصرف شده باشد و در غلظت‌های بالاتر، بخشی بیشتری از آن صرف بازداشت اسفالریت شده باشد.

به نظر می‌رسد که در نمونه‌های ۷۵ میکرونی، اگر عیار سرب و روی در کنسانتره سرب را در نظر بگیریم در شرایطی که از ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم و ۱۰۰۰ گرم بر تن سولفات روی استفاده شده نتایج بهتری به دست آمده است. به طوری که در مراحل اولیه‌ی فلوتاسیون، متناسب با ۳ دقیقه کف‌گیری آزمایشگاهی، کنسانتره‌ی سربی با عیار و بازایی مناسب به دست می‌آید.

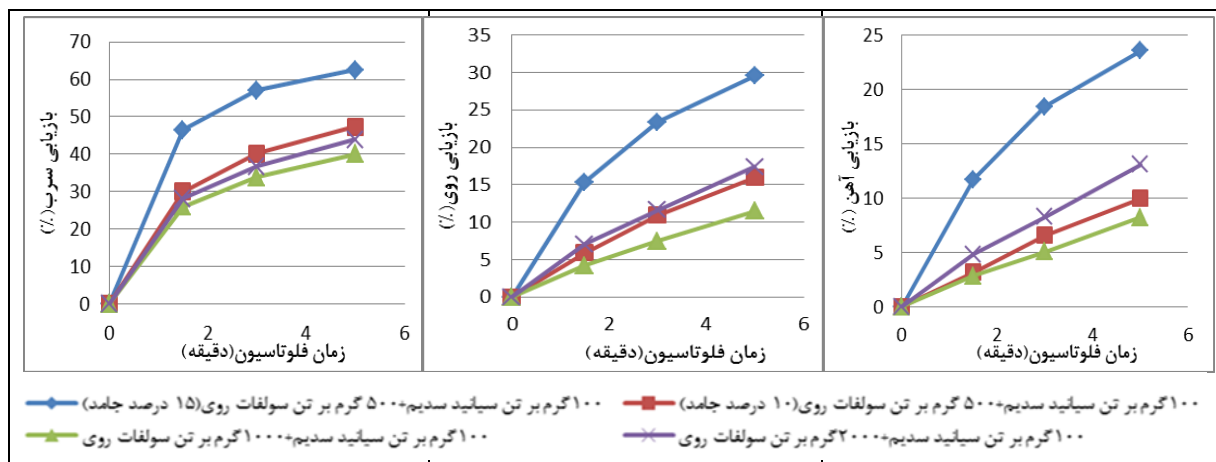
با توجه به نتایج بالا و نمودار انتخابی بودن جدایش سرب-روی و سرب-آهن (شکل ۴) مشاهده می‌شود که افزایش سولفات روی از ۳۰۰ به ۱۰۰۰ گرم بر تن، تأثیر زیادی بر بازایی گالن نداشته است در حالی که بازایی اسفالریت و پیریت در کنسانتره سرب را کاهش داده است. به عبارتی دیگر افزایش این بازداشت‌کننده موجب افزایش انتخابی بودن فلوتاسیون گالن نسبت به اسفالریت و حتی پیریت می‌شود.

افزایش سیانید سدیم تأثیری بر انتخابی بودن فلوتاسیون اسفالریت و گالن نداشته است. ولی تأثیر زیادی بر انتخابی

جدول ۴: نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون گالن روی نمونه‌های ۹۰ میکرونی کانسنگ پر پیریت گوشفیل، کف‌گیری در ۵ دقیقه

کنسانتره سرب						مواد شیمیایی (گرم بر تن)				آزمایش‌ها
آهن		روی		سرب		بازداشت کننده		کلکتور		
بازیابی (%)	عیار (%)	بازیابی (%)	عیار (%)	بازیابی (%)	عیار (%)	اتیل گزنتات پتاسیم	سولفات آهن	سیانید سدیم	سولفات روی	
۱۰	۱۰/۸	۱۶	۶/۴۶	۴۷/۴	۴/۷۳	۷۵		۱۰۰	۵۰۰	۸
۸/۲۲	۱۱/۱	۱۱/۵	۵/۹۳	۴۰	۵	۷۵		۱۰۰	۱۰۰۰	۹
۱۳/۱	۱۱	۱۷/۴	۵/۵	۴۴	۳/۳۳	۷۵		۱۰۰	۲۰۰۰	۱۰
۱۴/۴	۴/۱۱	۴/۱۹	۵/۵	۲۱	۳/۱	۷۵		۲۰۰	۱۰۰۰	۱۱
۲۹/۷	۱۳	۵۹/۱	۱۰/۸	۶۲/۸	۳	۱۰۰	۲۰۰	-	۵۰۰	۱۲
۹/۳۲	۱۱/۵۴	۱۳/۸۶	۶/۳۵	۳۹/۴۷	۵/۲۳	۱۰۰		۱۰۰	۵۰۰	۱۳
۱۷	۱۱	۲۴/۲۳	۶	۴۷/۱۳	۳/۱۱	* ۷۵		۱۰۰	۵۰۰	* ۱۴
۲۳/۶	۱۰/۲	۲۹/۶	۵/۷	۶۲/۵	۳/۱۱	۷۵		۱۰۰	۵۰۰	** ۱۵
۹/۷۳	۱۱/۳	۱۵	۵/۸۶	۴۷	۴/۸۷	۷۵		۱۰۰	۱۰۰۰	*** ۱۶

* آزمایش ۱۴، کلکتور امیل گزنتات ** آزمایش ۱۵ درصد جامد ۱۵٪ *** آزمایش ۱۶ تنظیم pH با کربنات سدیم



شکل ۵: تأثیر غلظت سولفات روی بر بازیابی سرب، روی و آهن در کنسانتره سرب کانسنگ پر پیریت گوشفیل در نمونه ۹۰ میکرونی (در حضور 100gr/t سیانید سدیم و 75gr/t اتیل گزنتات پتاسیم)

دهد که بازیابی سرب در کنسانتره سرب با افزایش سولفات روی از ۴۷ به ۴۴ درصد کاهش یافته است، ولی بازیابی روی در این کنسانتره از ۱۶ به ۱۷ درصد و بازیابی آهن از ۱۰ به ۱۳ درصد افزایش یافته است. به نظر می‌رسد افزایش سولفات روی تا حدود ۱۰۰۰ گرم بر تن، منطبق بر مباحث تئوریک مبنی بر تشکیل هیدرواکسید روی و جلوگیری از فعال شدن اسفالریت منطبق بوده است. اگر چه همزمان بازیابی سرب و آهن را نیز کاهش داده است که ممکن است مربوط به ذرات درگیر اسفالریت با گالن و پیریت بوده باشد. از طرف دیگر مصرف بیش از حد سولفات روی، در این شرایط (به خصوص pH محیط)، همانطور که انتظار می‌رفت، تأثیر منفی بر فلوتاسیون

مقایسه نتایج آزمایش‌ها در نمونه‌های ۹۰ میکرونی نشان می‌دهد که با افزایش سولفات روی از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ گرم بر تن، عیار آهن و سرب اندکی (حدود ۰,۳ درصد) افزایش یافته ولی عیار روی حدود ۰,۵ درصد کاهش یافته است. در این حالت، بازیابی سرب، روی و آهن در کنسانتره سرب به ترتیب از ۴۷/۴ به ۴۰، از ۱۵ به ۱۱ و از ۱۰ به ۸ درصد کاهش یافته است. با افزایش سولفات روی به ۲۰۰۰ گرم بر تن، عیار روی در کنسانتره سرب از ۶/۵ به ۵/۵ درصد کاهش یافته است، ولی عیار آهن به میزان کمی (از ۱۰/۸ به ۱۱ درصد) افزایش یافته است در حالی که عیار سرب نیز از ۴/۷ به ۳/۳ درصد کاهش یافته است. مقایسه بازیابی‌ها در حالت فوق نشان می-

کمی در نمونه مشاهده می‌شود)، فعال شود. به نظر می‌رسد که ترکیب سیانید سدیم و سولفات روی به‌عنوان بازداشت‌کننده در فلوتاسیون این نمونه مؤثرتر باشد.

۴-۱-۳- اثر سیانید سدیم بر فلوتاسیون گالن در نمونه‌های ۹۰ میکرونی

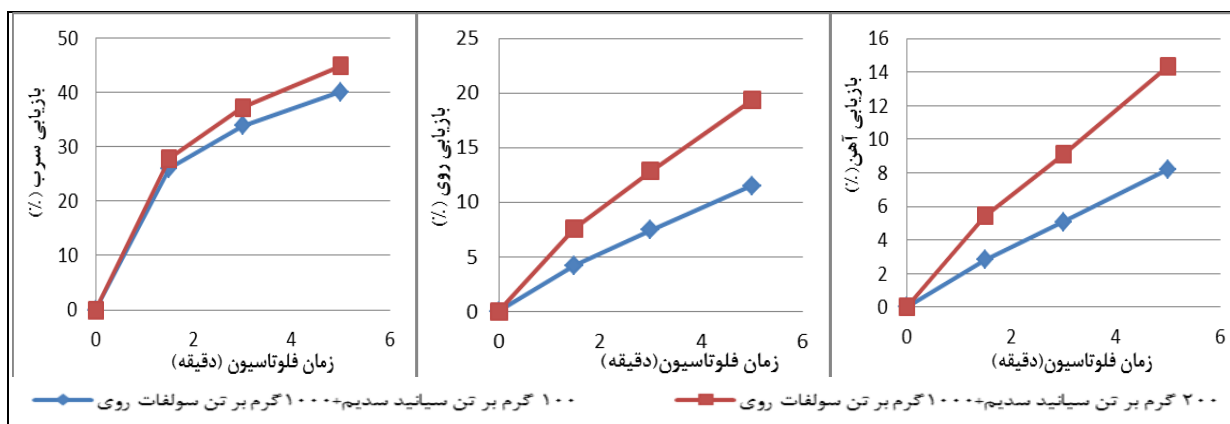
آزمایش‌های شماره ۹ و ۱۱، جدول ۴، با استفاده از ۷۵ گرم بر تن ایتیل گزنات پتاسیم، ۱۰۰۰ گرم بر تن سولفات روی و در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم انجام شده است. بازبایی آهن، روی و سرب در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش میزان مصرف سیانید سدیم از ۱۰۰ به ۲۰۰ گرم بر تن، در حضور ۱۰۰۰ گرم بر تن سولفات روی و در pH طبیعی، موجب کاهش عیار سرب (حدود ۲ درصد) و روی (حدود ۰٫۴ درصد) در کنسانتره سرب شده است، ولی عیار آهن را تغییری نداده است. در حالی که بازبایی سرب، روی و آهن در کنسانتره به ترتیب، از ۴۰ به ۴۵، از ۱۱/۵ به ۱۹ و از ۸/۲ به ۱۴ درصد افزایش یافته است.

گالن داشته‌است. احتمالاً به علت افزایش بازبایی روی و آهن در این حالت بازبایی گالن کاهش یافته است.

در آزمایش‌های بالا، به نظر می‌رسد که از نظر بازبایی رفتار پیریت مشابه اسفالریت بوده است. یعنی با افزایش سولفات روی تا حدودی بازبایی پیریت نیز کاهش یافته است ولی در غلظت‌های بیشتر افزایش یافته است. چون بازبایی آهن و روی با توجه به درصد این عناصر در کنسانتره سنجیده می‌شود (و نه کانی‌های تشکیل دهنده آنها) این مسئله یک نوع هم بستگی بین میزان آهن موجود در نمونه و اسفالریت را نشان می‌دهد. احتمالاً بخشی از این آهن (که به پیریت نسبت داده می‌شود) همراه با روی در ترکیب کانی‌های حاوی روی مانند اسفالریت یا مارماتیت باشد.

به‌طور کلی در شرایط آزمایش‌های بالا، استفاده از ۱۰۰۰ گرم بر تن سولفات روی نتایج مطلوب‌تری به دست می‌دهد و افزایش آن احتمالاً مزیتی ندارد.

مصرف بیش از حد سولفات روی، بازبایی گالن را، به دلیل تشکیل هیدروکسید روی بر روی سطح آن، کاهش می‌دهد. همچنین احتمال دارد اسفالریت موجود در ترکیب کانسنگ زیرزمینی گوشفیل، با یون‌های مس (که به میزان



شکل ۶: تأثیر غلظت سیانید سدیم بر بازبایی سرب، روی و آهن در کنسانتره‌ی سرب کانسنگ پر پیریت گوشفیل (در حضور 1000gr/t سولفات روی و 75gr/t ایتیل گزنات پتاسیم)

کاهش یابد. مشاهده می‌شود که در شرایط آزمایش‌های انجام شده، افزایش سیانید تأثیر مورد نظر بر بازداشت پیریت و اسفالریت در مدار فلوتاسیون سرب را نداشته است. تأثیر بازدارندگی سیانید بستگی به غلظت آن، ترکیب یونی پالپ و طول زنجیر هیدروکربنی کلکتور دارد. بعضی تحقیقات نشان داده است که افزایش میزان کمی سیانید موجب بهبود فلوتاسیون گالن می‌شود، این تأثیر ممکن است به علت خاصیت پاک‌کنندگی سیانید در سطح گالن باشد. گالن یکی از کانی-

در آزمایش‌های بالا، تغییرات سیانید سدیم در حضور ۱۰۰۰ گرم بر تن سولفات روی و در pH طبیعی انجام شده است که ممکن است حالت مطلوبی نباشد، ولی برای مقایسه تأثیر سیانید از آن استفاده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سیانید سدیم، عیار آهن در کنسانتره سرب تغییری نکرده است ولی بازبایی آن افزایش یافته است. انتظار می‌رفت در حالتی که سایر شرایط فلوتاسیون مهیا باشد، با افزایش میزان سیانید سدیم، بازبایی آهن و حتی روی، در کنسانتره سرب

گالن ناپایدار می‌شود و در نتیجه بازیابی آن کاهش می‌یابد. افزایش سولفات روی قاعدتا باید موجب بازداشت اسفالریت و افزایش بازیابی گالن شود و لی احتمالا ذرات در گیر گالن - اسفالریت را هم بازداشت می‌کند و در نتیجه بازیابی سرب کاهش می‌یابد. افزایش سیانید نیز باید موجب بازداشت پیریت و افزایش بازیابی گالن شود ولی در شرایط آزمایش‌های انجام شده منجر به افزایش بازیابی سرب نشده است. مصرف بیش از حد سیانید می‌تواند تأثیر منفی بر فلوتاسیون گالن داشته باشد. مشاهده می‌شود که قابلیت شناوری گالن در سطوح بالا و پایین pH متفاوت است. به طوری که در سطح بالای pH با افزایش سولفات روی بازیابی سرب به شدت کاهش می‌یابد. در حالی که در سطح پائین pH تغییر خاصی صورت نمی‌گیرد. همان‌طور که ذکر شد سطوح بالای pH شرایط خوبی برای فلوتاسیون گالن نیست و اضافه کردن سایر بازداشت کننده‌ها شرایط را بدتر می‌کند. همچنین سولفات روی و سیانید سدیم تأثیر دوگانه‌ای با شدت کمتر دارند. در سطوح پائین سیانید سدیم با افزایش سولفات روی بازیابی سرب کاهش می‌یابد، در حالی که در سطوح بالای آن تقریباً تغییری نمی‌کند. در این حالت نیز در سطح پائین سیانید، سولفات روی موجب بازداشت اسفالریت‌های درگیر با گالن می‌شود در حالی که در سطح بالای سیانید تأثیر آن بر بازداشت کمتر می‌شود زیرا احتمالا بخشی از ذرات با سیانید بازداشت شده‌اند.

هائی است که یون فلزی آن با سیانید ترکیبی نمی‌سازد و بازداشت نمی‌شود. بنابراین با افزایش غلظت سیانید بازداشت نمی‌شود. در حالی که سیانید قادر به بازداشت پیریت است. در آزمایش‌های بالا، احتمالا اندرکنش گالوانیکی بین گالن و پیریت و یون‌های فلزی سایر کانی‌های موجود در سیستم باعث انتخابی نبودن فلوتاسیون پیریت و گالن شده است. به نظر می‌رسد مصرف حدود ۱۰۰ گرم بر تن تأثیر منفی بر فلوتاسیون گالن نداشته است و حتی موجب افزایش بازیابی آن شده است ولی مصرف بیشتر آن، احتمالا به علت مصرف اکسیژن محیط، موجب کاهش بازیابی گالن می‌شود. همچنین مصرف بیشتر سیانید موجب افزایش بازیابی اسفالریت شده است، که احتمالا به علت شناور نشدن گالن، بازیابی آن افزایش یافته - است. تأثیر سیانید در بخش بعد نیز بحث شده است.

۲-۴ آزمایش‌های فاکتوریل برای بررسی تأثیر سولفات روی، سانیید سدیم و pH بر فلوتاسیون گالن

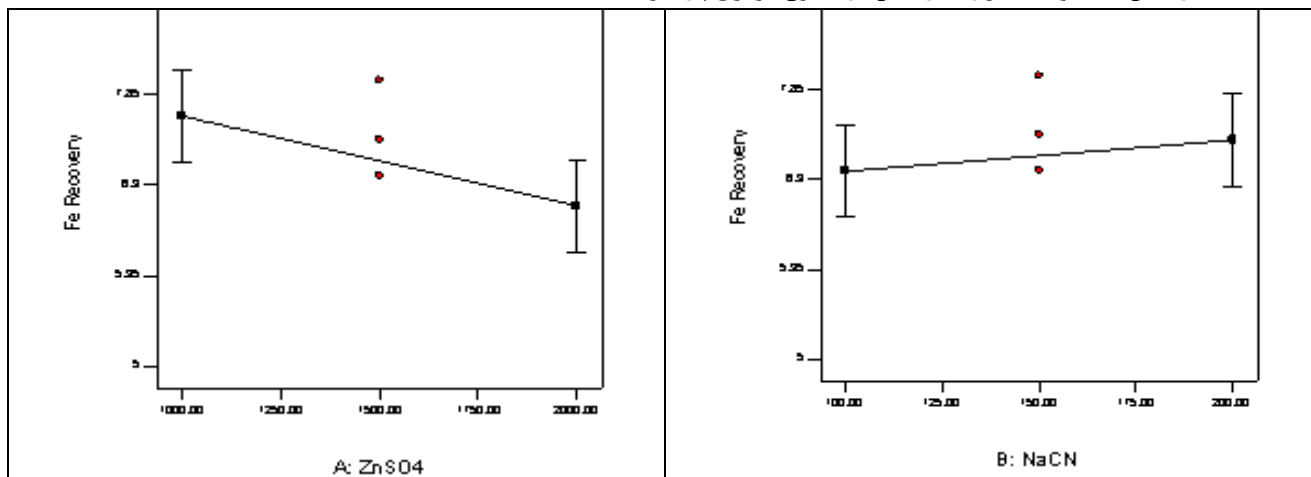
به منظور ارزیابی نتایج آزمایش‌های قبل و بررسی تأثیر pH و تأثیر متقابل پارامترها، آزمایش‌های فاکتوریل در ۲ سطح و با ۳ نقطه مرکزی، با استفاده از سولفات روی، سیانید سدیم و pH انجام شد (جدول ۵) و تأثیر این پارامترها بر بازیابی سرب، روی و آهن، بررسی شده است. مشاهده شد که در محدوده پارامتر-های بررسی شده در آزمایش‌های فاکتوریل، پارامترهای اصلی مؤثر بر بازیابی سرب در کنسانتره سرب، به ترتیب، pH و سولفات روی و به میزان کمتری، سیانید سدیم است. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ تأثیر این پارامترها بر بازیابی آهن را نشان می‌دهد ولی روند تأثیر پارامترها در مورد بازیابی سرب، روی و آهن تقریباً مشابه است که در هر مورد توضیح داده شده است. همچنین تأثیرهای متقابل سولفات روی-pH و به میزان کمتری، سولفات روی-سیانید سدیم، قابل ملاحظه هستند. در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ از هرکدام از تأثیرهای دوگانه بر بازیابی سرب، روی و آهن، یک مورد نمایش داده شده است که در برخی موارد روند تأثیرهای متقابل مشابه است.

نکته مهم در این آزمایش‌ها تأثیر نسبتاً زیاد pH در فلوتاسیون گالن هم به صورت تأثیر اصلی و هم به صورت تأثیر دوگانه با سولفات روی است. افزایش pH و سولفات روی موجب کاهش بازیابی سرب در کنسانتره می‌شود. در حالی که افزایش سیانید (به میزان کمتری) موجب افزایش بازیابی سرب می‌شود. اعتقاد بر این است که با افزایش pH ترکیب گزنتات سرب در سطح

جدول ۵: نتایج آزمایش‌های فاکتوریل جهت بررسی قابلیت فلوتاسیون گالن از نمونه‌های ۹۰ میکرونی کانسنگ زیر زمینی گوشفیل

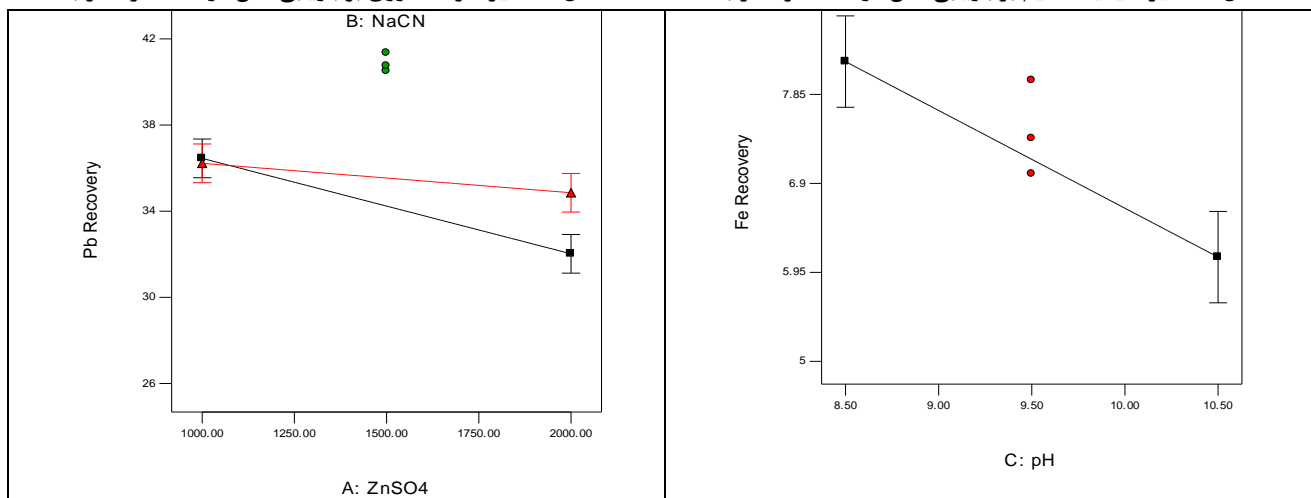
کنسانتره سرب						سطوح پارامترها			آزمایش‌ها
آهن		روی		سرب		pH	سیانید سدیم (gr/ton)	سولفات روی (gr/ton)	
بازیابی %	عیار %	بازیابی %	عیار %	بازیابی %	عیار %				
۷/۷۳	۱۰/۶	۱۱/۸۷	۷	۳۶/۴۵	۵/۲	۸/۵	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۷
۷/۶۵	۱۲/۲	۱۰/۵۷	۷/۲۵	۳۷/۹۶	۶/۳	۸/۵	۱۰۰	۲۰۰۰	۱۸
۸/۶۶	۱۱/۶	۱۲/۱۶	۷	۳۸	۵/۳	۸/۵	۲۰۰	۱۰۰۰	۱۹
۸/۷۶	۱۲	۱۲/۱۴	۷/۱۵	۳۹/۳۱	۵/۶	۸/۵	۲۰۰	۲۰۰۰	۲۰
۷/۵۵	۱۱	۱۱/۳۴	۷/۱	۳۶/۴۵	۵/۵۲	۱۰/۵	۱۰۰	۱۰۰۰	۲۱
۵/۰۳	۱۱/۶	۷/۴۱	۷/۳۵	۲۶/۰۸	۶/۲۶	۱۰/۵	۱۰۰	۲۰۰۰	۲۲
۶/۵۷	۱۱/۶	۹/۶۹	۷/۳۵	۳۴/۴۴	۶/۳۲	۱۰/۵	۲۰۰	۱۰۰۰	۲۳
۵/۳	۱۱/۲	۸/۰۴	۷/۳	۳۰/۴	۶/۶۸	۱۰/۵	۲۰۰	۲۰۰۰	۲۴
۷/۴۶	۱۲/۳۳	۱۲/۶۸	۷/۵۸	۴۰/۸۶	۶/۱	۹/۵	۱۵۰	۱۵۰۰	۲۵*

* آزمایش ۲۵ متوسط تکرار ۳ آزمایش در سطوح مرکزی پارامترها است.



شکل ۸: تأثیر سولفات روی بر بازیابی آهن در کنسانتره سرب

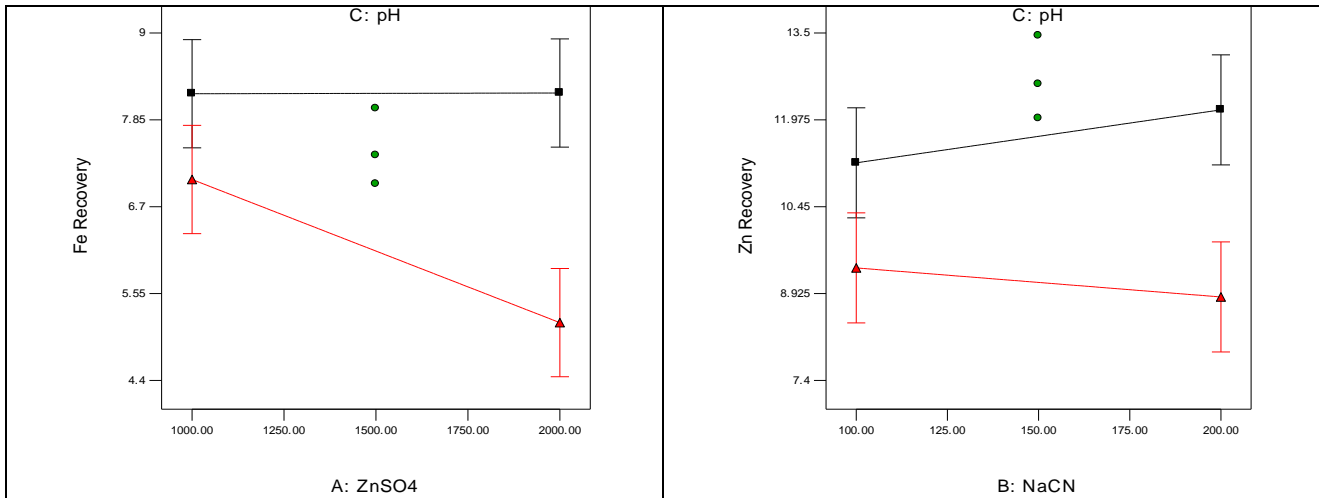
شکل ۷: تأثیر سیانید سدیم بر بازیابی آهن در کنسانتره سرب



شکل ۱۰: تأثیر دوگانه سیانید سدیم - سولفات روی بر بازیابی سرب

شکل ۹: تأثیر تغییر pH بر بازیابی آهن در کنسانتره سرب

(خط قرمز سطح بالا و خط تیره سطح پائین سیانید)



شکل ۱۱: تأثیر دوگانه سیانید سدیم - pH بر بازیابی روی در کنسانتره سرب (خط قرمز سطح بالا و خط تیره سطح پائین pH)

شکل ۱۲: تأثیر دوگانه pH - سولفات روی بر بازیابی آهن در کنسانتره سرب (خط قرمز سطح بالا و خط تیره سطح پائین pH)

تأثیر منفی بر قابلیت فلوتاسیون پیریت و حضور آن در کنسانتره سرب می‌گذارد. ولی افزایش سولفات روی احتمالاً حضور ذرات درگیر پیریت-اسفالریت در کنسانتره سرب را کاهش داده‌است. همچنین تأثیر دو گانه سولفات روی -pH و به میزان کمتری تأثیر دو گانه سیانید سدیم -pH نیز در بازیابی آهن مهم هستند. مشاهده شده است که در سطح پائین pH افزایش سیانید سدیم موجب افزایش بازیابی آهن و در سطح بالای pH موجب کاهش آن در کنسانتره سرب شده است. کاهش حضور آهن در کنسانتره سرب، در pH بالا و در حضور سیانید، قابل انتظار است. ولی افزایش بازیابی آهن با افزایش سیانید در pH پائین غیرمنتظره است و ممکن است به عوامل دیگری ارتباط داشته باشد (مثلاً پتانسیل پالپ) که در اینجا بررسی نشده‌اند.

در محدوده سه پارامتر بررسی شده در آزمایش‌های فاکتوریل، ماکزیمم بازیابی سرب در کنسانتره سرب، در حالی که بازیابی روی و آهن آن در حد کمینه باشد، در سطوح بالای هر سه پارامتر بررسی شده، به دست آمده است. به عبارت دیگر با استفاده از حدود ۲۰۰ گرم برتن سیانید سدیم، ۲۰۰۰ گرم برتن سولفات روی و در pH حدود ۱۰/۵، در کنسانتره سرب حاصله، بازیابی سرب حدود ۳۱ درصد و بازیابی روی و آهن، به ترتیب حدود ۸/۲ و ۵/۳ درصد خواهد بود.

۳-۴- تأثیر سولفات آهن بر فلوتاسیون گالن در نمونه گوشفیل

تأثیر پارامترهای pH و سولفات روی بر بازیابی روی در کنسانتره سرب، نیز قابل ملاحظه است و افزایش آن‌ها در سطوح بررسی شده موجب کاهش بازیابی روی می‌شود. کاهش بازیابی روی در کنسانتره سرب، با افزایش سولفات روی قابل انتظار است. احتمالاً افزایش pH موجب کاهش بازیابی ذرات درگیر گالن و اسفالریت و حضور کمتر روی در کنسانتره سرب شده است. در این مورد نیز تأثیر دوگانه سولفات روی - سیانید سدیم مهم است و افزایش میزان سولفات روی، در سطوح پائین سیانید، موجب کاهش بیشتر بازیابی روی در کنسانتره سرب می‌شود. به نظر می‌رسد که سولفات روی، در مقادیر کمتر سیانید، وظیفه اصلی بازداشت اسفالریت‌ها را بر عهده دارد و تأثیر آن آشکارتر است. ولی در سطوح بالای سیانید نقش آن کمتر می‌شود. بخشی به این علت که بعضی از اسفالریت‌ها می‌توانند توسط سیانید بازداشت شوند و بخشی هم احتمالاً به علت تأثیری است که بر فلوتاسیون گالن دارد. همچنین تأثیر دوگانه سولفات روی -pH مهم است و در سطوح بالای pH، افزایش سولفات روی به میزان بیشتری بازیابی روی در کنسانتره سرب را کاهش می‌دهد. در pH بالا احتمالاً قابلیت فلوتاسیون ذرات درگیر گالن و اسفالریت کاهش می‌یابد بنابراین تأثیر سولفات روی بیشتر مشاهده می‌شود.

پارامترهای غلظت سولفات روی و pH بیشترین تأثیر را بر بازیابی آهن در کنسانتره سرب داشته‌اند و افزایش هر دو پارامتر موجب کاهش بازیابی آهن شده است. افزایش pH

کنسانتره‌ی سرب مورد نظر باشد و محدودیت‌های زیست محیطی اعمال نشود، استفاده از سیانید سدیم ترجیح داده می‌شود.

۴-۴- اثر کلکتور بر فلوتاسیون گالن در نمونه گوشفیل

به منظور بررسی تأثیر غلظت و نوع کلکتور علاوه بر آزمایش‌هایی که اکثراً با استفاده از ۷۵ گرم بر تن اتیل گزنتات پتاسیم انجام شد، چند آزمایش نیز با غلظت ۱۰۰ گرم بر تن از این کلکتور و ۷۵ گرم بر تن از امیل گزنتات پتاسیم انجام شد (جدول ۳).

مشاهده شد که افزایش مصرف اتیل گزنتات پتاسیم از ۷۵ به ۱۰۰ گرم بر تن (در شرایط فوق)، موجب کاهش بازیابی سرب و همچنین کاهش بازیابی روی و آهن در کنسانتره‌ی سرب شده است. این نتیجه بر خلاف انتظار است، زیرا اغلب افزایش کلکتور (تا حدودی)، موجب افزایش بازیابی می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌های فاکتوریل (جدول ۵) و ممکن است این مسئله مرتبط با میزان pH و Eh محیط بوده باشد. و یا این که مصرف کلکتور بیش از حد نیاز، تأثیر منفی روی بازیابی گالن داشته است.

از طرف دیگر، استفاده از ۷۵ گرم بر تن کلکتور امیل گزنتات پتاسیم به جای اتیل گزنتات پتاسیم، باعث افزایش ناچیزی در عیار آهن (از ۱۰/۸ به ۱۱ دصد) در کنسانتره‌ی سرب شده است ولی عیار روی در این کنسانتره از ۶٫۵ به ۶ درصد و عیار سرب از ۴٫۷ به ۳ درصد کاهش یافته است. در این حالت بازیابی آهن از ۱۰ به ۱۷ درصد و بازیابی روی از ۱۶ به ۲۴ درصد افزایش یافته است ولی بازیابی سرب اندکی کاهش (حدوداً ۰/۳ درصد) یافته است. کلکتور امیل گزنتات احتمالاً ذرات درگیر (و یا ذرات آزاد اسفاریت فعال شده یا پیریت) را بیشتر به کنسانتره منتقل کرده است.

به طور کلی استفاده از امیل گزنتات در فلوتاسیون گالن توصیه نشده است. میزان بهینه اتیل گزنتات نیز نیاز به بررسی بیشتر دارد.

۴-۵- مقایسه تأثیر آهک و کربنات سدیم بر فلوتاسیون گالن در نمونه گوشفیل

در منابع علمی استفاده از کربنات سدیم برای تنظیم pH در مرحله‌ی فلوتاسیون گالن توصیه شده است. البته در این حالت نیازی به استفاده از موادی نظیر سولفات روی برای جلوگیری از فعال شدن اسفالریت نیست، زیرا یون‌های کربنات این نقش را

هدف از انجام این آزمایش، بررسی امکان جایگزینی سولفات آهن با سیانید سدیم، برای بازداشت پیریت، است. آزمایش شماره ۲ (جدول ۳) در حضور ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم (۷۵ گرم بر تن اتیل گزنتات پتاسیم) و آزمایش شماره ۷ از ۵۰۰ گرم بر تن سولفات آهن (و ۷۵ گرم بر تن امیل گزنتات پتاسیم) استفاده شده است. مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از ۵۰۰ گرم بر تن سولفات آهن به جای ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم، عیار سرب در کنسانتره‌ی سرب اندکی افزایش یافته است (حدود ۰/۵ درصد) ولی عیار آهن و روی در این کنسانتره، به ترتیب حدود ۵ و ۴ درصد افزایش یافته‌اند. در این حالت بازیابی آهن، روی و سرب به ترتیب حدود ۱۰، ۱۸ و ۹ درصد افزایش می‌یابند. به عبارت دیگر تأثیر سیانید سدیم به تنهایی در بازداشت آهن و روی بیشتر از سولفات آهن است.

اگر در آزمایش‌های شماره ۲ و ۷ (جدول ۳)، از مقادیر مساوی اتیل گزنتات پتاسیم استفاده شده بود می‌شد نتیجه گرفت که استفاده از سولفات آهن موجب افزایش عیار و بازیابی آهن و روی (و حتی تا حدودی سرب) در کنسانتره شده است که نتیجه‌ی مطلوبی نیست. چون همزمان با استفاده از سولفات آهن از امیل گزنتات پتاسیم به عنوان کلکتور استفاده شده است ممکن است بخشی از افزایش بازیابی‌های فوق مرتبط با این کلکتور نیز باشد.

همچنین مقایسه نتایج آزمایش‌های ۸ و ۱۲ (جدول ۴) که جایگزینی ۲۰۰ گرم بر تن سولفات آهن با ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم مقایسه شده است نشان می‌دهد که عیار سرب در کنسانتره‌ی سرب تقریباً ثابت (حدود ۳ درصد) مانده است، در حالی که عیار آهن از ۱۰ به ۱۳ درصد و عیار روی از ۵٫۷ به ۱۰٫۸ درصد افزایش یافته است. در این حالت بازیابی آهن از ۲۴ به ۳۰ درصد، بازیابی روی از ۳۰ به ۶۰ درصد افزایش یافته است ولی بازیابی گالن تغییری نکرده است. در این مورد، نیز استفاده از سولفات آهن به جای سیانید، موجب افزایش آهن و روی کنسانتره شده است، اگرچه بخشی از این تغییر ممکن است در اثر افزایش میزان کلکتور (۱۰۰ گرم بر تن اتیل گزنتات در آزمایش شماره ۱۲) بوده باشد. ولی چون بازیابی گالن تغییری نکرده است، این افزایش آهن و روی کنسانتره عمدتاً در اثر جایگزینی سولفات آهن بوده است.

افزایش سولفات آهن به محیط موجب تشکیل ترکیبات آبدوست مانند هیدرواکسید آهن در سطح پیریت و بازداشت آن می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت در صورتی که کیفیت

بازیابی آهن در کنسانتره‌ی سرب کاهش یافته است. در این حالت سولفات روی مانع فعال شدن بخشی از اسفالریت شده است.

۵- در آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شده روی نمونه‌های کوچک‌تر از ۹۰ میکرون، با افزایش سولفات روی از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ گرم بر تن، عیار آهن و سرب اندکی (حدود ۰/۳ درصد) افزایش یافته ولی عیار روی حدود ۰/۵ درصد کاهش یافته است. در این حالت، بازیابی گالن، اسفالریت و پیریت در کنسانتره‌ی سرب کاهش یافته است. بر خلاف انتظار افزایش بیش از حد سولفات روی موجب بازداشت بیشتر اسفالریت نشده و حتی تأثیر منفی بر فلوتاسیون گالن داشته است. آزمایش‌های بعد نشان داده است که تأثیر سولفات روی به سطوح پارامترهای دیگر از جمله pH محیط وابسته است.

۶- بررسی تأثیر سیانید سدیم در بازداشت پیریت و اسفالریت، در نمونه‌های کوچک‌تر از ۹۰ میکرون نیز نشان داد که با افزایش میزان مصرف آن از ۱۰۰ به ۲۰۰ گرم بر تن (در حضور ۱۰۰۰ گرم بر تن سولفات روی) عیار سرب و روی در کنسانتره سرب کاهش یافته است ولی عیار آهن تغییری نکرده است. در حالی که بازیابی‌ها افزایش یافته است. این اتفاق بر خلاف انتظار بود. در این حالت نیز احتمالاً شرایط پالپ (pH, Eh) و سطوح سایر پارامترها تأثیر گذار بوده است.

۷- نتایج آزمایش‌های فاکتوریل در ۲ سطح از پارامترهای غلظت سولفات روی و سیانید سدیم، و pH محیط، روی نمونه کوچک‌تر از ۹۰ میکرون نیز نشان داد که تأثیر پارامترهای pH و سولفات روی و به میزان کمتری سیانید سدیم بر بازیابی سرب، روی و آهن در کنسانتره سرب قابل ملاحظه هستند. همچنین تأثیر دوگانه پارامترهای بالا، به خصوص pH با سایر پارامترها، مهم هستند. رفتار سایر پارامترها در سطوح بالا و پائین pH کاملاً متفاوت است. در محدوده پارامترهای بررسی شده، ماکزیمم بازیابی سرب در حالیکه بازیابی روی و آهن مینم باشد، حدود ۳۰ درصد به‌دست آمده است.

۸- استفاده از سولفات آهن به جای سیانید سدیم، موجب افزایش عیار و بازیابی روی و آهن در کنسانتره‌ی سرب شده است ولی عیار و بازیابی سرب تغییری نکرده است. به عبارت دیگر تأثیر سیانید سدیم به تنهایی در بازداشت آهن و روی بیشتر از سولفات آهن است.

۹- استفاده از کربنات سدیم به جای آهنک، برای تنظیم pH، بازیابی و عیار سرب، روی و آهن در کنسانتره‌ی سرب را تغییر نداده است، بنابراین استفاده از کربنات سدیم در مقابل آهنک ارزان قیمت‌تر توصیه نمی‌شود.

برعهده دارند. در آزمایش‌های بالا اغلب از سولفات روی استفاده شده است.

آزمایش‌های شماره ۸ و ۱۶ (جدول ۴) با استفاده از ۷۵ گرم بر تن اتیل گزنات پتاسیم، ۱۰۰۰ گرم بر تن سولفات روی و ۱۰۰ گرم بر تن سیانید سدیم انجام شده است. در آزمایش شماره ۸ تنظیم pH به وسیله آهنک ولی در آزمایش شماره ۱۶، به وسیله کربنات سدیم انجام شده است. مقایسه‌ی تأثیر تنظیم pH با آهنک و کربنات سدیم تفاوت معناداری را نشان نمی‌دهد. در حضور کربنات سدیم، بازیابی گالن، اسفالریت و پیریت در کنسانتره‌ی سرب تقریباً تغییری نکرده است. در این حالت کاهش اندکی در عیار روی (حدود ۰/۵ درصد) و افزایش کمی در عیار آهن (حدود ۰/۵ درصد)، (با فرض عدم وجود خطا) مشاهده شده است. بنابراین استفاده از کربنات سدیم در مقابل آهنک ارزان قیمت‌تر توجیهی ندارد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات فلوتاسیون اولیه گالن از کانسنگ سولفیدی معدن زیرزمینی گوشفیل در حضور بازداشت کننده‌های مختلف را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- مطالعات آزمایشگاهی و تجربیات کارخانه نشان داده است که فلوتاسیون کانسنگ سولفیدی پرپیریت معدن زیرزمینی گوشفیل پیچیده است. بار اولیه‌ی شامل این کانسنگ در کارخانه‌ی فلوتاسیون باما راندمان مورد نظر را نداشته است.

۲- نمونه‌برداری از نقاط مختلف کانسار و مطالعه مقاطع صیقلی نشان داده است که این کانسنگ سرب و روی از چند تیپ مختلف شامل: کانه سرب و روی دولومیتی، سرب و روی پرپیریت، شیبست‌های عیاردار و کانسنگ سرب و روی بیتومین-دار، تشکیل شده است.

۳- در کانسنگ پرپیریت، کانی‌های اصلی گالن، اسفالریت و پیریت است. در این زون دو نسل اسفالریت وجود دارد و پیریت به شکل‌های مختلفی دیده شده است. گانگ اصلی این کانسنگ کربناته است. مطالعات کانی‌شناسی نمونه نشان داده است کانی‌های گالن، اسفالریت و پیریت به شدت درگیر هستند.

۴- در آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شده روی نمونه‌ی کوچک‌تر از ۷۵ میکرون مشاهده شد که با افزایش سولفات روی از ۳۰۰ به ۱۰۰۰ گرم بر تن، عیار سرب در کنسانتره‌ی سرب افزایش یافته، ولی بازیابی آن (حدود ۴۰ درصد) تقریباً ثابت مانده است. عیار روی تقریباً ثابت مانده (حدود ۸ درصد) ولی بازیابی آن کاهش پیدا کرده است. از طرف دیگر عیار و

[4]. Chander S., "Fundamentals of Sulfide Mineral Flotation", 1999, *Advances in Flotation Technology*, Edited by Parekh and Miller, SME, pp 129-146.

[5]. Bulatovic S.M., ۲۰۰, "Flotation of Sulfide Ores", *Handbook of Flotation Reagents, Chemistry, Theory and Practice*, Elsevier, pp 323-366.

[۶]. نعمت اللهی، حسین، ۱۳۸۴، کانه‌آرایی، جلد ۲، انتشارات دانشگاه تهران.

[7]. Klimpel R.R., 1999, "A review of sulfide mineral collector practice", in, *Advances in Flotation Technology*, Parekh and Miller, pp 115-128.

[۸]. کلینی، محمد جواد، ۱۳۹۲، "راهنمای واکنشگرهای فلوتاسیون"، جلد اول، انتشارات دانشگاه تفرش.

[۹]. عطفی، آویشن؛ حجت الاسلامی، هاید؛ نوع پرست، محمد؛ شفائی، ضیاءالدین؛ قربانی، علی؛ جوزانی کهن، گلناز؛ ۱۳۸۸ "مطالعه و بررسی پرعیارسازی کانسنگ سولفیدی-اکسیدی سرب کم عیار به روش‌های فلوتاسیون و ثقی". نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره چهارم، شماره هشتم، سال ۱۳۸۸، صفحه ۳۹ تا ۴۹.

[10]. Wills B.A., Napier- Munn T., 2010, "Mineral Processing Technology", Elsevier.

[11]. Maximov I.I., Otrzhdyonova L. A., Koltunova T.Y. and Kuchayev V. A., 2005, "New Non-Cyanide Technology for Processing Massive Copper-Zinc Ores", *Centenary of flotation symposium, Brisbane Australia, QLD*, pp 991-998.

[12]. Silvestre M. o., Pereira C. A., Galery R., Peres A. E. C., 2009, "Dispersion effect on a lead-zinc sulphide ore flotation", *Mineral Engineering*, Vol. 22, pp 752-758.

[13]. Sui C., Stephane H.R. Brienne, ZhengHe Xu, James A. Finch, 1997, *Xanthate adsorption on Pb contaminated pyrite*, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 49, pp 207-221.

[14]. Shen W.Z., Fornasiero D., Ralston J., 2001, "Flotation of sphalerite and pyrite in the presence of sodium sulfite", *Int. J. Miner. Process*, Vol.63, pp. 17-28.

[15]. Bulut G., Ceylan A., Soylu B., Goktepe F., "Role of starch and metabisulphite on pure pyrite and pyritic copper ore flotation", 2011, *Physicochemical problems of mineral processing*, Vol.48, pp 39-48.

[16]. Toka B., Antalya U., 1996, *Flotation behaviour of galena and pyrite*, *Changing Scopes in Mineral Processing*, Turkey.

[17]. Young M.F., Pease J.D., Johnson N.M. and Munro P.D., 1997, "Developments in milling practice at the lead/zinc concentrator of Mount Isa

۱۰- افزایش مصرف اتیل گزنتات پتاسیم، موجب کاهش بازیابی گالن، اسفالریت و پیریت در کنسانتره‌ی سرب شده است، این نتیجه بر خلاف انتظار است، ممکن است افزایش کلکتور باعث فلوتاسیون بخشی از گانگ شده باشد. از طرف دیگر، استفاده از کلکتور امیل گزنتات پتاسیم به جای اتیل گزنتات پتاسیم، باعث کاهش بازیابی گالن ولی افزایش بازیابی پیریت و اسفالریت در کنسانتره‌ی سرب شده است. احتمالاً بخشی از اسفالریت فعال شده و پیریت در این حالت شناور شده است.

۱۱- مطالعات اولیه نشان داد که بخشی از این نمونه حاوی کربن است و در مرحله پیش فلوتاسیون با استفاده از گازوئیل و کف ساز شناور شدند که شامل بخشی از سرب و روی نیز بودند. احتمالاً بخشی از نتایج غیر قابل توجیه در این تحقیق مربوط به حضور این بخش کربن دار در نمونه باشد. لازم است که حضور این مواد در نمونه بیشتر مطالعه شود.

۱۲- نمونه‌هایی که در این بخش مطالعه شده‌اند برای افزایش درجه آزادی کانی‌ها تا ابعاد بسیار ریز (d80 حدود ۳۸ و ۵۳ میکرون) آسیا شده‌اند. ریز بودن نمونه‌ها فلوتاسیون آن‌ها را مشکل‌تر می‌کند. حضور نرمه‌ها می‌تواند موجب مصرف بیش از حد بازداشت کننده‌ها و کلکتور شود، همچنین در فلوتاسیون ایجاد اختلال کند. ممکن است دلیل فلوتاسیون بهتر نمونه‌های کوچک‌تر از ۹۰ میکرون به توزیع ابعاد ذرات مربوط باشد. با این حال به نظر می‌رسد هنوز هم بعضی از کانی‌های سولفیدی درگیر باشد. در این تحقیق ابزار لازم برای مطالعه نحوه فلوتاسیون فراکسیون‌های مختلف نمونه‌ها و نحوه درگیری آن‌ها وجود نداشت و لی لازم است که در مطالعات بعدی به این مسئله پرداخته شود.

۶- تشکر و تقدیر

از مدیریت و کارشناسان محترم معدن سرب و روی باما که از انجام این تحقیق حمایت کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع

[1]. Fuerstenau M. C., Chander S., and Wood R., 2007, "Sulfide mineral flotation", in *Froth flotation: A century of innovation*, Edited by Fuerstenau M. C, Jameson G.J., Yoon R., SME, Littleton, pp. 425-453.

[۲]. رضایی، بهرام، ۱۳۷۵، فلوتاسیون، دانشگاه هرمزگان.

[3]. Seke, M.D, 2005, *Optimization of the selective flotation of galena and sphalerite at Rosh Pinah Mine*, PhD Thesis, University of Pretoria, South Africa.

۲۰. Magdalionovic N., Trumic M., Petkovic Z., Rajic V., 2004. "Cyanide elimination from lead-zinc flotation", Mineral Processing and Environmental Protection. Vol. 4, pp 30-35.
21. Greet C.J., 2005, The influence of pyrite on galena oxidation and sunsequent flotation, Centenary of Flotation Symposium, Australia.
۲2. Gredelj S., Zanin M., Grano S.R., 2009. Selective flotation of carbon in the Pb-Zn carbonaceous sulphide ores of Century, Zinifex, Minerals Engineering, Vol. 22, pp 279-288.
- Mines Limited from 1990", Ausimm Sixth Mill Operators Conference, 6-8 Octobr, Madang, Papua new Guinea.
۱۸. Ikumapayi F.K., 2010, Flotation Chemistry of complex sulphide ores: Recycling of process water and flotation selectivity.
۱۹. Basilio C.I., Kartio I.J and. Yoon R.-H, 1996, "Lead activation of sphalerite during galena flotation", Mineral Engineering, Vol. 9, pp 689-879.