

## بهینه‌سازی عامل‌های عملیاتی استخراج باکتریایی کانسنگ کم عیار مجتمع مس سرچشمه با استفاده از باکتری‌های مزوفیل و گرمادوست معتدل در مقایسه با حلال شویی

مهدی یعقوبی مقدم<sup>۱\*</sup>، زهرا منافی<sup>۲</sup>، محمد رنجبر<sup>۳</sup> و مهین شفیعی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، واحد تحقیقات هیدرومتالورژی، امور پژوهش و توسعه، مجتمع مس سرچشمه، کرمان، ایران

۳- استاد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۴- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

دریافت: مهر ۱۳۹۰، بازنگری: بهمن ۱۳۹۰، پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۱

**چکیده:** در این پژوهش، مقایسه بین روش‌های حلال شویی و استخراج باکتریایی به منظور به دست آوردن مس از کانسنگ کم عیار اکسیدی و سولفیدی مجتمع مس سرچشمه بررسی شد. تأثیر عامل‌های عملیاتی مانند pH، دما و دبی پاشش بر روی استخراج باکتریایی کانسنگ کم عیار در ستون‌های ۴ متری در مدت ۹۰ روز با استفاده از روش طراحی آزمایشی تاگوچی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌های ستونی نشان داد که در فرایند باکتریایی، با استفاده از باکتری‌های مزوفیل در مقایسه با فرایند شیمیایی و دمای محیط، استخراج مس و آهن به ترتیب ۲۴/۹۳ و ۹/۳۰ درصد و با استفاده از باکتری‌های گرمادوست معتدل در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و pH برابر ۱/۵ و دبی پاشش ۵ لیتر بر متر مربع بر ساعت، استخراج مس در حدود ۳۶ درصد افزایش داشت. با وجود این، بیشینه استخراج مس ۸۱/۸۷ درصد بود.

**واژه‌های کلیدی:** استخراج باکتریایی، باکتری‌های مزوفیل و گرمادوست معتدل، کانسنگ کم عیار، راکتور ستونی، طراحی آزمایش تاگوچی

### مقدمه

و ثروت‌های خدادادی توجه کارشناسان و پژوهشگران به چنین فناوری‌هایی جلب شده است. مروری بر زمینه بهره‌وری صحیح از منابع معدنی نشان می‌دهد که امروزه استفاده از منابع با عیار پایین و منابعی که از نظر فناوری امکان بهره برداری از آن‌ها مشکل‌تر است، در دستور کار کارشناسان قرار گرفته است [۲]. استخراج باکتریایی فنی اقتصادی و ساده است که در زمینه صنایع معدنی توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۲].

بررسی عملکرد واحدهای صنعتی فعال در زمینه استخراج باکتریایی حاکی از آن است که تعداد قابل توجهی از آن‌ها در

امروزه استخراج باکتریایی فلزها، جهت استفاده از کانسنگ کم عیار و باطله‌های صنایع به عنوان یک فناوری نویدبخش شناخته شده است و از طرفی از نظر زیست محیطی نیز پاکیزه‌ترین فناوری به حساب می‌آید. وضعیت کنونی این فناوری در مقایسه با ۳۰ سال پیش، زمانی که نخستین کنفرانس بین‌المللی بیوهیدرومتالورژی در نیومکزیکو برگزار شد [۱]، پیشرفت قابل توجهی داشته است. از این رو، با پیشرفت جوامع بشری و به موازات آن افزایش حجم تقاضا برای فرآورده‌های صنعتی، و استفاده بهینه از منابع

دسترسی باکتری‌ها به مواد مغذی و اکسید کننده‌ها به سطح کانی شده و قسمت اعظم استخراج مس را به تعویق می‌اندازد. ماهیت این لایه منفعل ساز هنوز مورد بحث است. بر اساس نظری، این لایه بیشتر از جنس جاروسیت، سولفات هیدروکسیدهای آهن سه ظرفیتی، پلی‌سولفید یا گوگرد است [۸].

یون‌های آهن سه ظرفیتی در محیط‌هایی که خاصیت اسیدی کمتری دارند، آبکافت شده و انواع ترکیب‌های پیچیده و نامحلول تولید می‌کنند. این ترکیب‌های نامحلول به طور عمده شامل آهن(III) هیدروکسیدها، انواع سولفات‌های بازی مانند جاروسیت با فرمول کلی  $X[Fe_3(SO_4)_2(OH)_6]$  است که X ممکن است  $NH_4^+$ ،  $Na^+$ ،  $K^+$  و  $H_3O^+$  باشد [۸، ۱۲ و ۱۳].

در pH بالاتر رسوب نمک آهن سه ظرفیتی یا جاروسیت افزایش می‌یابد. لذا غلظت یون آهن سه ظرفیتی باید به گونه‌ای تنظیم شود که در شرایط فعالیت باکتری رسوب نکند. جاروسیت افزون بر رسوب روی سطح کانی و ایجاد سدی در مقابل نفوذ حلال به سطح کانی، با جذب یون‌های پتاسیم، سدیم و آمونیم باعث می‌شود که محیط از این یون‌ها که برای رشد باکتری بسیار ضروری است فقیر شده و فعالیت باکتری کاهش یابد [۱۳، ۱۴]. از طرفی یون آهن سه ظرفیتی که به عنوان یک اکسید کننده قوی در واکنش غیر مستقیم باکتریایی اهمیت دارد، به دلیل تشکیل رسوب جاروسیت، رسوب کرده و تأثیر خود را از دست می‌دهد [۱۲]. براساس گزارش‌های موجود [۱۵]، تقدم در استخراج باکتریایی کانی‌های سولفیدی عمده مس با باکتری‌های معتدل‌دوست به این ترتیب است:

کالکوپیریت > کارولیت > کوولیت > بورنیت > کالکوسیت  
در پژوهشی که توسط رنجبر و همکاران [۱۵] صورت گرفت، آخرین وضعیت و نتیجه‌ی پژوهش‌های استخراج باکتریایی سولفیدهای اولیه مس و پتانسیل کاربرد استخراج باکتریایی در صنایع مس ایران مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. همچنین توسط رنجبر و همکاران [۱۶-۲۳] پژوهش‌هایی بر روی کانسنگ کم عیار انجام گرفته تا کارایی و عملکرد باکتری‌های مزوفیل و گرمادوست جهت افزایش استخراج مس بررسی و تعیین شود.

کشورهای در حال توسعه وجود دارند. دلیل عمده این امر این است که در بسیاری از این ممالک، منابع معدنی قابل توجه‌ای یافت می‌شود که می‌توانند درآمدزا باشند. افزون بر آن، فرایند استخراج باکتریایی به دلیل سادگی و نیاز به هزینه‌های سرمایه‌ای اندک به عنوان فناوری مطلوبی برای کشورهای در حال توسعه قابل استفاده است [۳].

استخراج کاتیون‌های فلزی از کانی‌های نامحلول با استفاده از اکسایش زیستی و فرایندهای کمپلکس سازی به طور کلی در مورد فلزهایی چون مس، کبالت، نیکل، نقره و اورانیم به کار برده می‌شود [۴]. یکی از رویکردهای امیدبخش ایجاد شده برای بهبود انحلال مس از کانسارهای کم‌عیار، کاربرد میکروارگانیزم‌های اسیددوست به عنوان کاتالیست‌های زیستی است [۳]. هیپ<sup>(۱)</sup> استخراج باکتریایی سولفیدهای کم عیار مس یک فناوری جدید برای استخراج مس از کانی‌های سولفیدی ثانویه مانند کالکوسیت و کوولیت با موفقیت به کار برده شده است [۵ و ۶]. برخی هیپ‌های کالکوسیتی ابتدا با عملیات حلال‌شویی شروع به کار کرده و پس از تمام شدن کانی‌های اکسیدی با هوادهی و یا تلقیح باکتری تبدیل به عملیات استخراج باکتریایی شده‌اند [۷]. کالکوپیریت مهمترین کانی مس‌دار است و در مقابل استخراج باکتریایی در دمای پایین مقاومت نشان می‌دهد و با تشکیل رسوب روی سطوح این کانی انحلال آن متوقف می‌شود [۹، ۱۰ و ۱۱]. سولفات آهن دو ظرفیتی در حضور اکسیژن، سولفوریک اسید و باکتری دوباره به فریک سولفات تبدیل می‌شود. در حضور باکتری اسیدی تیوباسیلوس تیو اکسیدانس گوگرد عنصری به سولفوریک اسید اکسیده می‌شود. اکسایش گوگرد عنصری و فرو سولفات باید همزمان صورت گیرد، در غیر این صورت گوگرد عنصری تشکیل شده، سطح کالکوپیریت را پوشانده و مانع از ادامه انحلال آن می‌شود [۱۱]. گوگرد هادی ضعیفی است و از انتقال الکترون به سطح کانی جلوگیری کرده و از دسترسی باکتری و آهن سه ظرفیتی به سطح کانی ممانعت می‌کند [۸].

سینتیک انحلال کم این کانی به دلیل تشکیل لایه انفعالی بر روی سطح کانی است. این لایه باعث ایجاد محدودیت در

است. افزون بر این توزیع مس، آهن و اکسید در بخش‌های ابعادی متفاوت نیز در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱ تجزیه کانی شناسی کانسنگ کم عیار کالکوپیریتی

نوع کانی	درصد جرمی	نوع کانی	درصد جرمی
کالکوسیت	۰/۰۲۶	کالکوپیریت	۰/۳۶۶
کولیت	۰/۰۳۳	مس طبیعی	۰/۰۰۰
بورنیت	۰/۰۰۰	پیریت	۱۲/۹۵۳
هماتیت	۰/۰۹۴	جمع کل کانی‌های غیرفلزی	۸۶/۰۷۱
مولیبدنیت	۰/۰۱۰	جمع کل کانی‌های اکسیدی	۰/۲۹۸
لیمونیت	۰/۱۴۷	جمع کل کانی‌های فلزی	۱۳/۶۳۱

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، کانی‌های سولفیدی مس موجود در کانسنگ به طور عمده کالکوپیریتی است. با توجه به نتیجه‌های تجزیه شیمیایی مشخص شد که کانسنگ کم عیار مجتمع مس سرچشمه مخلوطی از کانی‌های اکسیدی و سولفیدی است. میزان پیریت کانسنگ در حدود ۱۳ درصد است که در فرایند استخراج باکتریایی می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود.

جدول ۲ توزیع مس در دامنه‌های ابعادی متفاوت

توزیع اکسید (%)	عیار اکسید (%)	توزیع مس (%)	عیار مس (%)	گستره ابعادی (mm)
۱۰/۷۹	۰/۲۳	۵/۷۲	۰/۲۶	+۵۰/۸۰
۷/۶۶	۰/۱۳	۷/۴۶	۰/۲۷	+۲۵/۴-۵۰/۸۰
۹/۱۸	۰/۱۰	۱۰/۳۲	۰/۲۴	+۱۲/۷-۲۵/۴
۱۹/۱۴	۰/۰۹	۲۸/۸۹	۰/۲۹	+۶/۷۳-۱۲/۷
۱۱/۴۶	۰/۱۰	۱۸/۲۶	۰/۳۴	+۲-۶/۷۳
۴۱/۷۷	۰/۲۶	۲۹/۳۶	۰/۳۹	-۲

مطالعات XRD بر روی نمونه معرف نشان داد که کانی‌های موجود در کانسنگ به ترتیب از بیشترین مقدار شامل کوارتز، ایلیت، انورتیت، کلریت، سانیدین، پیریت، مسکویت، کالکوپیریت، اسفالریت، آلپیت هستند که کانی‌های باطله در نمونه بیشتر کوارتز، ایلیت و کلریت است.

با توجه به ماهیت ترکیبی کانسنگ کم عیار مجتمع مس سرچشمه در عملیات بهره برداری از هیپ ۳ مجتمع مس سرچشمه تنها بخشی از مس که به طور عمده مربوط به بخش اکسیدی است، به دست می‌آید. به نظر می‌رسد که یکی از راه کارهای افزایش استخراج مس در این هیپ تبدیل آن به یک هیپ باکتریایی است. در این راستا هدف اصلی این پژوهش، تعیین گستره‌ی بهینه عامل‌های عملیاتی فرایند استخراج باکتریایی کانسنگ کم عیار به کار رفته در هیپ ۳ مجتمع مس سرچشمه با استفاده از باکتری‌های مزوفیل و گرمادوست معتدل است.

### بخش تجربی

#### تهیه و آماده سازی نمونه

برای انجام این پژوهش، حدود ۱۰۰ تن نمونه از کانسنگ دامپ ۵، ۱۵ و پله معدنی به طور تصادفی برداشته شد که پس از اختلاط کامل حدود ۳ تن از آن با سرندهای ASTM به شش بخش ابعادی تفکیک شد. حدود نیمی از نمونه با سنگ شکن فکی تا زیر ۰/۷ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) خرد و برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. نیمی دیگر از نمونه بسته‌بندی و ذخیره شد تا در صورت نیاز به تکرار آزمایش‌ها از آن‌ها استفاده شود.

#### تجزیه شیمیایی و کانی شناسی

یکی از هدف‌های انجام تجزیه شیمیایی و کانی شناسی، بررسی توزیع مس از هر یک از بخش‌های ابعادی گروه‌بندی شده و تجزیه شیمیایی بر روی آن است. تعیین کمترین مقدار نمونه برای تجزیه شیمیایی و کانی شناسی بر اساس درصد جرمی هر بخش به کمک فرمول جی [۲۴] انجام شد. بر اساس محاسبات انجام شده تجزیه کانی شناسی با مطالعه مقاطع صیقلی با میکروسکوپ الکترونیکی و تجزیه شیمیایی به وسیله‌ی جذب اتمی صورت گرفت. تجزیه شیمیایی نمونه‌های مورد نظر به منظور تعیین مس کل، مس اکسیدی و آهن کل به روش جذب اتمی و تجزیه کانی شناسی صورت گرفت. نتیجه‌های آزمایش‌های شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه ترکیبی به ترتیب در جدول ۱ ارایه شده

به منظور تعیین دقیق توزیع دانه بندی نمونه حداقل نمونه‌ی لازم براساس فرمول جی [۲۴]، برداشته شد و با استفاده از الک‌های سری ASTM دانه بندی آن تعیین شد.

#### باکتری‌های مورد استفاده:

باکتری‌های به کار رفته در این پژوهش از دو گروه متفاوت بودند [۲۵]:

باکتری‌های مزوفیل که شامل مخلوطی از گونه‌های/اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس، اسیدی تیوباسیلوس تیو اکسیدانس و لیتوسپیریلیم فرو اکسیدانس بودند.

باکتری‌های گرمادوست معتدل که شامل مخلوطی از گونه‌های سولفوآسیلوس و اسیدی تیوباسیلوس‌ها بودند.

همه این گونه‌ها از آب‌های اسیدی جاری معدن مس سرچشمه جداسازی و به ترتیب در دماهای  $32^{\circ}\text{C}$  و  $48^{\circ}\text{C}$  کشت داده شدند [۲۵].

محیط کشت مورد استفاده، محیط پایه 9K بود که pH آن با کمک سولفوریک اسید روی ۱٫۸ تنظیم شد.

میزان پیشرفت فرایند و رشد باکتری‌ها با اندازه‌گیری اسیدیته (pH) با دستگاه pH متر مدل MP120 شرکت Mettler Toledo سوئیس و اکسایش- کاهش (ORP) محیط نسبت به الکترود نقره/کلرید نقره با pH/Eh متر مدل 826pH mobile شرکت Metrohm سوئیس دنبال شد. افزایش قابلیت اکسایش- کاهش و اسیدیته، ملاک‌های رشد باکتری‌ها در محیط بودند.

#### آزمایش بطری غلتان

هدف از آزمایش‌های بطری غلتان انجام آزمایش قابلیت حلال‌شویی و میزان مصرف اسید به وسیله‌ی ماده معدنی به صورت سریع است [۲۵]. آزمایش‌های بطری غلتان در شیشه‌های اسیدی به حجم ۲٫۵ لیتر با دستگاه بطری غلتان که با سرعت ۶۰ دور در دقیقه می چرخید، انجام شد. این سری از آزمایش‌ها بر روی کانسنگ پودر شده زیر ۳۰۰ میکرون در pH های ۱٫۵، ۱٫۷ و ۲ انجام شد. برای انجام آزمایش ۱۰۶٫۳ گرم کانسنگ پودر شده را با ۸۵۰ گرم محلول حاوی سولفوریک اسید با pH های معادل

۲، ۱٫۷ و ۱٫۵ مخلوط شد و دوغاب با ۱۰ درصد جامد تهیه شد. پس از تهیه دوغاب، pH و قابلیت اکسایش و کاهش (ORP) آن بلافاصله اندازه‌گیری شد و pH دوغاب به کمک سولفوریک اسید دوباره روی ۱٫۵ تنظیم شد و بطری‌ها روی دستگاه غلتان قرار گرفتند. در زمان‌های متفاوت پس از شروع آزمایش، pH و ORP دوغاب اندازه‌گیری شده در صورتی که pH دوغاب بیشتر از مقادیر تنظیمی بود، با افزودن اسید دوباره روی مقادیر ۱٫۵، ۱٫۷ و ۲ تنظیم شد و این کار تا ثابت شدن pH ادامه داشت. در هر مرحله از تنظیم pH، مقدار اسید افزوده شده اندازه‌گیری و یادداشت شد تا در نهایت حداکثر مصرف اسید مشخص شود. پس از اتمام آزمایش محلول حاصل فیلتر شده به دست آمده صاف و جهت تعیین میزان مس، آهن و اسیدیته به آزمایشگاه ارسال شد.

#### انباشتگی<sup>(۱)</sup>

انباشتگی فرایندی است که در آن ذرات کوچک، نرمه، غبار و پودر توسط اتصال دهنده‌های گوناگون به هم متصل شده و ذرات با ابعاد بزرگتر را تشکیل می‌دهند. این فرایند به منظور ایجاد تخلخل بیشتر و ایجاد نفوذ پذیری مناسب در هیپ کاربرد دارد [۱۹، ۲۱]. در صنایع معدنی، انباشتگی سبب افزایش نفوذ اکسیژن و محلول پاششی به درون هیپ و یکنواختی توزیع دانه بندی ذرات و در نهایت افزایش استخراج فلز مورد نظر از کانسنگ خواهد شد.

جهت انجام فرایند انباشتگی از یک دستگاه دیسک دوار با شیب ۴۵ درجه و محلول سولفوریک اسید با غلظت‌های متفاوت ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ گرم در لیتر به عنوان اتصال دهنده استفاده شد.

#### آزمایش نفوذپذیری

مسأله ایجاد نفوذپذیری لازم ضمن عملیات حلال‌شویی از مهمترین مسایل در اجرای عملیات خردایش است که اگر بیش از حد لازم انجام شود مشکلات عدم نفوذ پذیری در سطح هیپ به وجود می‌آید. چنانچه بستر هیپ بیش از حد نفوذ پذیر باشد، زمان کافی

1. Agglomeration

در همه ستون‌ها به جز ستون E از فرایند تیمار با اسید استفاده شد. بر اساس درصد جرمی هر بخش ابعادی، ۱۴۶ کیلوگرم نمونه ترکیبی تهیه و تا زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر خرد شد و بعد از انباشته کردن، کانسنگ داخل ستون‌ها ریخته شد. از هر ستون یک نمونه جهت تعیین عیار مس، مس اکسیدی و آهن و کانی‌شناسی گرفته شد. جهت تسریع در آغاز فعالیت‌های باکتریایی داخل کانسنگ، در مرحله انباشته‌گی از محلول حاوی باکتری نیز استفاده شد. هوادهی ستون‌ها با هوای فشرده صورت گرفت و هوا با دبی ۰٫۵ از پایین ستون‌ها وارد شد. در مورد ستون‌هایی که استفاده از گاز کربن‌دی‌اکسید پیش بینی شده بود از کپسول کربن‌دی‌اکسید استفاده و هوای حاوی ۰٫۲ درصد کربن‌دی‌اکسید با هوای ورودی وارد ستون‌ها شد. تنظیم دمای داخل ستون‌ها به وسیله‌ی یک سامانه کنترلی صورت گرفت، به این نحو که دمای داخل ستون به طور پیوسته با حسگر تعبیه شده در آن اندازه‌گیری شد. پاشش عامل انحلال توسط پمپ پرستالتیک با دبی پاشش قابل تنظیم صورت گرفت. برای پاشش محلول للال‌شویی بر روی ستون‌ها از ترکیب دو سامانه مدار باز و مدار بسته استفاده شد. تا زمانی که غلظت مس در محلول خروجی قابل قبول باشد از سامانه مدار باز و زمانی که غلظت مس در محلول خروجی کم شود از مدار بسته استفاده می‌شود. عامل انحلال استفاده شده، محلول K ۹ بود که با ۱۰ درصد تلقیح باکتریایی به آن صورت گرفت.

آزمایش‌های استخراج باکتریایی با استفاده از روش طراحی آزمایشی تاگوچی با بررسی ۳ عامل در ۲ سطح صورت گرفت. با وجود ۳ عامل اصلی در دو سطح، آرایه L4 از طرح آزمایش تاگوچی [۲۶] انتخاب شد. آزمایش‌ها در طی ۹۰ روز انجام گرفت. عامل‌های ثابت آزمایش شامل دانه بندی کانسنگ و میزان اسید مصرفی برای فرایند انباشته‌گی و میزان تلقیح باکتریایی در ستون‌های استخراج باکتریایی، قطر و طول ستون‌ها، میزان دبی هوای اعمال شده در ستون‌های استخراج باکتریایی، کانی‌شناسی کانسنگ بود. جهت بررسی روند پیشرفت فرایند، در فواصل زمانی معین pH و ORP محلول خروجی از ستون اندازه‌گیری شده و نمونه‌ای جهت تعیین میزان مس و آهن موجود در آن گرفته شد.

برای تماس بین کانسنگ و محلول ایجاد شده و پدیده کانالیزه شدن روی خواهد داد و از طرف دیگر چنانچه هیپ نفوذ پذیری کمی داشته باشد، سطح هیپ در نتیجه تجمع سیال، خراب خواهد شد. به منظور اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری از دو ستون به ارتفاع ۱۳۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۱۱٫۸ سانتی‌متر استفاده شد. یکی از ستون‌ها با نمونه کانسنگ خرد شده تا زیر ۱۲٫۷ میلی‌متر و دیگری از کانسنگ انباشته شده پر شد. ستون‌های به کار رفته شفاف بوده و هر گونه پدیده کانالیزه شدن جریان، تشکیل حوضچه و نفوذناپذیری قابل رویت بود.

#### آزمایش‌های ستونی

ستون‌ها به عنوان مدلی از هیپ و دامپ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶]. به‌طور معمول از این آزمایش‌ها برای مطالعه تأثیر پیش آماده سازی کانسنگ با اسید، اندازه ذرات، دبی پاشش، دوره عملیات و بررسی نفوذپذیری سنگ معدن استفاده می‌شود [۱۶]. در این پژوهش، از ستون‌هایی به ارتفاع ۴۰۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۲۰ سانتی‌متر که از جنس PVC ساخته شده بودند، استفاده شد. جهت جلوگیری از اتلاف گرمای داخل ستون‌ها، کلیه ستون‌ها به کمک پشم شیشه و فوم ایزوله شده و به منظور بالا بردن دمای داخل ستون، از المنت‌هایی که بر روی بدنه ستون پیچیده شده بود استفاده شد. برای انجام آزمایش پنج ستون با شرایط متفاوت در نظر گرفته شد که شرایط کاری هر ستون در جدول ۳ نشان داده شده است.

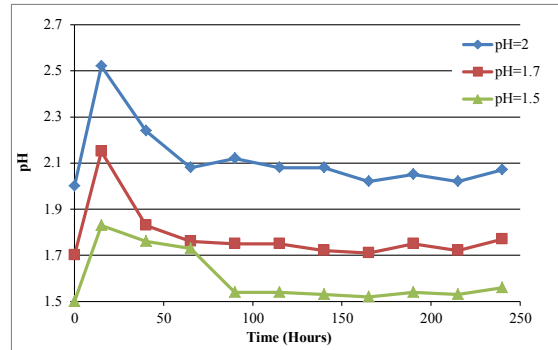
جدول ۳ شرایط آزمایش‌های ستونی

ستون	pH	دبی پاشش L/m <sup>2</sup> .h	دما (°C)
A	۲	۱۰	۵۰
B	۱٫۵	۵	۵۰
C	۱٫۵	۱۰	۲۵
D	۲	۵	۲۵
E	۲	۵	۲۵

## نتیجه‌ها و بحث

### آزمایش بطری غلتان

آزمایش بطری غلتان به مدت ۲۴۰ ساعت به طول انجامید. در شکل ۱ تغییرات pH برای نمونه پودر شده در pHهای تنظیمی ۱٫۵، ۱٫۷ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ تغییرات pH بر حسب زمان در آزمایش‌های بطری غلتان

با توجه به منحنی تغییرات pH، بیشترین تغییرات در ساعات اولیه بود که این امر می‌تواند به دلیل مصرف اسید با کانی‌های اکسیدی مس و گانگ باشد. به‌طور معمول مقدار اسید مصرف شده به صورت کیلوگرم اسید مصرفی به ازای یک تن کانسنگ ارایه می‌شود که بر این اساس حداکثر مصرف اسید برای کانسنگ پودر شده به ترتیب در pHهای ۲، ۱٫۷ و ۱٫۵ برابر با ۱۹٫۲۲ Kg/ton، ۳۰٫۰۹ Kg/ton و ۳۰٫۶۹ Kg/ton محاسبه شد.

### آزمایش‌های انباشتگی

پس از ساخت انباشته‌ها با غلظت‌های متفاوت سولفوریک اسید، ابتدا مقاومت فیزیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که انباشته‌های تولید شده با محلول سولفوریک اسید با غلظت‌های ۵۰، ۶۰ و ۸۰ گرم بر لیتر از لحاظ فیزیکی مقاومت رضایت بخشی ندارند، اما انباشته‌های تولید شده با محلول سولفوریک اسید با غلظت‌های ۱۰۰ و ۱۲۰ گرم بر لیتر مقاومت فیزیکی مناسبی داشتند به همین دلیل در ادامه مقاومت شیمیایی آن‌ها مورد ارزشیابی قرار گرفت. از این‌رو دو ستون یک متری از کانسنگ مذکور پر شد و با محلول سولفوریک اسید با pH برابر ۱٫۵ مورد

پاشش قرار گرفت. پس از یک هفته پاشش، میزان نشست کانسنگ اندازه‌گیری و ستون‌ها تخلیه شدند و وضعیت انباشته‌ها مورد بررسی قرار گرفتند، میزان نشست هر دو ستون ناچیز بود، ولی انباشته‌های تولید شده با محلول سولفوریک اسید ۱۲۰ گرم بر لیتر از لحاظ شیمیایی مقاومت مناسبی داشت. به همین دلیل به عنوان اتصال دهنده در فرایند انباشتگی انتخاب شد. میزان مصرف اسید برای انجام فرایند انباشتگی ۸٫۶۵ کیلوگرم بر تن محاسبه شد.

### آزمایش نفوذ پذیری

از دو ستون به منظور بررسی نفوذ پذیری کانسنگ خرد شده و انباشته شده استفاده شد. دبی محلول خروجی به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. آزمایش از دبی ۵ آغاز و پس از برابری جریان خروجی با ورودی، دبی افزایش یافت، به طوری که در نهایت در دبی ۲۲۶ محلول پاششی روی کانسنگ داخل ستون تجمع پیدا کرد و عدم نفوذپذیری رخ داد.

### حلال‌شویی ستونی

#### آزمایش‌های ستونی

شکل ۲ نمودار تغییرات pH محلول خروجی از ستون‌ها را نشان می‌دهد. pH محلول خروجی مربوط به فرایند حلال‌شویی در مقایسه با استخراج باکتریایی به دلیل تولید کم اسید در فرایند حلال‌شویی نسبت به تولید اسید در فرایند استخراج باکتریایی بالاتر است. با مقایسه تغییرات pH مربوط به ستون‌های استخراج باکتریایی می‌توان نقش باکتری را در افزایش تولید اسید نسبت به مصرف در pH برابر ۲ را مشاهده نمود. در صورتی که در pH برابر ۱٫۵ میزان تولید هیچ‌گاه به اندازه میزان مصرف نبود.

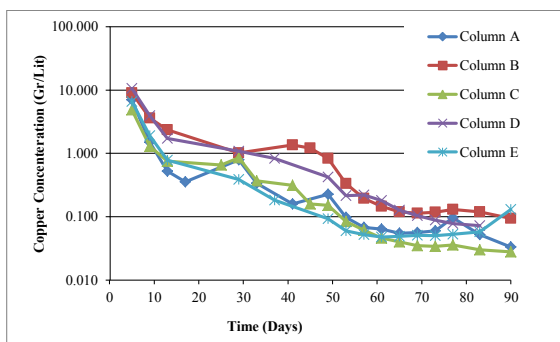
pH با گذشت زمان کاهش و پس از مدتی به تقریب ثابت شد. در مورد ستون‌های باکتریایی به علت فعالیت باکتری‌ها و تولید اسید با آن‌ها از روز هجدهم pH کاهش یافت. ولی pH ستون شاهد (ستون E) همچنان بالا بود. همان‌گونه که از شکل پیداست در ستون‌های A و B به ترتیب در مقایسه با ستون‌های C و D، افزایش دما، حلالیت کانسنگ و گانگ را بدنبال داشته و سبب



و توانایی اکسایش لایه‌ی سولفید کمتر می‌شود و در نتیجه قابلیت اکسایش، کاهش می‌یابد.

#### استخراج مس در ستون‌ها

غلظت مس بر حسب گرم در لیتر در محلول باردار (PLS) خروجی از زیر ستون‌ها در طی دوره ۹۰ روزه در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل، غلظت مس ابتدا بالا و بعد از چند روز به دلیل حلالیت مس اکسیدی در روزهای اولیه پاشش به آرامی کاهش یافت.

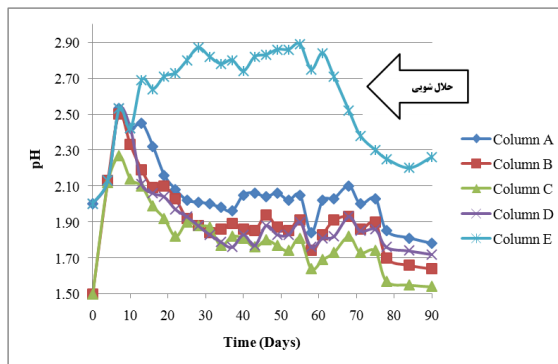


شکل ۴ تغییرات غلظت مس بر حسب گرم در لیتر در PLS خروجی از زیر ستون‌ها در طی دوره ۹۰ روزه

در شکل ۵ نمودار استخراج مس مربوط به ستون‌های حلال‌شویی و استخراج باکتریایی نشان داده شده است. مقدار بازیابی ستون‌های باکتریایی در مقایسه با ستون‌های شیمیایی تفاوت قابل توجهی دارد، به طوری که در ستون‌های باکتریایی با استفاده از باکتری‌های گرمادوست معتدل و دمای ۵۰ درجه حداکثر بازیابی ۸۱٫۸۷ درصد رسید. در صورتی که با استفاده از باکتری‌های مزوفیل و دمای محیط (۲۵ °C)، بیشینه بازیابی ۷۱٫۷۲ درصد است. بیشینه بازیابی در فرایند حلال‌شویی در این حالت ۴۶٫۷۹ درصد به دست آمد.

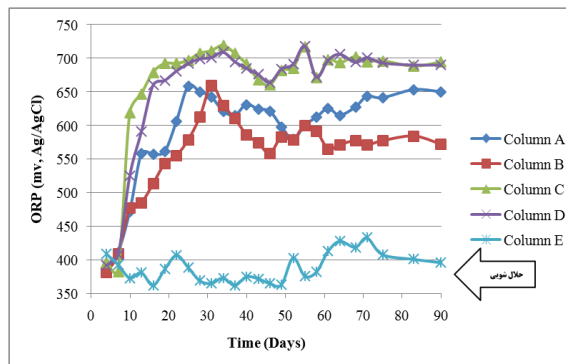
از آنجایی که باکتری‌های مزوفیل و گرمادوست جهت رشد و فعالیت به اکسیژن نیاز دارند و فرایندهایی همچون انباشتگی به ایجاد تخلخل و pH یکنواخت درون ستون کمک می‌کنند و با به کارگیری فرایندهای مذکور در عمل از کاهش روند بازیابی در ستون جلوگیری به عمل می‌آید.

افزایش pH محلول (مصرف بیشتر اسید) شده است.



شکل ۲ تغییرات pH محلول خروجی از ستون‌ها

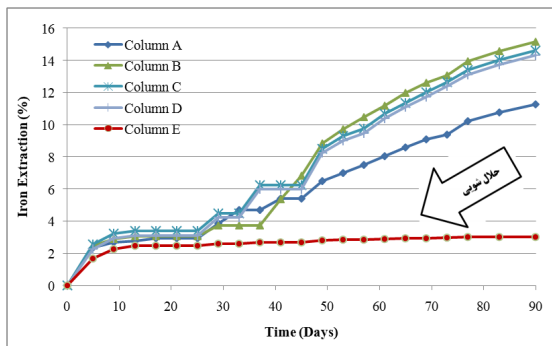
شکل ۳ نمودار تغییرات اکسایش-کاهش (ORP) در محلول خروجی از ستون‌ها را نشان می‌دهد. تغییرات ORP در ستون‌های حلال‌شویی در مقایسه با استخراج باکتریایی کمتر است، این در حالی است که ORP مربوط به استخراج باکتریایی روند افزایشی داشته که این امر می‌تواند به سبب اکسایش محیط و رشد و فعالیت مؤثر باکتری‌ها باشد.



شکل ۳- تغییرات پتانسیل اکسایش-کاهش محلول خروجی از ستون‌ها بر حسب زمان

همان‌گونه که از شکل فوق پیداست، ORP مربوط به باکتری‌های مزوفیل نسبت به گرمادوست بیشتر است. دلیل این امر را می‌توان کاهش حلالیت اکسیژن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و کمبود آن به قدر کافی در فضای سیتوپلاسمی سلولی دانست؛ در چنین حالتی یون فرو به طور متداوم به یون فریک تبدیل نشده

با توجه به شکل، غلظت آهن کل در همه ستون‌ها به‌غیر از ستون E با گذشت زمان افزایش یافته است. افزایش مرتب آهن در PLS خروجی از ستون‌ها به دلیل فعالیت باکتریایی است. شکل ۷، استخراج آهن مربوط به ستون‌های حلال‌شویی و استخراج باکتریایی را نشان می‌دهد. میزان آهن استخراج شده در ستون‌های باکتریایی در مقایسه با ستون‌های شیمیایی بیشتر است. موارد مذکور در استخراج مس نیز برای استخراج آهن صادق است.

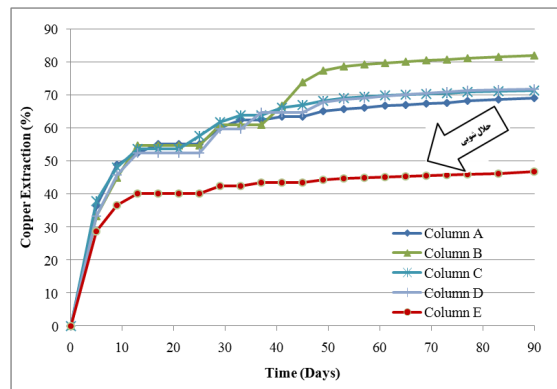


شکل ۷ مقدار آهن استخراج شده در ستون‌های حلال‌شویی و باکتریایی بر حسب زمان

نتیجه‌های کلی به دست آمده از آزمایش‌های ستونی پس از قرار گرفتن عوامل در طرح، ترتیب انجام آزمایش‌ها به صورت تصادفی انتخاب و انجام شد. در جدول ۴ نتیجه‌های کلی به دست آمده از آزمایش‌های انجام گرفته با ستون‌ها آورده شده است. با توجه به این که در آزمایش‌های انجام گرفته با بطری غلتان، مقدار قابل توجهی مس سولفیدی حل شده بود، استخراج مس سولفیدی در ستون‌ها نیز از روی جامد باقی مانده در ستون‌ها بعد از پایان عملیات استخراج محاسبه شد.

جدول ۴- نتیجه‌های کلی به دست آمده از آزمایش‌های ستونی

شماره ستون	غلظت متوسط مس (g/L)	غلظت متوسط آهن (g/L)	استخراج مس کل (%)	استخراج آهن کل (%)
A	۰.۶۷۵	۱.۴۷۶	۶۸.۹۴	۱۱.۲۵
B	۱.۳۰۳	۳.۵۶۳	۸۱.۸۷	۱۵.۱۵
C	۰.۵۴۵	۱.۶۸۶	۷۱.۲۶	۱۴.۶۰
D	۱.۳۱۵	۳.۳۰۵	۷۱.۷۲	۱۴.۳۳
E	۰.۷۰۱	۰.۶۳۷	۴۶.۷۹	۳.۰۳



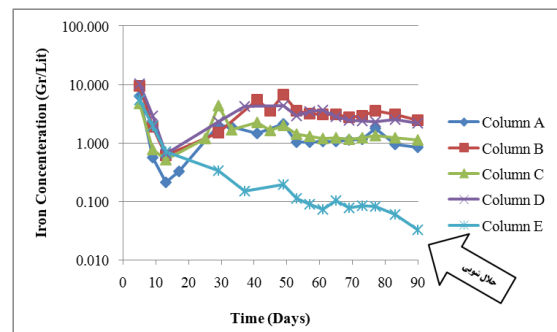
شکل ۵ مقدار مس استخراج شده در ستون‌های حلال‌شویی و استخراج باکتریایی بر حسب زمان

انحلال کانی‌های سولفیدی مس به‌ویژه کالکوپیریت با گذشت زمان در ستون‌های باکتریایی امکان‌پذیر است، این در حالیست که در مورد ستون شیمیایی انحلال کانی‌های سولفیدی به مرور زمان به میزان ۲ تا ۳ درصد بوده است.

نرخ تغییرات شدید در روزهای بیستم و چهارم به دلیل زمان استراحت و پاشش دوره‌ای بر روی ستون‌ها و ایجاد فرصت کافی برای انجام واکنش و فعالیت باکتری‌ها برای استخراج مس از کانسنگ بوده است.

#### بازیابی آهن در ستون‌ها

تغییرات غلظت آهن کل در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ تغییرات غلظت مس بر حسب گرم در لیتر در PLS خروجی از زیر ستون‌ها در طی دوره ۹۰ روزه

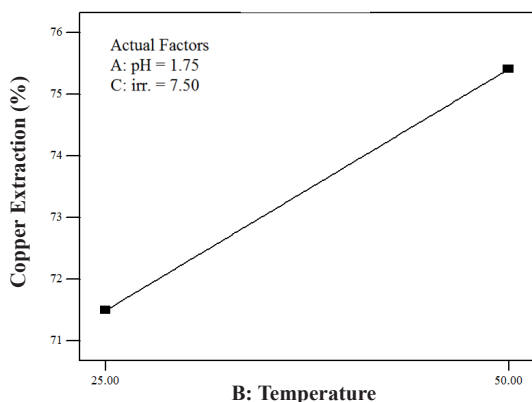


تأثیر pH در ستون ها

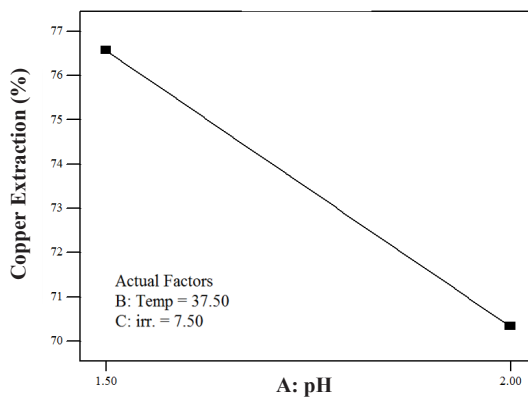
بعد از تعیین شرایط بهینه pH در مقیاس آزمایشگاهی که عددی بین ۱٫۴ تا ۱٫۶ به دست آمد [۱۶]، مقدار pH برابر با ۱٫۵ برای آزمایش‌های نیمه صنعتی انتخاب شد. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نشان دهنده تأثیر pH بر استخراج مس و آهن است. همان‌گونه که مشخص است، کاهش pH باعث افزایش استخراج مس و آهن شد. در واقع می‌توان احتمال داد با اسیدی‌تر شدن محیط، آبکافت یون فرو و فریک و در نتیجه شکل‌گیری کانی هماتیت و جاروسیت بر روی سطح کمتر رخ داده و استخراج مس از کانسنگ افزایش داشته است. با کاهش pH، میزان استخراج مس و آهن به ترتیب از ۷۰٫۳۳٪ و ۱۲٫۷۹٪ به ۷۶٫۵۷٪ و ۱۴٫۸۸٪ افزایش یافت.

تأثیر دما در ستون ها

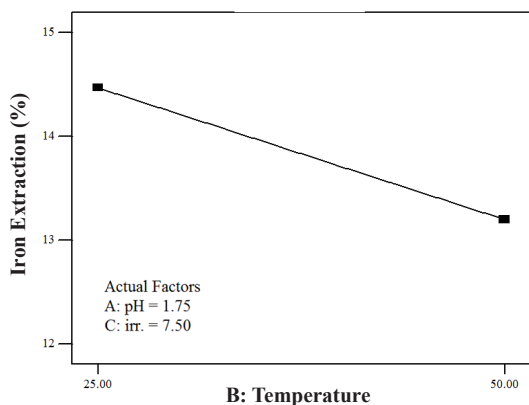
دما به‌عنوان یک عامل اساسی در فرایندهای استخراج باکتریایی به دو دلیل:  
 ۱- ایجاد گستره‌ای مناسب برای رشد و فعالیت باکتری‌ها  
 ۲- افزایش حلالیت و انحلال مس از کانسنگ مطرح است. در فرایندهای صنعتی هیپ استخراج باکتریایی، به موازات رشد و فعالیت باکتری‌ها در اثر حمله یون فریک به ساختار کانی پیریت به میزان ۱۵۰۰ کیلوژول انرژی در pH کمتر از ۴ آزاد می‌شود و در نتیجه توده هیپی گرم می‌شود. در این حالت باکتری‌های مزوفیل جای خود را به باکتری‌های گرمادوست داده و فرایند استخراج مس با بازیابی بیشتر آن ادامه می‌یابد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تأثیر دما به ترتیب بر استخراج مس و آهن نشان داده شده



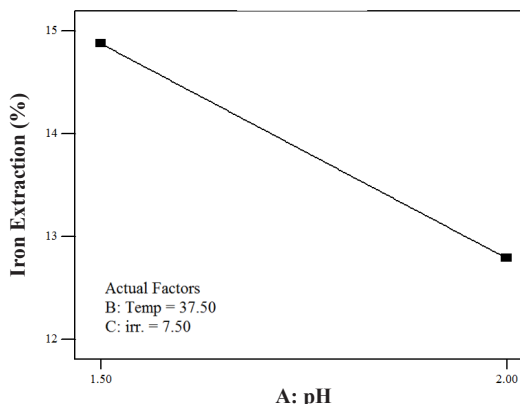
شکل ۱۰ تأثیر دما بر روی استخراج مس در آزمایش‌های ستونی



شکل ۸ تأثیر pH در آزمایش‌های ستونی بر استخراج مس



شکل ۱۱ تأثیر دما بر روی استخراج آهن در آزمایش‌های ستونی



شکل ۹ تأثیر pH در آزمایش‌های ستونی بر استخراج آهن

کاهش یافته است. از آنجایی که فرایند استخراج باکتریایی یک فرایند حد واسط است، لذا افزایش دبی پاشش سبب عدم فرصت لازم به محلول در دیفوزن و انجام واکنش (مرحله ۲ و ۳) می‌شود. با انجام آزمایش انباشتگی، سطوح آزاد کاهش پیدا می‌کند و با افزایش دبی پاشش و کاهش زمان ماند، یون فریک و باکتری‌ها زمان کافی برای انجام کامل واکنش را ندارند.

با افزایش دبی پاشش میزان استخراج مس و آهن به ترتیب از ۷۶٫۸۰٪ و ۱۴٫۷۴٪ به ۷۰٫۱۰٪ و ۱۲٫۳۹٪ کاهش یافته است. تفاوت ۶٫۷۰٪ در کاهش استخراج مس را می‌توان به دلیل کاهش ۱٫۱۹٪ استخراج آهن و تولید کمتر یون فریک نسبت داد.

### نتیجه‌گیری

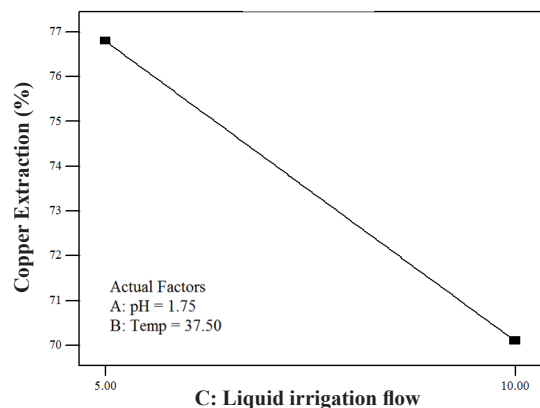
مجموعه‌ای از آزمایش‌های استخراج باکتریایی بر روی کانسنگ کم عیار اکسیدی و سولفیدی و با استفاده از باکتری‌های مزوفیل و گرمادوست معتدل انجام شد. در آزمایش‌های بطری غلظان مشخص شد که بیشترین مقدار مصرف اسید برای کانسنگ نرم شده به ترتیب در pHهای ۲، ۱٫۷ و ۱٫۵ برابر با ۱۹٫۲۲ Kg/ton، ۳۰٫۰۹ Kg/ton و ۳۰٫۶۹ Kg/ton است. در آزمایش نفوذ پذیری در دبی ۲۲۶٫۳۹ لیتر بر متر مربع بر ساعت محلول پاششی روی کانسنگ داخل ستون تجمع پیدا کرد و عدم نفوذپذیری رخ داد. در مورد کانسنگ انباشته شده هیچ گونه پدیده‌ای دال بر عدم نفوذپذیری مشاهده نشد. به منظور انباشتگی کانسنگ، بهترین اتصال دهنده، محلول سولفوریک اسید با غلظت ۱۲۰ گرم بر لیتر تعیین شد. بر اساس طراحی آزمایش به روش تاگوچی حالت بهینه pH، دما و دبی پاشش در سطوح در نظر گرفته شده در طرح در شرایط عملیاتی برای ستون‌های نیمه صنعتی برای بیشینه کردن استخراج مس و کمینه کردن استخراج آهن به دست آمد. کاهش pH میزان استخراج مس و آهن به ترتیب از ۷۰٫۳۳٪ و ۱۲٫۷۹٪ به ۷۶٫۵۷٪ و ۱۴٫۸۸٪ افزایش یافته است. همچنین افزایش دما میزان استخراج مس را از ۷۱٫۴۹٪ تا ۷۵٫۴۱٪ افزایش داده است. با افزایش دبی پاشش مقدار استخراج مس و آهن به ترتیب از ۷۶٫۸۰٪ و ۱۴٫۷۴٪ به ۷۰٫۱۰٪ و ۱۲٫۳۹٪ کاهش

است. افزایش دما میزان استخراج مس را از ۷۱٫۴۹٪ تا ۷۵٫۴۱٪ افزایش داده است.

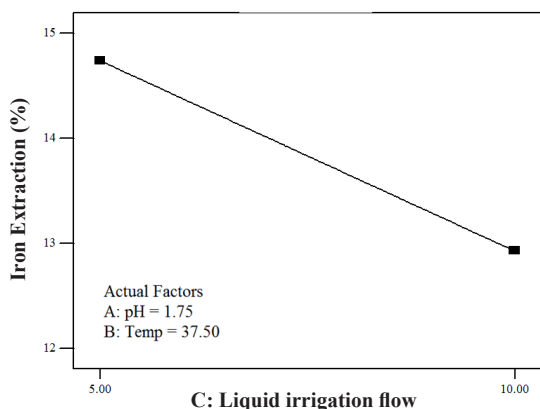
کاهش تبدیل یون فرو به طور مداوم به یون فریک و به تبع آن کاهش تعداد دفعات حمله یون فریک به پیریت را به همراه دارد که نتیجه آن کاهش استخراج آهن است.

### تأثیر دبی پاشش

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تأثیر دبی پاشش در ستون‌ها را بر استخراج مس و آهن از کانسنگ را نشان می‌دهند. همان‌گونه که از شکل ۱۳ پیداست، با افزایش دبی پاشش، آهن استخراجی و به تبع آن یون فریک در محلول کاسته شده و در نتیجه استخراج مس



شکل ۱۲ تأثیر دبی پاشش بر روی استخراج مس در آزمایش‌های ستونی



شکل ۱۳ تأثیر دبی پاشش بر روی استخراج آهن در آزمایش‌های ستونی

باکتری‌های گرمادوست و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با باکتری‌های مزوفیل استخراج مس در حدود ۱۰ درصد روند افزایشی دارد.

### سیاسگذاری

این پژوهش با همکاری شرکت ملی صنایع مس ایران و در مجتمع مس سرچشمه صورت گرفت.

یافته است. تفاوت ۶۷٪ در کاهش استخراج مس را می‌توان به دلیل کاهش ۱۹٪ استخراج آهن و تولید کمتر یون فریک نسبت داد. نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های ستونی نشان داد، در فرایند باکتریایی، با استفاده از باکتری‌های مزوفیل و دمای محیط در مقایسه با فرایند شیمیایی و دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) استخراج مس و آهن به ترتیب ۲۴/۳۹٪ و ۹/۳۰٪ افزایش داشت. در مورد ستون‌های باکتریایی، استفاده از

### مراجع

- [1] Brierley, J.A.; Hydrometa. 94, 2–7, 2008.
- [2] Dreisinger, D.B.; Muñoz, J.A., Cooper, W.C.; Young, S.K.; Hydrometa. 88, 19–34, 2007.
- [3] Dreisinger, D.B.; Muñoz, J.A.; Cooper, W.C.; Young, S.K.; Hydrometa. 88, 3–18, 2007.
- [4] Rohwerder, T.; Gehrke, T.; Kinzler, K.; Sand, W.; Appl. Microb. Biotechnol. 63, 239–248, 2003.
- [5] Clark, M.E.; Batty, J.D.; Vanbuuren, C.B.; Dew, D.W.; Eamon, M.A.; Hydrometa. 83, 1–4, 2006.
- [6] Brierley, J.A.; Brierley, C.L.; Hydrometa. 59, 233–239, 2001.
- [7] Watling, H.R.; Hydrometa. 84, 81–108, 2006.
- [8] Acevedo, F.; Jour. Biotechn. 5, 196-199, 2002.
- [9] Manafi, Z.; Kargarrazi, M.; Tolue, A. 6, 2009, 89-94.
- [10] Kargarrazi, M.; Manafi, Z.; Tolue, A. 2010.
- [11] Olson, G.J.; Brierley, J.A.; Brierley, C.L.; Appl. Microb. Biotechno. 63, 249-257, 2003.
- [12] Daoud, J.; Karamanev, D.; Miner. Eng. 19, 960–967, 2006.
- [13] Vaghar, R.; Oliazadeh, M.; 2000.
- [14] Bakhtiari, F.; 2007.
- [15] Ranjbar, M.; Schaffie, M.; Pazouki, M.; Ghazi, R.; Akbary, A.; Zanddevakili, S.; Seidbagheri, S.A.; Manafi, Z.; Adva. Mate. Res. 1, 38-41, 2007.
- [16] Yaghobi-Moghaddam, M.; Ranjbar, M.; Schaffie, M.; Manafi, Z.; 2010.
- [17] Zandevaki, S.; Ranjbar, M.; Schaffie, M., Seyedbagheri, S.A.; Manafi, Z.; 2004.
- [18] Lotfalian, M.; Ranjbar, M.; Schaffie, M.; Manafi, Z.; 2008.
- [19] Lotfalian, M.; Ranjbar, M.; Schaffie, M.; Darezereshki, E.; Seyedbagheri, S.A.; Manafi, Z.; Jour. Sepa. Sci. Eng. 1, 57-65, 2009.
- [20] Darehzereshki, E.; Ranjbar, M.; Schaffie, M.; Seyedbagheri, S.A.; 2008.
- [21] Darezereshki, E.; Schaffie, M.; Manafi, Z.; Lotfalian, M.; Jour. Sep. Sci. Eng. 1, 15-31, 2009.
- [22] Yaghobi-Moghaddam, M.; Ranjbar, M.; Schaffie, M.; Darezereshki, E.; Manafi, Z.; p. 1-6, 2009.
- [23] Yaghobi-Moghaddam, M.; Ranjbar, M.; Schaffie, M.; Manafi, Z.; Darezereshki, E.; 200-204, 2009.
- [24] Wills, B.A.; Napier-Munn, T.; 2006.
- [25] Manafi, Z.; 2002.
- [26] Roy, R.K.; 1995.

## Optimization of operational parameters for bioleaching of low-grade ore at sarcheshmeh copper complex using mesophile and thermophile bacteria in comparison to chemical leaching

M. Yaghobi-Moghaddam<sup>1,\*</sup>, Z. Manafi<sup>2</sup>, M. Ranjbar<sup>3</sup> and M. Schaffie<sup>4</sup>

1. Ph.D. student in Mining Engineering, University college of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. M.Sc., Hydrometallurgy Research Unit, R & D Center, Sarcheshmeh Copper Complex, Rafsanjan, Iran
3. Prof. of Mining Engineering, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran
4. Assistant Prof. of chemical Engineering, Department of chemical Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

Received: October 2011, Revised: January 2012, Accepted: May 2012

**Abstract:** In this Research, Comparison of leaching and bioleaching processes for extracting copper from low-grade ore at Sarcheshmeh Copper Mine Complex has been investigated. Investigations were applied to find the effects of parameters such as pH, temperature, as well as liquid irrigation flow in semi-industrial scale in column reactor for 90 days. Results obtained from column tests showed that bacterial leaching processes using mesophilic bacterial in comparison with chemical leaching at ambient temperature increase the amount of copper and iron extraction by 24.93% and 9.30%, respectively. Also, using moderate thermophilic bacteria at 50 °C, pH=1.5 and rate of irrigation= 5 liter per meter square per hour increased copper extraction about 36% in comparison with chemical leaching. However, the maximum copper extraction was 81.87%.

**Keywords:** Bioleaching, Mesophilic and thermophilic bacteria, Low-grade ore, Column reactor, Taguchi experimental design