

بررسی پارامترهای موثر در فروشویی توده ای کانسنگ اکسیدی مس سونگون

منوچهر اولیازاده

دانشیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

والح آقازاده

مربی دانشکده مهندسی معدن - دانشگاه صنعتی سهند تبریز

محمد نوع پرست

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

معصومه ترابی

کارشناس هیدرومتالورژی - امور تحقیقات و مطالعات - مجتمع مس سرچشمه

(تاریخ دریافت ۸۱/۱۱/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۲/۱۹، تاریخ تصویب ۸۳/۷/۱۱)

چکیده

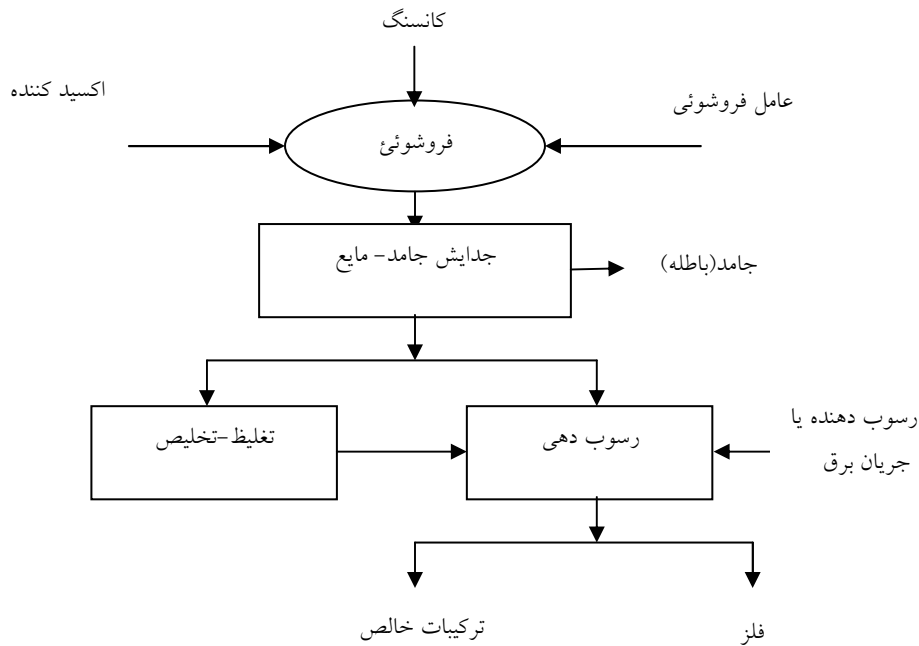
کانسار پرفیری مس سونگون شامل ذخایر سولفیدی و اکسیدی، حدود ۱۸/۵ میلیون تن مس اکسیدی با عیار متوسط ۰/۴ درصد مس دارد. واحد استحصال مس از منابع سولفیدی بروش فلوتاسیون و ذوب در این معدن در دست احداث است، ولی تاکنون فعالیتی درباره استحصال مس از منابع اکسیدی سونگون انجام نگرفته است. روش معمول استحصال مس از منابع اکسیدی کم عیار، فروشویی به روش توده ای، استخراج با حلال و الکترووینینگ می باشد. بنابراین در تحقیق حاضر آزمایش های بطری غلطان و ستونی جهت بررسی پارامترهای موثر در فروشویی توده ای کانسنگ اکسیدی مس سونگون انجام گرفت. قابلیت فروشویی، سینتیک فروشویی، تخمین میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی، بازیابی مس، آهن و ظرفیت نگهداری محلول توسط ماده معدنی و آزمایش نفوذپذیری جهت تعیین بیشترین دبی پاشش تا رسیدن جریان به حالت طغیان در داخل ستون ها بررسی شده است. نتایج نشان داد که در بهترین شرایط ۹۵/۲ درصد مس کانسنگ اکسیدی سونگون در بطری های غلطان و ۸۱ درصد در ستون ها قابل استخراج است.

واژه های کلیدی: مس پرفیری سونگون، فروشویی توده ای، اسید سولفوریک، بطری غلطان، ستون

مقدمه

استخراج مس بروش پیرومتالورژی، تولید مس بروش هیدرومتالورژی در سال های اخیر افزایش چشمگیری داشته است، بطوری که در حال حاضر حدود ۳۰ درصد مس در آمریکا [۲] و ۲۰ درصد مس در جهان به روش هیدرومتالورژی تولید می شود [۷]. فرآیند هیدرومتالورژی برای تولید فلزات از کانسنگ های آنها در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱) مهمترین مرحله در تولید مس به روش هیدرومتالورژی عملیات فروشویی سنگ معدن می باشد. فروشویی کانسنگ های مس با در تماس قرار دادن ماده معدنی با یک عامل انحلال (بستگی به نوع ماده معدنی و گانگ) به همراه

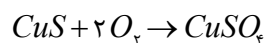
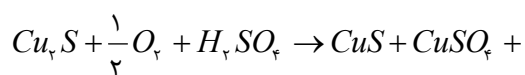
کانسار مس پرفیری سونگون در استان آذربایجان شرقی و در شمال غربی شهرستان اهر واقع شده است. این معدن با داشتن ۱/۷ میلیارد تن ذخیره کل و ۱۸ میلیون تن مس اکسیدی با عیار متوسط ۰/۴ درصد یکی از بزرگترین ذخایر مس پرفیری جهان می باشد [۴]. فلز مس عموماً از کانسنگ های سولفیدی پرعیار مس به روش پیرومتالورژی استخراج می شود. استخراج مس به روش هیدرومتالورژی برخلاف پیرومتالورژی یک روش جدید در تولید مس می باشد. به خاطر کاهش ذخایر پرعیار مس، آلودگی محیط زیست در اثر انتشار گاز SO₂ و در نهایت بالا بودن هزینه انرژی مصرفی در



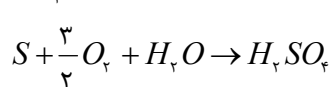
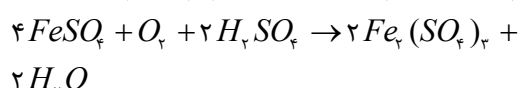
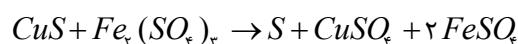
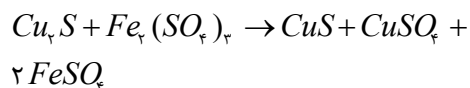
شکل ۱: فرآیند هیدرومتالورژی برای تولید فلزات [۳].

لیچینگ کانی های سولفیدی مس توسط دیفوزیون و سرعت واکنش کنترل می شود [۲]. کانی های سولفیدی ثانویه طبق واکنش های زیر در حضور یک اکسید کننده مانند یون فریک Fe^{3+} (واکنش غیر مستقیم) و یا هوا O_2 (واکنش مستقیم) حل می شوند.

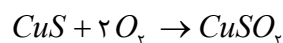
کالکوسیت- واکنش مستقیم



کالکوسیت- واکنش غیر مستقیم

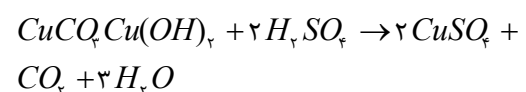


کوولیت- واکنش مستقیم

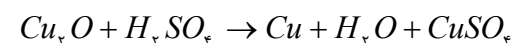


اکسید کننده (در صورت نیاز) صورت می گیرد. کانی های اکسیدی مس بجز تنوریت، کوپریت و کانی سیلیکاتی کریزوکولا، به سرعت در دمای محیط با اسید واکنش می دهند [۹]. سرعت لیچینگ در کانی های اکسیدی مس به وسیله نفوذ یون H^+ به داخل سنگ کنترل می شود [۵]. واکنش بعضی از کانی های اکسیدی و سیلیکاتی مس با اسید سولفوریک بصورت زیر می باشد.

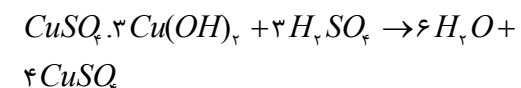
مالاکیت



کوپریت

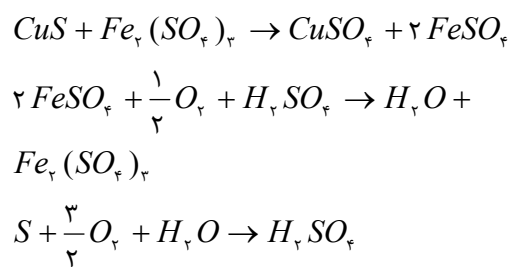


بروکانتیت



کانی های سولفیدی ثانویه مس یعنی کالکوسیت و کوولیت نیز به آسانی با اسید سولفوریک در حضور یک اکسید کننده حل می شوند. کانی های سولفیدی اولیه هم کم و بیش در حضور یک اکسید کننده حل می شوند. سرعت

کوولیت- واکنش غیر مستقیم

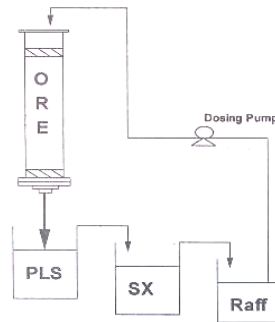


روش استحصال مس از منابع اکسیدی کم عیار مس مانند ذخیره اکسیدی مس سونگون، فروشویی توده ای، استخراج با حلال و الکترووینینگ می باشد. در روش فروشویی توده ای ماده معدنی استخراج شده خرد می شود و پس از نرمة گیری یا آگلومراسیون با دقت زیاد روی یک بستر ضد اسید و نفوذناپذیر قرار می گیرد تا از ایجاد کانال جریان در بعضی از نقاط توده جلوگیری شود. محلول اسیدی از حوضچه رافینت (محلول آبی بی بار) پمپ شده و به سطح توده پاشیده می شود. محلول باردار جمع آوری شده از زیر توده به حوضچه محلول آبی باردار (PLS) هدایت و از آنجا برای استحصال مس به واحد استخراج با حلال پمپ می شود. بعد از استحصال مس از محلول باردار مس در واحد استخراج با حلال، محلول بی بار بدست آمده به حوضچه رافینت برگشت داده می شود. بررسی قابلیت تولید مس به روش هیدرومتالورژی از ذخیره اکسیدی مس سونگون با توجه به سرمایه گذاری های عظیم برای استحصال مس از ذخیره سولفیدی مس سونگون به روش فلوتاسیون و ذوب ضروری می باشد. برای این منظور مطالعات آزمایشگاهی جهت استحصال مس از ذخیره اکسیدی بروش فروشویی توده ای انجام شده است.

روش تحقیق و مواد

حدود ۴۰۰ کیلوگرم نمونه از دپوی اکسیدی معدن مس سونگون بطور تصادفی برداشته شد. بعد از عملیات خردایش و آماده سازی نمونه هایی جهت آنالیز شیمیایی و کانی شناسی گرفته شد. آزمایش های لازم جهت بررسی پارامترهای موثر برای فروشویی توده ای، تست های همزنی و ستونی

می باشد. برای بررسی قابلیت لیچینگ، سینتیک لیچینگ، تخمین میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی و بازیابی مس و آهن تست هایی در مقیاس کوچک با بطری های غلطان بر روی ماده معدنی انجام گرفت. برای انجام کلیه تست ها از اسید سولفوریک صنعتی استفاده شد که در این مقاله بطور اختصار کلمه اسید بکار برده شده است. در کل هدف از تست های بطری غلطان بررسی قابلیت لیچینگ و محاسبه بازیابی ها و تخمین میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی بصورت سریع می باشد و مقدمه ای برای انجام تست های بزرگ مقیاس مانند تست های ستونی می باشد [۶]. آزمایش های بطری غلطان در شیشه های اسیدی با حجم ۲/۵ لیتر توسط دستگاه دوار با سرعت ۶۰ دور در دقیقه انجام گرفت. پارامترهای در نظر گرفته شده جهت بررسی بازیابی مس، آهن و اسید مصرفی توسط ماده معدنی، زمان، غلظت اسید، درصد جامد داخل بطری غلطان و ابعاد ذرات انتخاب شد. بعد از انجام تست های بطری غلطان، تست های ستونی بر روی ماده معدنی انجام گرفت. وزن نمونه مورد نیاز برای انجام تست های ستونی بستگی به اندازه ستون و تعداد تست های مورد نیاز دارد. حداکثر اندازه ذرات برای انجام تست های ستونی تحت تاثیر پارامترهایی از جمله وزن مواد داخل ستون و زمان مورد نیاز برای انجام تست های ستونی قرار دارد [۱]. روابطی بین ابعاد ستون و همچنین بین ابعاد ذرات و قطر ستون وجود دارد که در هنگام تست باید این روابط در نظر گرفته شوند. نسبت طول ستون به قطر آن معمولا ۱۰ و نسبت قطر ستون به بزرگترین ابعاد ذرات ریخته شده به داخل آن ۵ یا بیشتر می باشد. این نسبت ها برای کاهش جریان مدار کوتاه در داخل ستون و اثر دیواره ها در انجام تست های ستونی ضروری می باشد [۱،۶]. تست های ستونی معمولا برای تطبیق بیشتر نتایج با حالت صنعتی عملیات فروشویی و همچنین بررسی اثر ناخالصی ها بصورت مدار بسته با استخراج با حلال انجام می شود [۸]. در شکل (۲) نمایی از تست ستونی مدار بسته نشان داده شده است.



شکل ۲: نمایی از تست ستونی مدار بسته در آزمایشگاه [۸].

جدول ۱: شرایط کاری ستون ها.

نوع مدار	مقدار ماده در داخل ستون (kg)	زمان لیچینگ (روز)	غلظت اسید (g/l)	اندازه ذرات (mm)	دبی پاشش (cc/min)	ستون
بسته	۱۳/۶	۲۵	۱۵	-۲۵/۴	۱/۲	A1
بسته	۱۳/۶	۲۵	۲۰	-۲۵/۴	۱/۲	A2
بسته	۱۳/۲	۲۶	۱۵	۱۲/۷	۱/۲	A3
بسته	۱۲/۶	۱۹	۴۰	-۲۵/۴	۱/۲	A4
باز	۱۲/۷	۳۵	۱۵	-۲۵/۴	۱/۲	A5
بسته	۱۲	۱۴	۱۰۰	-۱۲/۷	۱/۲	A6

آورده شده است. آنالیز شیمیایی نم‌تونه بوسیله دستگاه‌های جذب اتمی و XRF صورت گرفت.

در شکل (۳) نتایج مطالعات میکروسکوپی کانی شناسی نمونه نشان داده شده است. نتایج آنالیز کانی شناسی نمونه نشان داد که کانی‌های سولفیدی مس کالکوپیریت، کالکوسیت و کوولیت می‌باشد ولی بخاطر پایین بودن مقدار کانی‌های کالکوپیریت و کوولیت مقدار آنها در شکل (۳) آورده نشده است. کانی‌های اکسیدی مس مالاکیت، آزوریت، کوپریت، تنوریت و به مقدار کم مس آزاد و سیلیکات‌های مس می‌باشد. همچنین نتایج XRD نشان داد که فازهای مهم در نمونه آلبیت ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)، کوارتز (SiO_2) و کلریت ($(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{10}$) می‌باشد.

نتایج تست های بطری غلطان

اثر زمان، غلظت اسید، درصد جامد و ابعاد ذرات بر روی بازیابی مس کل، آهن و میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی در تست های بطری غلطان بررسی شده است. عدد بدست آمده در

برای انجام تست های ستونی ماده معدنی با وزن مشخص به داخل ستون هایی از جنس پی.وی.سی شفاف بطول ۱ متر و قطر ۱۱ سانتی متر با دقت زیاد ریخته شد. برای پاشش عامل انحلال به ستون ها از پمپ پریستالتیک که دبی پاشش آن قابل تنظیم می باشد استفاده شد. برای اینکه عامل انحلال در بالا و پایین ستون به خوبی توزیع و محلول زلال بدست آید به بالا و پایین ستون لایه ای از پشم شیشه

گذاشته شد. در کل ۶ تست ستونی با شرایط مختلف که در جدول (۱) آورده شده است، انجام گرفت. تست ستونی A6 با غلظت اسید اولیه بالا (۱۰۰ گرم بر لیتر) شروع و با کنترل pH در PLS در حدود ۲ ادامه داده شد، و بستگی به تغییرات ایجاد شده در pH خروجی از زیر ستون ها تغییراتی در غلظت اسید بالای ستون داده شد.

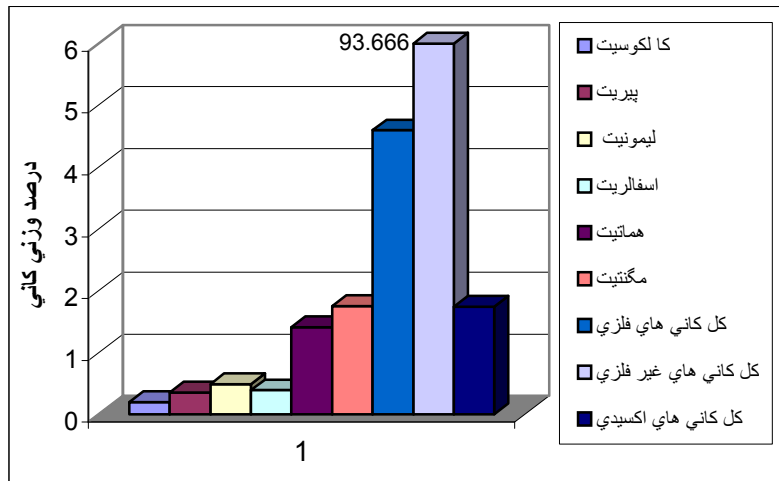
نتایج و بحث

نتایج تجزیه شیمیایی و کانی شناسی نمونه

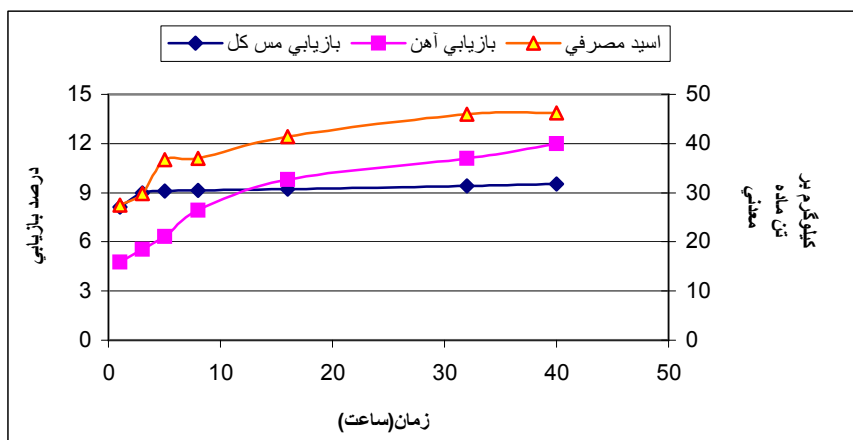
در جدول (۲) نتایج آنالیز شیمیایی نمونه

جدول ۲: آنالیز شیمیایی نمونه.

درصد	عنصر	درصد	عنصر
۰/۰۰۵	MO	۱/۱۶	Cu _T
۶۲/۹۷	SiO ₂	۱	Cu _{ox}
۱۷/۴۳	Al ₂ O ₃	۲/۸	Fe
۰/۰۰۴	Mn	۱/۱	Fe ₃ O ₄
<۱	S	۲/۴	K
<۱۰۰ppm	As	۲/۸	Na
۱-۲ppm	Ag	۱	Mg
		۱/۲	Ca



شکل ۳: نتایج آنالیز کانی شناسی نمونه.



شکل ۴: بازیابی مس کل، آهن و میزان اسید مصرفی نسبت به زمان (غلظت اسید: ۲۵g/l، درصد جامد: ۲۵، ابعاد ذرات: ۱۵۰ میکرون).

نشان می دهد که با افزایش زمان ابتدا میزان افزایش عوامل فوق سریع و اما با افزایش بیشتر زمان روند افزایش این عوامل به افزایش یافته است.

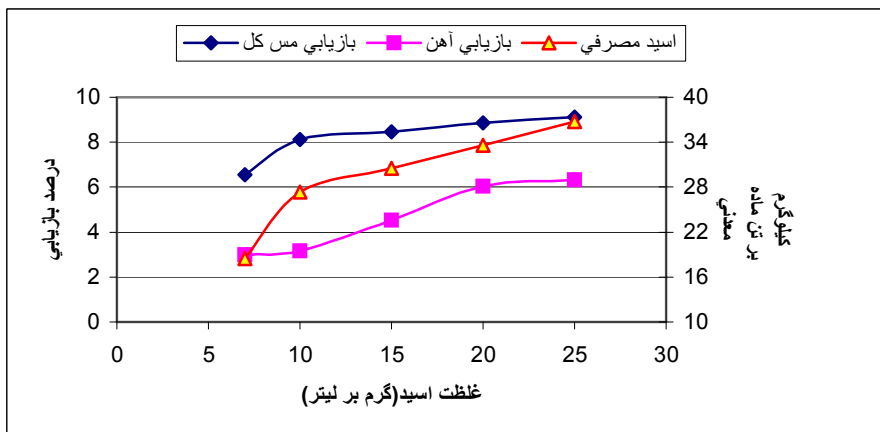
بررسی غلظت اسید

بازیابی مس کل، آهن و میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی در برابر غلظت اسید مصرفی در شکل (۵) آورده شده است. با افزایش غلظت اسید مصرفی هر سه پارامتر فوق افزایش یافته است.

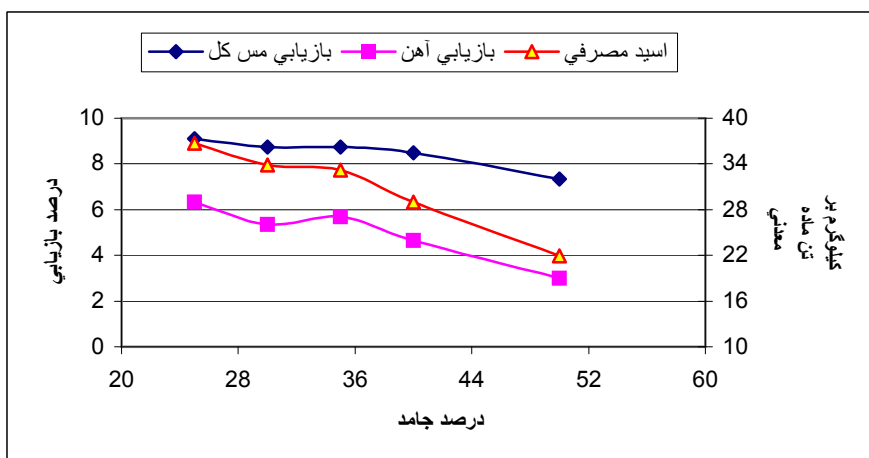
آزمایشگاه برای بازیابی مس کل به ۱۰ تقسیم شده است و عدد حاصل در شکل های (۴، ۵، ۶ و ۷) بکار برده شده است.

بررسی اثر زمان

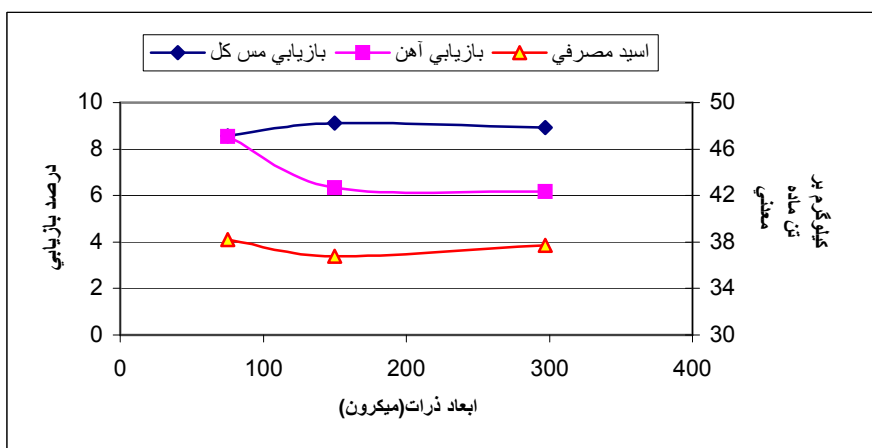
بازیابی مس کل و آهن نسبت به زمان (سینتیک واکنش) و همچنین میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی نسبت به زمان در شکل (۴) آورده شده است. نتایج مندرج در شکل



شکل ۵: بازیابی مس کل، آهن و میزان اسید مصرفی در برابر غلظت اسید (زمان: ۵ ساعت، درصد جامد: ۲۵، ابعاد ذرات: ۱۵۰ میکرون).



شکل ۶: بازیابی مس کل، آهن و میزان اسید مصرفی نسبت به درصد جامد (زمان: ۵ ساعت، غلظت اسید: ۲۵g/l، ابعاد ذرات: ۱۵۰ میکرون).



شکل ۷: بازیابی مس کل، آهن و میزان اسید مصرفی نسبت به ابعاد ذرات (زمان: ۵ ساعت، غلظت اسید: ۲۵g/l، درصد جامد: ۲۵).

بررسی درصد جامد

آورده شده است. با افزایش درصد جامد هر سه پارامتر فوق بعلت کاهش سطح در تماس ماده معدنی با عامل انحلال کاهش یافته است.

بازیابی مس کل، آهن و میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی نسبت به درصد جامد در شکل (۶)

بررسی ابعاد ذرات

بازیابی مس کل، آهن و میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی نسبت به ابعاد ذرات در شکل (۷) آورده شده است. با توجه به شکل در محدوده ابعادی کار شده تفاوت قابل ملاحظه ای در بازیابی مس کل، آهن و اسید مصرفی مشاهده نشد.

نتایج حاصل از تست های ستونی

تست های ستونی معیار و پارامترهای اصلی فروشویی توده ای را مشخص می کند. از جمله مهمترین این پارامترها ابعاد سنگ معدن با توجه به بازیابی مس، دبی پاشش عامل انحلال، دوره عملیات لیچینگ، میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی، میزان محلول نگه داشته شده توسط ماده معدنی جهت اشباع آن و بررسی نفوذپذیری سنگ معدن

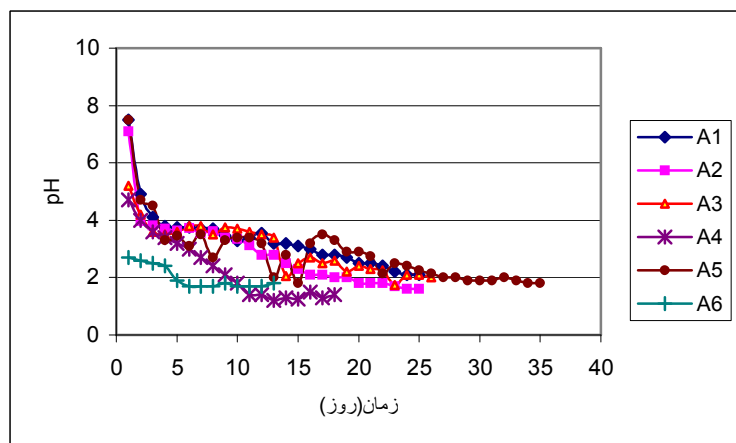
می باشد. نتایج حاصل از تست های ستونی در صفحات بعد آورده شده است.

تغییرات pH روزانه در PLS خروجی از زیر ستون ها

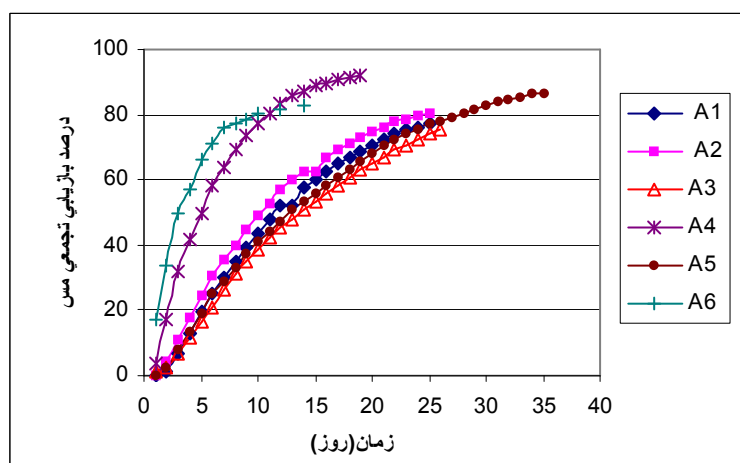
در شکل (۸) تغییرات pH در PLS خروجی از زیر ستون ها نشان داده شده است. بعلت مصرف بالای اسید توسط ماده معدنی در روزهای اول، pH بالا و با افزایش زمان لیچینگ بتدریج کاهش و به مقدار ثابتی رسیده است.

بازیابی تجمعی مس کل در ستون ها

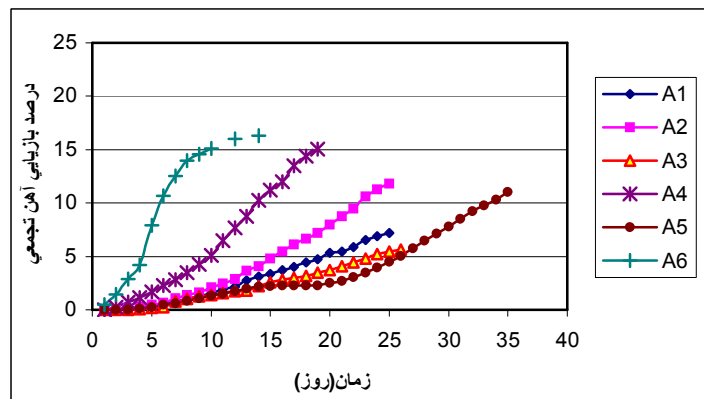
در شکل (۹) بازیابی تجمعی مس کل در ستون ها آورده شده است. بازیابی تجمعی مس کل در ستون های A4 و A6 که با اسید بالا کار کرده اند در مدت زمان مشابه نسبت به سایر ستون ها بیشتر می باشد.



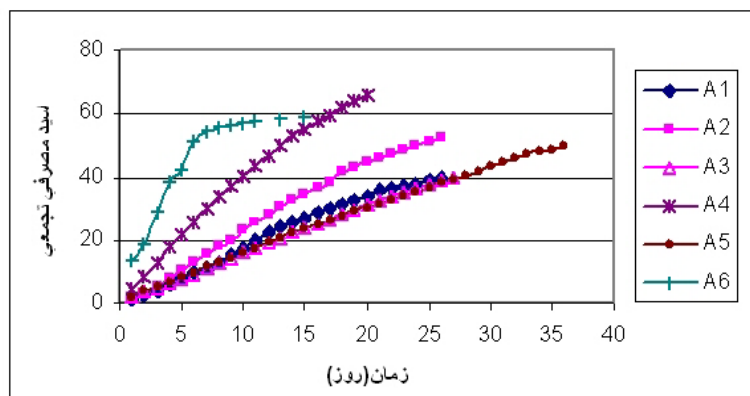
شکل ۸: تغییرات pH روزانه در PLS خروجی از زیر ستون ها.



شکل ۹: بازیابی تجمعی مس کل در ستون ها.



شکل ۱۰: باز یابی تجمعی آهن در ستون ها.



شکل (۱۱): مصرف تجمعی اسید توسط ماده معدنی در ستون ها (کیلوگرم بر تن ماده معدنی)

ترتیب در دبی پاشش ۱۰۰ و ۲۵۰ میلی لیتر بر دقیقه اتفاق می افتد.

میزان محلول نگه داشته شده و همچنین میزان محلول جهت اشباع ماده معدنی در ستون ها

درصد وزنی محلول جهت اشباع ماده معدنی (نسبت به ماده معدنی در ستون ها) درستون هایی که با ابعاد ذرات کوچکتر از ۱۲/۷ و ۲۵/۴ میلیمتر کار کرده اند به ترتیب بطور متوسط ۱۱/۲۸ و ۱۰/۷۱ می باشد. همچنین درصد وزنی محلول نگه داشته شده (نسبت به ماده معدنی در ستون ها) در ستون هایی که با ابعاد ذرات کوچکتر از ۱۲/۷ و ۲۵/۴ میلیمتر کار کرده اند به ترتیب بطور متوسط ۹/۴۴ و ۸/۳۶ می باشد.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از تست های بطری غلطان نشان داد

باز یابی تجمعی آهن در ستون ها

در شکل (۱۰) باز یابی تجمعی آهن در ستون ها نشان داده شده است. با توجه به شکل ستون A6 که بصورت مدار باز کار کرده در مدت زمان مشابه از باز یابی کمتری نسبت به سایر ستون ها برخوردار است.

میزان اسید مصرفی توسط ماده معدنی در ستون ها

اسید مصرفی تجمعی در ستون ها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل هر چه غلظت اسید مصرفی در ستون ها بیشتر باشد، مصرف اسید توسط ماده معدنی نیز افزایش می یابد.

نتایج حاصل از تست های نفوذ پذیری

نتایج حاصل از تست های نفوذ پذیری بر روی ستون های A5 و A6 که برای تعیین بیشترین دبی پاشش تا رسیدن به حالت طغیانی جریان که علائم آن تشکیل حوضچه در بالای ستون می باشد، نشان داد که طغیان جریان در ستون های A5 و A6 به

ستونی در آزمایشگاه با در نظر گرفتن پارامترهای فوق ۲۵ روز می باشد. با در نظر گرفتن پارامترهای فوق و انجام تست های ستونی در آزمایشگاه با مصرف اسید ۳۹/۸۷ کیلوگرم بر تن ماده معدنی به ۸۱ درصد بازیابی مس کل و ۷/۸۳ درصد بازیابی آهن دست یافته شد. نتایج تست های نفوذپذیری نیز نشان داد که خاک اکسیدی مس سونگون در ابعاد کوچکتر از ۲۵/۴ میلیمتر از نفوذپذیری بالایی برخوردار است.

تقدیر تشکر

نویسندگان از پرسنل امور تحقیقات و مطالعات مجتمع مس سرچشمه، بویژه پرسنل محترم واحد تحقیقات هیدرومتالورژی و کارخانه آزمایشی هیدرومتالورژی کمال تشکر را دارند.

که بیشترین بازیابی برای مس کل (۹۵/۲ درصد)، آهن (۱۲ درصد) و همچنین بیشترین اسید مصرفی توسط خاک اکسیدی مس سونگون (۴۶/۲ کیلوگرم بر تن ماده معدنی) در ۴۰ ساعت فروشویی با غلظت اسید ۲۵ گرم بر لیتر، ۲۵ درصد جامد و ابعاد ذرات ۱۵۰ میکرون اتفاق افتاد. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از تست های ستونی مانند میزان بازیابی مس، اسید مصرفی توسط ماده معدنی و همچنین انحلال ناخالصی ها از جمله آهن که در واحد استخراج با حلال و الکترووینینگ مزاحمت هایی ایجاد می کنند، پارامترهای بهینه جهت فروشویی توده های انتخاب می شود. با مقایسه نتایج حاصل از تست های ستونی ابعاد ذرات کوچکتر از ۲۵/۴ میلیمتر، غلظت اسید ۱۵ گرم بر لیتر و دبی پاشش ۷/۲ لیتر بر ساعت بر متر مربع (حدود ۱/۲ cc/min برای ستون با قطر ۱۱ سانتی متر) پارامترهای بهینه انتخاب شدند. همچنین زمان بهینه لیچینگ در مقیاس

مراجع

- 1 - Column Leach Test Procedure-Copper. (2002). www.members.aol.com
- 2 - Bartlett, R. W. (1998). *Solution Mining*. Gordon and Breach, 2nd ed.
- 3 - Habashi, Fathi. (1993). *A Textbook of Hydrometallurgy*.
- 4 - شرکت ایتوک ایران. "مطالعه امکان پذیری نهایی کانسار مس سونگون (جلد اول) گزارش زمین شناسی و اکتشاف".
- 5 - Miller, G. and Newton, T. (1999). "Copper heap leaching testing, interpretation and scale up." *ALTA Metallurgical Services, Copper Heap Leaching Forum*.
- 6 - Schlitt, W. J. and Ream, B. P. (1997). "Kennecott's bingham canyon heap leach program." *ALTA Metallurgical Services*.
- 7 - Servers, K.J. and Wood, P. R. (1998). "Economic implications of the intec copper process for the world's copper industry." *ALTA Metallurgical Services, Copper Sulphide Symposium*.
- 8 - Seville, R., Draper, N., Dicoski, W. and Wong, S. (1996). "Initial and confirmatory testwork mt.cuthbert copper project." *ALTA Metallurgical Services, Copper Hydrometallurgical forum*
- 9 - The A-Z of Copper Ore Leaching Seminar.(1997). Volume one, *ALTA Metallurgical Services*.