نشریه علوم و مهندسی جداسازی
دوره اول، شماره دوم، سال ۱۳۸۸، صفحه ۱۵ تا ۳۱

Journal of Separation Science and Engineering
Vol. 1, No. 2, 2010, pp. 15-31

بهینه سازی استخراج مس از کانسنگ کم عیار مجتمع مس سرچشمه با استفاده از لیچینگ باکتریایی

اسماعیل دره‌زرشکی[۱،۲] ، مهین شفیعی[۲،۳*] ، زهرا منافی[۴] ، مجید لطفعلیان[۵]

۱. کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی و مربی پژوهشکده انرژی و محیط زیست، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲. پژوهشکده صنایع معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۳. استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (**M.Schaffei@mail.uk.ac.ir**)*
۴. کارشناس ارشد بیوهیدرو متالورژی امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه، شرکت ملی مس ایران
۵. کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله :
دریافت ۱۰ اسفند ۱۳۸۷
دریافت‌پس‌ازاصلاحات ۲۰ مهر ۱۳۸۸
پذیرش نهایی ۳۰ مهر ۱۳۸۸

کلمات کلیدی :
لیچینگ باکتریایی
باکتری مزوفیل
ترموفیل معتدل
هیپ
مس
سرچشمه

* عهده دار مکاتبات

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی نقش پارامترهای موثر مانند pH، غلظت آهن فریک و آهن فرو و بهینه سازی پارامترهای عملیاتی برای افزایش استخراج مس از کانسنگ سولفیدی هیپ شماره ۳ مجتمع مس سرچشمه بوده است. دراین راستا با استفاده از طرح تاگوچی ابتدا آزمایش‌های ظروف لرزان طراحی و شرایط بهینه استخراج مس تعیین گردید. در ادامه تست‌های لیچینگ ستونی طراحی و چگونگی افزایش بازیابی مس از این هیپ با استفاده از باکتری‌های مزوفیل وترموفیل معتدل بررسی شد. نتایج آزمایشات ظروف لرزان نشان داد حداکثر بازیابی مس در دما و pH مناسب، حضور آهن فرو و بدون حضور آهن فریک حدود۹۰ درصد می باشد. بر اساس نتایج آزمایش‌های ستونی بازیابی مس در لیچینگ باکتریایی با استفاده از مخلوط باکتری‌های مزوفیل در مقایسه با لیچینگ شیمیایی تحت شرایط بهینه، تا حدود ۳۰ درصد و با استفاده از باکتری‌های ترموفیل معتدل تا بیش از۴۰ درصد افزایش می یابد.

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

تولید کانه‌های فلزی از ذخایر معدنی در ایران به صورت چشمگیری در دهه‌ی اخیر افزایش یافته است. در سال ۲۰۰۶ صنعت معدن ایران حدود ۱/۴ ٪ تولید جهانی را تشکیل داده است. با این حال، فعالیت‌های اصلی معادن ایران روی آهن و مس متمرکز شده است. ذخایر بالقوه‌ی ایران حداقل ۳۰۰۰ میلیون تن گزارش شده است[۱]. لیچینگ باکتریایی سولفیدهای فلزی در دهه های اخیر به سرعت توسعه یافته است. امروزه بازیابی فلزات سنگین بوسیله میکروارگانیزم‌ها با تکنیک بیوتکنولوژی محقق گشته است[۲]. ذخایرجهانی‌کانه‌های با عیار بالا به علت نیاز روز افزون به مواد اولیه رو به کاهش است. یکی از مشکلات بازیابی مواد از کانه‌های کم عیار با استفاده از روش‌های سنتی مصرف انرژی بالا و نیاز به هزینه‌های سرمایه‌ای بالا می‌باشد. از مشکلات دیگر می‌توان به مسائل مرتبط با حفاظت محیط زیست اشاره نمود. چشم انداز استفاده از بیوتکنولوژی برای حل این مشکلات امیدوار کننده است. کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و همچنین کاهش آلودگی می‌تواند از نتیجه‌های بارز استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی باشد[۳]. بیواکسیداسیون کانی‌ها هم اکنون به عنوان یک تکنولوژی برتر برای غلبه بر کانه‌های سخت طلا و کنسانتره‌ها و همچنین برای لیچینگ فلزات پایه از دیگر کانه‌ها و کنسانتره‌ها پذیرفته شده است[۴]. بیولیچینگ مخزنی در بیوراکتورها، در بدست آوردن بازیابی بالا موفقیت خوبی کسب نموده است اما به دلیل مشکلاتی از قبیل: خوردگی، مقاومت برشی پایین باکتری‌ها با محدودیتهائی روبرو است[۵]. بیواکسیداسیون به روش هیپ هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی کمتر اما در مقابل نرخ (سرعت) استخراج پایین‌تر و بازیابی نهایی کمتر دارد[۴]. اقتصادی بودن استحصال مس از خاک‌های کم عیار نیازمند استفاده از روش‌های کم هزینه مانند لیچینگ درجا، هیپ و دامپ لیچینگ می‌باشد. هیپ لیچینگ سولفیدهای کم عیار مس یک تکنولوژی جدید که برای استخراج مس از کانی‌های سولفیدی ثانویه مانند کوولیت و کالکوسیت با موفقیت در سرتاسر جهان به کار برده شده است[٦].

میکروارگانیزم‌های استفاده شده برای استخراج فلز از کانی‌های سولفیدی، باکترهای شیمولیتوتروف بوده که برای رشد صرفاً به ترکیبات معدنی(غیر آلی) نیاز دارند. کربن، هیدروژن و اکسیژن مشتق شده از اتمسفر و آب زمین از مهمترین منابع مورد استفاده این باکتری‌ها می‌باشند. عناصر لازم و ضروری باقیمانده دیگر نظیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منگنز، گوگرد، کلرین و فلزات سنگین از جمله آهن، روی، مس، مولیبدین و... از مواد معدنی خاک یا کودهای معدنی تامین می‌شوند. این محیط‌های غذایی برای رشد باکتری‌ها با روش‌های خاص در آزمایشگاه تولید می‌شوند[۲]. البته استفاده و کاربرد این محیط‌های رشد در دامپ و هیپ صنعتی با مشکلاتی روبرو است. فلزات سنگین و عناصر دیگر از جمله کلسیم و منیزیم به مقدار کافی در اثر تخریب اسیدی سنگ‌ها ایجاد می‌شوند در حالی که تأمین نیتروژن و فسفر ممکن است با محدودیت‌های روبرو باشد. در این صورت اغلب از سولفات آمونیم($(NH_4)_2SO_4$) و فسفات پتاسیم (K_2HPO_4) یا سولفات آمونیم و اسید فسفریک (H_3PO_4) استفاده می‌شود[۲].

باکتری‌های مهمی‌که در لیچینگ کانی‌های سولفیدی مس استفاده می‌شوند شامل موارد زیر می‌باشند[۷]:

- مزوفیل‌ها که شامل: *لیپتوسپیرلیم فرواکسیدانس*[1]، *اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس*[2] و *اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدانس*[3] که در دمای ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد فعالیت می‌کنند.

[1] Leptospirillum ferrooxidans
[2] Acidithiobacillus ferrooxidans
[3] Acidithiobucillus thiooxidants

- ترموفیل‌های معتدل که مهمترین آنها شامل: *سولفولوبوس*[1]، *اسیدیانوس*[2] و *سولفوباسیلوس*[3] که در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد فعالیت می‌کنند.
- ترموفیل‌های مطلق که مهمترین آنها شامل: *اسیدیانوس و متالوسفارا*[4] و *سولفولوبوس*که در دمای ۶۸ درجه سانتی‌گراد فعالیت می‌کنند.

سرعت اکسیداسیون مینرال‌های سولفیدی به طور محسوس در اثر فعالیت باکتری‌های اسیددوست، شیمیولیتوتروف و اکسید کننده آهن مانند اسیدی تیوباسیلیوس فرواکسیدانس(T.f) تسریع می‌گردد. مهمترین فرآیند در فرآیند بیولیچینگ اکسایش آهن دوظرفیتی (Fe^{+2}) به آهن سه ظرفیتی (Fe^{+3}) در لیچینگ کانی‌های اکسیدی و سولفیدی می‌باشد[۸،۹].

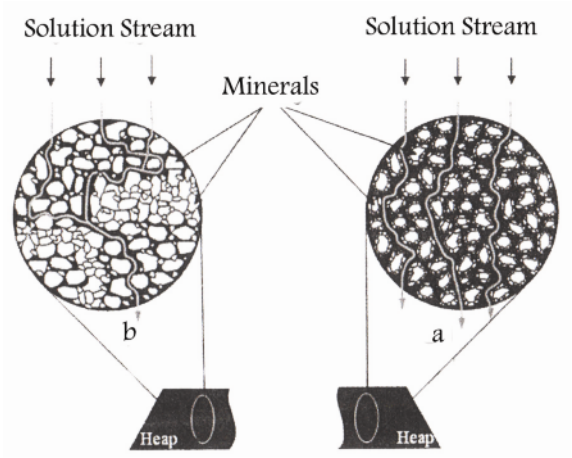
برخی از فاکتورها و پارامترهای موثر بر اکسیداسیون باکتریایی مواد و فلزات درجدول (۲) آورده شده است[۱۰].

با توجه به افزایش میزان کانی‌های سولفیدی مس در کانسنگ اکسیدی، محققان درصدد استحصال مس از بخش سولفیدی موجود در باطله‌های حاصل از لیچینگ شیمیایی برآمدند. در این فرآیندها ابتدا کانی‌های اکسیدی تحت لیچینگ اولیه (شیمیایی) قرار گرفته و هنگام ساخت هیپ با نصب لوله‌های مشبک بستر لازم جهت هوادهی در مرحله لیچینگ ثانویه (بیولیچینگ) فراهم می‌شود. طی فاز نهائی لیچینگ شیمیایی، با پاشش اسید و باکتری روی هیپ وهوادهی از پایین، لیچینگ ثانویه کانی‌های سولفیدی آغاز گردید[۶].

نمونه‌های میکروبیولوژیکی جمع آوری شده از مغزه‌های داخل دامپ معدن جدول(۱) نشان داد بیشترین جمعیت باکتری در سطح بوده و با افزایش عمق به سرعت از تعداد باکتری‌های اکسید کننده آهن کاسته می‌شود[۱۱]. عامل اصلی این پدیده عدم نفوذ اکسیژن به داخل هیپ و کاهش درصد اکسیژن به حدود ۵ درصد در عمق حدود ۱/۵ متر ارزیابی شده است. برای بهبود نفوذ اکسیژن، پاشش سیکلی[5] مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۲]. گزارشات نشان می‌دهد که آگلومراسیون ذرات نرم نیز می‌تواند مشکل نفوذپذیری را حل کند و همچنین از کانالی شدن جریان نیز جلوگیری نماید (شکل ۱)[۱۳،۱٤،۱۵].

جدول (۱): باکترهای مزوفیل اکسید کننده آهن نمونه‌های دامپ معدن[۱۱].

Depth[m]	Bacteria [numbers/g-sample (dry wt)]
surface	4.5×10^{7}
2.4–4.9	1.1×10^{3}
7.3–9.8	1.1×10^{2}
12.2–14.6	1.1×10^{2}
17.1–19.5	1.1×10^{1}
22.0–24.4	1.1×10^{1}
26.8–43.9	not detectable



شکل (۱): جریان سیالات در بستر (a) ایده‌ال، (b) غیر ایده‌ال[۱۵].

[1] Sulfolobus
[2] Acidianus
[3] Sulfobacillus
[4] Metallosphaera
[5] Cyclical irrigation

جدول (۲): پارامترهای موثر اکسیداسیون باکتریایی فلزات[۱۰].

Factor	Parameters	Factor	Parameters	Factor	Parameters
Properties of the minerals to be leached	Mineral composition	Microbiological Parameters	Microbial activities	Physicochemical Parameters	Temperature, pressure, light
	Mineral type		Population density		Redox potential
	Mineral dissemination		Microbial diversity		Oxygen and carbon dioxide content
	Grain size and porosity		Adaptation abilities of microorganisms		Nutrient availability
					Iron(III) concentration

ساکاگوشی و همکاران در سال ۱۹۷۶[۱۶] اکسیداسیون میکروبی کوولیت و کالکوسیت را با استفاده از باکتری‌اسیدی‌تیوباسیلوس فرواکسیدانس(T.f) بررسی‌کردند. مطالعه روی لیچینگ کالکوسیت وکوولیت طبیعی نشان داد که آهن فریک اغلب حضور داشته و باعث افزایش حلالیت شده، بنابراین مطالعه غلظت آهن فریک و همچنین تاثیرات دما و pH مورد توجه و مطالعه قرارگرفت. نتایج نشان دهنده این بود که غلظت بهینه آهن فریک در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد وpH بهینه بدست آمده در مراحل قبل (pH=۲/۳-۱/۷) ۰/۰۰۴تا۰/۰۱مولار برای کالکوسیت و۰/۰۰۴ تا ۰/۰۲مولار برای کوولیت بدست آمد[۱۶]. همچنین رنجبر و همکارانش در سال ۲۰۰۹[۱۷]بیولیچینگ کانسنگ کالکوپیریتی با استفاده از باکتری‌های ترموفیل را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات نشان داد باکتریهای ترموفیل مطلق در مقایسه با باکتریهای ترموفیل معتدل، از پتانسیل بهتری برای استخراج مس از منابع کالکوپیریتی برخوردار بوده و تحت شرایط بهینه دما، pH و نسبت یون فرو به فریک استخراج مس با استفاده از باکتریهای ترموفیل مطلق در مقایسه با باکتریهای ترموفیل معتدل به میزان ۱۷ درصد افزایش یافت.

در غلظت‌های بالای آهن فریک نرخ حلالیت مس به دلیل هیدرولیز سولفات فریک طبق واکنش(۱) کاهش یافت[۱۶].

$$3Fe^{3+} + 2SO_4^{2-} + 6H_2O + M^+ \Leftrightarrow MFe_3(SO_4)_2.(OH)_6 + 6H^+ \quad (۱)$$

M در واکنش (۱) می‌تواند یکی از کاتیون‌های زیر باشد[۷] :

$$Na^+, K^+, Ag^+, NH_4^+, H_3O^+, \frac{1}{2}Pb^{+2}, Hg^{+2}, Li^+$$

در فرایند بیولیچینگ زمانی که غلظت یون Fe^{+3} در محلول زیاد شود علاوه بر هیدرولیز شدن یون‌های فریک، اکسیداسیون آنزیماتیک یون فرو توسط میکروارگانیزم‌های اکسیدکننده آهن محدود می‌شود. این محدودیت باعث تجمع آهن فرو بر روی سطح کانی گردیده و از ادامه فرایند انحلال جلوگیری می‌کند[۱۸].

معدن مس سرچشمه با ذخیرهٔ ۱۲۳۳ میلیون تن، بزرگترین معدن مس در ایران می‌باشد[۱۹]. هیپ ۳ مجتمع مس سرچشمه واقع در قسمت جنوب غربی معدن که سطح قابل استفاده از آن ۱۵۰ هزار متر مربع و گنجایشی بالغ برسه میلیون و نهصد هزار متر مکعب را دارامی‌باشد. کانسنگ به کار رفته در فرآیند هیپ لیچینگ ۳ مجتمع سرچشمه دارای ۰/۲٪ مس در بخش سولفیدی و ۰/۱۸٪ مس در بخش اکسیدی می‌باشد. در این تحقیق تاثیرپارامترهای موثر از جمله: pH، دما، آهن فرو، آهن فریک وتلقیح باکتریایی و اثر متقابل آنها در افزایش بازیابی کانسنگ به کار رفته در هیپ ۳ در حضور باکتری‌های مزوفیل و ترموفیل معتدل با آزمایش ظروف لرزان به کمک طرح آزمایشی تاگوچی، غلظت مناسب

اسید برای آگلومره کردن ذرات ریز به ذرات درشت و همچنین مقایسه بین لیچینگ شیمیایی و لیچینگ باکتریایی با کمک باکترهای مزوفیل و ترموفیل معتدل در راکتورهای ستونی بر روی خاک به‌کار رفته در هیپ ۳ مس سرچشمه مورد بررسی قرار گرفته است.

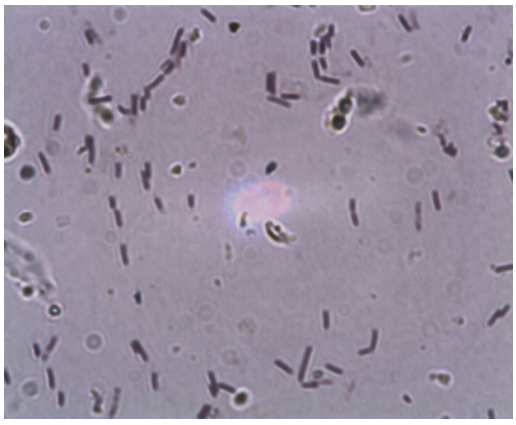
۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- باکتری و محیط کشت

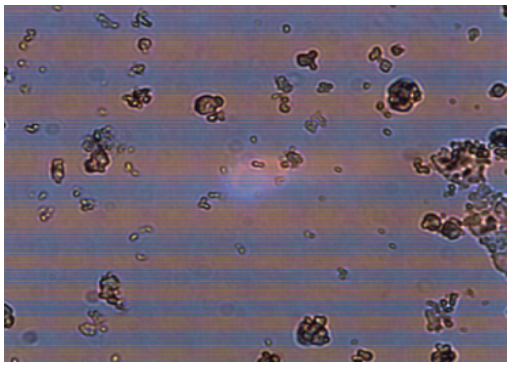
باکتری‌های به کار رفته در این تحقیق از دو گروه متفاوت بودند:

- باکتری‌های مزوفیل که شامل مخلوطی از گونه‌های *اسیدی‌تیوباسیلوس‌فرواکسیدانس*، *اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدانس* و *لپتوسپریلیم فرو اکسیدانس* بودند.
- باکتری‌های ترموفیل معتدل که شامل مخلوطی از گونه‌های *سولفوباسیلوس* و *اسیدی‌تیوباسیلوس‌ها* بودند.

همه این گونه‌ها از آبهای اسیدی جاری معدن مس سرچشمه جداسازی و شناسایی شده بودند[۲۰]. شکل ۲و ۳ بترتیب تصویری از باکترهای مزوفیل و ترموفیل مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. از محیط کشت 9K (جدول۳) برای انجام سازگاری و رشد باکتری‌ها در آزمایش‌های لیچینگ باکتریایی کانی‌های کم عیار مس استفاده گردید.



شکل (۲): تصویر میکرسکوپی باکترهای مزوفیل



شکل (۳): تصویر میکرسکوپی باکترهای ترموفیل معتدل

جدول (۳) : ترکیب محیط کشت استفاده شده در این تحقیق

Component	Concentration(g/l)
$(NH_4)_2SO_4$	3.000
$MgSO_4.7H_2O$	0.500
K_2HPO_4	0.630
KCl	0.100
$Ca(NO_3)_2.H_2O$	0.014

آزمایش‌های بیولیچینگ با استفاده از خاک کم عیار به کار رفته در هیپ ۳ مجتمع مس سرچشمه(مخلوط خاک دامپ‌های ۵و ۱۵) انجام شد. نمونه معرف با توجه به درصد وزنی هر بخش(جدول۴) تهیه و با استفاده از آسیای دیسکی تا ابعاد زیر ۳۰۰ میکرون خرد شد. عملیات طبقه‌بندی نشان داد بخش قابل توجهی از کانسنگ(حدود ۲۳ درصد) زیر ۱۲ مش بوده که ترکیب شیمیایی و مینرالوژی کانه در جدول(۵) نشان داده شده است. آنالیز کانه شناسی نشان داد که عمده کانی‌های سولفیدی، کوولیت(۰/۲۲درصد) و کالکوپیریت(۰/۱۶درصد) بوده و همچنین میزان پیریت کانسنگ قابل توجه است(۱۰درصد). مطالعات *XRD* بر روی خاک نشان داد که کانی‌های باطله در نمونه بیشتر مسکویت_ ایلیت($KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$)، کوارتز(SiO_2) و کلریت $(MgFe)_6(Si,A)_4O_{10}(OH)_{10}$ می‌باشد. از آنجا که قابلیت انحلال کانی‌های سولفیدی در محیط اسیدی سخت می‌باشد و با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از کانسنگ به کار رفته در هیپ ۳ سولفیدی است می‌توان با فرایند بیولیچینگ این بخش را

استخراج نمود.

جدول (٤): طبقه‌بندی ابعادی نمونه

Size (mm)	Weight(kg)	Content (wt%)	Cu (%)
+25.4-50.8	141.9	8.33	0.38
+12.7-25.4	447.6	26.21	0.27
+6.73-12.7	317.6	18.64	0.37
+1.68-6.73	410.8	24.11	0.44
-1.68	386.9	22.71	0.56

جدول (۵): ترکیب شیمیایی و مینرالوژی نمونه

Component	Content (wt %)	Mineral	Content (wt %)
Cu	0.4188	$CuFeS_2$	0.164
Fe	4.98	CuS	0.216
S	1.729	FeS_2	10.04
SiO_2	61.75	ZnS	0.165
Al_2O_3	19.04	Non-Metallic minerals	88.733

۲-۲- آزمایش ظروف لرزان[1]

با استفاده از آزمایش ظروف لرزان مناسب بودن کانسنگ جهت انجام فروشویی باکتریایی به صورت مقدماتی مشخص می‌شود و همچنین می‌توان تاثیر عوامل مختلف در فروشویی میکروبی را بررسی کرده و در صورت مثبت بودن نتایج اولیه درمقیاس‌های بزرگتر مانند ستون و راکتور پارامترهای عملیاتی و موثر را بررسی نمود.

آزمایش‌ها در انکوباتور شیکردار و با سرعت ثابت ۱۴۵ دور بر دقیقه انجام شد. مدت زمان انجام هر آزمایش ۳۰ روز بود. آزمایش‌های بیولیچینگ بر اساس طرح L27 تاگوچی طراحی شدند(جدول۶) که شامل پنج فاکتور در سه سطح بود. پنج پارامتر مستقل و سطوح مربوط به آنها در جدول(۷)نشان داده شده است، پارامتر وابسته میزان بازیابی در انتهای آزمایش‌ها بود.

برای ارزیابی پیشرفت فرآیند بیولیچینگ، در فواصل زمانی مشخص pH و پتانسیل اکسایش-کاهش پالپ اندازه گیری و ثبت می‌شد، برای تنظیم pH پالپ از اسید سولفوریک رقیق استفاده و مقدار آن مجدداً بر روی مقدار اولیه تنظیم می‌گردید.

جدول (۶): فاکتورها و سطوح مربوط به طرح آزمایشی

Factors	Surfaces		
Temperature $(^{\circ}C)$	32	40	50
pH	1.2	1.5	1.8
inoculation	A	B	C
$Fe^{2+}(M)$	0	0.005	0.012
$Fe^{3+}(M)$	0	0.005	0.012

↓

Inoculation (%)	A.F	T.t	L.f
A	40	40	20
B	60	20	20
C	20	20	60

جدول (۷): شرایط آزمایش لیچینگ باکتریایی با طرح L27 تاگوچی

Test NO.	Temp (^{0}C)	pH	Inoculation	[Fe^{+2}] M	[Fe^{+3}] M
1	32	1.2	A	0	0
2	32	1.2	B	0.005	0.005
3	32	1.2	C	0.012	0.012
4	32	1.5	A	0	0
5	32	1.5	B	0.005	0.005
6	32	1.5	C	0.012	0.012
7	32	1.8	A	0	0
8	32	1.8	B	0.005	0.005
9	32	1.8	C	0.012	0.012
10	40	1.2	A	0.005	0.012
11	40	1.2	B	0.012	0
12	40	1.2	C	0	0.005
13	40	1.5	A	0.005	0.012
14	40	1.5	B	0.012	0
15	40	1.5	C	0	0.005
16	40	1.8	A	0.005	0.012
17	40	1.8	B	0.012	0
18	40	1.8	C	0	0.005
19	50	1.2	M.thermophile	0.012	0.005
20	50	1.2	M.thermophile	0	0.012
21	50	1.2	M.thermophile	0.005	0
22	50	1.5	M.thermophile	0.012	0.005
23	50	1.5	M.thermophile	0	0.012
24	50	1.5	M.thermophile	0.005	0
25	50	1.8	M.thermophile	0.012	0.005
26	50	1.8	M.thermophile	0	0.012
27	50	1.8	M.thermophile	0.005	0

[1] Shaking Flask Test

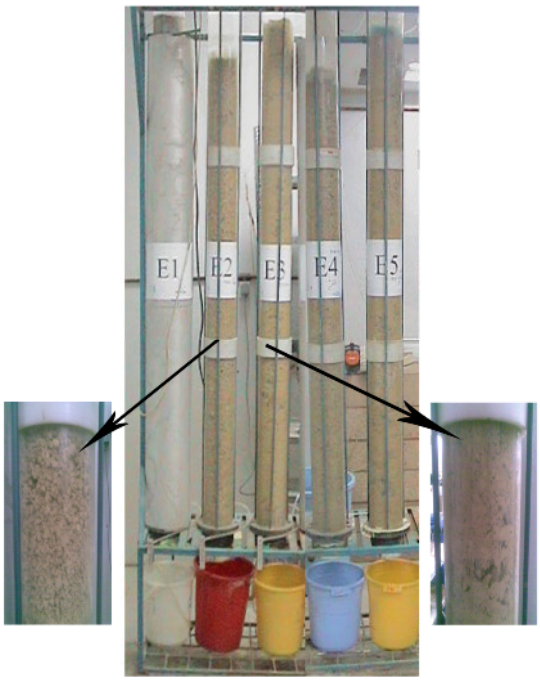
۲-۳- آزمایش‌های ستونی[1]

آزمایش‌های ستونی برای تطبیق با حالت صنعتی مدلی از هیپ و دامپ برنامه ریزی شدند. در این تحقیق از پنج ستون به ارتفاع ۲۰۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۱۳/۸ سانتی‌متر که از جنس پلکسی گلاس ساخته شده بودند، استفاده شد(شکل۴). شرایط کاری هر ستون در جدول(۸) نشان داده شده است. دمای ستون(۱) در ۵۰ درجه سانتی‌گراد و مابقی ستون‌ها در دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت. در ستون‌های مربوط به دمای محیط($25^{\circ}C$) از مخلوط باکتری‌های مزوفیل شامل اسیدی‌تیوباسیلوس فرو اکسیدانس(۴۰درصد)، اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدانس(۴۰درصد) و لیپتوسپریلم فرواکسیدانس(۲۰درصد) و ستون مربوط به دمای ۵۰ درجه از باکتری‌های ترموفیل معتدل استفاده شد. تنظیم دمای داخل ستون توسط یک سیستم کنترلی صورت می‌گرفت. برای جلوگیری از رشد و فعالیت باکتری داخل ستون‌های لیچینگ شیمیایی از تیمول با حلال متانول استفاده شد($5\%\ W/V$). آگلومره شدن ذرات بر اساس آزمایش‌های انجام شده با غلظت ۱۴۰ گرم بر لیتر اسید انجام شد. برای پاشش عامل انحلال (اسیدسولفوریک) از پمپ پریستالتیک که دبی پاشش آن قابل تنظیم است استفاده شد. دبی پاشش در مورد تمام ستون‌ها ۳/۱۲ $L/m^2.h$ در نظر گرفته شد. دبی هوادهی در مورد ستون‌های بیولیچینگ ۲۰۰ $cc/\min$ محاسبه و از پایین ستون دمیده شد. pH محلول پاشی ۱/۵ در نظر گرفته شد و مدت زمان انجام آزمایش‌ها ۹۵ روز بود. هر چند روز یکبار pH و ORP محلول خروجی اندازه‌گیری و جهت اندازه‌گیری غلظت آهن و مس ۵۰ cc محلول به آزمایشگاه ارسال گردید.

[1]Column Test

جدول(۸): شرایط آزمایش ستونی لیچینگ شیمیایی و باکتریایی

Column NO.	Process	Agglomeration	Temp (^0C)
1	Bioleaching	Yes	50
2	Bioleaching	Yes	25
3	Bioleaching	No	25
4	Leaching	Yes	25
5	Leaching	No	25



شکل (۴): نمایی از ستون‌های لیچینگ شیمیایی و باکتریایی

۳- ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

با توجه به سوابق تحقیقات[۱ و ۱۰ و۱۷] پارامترهای موثرمانند pH، دما، غلظت Fe^{+3}، غلظت Fe^{+2}وتلقیح باکتریایی برای بهینه‌سازی انتخاب شدند که درادامه، نتایج بدست آمده از هر بخش ارائه و تحلیل می‌شوند.

۳-۱- تاثیر pH

به دو دلیل pH در فرآیندهای بیولیچینگ نقش مهمی را ایفا می‌کند: تاثیر روی واکنش‌های شیمیایی و دیگری ایجاد محدوده‌های مختلف که باکتری‌های مختلف غالب

هستند[۲۱]. همه باکتری‌هایی که در فروشویی میکروبی به کار می‌روند در محدوده pH اسیدی (۳/۵-۱/۲) فعالیت دارند[۲۲]. با فعالیت باکتری، pH به تدریج کاهش می‌یابد. جدول (۹) شرایط عملیاتی لیچینگ باکتریایی در طی انجام آزمایشهای ظروف لرزان را نشان می‌دهد. بیشترین تغییرات pH در هر دما در شکل (۵) ارائه شده است. در دماهای مختلف با فعالیت باکتری، pH به تدریج کاهش یافته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دهنده این است که مناسبترین pH برای استخراج مس از کانسنگ مورد استفاده ۱/۲ می‌باشد. البته در pHهای ۱/۵ و ۱/۸ نیز استخراج مس قابل ملاحظه می‌باشد.

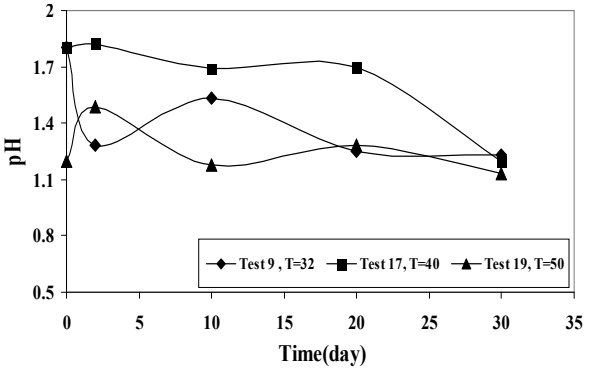
۳-۲- تاثیر دما

باکتری‌هایی که در انحلال بیولوژیک کاربرد دارند بسته به نوع باکتری در دامنه حرارتی خاصی قادر به اکسایش سولفیدها می‌باشند. دامنه حرارتی باکتری‌های مزوفیل ۴۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد، باکتری‌های ترموفیل معتدل ۵۵-۴۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. البته به علت تنوع زیاد، شرایط بهینه مطلقی برای آنها شناسایی نشده اما در کل باکتری‌های مزوفیل در محدوده دمای ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد و باکتری‌های ترموفیل معتدل ۴۵-۴۰ درجه‌سانتی‌گراد بهترین شرایط انحلال کانه سولفیدی را دارا می‌باشند. باکتری تیوباسیلوس فرواکسیدانس تنها در دمای کمتر از ۴۰ درجه سانتیگراد قادر به رشد است و دمای ۴۲ درجه باعث متوقف شدن فعالیت آن می‌گردد.

دمای بهینه برای رشد باکتری تیوباسیلوس تیواکسیدانس ۳۰ درجه سانتی‌گراد و باکتری لپتوسپریلیم فرو اکسیدانس ۴۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد[۲۲,۲۳]. برای رشد بهینه باکتری، با کاهش دما بایستی pH پائین‌تری در نظر گرفته شود که البته این pH خاصیت مهار کنندگی برای فعالیت باکتری‌ها دارد. تاثیر دما وpH روی قابلیت حلالیت مس از کانسنگ مورد استفاده در شکل(۶-a) نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دهنده این است که دمای بهینه در محدوده دمای مورد آزمایش برای استخراج مس با استفاده از باکتری‌های مزوفیل دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد و با استفاده از باکتری‌های ترموفیل معتدل ۵۰ درجه سانتی گراد می‌باشد.

جدول (۹): شرایط عملیاتی لیچینگ باکتریایی در ظروف لرزان

Test No.	Average	pH Max	Min
1	1.24	1.36	1.05
2	1.22	1.35	1.05
3	1.18	1.23	1.06
4	1.49	1.58	1.40
5	1.45	1.54	1.35
6	1.31	1.50	1.23
7	1.65	1.80	1.48
8	1.56	1.80	1.50
9	1.41	1.80	1.23
10	1.26	1.40	1.06
11	1.25	1.44	1.00
12	1.29	1.58	1.05
13	1.50	1.70	1.30
14	1.46	1.68	1.15
15	1.41	1.50	1.14
16	1.54	1.80	1.10
17	1.64	1.82	1.20
18	1.61	1.8	1.25
19	1.25	1.49	1.13
20	1.26	1.34	1.10
21	1.30	1.41	1.12
22	1.55	1.69	1.50
23	1.51	1.60	1.47
24	1.56	1.73	1.50
25	1.72	1.82	1.61
26	1.71	1.75	1.62
27	1.78	1.93	1.65



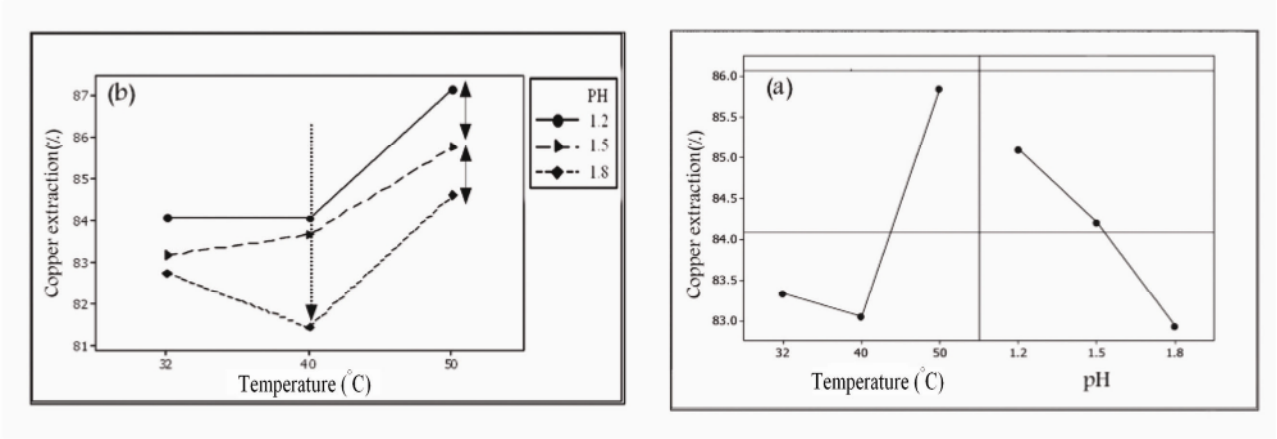
شکل (۵): بیشترین تغییرات pH در دمای ۳۲، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد

۳-۳- تاثیر متقابل pH و دما

شکل(۶-b) تاثیر متقابل pH و دما را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است در دمای ۳۲ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و با استفاده از باکتری‌های مزوفیل و همچنین در دمای ۵۰ درجه و با استفاده از باکتری‌های ترموفیل به ترتیب در pHهای ۱/۲ ، ۱/۵ و ۱/۸ بازیابی مس بیشتر بوده است. در کل در pH برابر با ۱/۲ و دمای ۵۰ درجه و با استفاده از باکتری‌های ترموفیل معتدل بیشترین بازیابی معادل ۸۷/۵ درصد حاصل شد. همان طورکه مشاهده می‌شود با افزایش دما، تاثیر pH خود را نشان داده بطوری که فاصله بازیابی‌ها از هم افزایش یافته است(پیکان دو طرفه). دما تاثیر بسزایی در فعالیت باکتری‌ها دارد بطوری که در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد با افزایش pH فعالیت باکتری‌ها کاهش یافته و درنتیجه کاهش بازیابی را به دنبال داشته است(جهت پیکان خط چین).

۳-۴- تاثیر Eh

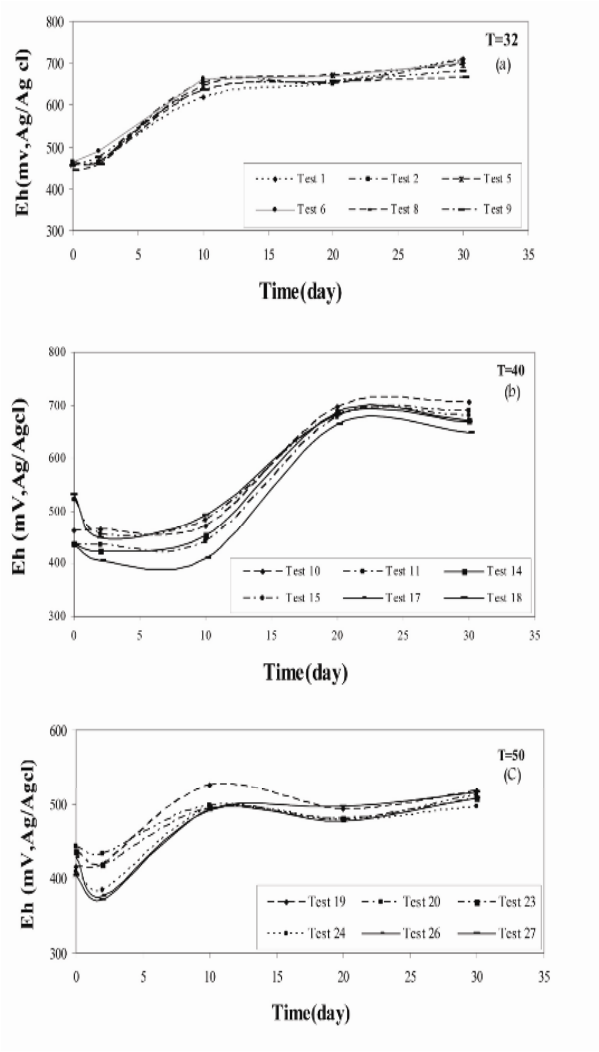
پتانسیل اکسیداسیون- احیا، معیاری برای سنجش تمایل یک ماده برای گرفتن یا دادن الکترون است و معرف نسبت یون‌های فریک به فرو (Fe^{+3}/Fe^{+2}) است[۲۲]. در طول اکسیداسیون آهن فرو به وسیله باکتری، Eh محیط به تدریج افزایش می‌یابد. در مورد باکتری‌های ترموفیل به دلیل کاهش حلالیت اکسیژن در دمای بالا، Eh محیط، حداکثر ۶۰۰ میلی‌ولت و در مورد باکترهای مزوفیل این مقدار به بالاتر از ۷۰۰میلی ولت نیز می‌رسد[۲۲]. شکل(۷) به ترتیب تغییرات Eh را در دمای ۳۲،۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در دمای ۴۰ درجه در رشد و فعالیت باکتری یک تاخیر اتفاق افتاده است(حدود ۱۰ روز) که می‌توان آن را به سبب مناسب نبودن دما برای باکتری اسیدی‌تیو-باسیلوس فرواکسیدانس(A.f) دانست. از طرفی چون لپتوسپریلم فرواکسیدانس(L.f) فعالیت کندتری نسبت به اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس(A.f) دارد[۲۲] در نتیجه تاخیر صورت گرفته است.



شکل (۶): تاثیر دما و pH (a) وتاثیر متقابل pH و دما (b) بر روی انحلال مس

۳-۵- تاثیر آهن

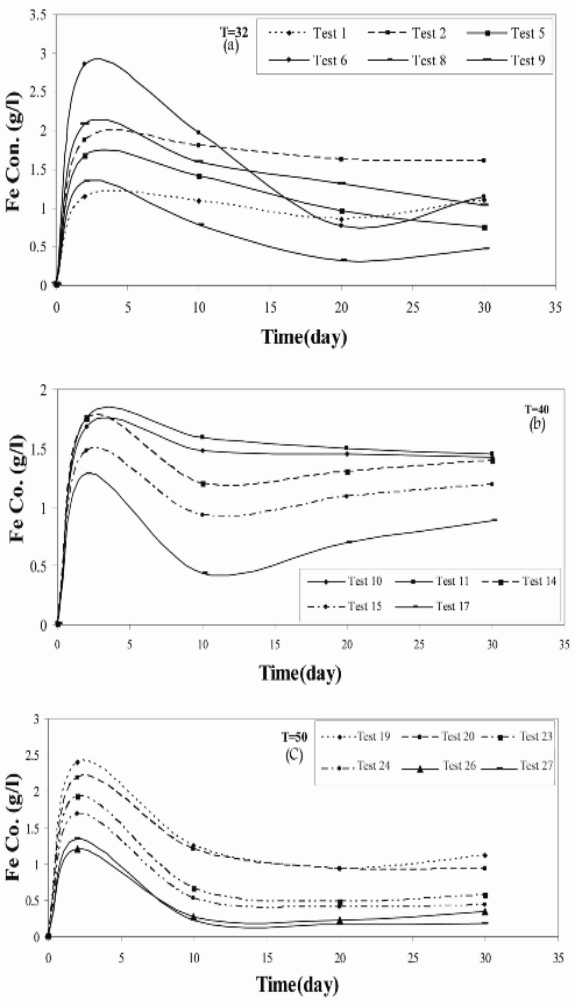
آهن، بطور مفید برای واکنش شیمیایی لازم است اما غلظت مورد نیاز، وابسته به فاکتورهای موثر در فعالیت باکتری‌ها است[۱۱]. شکل(۸) تغییرات غلظت آهن کل را در طی فرآیند نشان می‌دهد. ابتدا غلظت آهن افزایش یافته و پس از مدتی بعد از شروع فعالیت باکتری‌ها غلظت آهن در سیستم توسط باکتری‌ها کنترل شده است. کنترل غلظت آهن در دمای ۵۰ درجه و با استفاده از باکتری‌های ترموفیل معتدل بهتر صورت گرفته است. افزایش غلظت آهن باعث بروز مشکلاتی از قبیل هیدرولیز آهن و کاهش انحلال را در پی خواهد داشت. در واقع باکتری‌ها با تبدیل آهن فرو به فریک وسپس تبدیل شدن آهن فریک به فرو غلظت آهن کنترل نموده و از افزایش غلظت آهن جلوگیری می‌کنند.



شکل (۷): نمودار تغییرات Eh در دمای ۳۲(a) و ۴۰(b) و ۵۰ (c)درجه سانتی‌گراد

۳-۶- تاثیر Fe^{+2} و اثر متقابل با pH

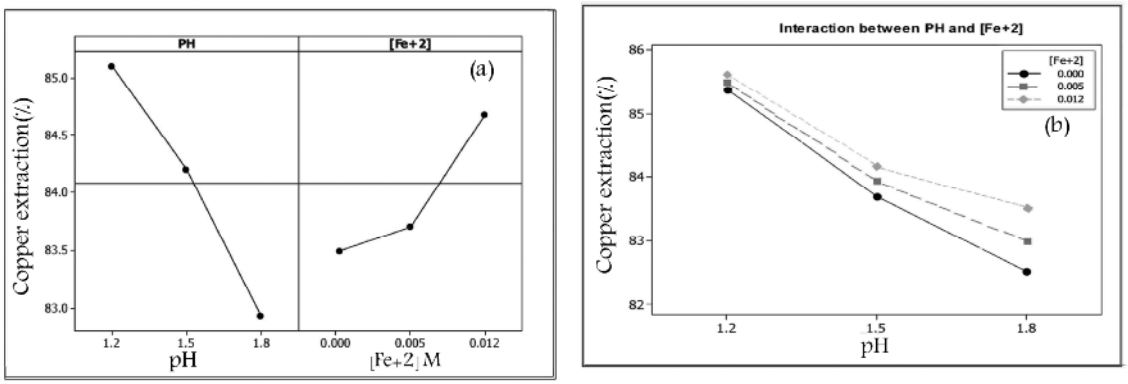
باکتری‌ها، انرژی مورد نیاز برای رشد خود را از انتقال الکترون از آهن فرو به اکسیژن بدست می‌آورند. در واقع یکی از منابع انرژی برای باکتری را می‌توان سولفات فرو دانست[۲۴]. شکل (۹-a) تاثیر Fe^{+2} را در انحلال مس نشان می‌دهد، در حضور آهن فرو انحلال مس بهتر صورت گرفته است. شکل(۹-b) تاثیر متقابل pH و Fe^{+2} را در انحلال مس نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت در pHهای پایین اضافه کردن یون فرو به سیستم تاثیر چندانی نسبت به به pHهای بالا ندارد. و همچنین با افزایش pH استفاده از آهن فرو باعث کاهش بازیابی می‌گردد که این پدیده را می‌توان به سبب هیدرولیز سولفات فرو دانست.



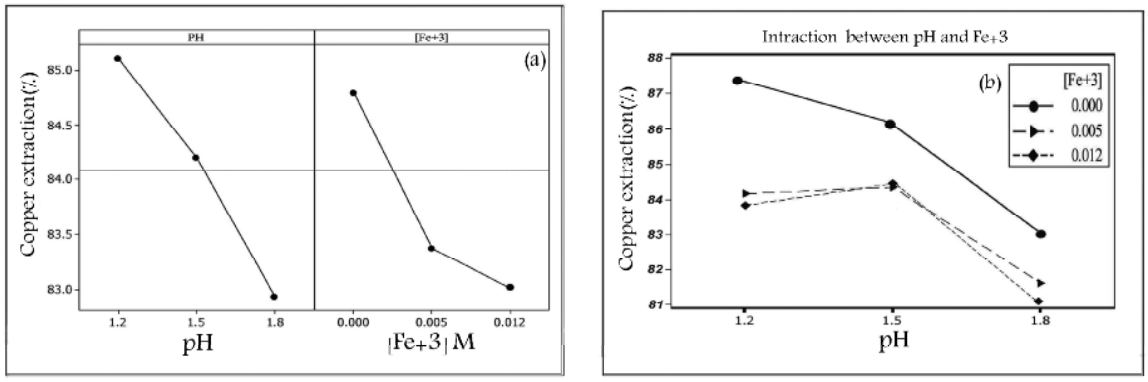
شکل (۸):نمودار تغییرات غلظت آهن در دمای ۳۲(a)، ۴۰(b)و ۵۰(c) درجه سانتی‌گراد

۳-۷- تاثیر Fe^{+3}

در شکل (۱۰-a) تاثیر آهن فریک برروی فرایند باکتریایی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود به نظر می‌رسد اضافه کردن یون فریک بطور مستقیم باعث ایجاد اخلال در فعالیت آنزیماتیک میکروارگانیزم‌ها شده وقابلیت انحلال کاهش یافته است. به زبان ساده‌تر با اضافه کردن آهن فریک به سیستم، باکتری تمایل به تبدیل آهن فرو به فریک را نداشته و از طرفی یون فرو در محلول افزایش یافته و رسوب گوتیت رخ داده است. در نتیجه برخلاف اینکه درفرایند شیمیایی استفاده از آهن فریک به عنوان اکسنده می‌تواند موثر واقع شود، ولی در مورد لیچینگ باکتریایی به اندازه لیچینگ شیمیایی موثر نیست و همچنین از نظر اقتصادی نیز این موضوع قابل توجه است.



شکل (۹): نمودار تاثیر Fe^{+2} (a) و تاثیرمتقابل pH و آهن فرو(b)در استحصال مس



شکل (۱۰): نمودار تاثیر Fe^{+3} (a) و تاثیرمتقابل pH و آهن فریک(b)در استحصال مس

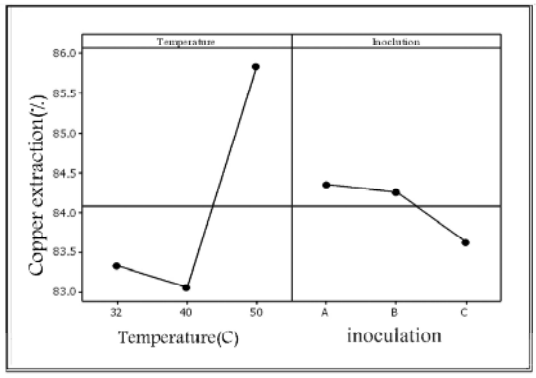
۳-۸- تاثیر متقابل pH و Fe^{+3}

شکل (۱۰-b) تاثیر متقابل pH و Fe^{+3} را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت استفاده از آهن فریک در pH های بالا باعث کاهش بازیابی شده و این پدیده را می‌توان به سبب هیدرولیز سولفات فریک دانست. همان طور که در شکل مشخص است عدم استفاده از سولفات فریک، افزایش انحلال را در پی‌داشته است.

۳-۹- تاثیر نسبت تلقیح

در بسیاری از عملیات جدید، تلقیح باکتری‌ها به هیپ به منظور کمک به شروع یا نگهداری فعالیتهای باکتریایی‌صورت‌می‌گیرد. در سایر عملیات‌ها محیط مناسب برای رشد باکتری‌ها در هیپ ایجاد شده و تلقیح صورت نمی‌گیرد. در عملیات بیولیچینگ مس هیچگونه گزارشی مبنی بر تائید موثر تلقیح باکتریایی گزارش نشده است. سازگاری و فعالیت باکتری‌ها در هیپ به مرور زمان بهبود می‌یابد. باید به توانایی باکتری‌ها در سازگاری با شرایط توجه نمود. پرورش دادن باکتری‌ها در آزمایشگاه امکان این سازگاری را فراهم نمی‌کند[۷].

با توجه به شکل (۱۱) نسبت تلقیح A در مورد باکتری‌های مزوفیل بهتراز حالت B وC می‌باشد. نکته قابل توجه این است که وجود مقدار کافی از باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان تاثیر بیشتری در تبدیل آهن فرو به فریک را داشته و به طور کلی نقش اصلی را این باکتری ایفا می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود نسبت تلقیح C که درصد باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان کمتر از تلقیح A وB بوده بازیابی پایین تری را بدنبال داشته است.



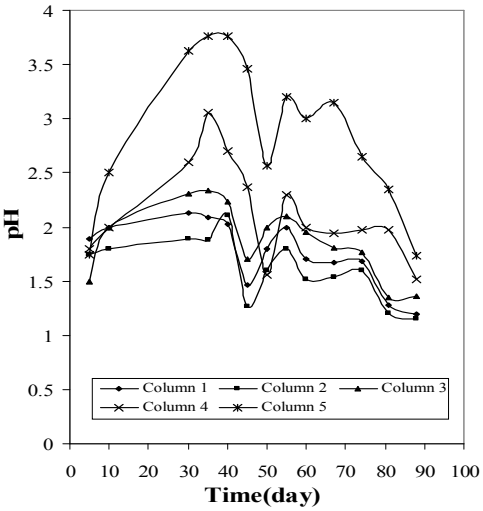
شکل (۱۱): نمودار تاثیر نسبت تلقیح در استحصال مس

۳-۱۰- نتایج آزمایش‌های ستونی

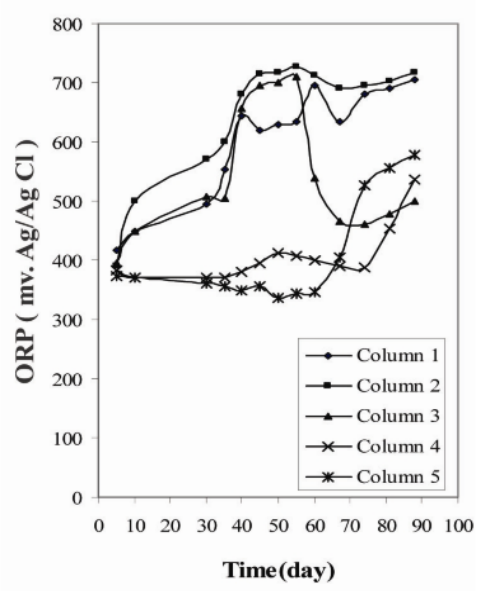
شکل(۱۲) نمودار تغییرات pH محلول خروجی از ستون‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود pH محلول خروجی مربوط به فرایند لیچینگ شیمیایی در مقایسه با لیچینگ باکتریایی بالاتر است، که نشان‌دهنده‌ی مصرف بیشتر اسید در فرایند لیچینگ شیمیایی است. در صورتی که در فرآیند باکتریایی بدلیل تولید اسید سولفوریک توسط باکتری‌ها مصرف اسید کمتر بوده است.

با مقایسه تغییرات pH مربوط به ستون‌های ۴-۵ و۲-۳ می‌توان نقش آگلومراسیون درلیچینگ شیمیایی و باکتریایی بر روی مصرف اسید را

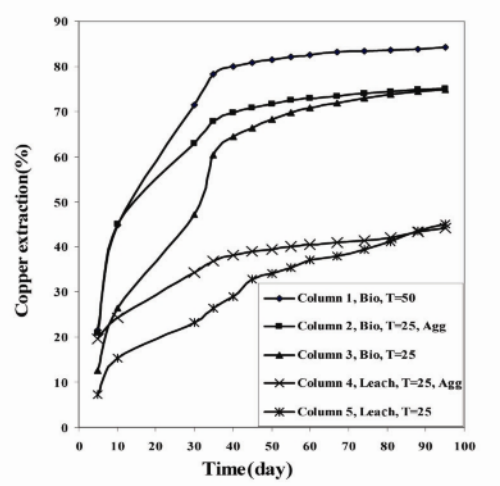
مشاهده نمود، بطوریکه با انجام آگلومراسیون میزان مصرف اسید کمتر شده است. شکل (۱۳) نمودار تغییرات ORP در محلول خروجی از ستون‌ها را نشان می‌دهد. تغییرات ORP در ستون‌های لیچینگ شیمیایی در مقایسه با لیچینگ باکتریایی کمتر است، این در حالی است که ORP مربوط به لیچینگ باکتریایی روند افزایشی داشته که نشان دهنده رشد و فعالیت موثر باکتری‌ها می‌باشد. با مقایسه تغییرات ORP مربوط به ستون‌های ۲ و ۳ می‌توان نقش آگلومراسیون را در لیچینگ باکتریایی مشاهده نمود. به طوری‌که پس از مدتی ORP مربوط به ستون ۳ کاهش یافته که این پدیده را می‌توان به دلیل توزیع غیر یکنواخت اکسیژن، و در نتیجه کاهش فعالیت باکتری‌ها دانست.



شکل (۱۲): تغییرات pH محلول خروجی از ستون

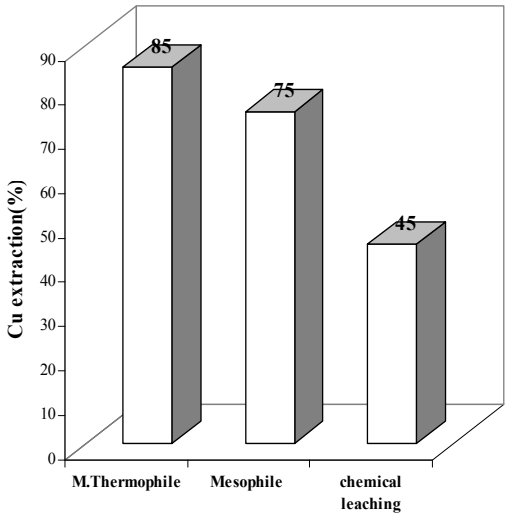


شکل (۱۳): تغییراتEh محلول خروجی از ستون‌ها



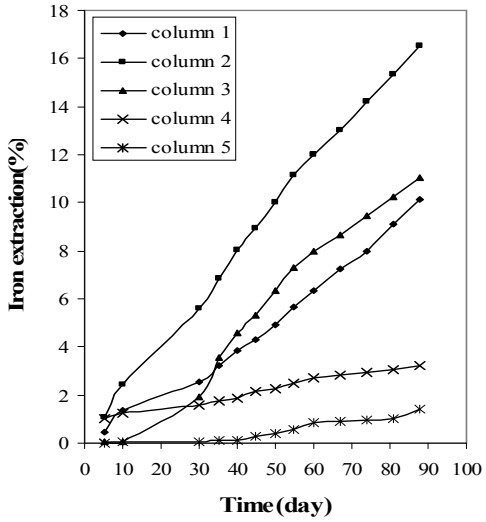
شکل(۱۴): نمودارتغییرات بازیابی مس مربوط به ستون‌های لیچینگ شیمیایی وباکتریایی

در شکل (۱۴) نمودار بازیابی مس مربوط به ستون-های لیچینگ شیمیایی ولیچینگ باکتریایی نشان داده شده است. آزمایش ستون (۴) با نمونه آگلومره شده در مقایسه با آزمایش ستون (۵) بدون فرایند آگلومراسیون، نرخ استخراج سریعتری را نشان داد. در واقع با انجام فرآیند آگلومرآسیون بستری ایده‌آل داخل ستون ایجاد شده و محلول لیچ به تمام قسمتهای خاک نفوذ کرد و استخراج سریعتری را نسبت به حالت بدون فرآیند آگلومراسیون، بدلیل کانالی شدن جریان، به دنبال داشته است. آزمایش ستونی(۲)که با استفاده از مخلوطی از باکتری‌های مزوفیل در دمای محیط و با نمونه آگلومره شده انجام شد در مقایسه با ستون(۳)که بدون فرایند آگلومراسیون انجام گرفت دارای نرخ استخراج سریعتری بود و در نهایت حداکثر بازیابی به ۷۵درصد رسید. آزمایش ستون(۱)مربوط به لیچینگ باکتریایی و با استفاده از باکتری‌های ترموفیل معتدل در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج نشان دهنده‌ی حداکثر بازیابی ۸۵درصد بود. در شکل(۱۵)بازیابی نهایی مربوط به لیچینگ شیمیایی و لیچینگ باکتریایی به صورت ستونی نمایش داده شده است. شرایط عملیاتی لیچینگ شیمیایی و لیچینگ باکتریایی در مدت انجام آزمایش در جدول(۱۰)آورده شده است. پتانسیل اکسایش-کاهش در لیچینگ باکتریایی با استفاده از باکتری‌های مزوفیل و ترموفیل معتدل متفاوت است. باکتریهای هوازی به پتانسیل اکسایش- کاهش[11] مثبت احتیاج دارند[۲۲]. افزایش پتانسیل در نتیجه اکسایش یون فرو و افزایش نسبت Fe^{+3} به Fe^{+2} می‌باشد که حاکی از فعالیت باکتری‌ها است[۲۵,۲۲]. میانگین ORP ستون با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و باکتری ترموفیل معتدل، ۵۰ میلی ولت کمتر از ستون‌های با دمای محیط و باکتری‌های مزوفیل بود. ORP ستون‌های مزوفیل در طول فرآیند روند افزایشی نشان داد و حداکثر به ۷۱۷+ میلی ولت و ORP ستون ترموفیل معتدل حداکثر به ۷۰۰+ میلی ولت رسید. در مورد لیچینگ شیمیایی میانگین ORP به ۳۸۹+ میلی ولت رسید. با مقایسه تغییرات pH مربوط به ستون‌های۲-۳ و۴-۵ می‌توان نقش آگلومراسیون در لیچینگ شیمیایی و باکتریایی بر روی مصرف اسید را مشاهده نمود، بطوریکه با انجام آگلومراسیون میزان مصرف اسید کمتر شده است.



شکل (۱۵): نمودار بازیابی نهایی مس ستون‌های لیچینگ شیمیایی و باکتریایی

شکل (۱۶) میزان بازیابی آهن مربوط به ستون‌های لیچینگ شیمیایی و لیچینگ باکتریایی را نشان می‌دهد. میزان آهن استخراج شده در ستون‌های باکتریایی در مقایسه با ستون‌های شیمیایی به دلیل تولید عامل اکسنده (آهن فریک) توسط باکتری‌ها بیشتر می‌باشد.



شکل (۱۶): نمودار تغییرات بازیابی آهن ستون‌های لیچینگ شیمیایی و باکتریایی

[11] Redox Potential

جدول (۱۰): شرایط عملیاتی لیچینگ شیمیایی و لیچینگ باکتریایی درطی انجام آزمایش‌های ستونی

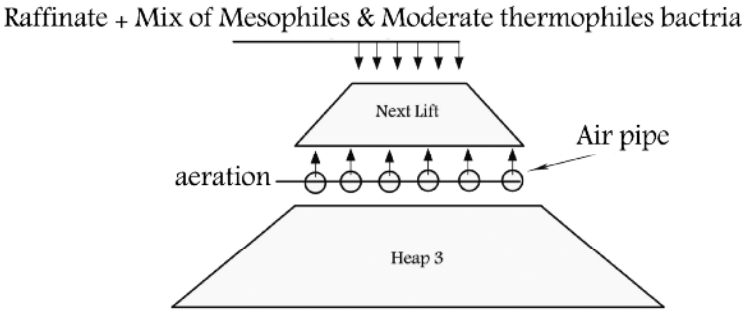
No. Column	ORP (mV, Ag/AgCl)			pH		
	Average	Max	Min	Average	Max	Min
1	603	704	416	1.7	2.1	1.2
2	650	717	400	1.6	2.1	1.15
3	600	710	400	1.87	2.35	1.35
4	389	411	370	2.1	3.05	1.52
5	381	416	350	2.79	3.76	1.74

۴- جمع بندی وپیشنهادات

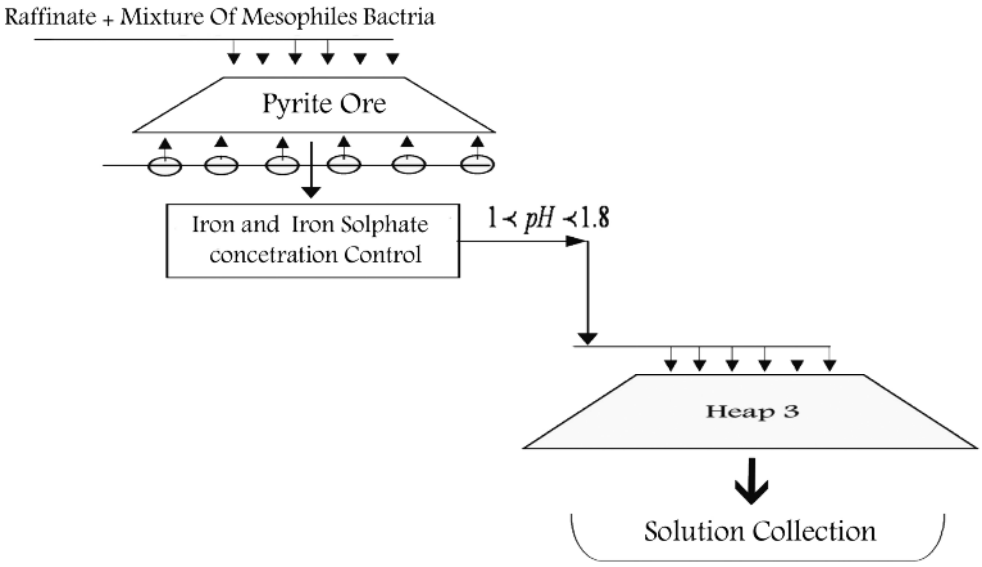
آنالیز شیمیایی و مینرالوژی نشان داد که کانسنگ به کار رفته در هیپ ۳ مخلوطی از کانی‌های اکسیدی و سولفیدی که دارای ۰/۲٪ مس در بخش سولفیدی و ۰/۱۸٪ مس در بخش اکسیدی می‌باشد. کانی‌های سولفیدی غالبا کوولیت و کالکوپیریت بوده و همچنین میزان پیریت در حدود ۱۰٪ می‌باشد که برای فرآیندباکتریایی قابل توجه می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده در ظروف لرزان نشان‌دهنده این بود که آهن فریک درلیچینگ باکتریایی موثر واقع نشد، در حالی استفاده از آهن فرو در لیچینگ باکتریایی موثر واقع شده و باعث افزایش بازیابی شد. استفاده از باکتری‌های ترموفیل معتدل در مقایسه با مزوفیل باعث افزایش بیشتر بازیابی مس شده به طوری که بازیابی با استفاده از باکتری‌های مزوفیل با نسبت تلقیح A و در دمای ۳۲ درجه سانتی-گراد ۸۶درصد و بااستفاده از باکتری‌های ترموفیل معتدل و دمای ۵۰ درجه ۸۹ درصد شد. pH برابر ۱/۲ بیشترین بازیابی را بدنبال داشت.

نتایج آزمایش‌های ستونی نشان داد که در فرآیند باکتریایی، با استفاده از باکتری‌های مزوفیل و دمای محیط ($۲۵^{0}C$) نسبت به فرآیند شیمیایی و دمای محیط بازیابی در حدود ۳۰ درصد و با استفاده از باکتری‌های ترموفیل معتدل و دمای ۵۰ درجه سانتی گراد، ۴۰ درصد افزایش داشته است. در فرآیند شیمیایی و باکتریایی استفاده از آگلومراسیون تاثیر بسزایی در افزایش بازیابی نهایی نشان نداد و تنها نرخ استخراج بالاتر و میزان مصرف اسید کمتر در مقایسه با خاک بدون آگلومره را به دنبال داشت.

با توجه به اینکه کانسنگ به کار رفته در هیپ ۳ مخلوطی ازکانی‌های اکسیدی و سولفیدی و با توجه به افزایش چشمگیر بازیابی (حدود ۳۰ درصد) با فرآیند باکتریایی در دمای محیط می‌توان با استفاده سیستم هوادهی در لیفت‌های بعدی و استفاده از مخلوط مناسب باکتری‌های مزوفیل به افزایش بازیابی هیپ دست یافت(شکل ۱۷). از آن جا که دمای هیپ پس از انجام واکنش‌های داخل هیپ به بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و بعضاً تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد، می‌توان با اضافه کردن مخلوط باکتری‌های مزوفیل و ترموفیل معتدل، بدین صورت که، ابتدا باکتری‌های مزوفیل فعالیت خود را در دمای محیط آغاز کرده و پس از افزایش دمای داخل هیپ (بدلیل واکنش‌های شیمیایی، حضور پیریت و کانی‌های غیرفلزی) فعالیت باکتری‌های مزوفیل کاسته شده و جای خود را به باکتری‌های ترموفیل معتدل می‌دهند، افزایش بازیابی هیپ شیمیایی را فراهم نمود. از سوی دیگر، در صورت عدم امکان هوادهی در لیفت ابتدایی می‌توان با استفاده از خاک پیریتی و باکتری‌های مزوفیل عامل اکسنده(آهن فریک) را تولید و بر روی هیپ پاشش کرد(شکل۱۸).



شکل(۱۷): شمای پیشنهادی برای افزایش بازیابی‌هیپ ۳



شکل (۱۸): شمای پیشنهادی برای افزایش بازیابی هیپ۳

مراجع

[1] M. Ranjbar, M. Schaffie, M. Pazouki, R. Ghazi, A. Akbary, S. Zanddevakili, S.A. Seiedbaghery; "Application potential of biohydrometallurgy in the Iranian mining industry", Advanced Materials, (2007), 38-41.

[2] Z. Sarcheshmehpour, A. Lakzian , A. Fotovat, A. Berenji, G. Haghnia, S. A. Seyed Bagheri; " Possibility of using chemical fertilizers instead of 9K medium in bioleaching process of low-grade sulfide copper ores",Hydrometallurgy 96, (2009), 264–267.

[3] P. Devasia, K.A.Natarajan; "Bacterial leaching biotechnology in the mining industry", (2004), 40-49.

[4] D.E.Rawlings, D.B.Gohnson, "Biomining", (2007), Springer.

[5] J.H.Todd, N.Holder, T.Stanek; "Thermophilic bioleaching of chalcopyrite concentrates with GEOCOAT process", jour. Alta 2002 Nickel/Cobalt 8 - Copper 7 conference, perth, Australia,1-19.

[6] H.R. Watling; "The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides — A review", Hydrometallurgy 84, (2006), 81–108.

[7] G.Petersen, D.G. Dixon; "Competitive bioleaching of pyrite and chalcopyrite", Hydrometallurgy, (2006), 40-49.

[8] P.Devasia, K.A.Natarajan; "Bacterial leaching biotechnology in the mining industry",(2004),40-49.

Copper Mine", In: Ciminelli, S.T., Garcia, O. (Eds.), Biohydrometallurgy: Fundamentals, Technology and Sustainable development, part one. Elsevier, Amsterdam,(2001), 393–396.

[21] M.P. Silverman; "Mechanism of Bacterial Pyrite oxidation", journal of Bacteriology, (1967), 1046-1051.

[22] Z. Manafi; "Column bioleaching of agglomerated low-grade copper ore by Thiobacillus ferrooxidans and Thiobacillus thiooxidans", MS Thesis, Islamic Azad University of Jahrom,(2002.), Iran.

[23] C.L. Brierley; "Mining biotechnology: research to commercial development and beyond. In: Rawling, D.E. (Ed.), Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes. Springer-Verlag, Landes, Berlin (Chapter 1),(1997).

[24] Y.Rodrıguez, A.Ballester, M.L. Blazquez, F.Gonzalez, J.A. Munoz, "New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature", Hydrometallurgy, (2003), 37-46.

[25] K.A. Natarajan; "Electro chemical aspects of biolcaching of base treatal sulfides, microbial mineral recovery", erlich,H., pub New York,(1998).

[9] G.Leduc, G.D.Ferroni; "The chemolithotrophic bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*" ,Microbiology,(1994),103-20.

[10] Brandle; "Microbial leaching of metals" Zurich Switzerland, (2001), 191-206.

[11] J.A.Brierley; "A perspective on developments in biohydrometallurgy", Hydrometallurgy 94, (2008), 2–7.

[12] H.A. Schnell; "Bioleaching of copper", edited by Rawling, Springer, (1997), 21-43.

[13] G.E. McClelland; "Agglomerated and unagglomerated Heap leaching behavior is copared in production Heap",Mining Engineering,(1986),500-503.

[14] S. bouffard; "review of agglomeration particle and fundamental in heap leaching", mineral processing & Extractive metal, (2005).rev, 26:233-294.

[15] K.A.Lewandowski, S.K.Kawatra; "Agglomeration for copper Heap leaching", (cu2007-volum5 (Book1)), 439-451.

[16] H.Sakaguchi, E.T. Arpad, M. silver; "microbiological oxidation of synthetic chalcocite and covellite by Thiobacillus ferrooxidans",Microbiology,(1976),7-10.

[17] M. Lotfalian, M. Ranjbar, M. Schaffie, E.Darezereshki, Z.Manafi, S.A. Seyedbagheri;" Bioleaching of low-grade chalcopyritic ore using thermophile bacteria",Journal of Separation Science and Engineering, (2009), 57-65.

[18] N. Pradhan, K.C. Nathsarma, K. Srinivasa, L.B. Sukla, B.K.Mishra; "Heap bioleaching of chalcopyrite: A review", Minerals Engineering, (2008), 355-365.

[19] P.J. van Staden, B. Shaidaee, M. Yazdani;" A Collaborative Plan Towards The Heap Bioleaching Of Low Grade Chalcopyritic Ore From A New Iranian Mine" ,Proceedings of the 16th International Biohydrometallurgy Symposium, Cape Town, South Africa,(2005), September.

[20] S.A.SeyedBagheri, H.R.Hassani; "Isolation and preliminary identification of some iron and sulfur oxidizing bacteria from Sarcheshmeh

Optimization of copper recovery from Sarcheshmeh low grade ores by bacterial leaching

E.Darezereshki[1,2], M.Schaffei[2,3], Z.Manafi[4], M. Lotfalian [1]

1.Post graduate of Mineral processing,Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman.
2. Mineral Industries Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman.
3. Assistant Prof. of Chemical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman.
4.Post graduate, National Iranian Copper Industry Company, Sarcheshmehn.

A R T I C L E I N F O

Article history :
Received 1 March 2009
Received in revised form 12 October 2009
Accepted 22 October 2009

Keywords:
Bacterial leaching
Mesophiles
Moderate thermophiles
Heap
Copper
Sarcheshmeh

A B S T R A C T

It is well-known that the rate of chemical leaching of copper sulfides in limited. So, the important question is whether a mixture of Fe-S oxidizing bacteria can be used to increase the copper recovery from this part of ore and what are the optimum conditions? Therefore, this study is aimed at studying the influence of important parameters such as pH, Fe^{+2} and Fe^{+3} concentration and to determine the optimum operating conditions for increasing copper recovery from Sarcheshmeh low grade heap 3 ore. Using Taguchi method design, shake flask tests were designed and performed in addition to column tests. From the results of these experiments it can be pointed out that copper recovery can be increased to about 90% under optimum condition. Compared to the results of chemical leaching, copper recovery by mixed mesophiles is increased about 30% and that by moderate thermophiles about 40%.

All rights reserved.