



تأثیر اندازه‌ی ذرات بر فروشویی زیستی اورانیم از سنگ معدن ساغند به وسیله‌ی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان

عباس رشیدی*^۱، رضا روستا آزاد^۲، سیدجابر صفدری^۱

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران
۲. دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۹۴۶۵-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: اثر اندازه‌ی ذرات سنگ معدن آنومالی‌های ۱ و ۲ ساغند بر روی فروشویی زیستی اورانیم به وسیله‌ی باکتری اسیددوست اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در مقیاس فلاسک لرزان بررسی شد. نتایج تجربی به دست آمده نشان داد که گونه‌ی میکروبی به کار رفته برای استخراج اورانیم از سنگ معدن آنومالی‌های ۱ و ۲ ساغند مناسب می‌باشد. در گستره‌ی ابعادی بررسی شده، استخراج اورانیم از سنگ معدن آنومالی یک، در حالت $d_{80}=108\mu\text{m}$ سریع‌تر می‌باشد، در حالی که برای آنومالی دو، سطح خردایش $d_{80}=160\mu\text{m}$ به عنوان اندازه‌ی مناسب به دست آمد. نتایج نشان داد که توزیع اندازه‌ی ذرات سنگ معدن در گستره‌ی مورد بررسی، تأثیر قابل توجهی بر فعالیت میکروبی نمی‌گذارد؛ ضمن این که براساس نتایج اکسایش باکتریایی، اثرات منفی و سمیت ناشی از حضور اجزای جامد و حل شده‌ی سنگ معدن در گستره‌ی مورد بررسی پارامترها، محدودکننده‌ی فعالیت باکتری نمی‌باشند، و جمعیت میکروبی رشد یافته فرایند مورد نظر را به خوبی به انجام می‌رساند.

کلید واژه‌ها: فروشویی زیستی، اندازه‌ی ذرات، اورانیم، باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان

Particle Size Effects in Bioleaching of Uranium From Saghand Ore by *Acidithiobacillus Ferrooxidans* (A.f.)

A. Rashidi*^{1,2}, R. Roosta Azad², S.J. Safdari¹

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran
2. Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 11365-9465, Tehran – Iran

Abstract: The effect of mineral particle size on the bioleaching of uranium from Saghand mine (anomaly 1&2) by acidophilic mesophile *Acidithiobacillus ferrooxidans* was investigated in a shake flask. The findings are indicating that this strain is suitable for the uranium recovery from the mentioned ore. In the range of our studies the uranium recovery is faster in the case of $d_{80}=108$ micron from anomaly 1, while, a comminution level of $d_{80}=160$ micron was obtained as an appropriate size for the anomaly 2. The results showed that the particle size distribution of the mineral in this range did not considerably influence the microbial activity. Also, based on the results of bacterial oxidation, the negative effects and toxicity due to the presence of solid and solute components do not put a limit on the microbial activity, and at the tested parameters range, the grown microbial population is performing the desired process excellently.

Keywords: Bioleaching, Particles Size, Uranium, *Acidithiobacillus Ferrooxidans*



۱. مقدمه

۱۸ μm محاسبه و با توجه به اندازه‌ی سلول‌های به کار گرفته شده (۱ تا ۱٫۵ μm)، اثرات برش مکانیکی ناچیز در نظر گرفته شد.

بسامد برخورد ذره-ذره به شدت به اندازه‌ی ذره وابسته است و این موضوع با افزایش اثرات منفی روی سلول‌ها بر اثر کاهش اندازه‌ی ذرات هم‌خوانی دارد. از نظر برخورد ذرات، تثبیت سلول‌های باکتریایی یا ذرات کانی می‌تواند مفید باشد. در خصوص شکل ذرات نیز نشان داده شده است که در اندازه‌ی برابر، اثرات منفی روی سلول‌ها با ذرات کروی بیش‌تر از ذرات نامنظم و زاویه‌دار است. با ریزتر شدن ذرات ($d < \lambda$)، جرم و سرعت نهایی ته‌نشینی ذره کاهش می‌یابد و عمده‌ی ذرات، حرکت سیال در خطوط جریان گردابی را دنبال می‌کنند، لذا احتمال برخورد ذره-ذره کاهش می‌یابد، زیرا سرعت نسبی ذرات به صفر میل می‌کند. نرخ غیرفعال‌سازی سلول‌های باکتریایی در $\frac{\lambda}{d} \approx 1$ به حداکثر مقدار می‌رسد (اندازه‌ی ذرات). در خصوص جنبه‌ی دوم، ذرات کوچک‌تر باعث افزایش سطح و آزادسازی بیش‌تر کانی هدف و در نتیجه افزایش آهنگ واکنش فروشویی می‌شوند، اما این امر تا جایی منطقی می‌باشد که باعث آسیب به سلول‌ها نگردد؛ ضمن این که کاهش اندازه‌ی ذرات، فرایندهای پایین‌دستی فرآوری معدنی را مشکل‌تر می‌سازد و هم‌چنین هزینه‌ی خردایش در بالادست افزایش می‌یابد. در عین حال، کاهش اندازه‌ی ذرات باعث آزادسازی بیش‌تر کانی‌های غیرمطلوب نیز می‌گردد که انحلال آن‌ها می‌تواند باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و نیز عملکرد نامناسب فرایند گردد.

هدف از بررسی حاضر، مشخص نمودن اثرات اندازه‌ی ذرات در محدوده‌ی ابعادی ۸۰ تا ۱۶۰ میکرون بر روی فروشویی زیستی اورانیم از سنگ معدن آنومالی‌های ۱ و ۲ معدن ساغند توسط باکتری اسیدی تیو باسیلوس فرواکسیدان بوده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ میکروارگانیزم، محیط و مایه‌ی تلقیح

میکروب معتدل و اسیددوست مورد استفاده در این مطالعه گونه‌ای از اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان بود که در پژوهش‌های پیشین پژوهش‌گران دانشگاه صنعتی شریف جداسازی شده بود [۱۳].

فرایندهای هیدرومتالورژیکی که فروشویی باکتریایی نیز بخش مهمی از آن‌ها می‌باشد، نقش مهمی در استخراج فلزات از سنگ معدن کم‌عیار بازی می‌کنند. روش هیدرومتالورژی زیستی برای فرآوری برخی کانی‌های اورانیم نیز به کار گرفته شده است [۱ تا ۵]. میکروب‌های اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان (A.f.)^(۱)، اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدان (A.t.)^(۲)، لپتوسپیریلیم فرواکسیدان (L.f.)^(۳)، به طور معمول در این فرایندها به کار گرفته می‌شوند. گستره‌ی دمایی رشد این میکروب‌ها ۱۰ تا ۳۷°C و بازه‌ی pH رشد آن‌ها ۱٫۳ تا ۴ می‌باشد [۶]. یکی از پارامترهای مهم که بر سرعت و بازده فروشویی زیستی تأثیر می‌گذارد، اندازه‌ی بعد از خردایش ذرات سنگ معدن می‌باشد. تأثیر اندازه‌ی ذرات را می‌توان به صورت سایش فیزیکی، در دسترس بودن کانی هدف برای فروشویی، انتقال جرم و غیره تفسیر کرد. اثرات اندازه‌ی ذرات بر فروشویی زیستی فلزات به وسیله‌ی میکروارگانیزم‌ها در برخی از موارد گزارش شده است [۷، ۸ و ۹]. به طور کلی تأثیر ذرات سنگ معدن بر عملکرد فروشویی زیستی در راکتورها، متأثر از نوع هم‌زن، سرعت هم‌زنی، زمان اختلاط، غلظت جامدات، اندازه و شکل ذرات می‌باشد. پارامتر اندازه‌ی ذرات را می‌توان از دو جنبه مورد بررسی قرار داد، یکی تأثیر آن بر عملکرد میکروارگانیزم و دیگری تأثیر آن بر جنبه‌های سینتیکی، ترمودینامیکی و عملیاتی فرایند فروشویی. در خصوص جنبه‌ی اول، نتایج برخی پژوهش‌ها [۱۰] نشان می‌دهد که یک اندازه‌ی بحرانی وجود دارد که در آن اثر معکوس روی سلول‌ها به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پایین‌تر از آن، اثرات منفی کم‌تر می‌شود. اثرات منفی روی سلول‌ها می‌تواند بر اثر برخورد ذرات باشد که با شدت هم‌زدن و غلظت جامدات ارتباط مستقیم دارد [۱۱]. با نزدیک‌تر شدن اندازه‌ی کوچک‌ترین گردابه در جریان آشفته^(۴) (λ)، به اندازه‌ی میکروب‌ها، اثرات معکوس برشی روی سلول‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد [۱۲]. حساسیت برشی سلول‌ها به اندازه‌ی آن‌ها و وضعیت دیواره‌ی سلولی در آن‌ها وابسته است. از این دیدگاه، اثرات معکوس ناشی از برش در میکروارگانیزم‌های نوع آرکی ترموفیل مانند گونه‌ی سولفولوبوس، از مزوفیل‌ها و ترموفیل‌های معتدل بیش‌تر است. در یک بررسی [۱۰] در سرعت معینی از هم‌زدن، λ برابر ۹ تا



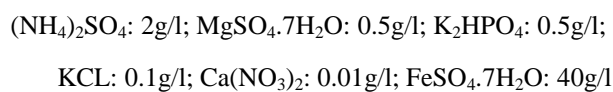
۳.۲ آزمایش‌ها

آزمایش‌های فروشویی زیستی در ارلن مایر ۲۵۰ ml به صورت دو بار تکرار و یک کنترل (بدون میکروارگانیزم) انجام شدند. هر ارلن حاوی ۹۰ میلی‌لیتر محیط کشت، ۵۰ g/l سنگ معدن و ۱۰ میلی‌لیتر مایه‌ی تلقیح بود. در آزمایش‌های کنترل به جای مایه‌ی تلقیح، ۱۰ میلی‌لیتر مخلوط ده درصد فرم‌آلدئید در متانول (به منظور اطمینان از عدم وجود میکروارگانیزم) اضافه شد. آزمایش‌ها در انکوباتور - تکاننده در سرعت ۱۵۰ rpm و در دمای ۳۵°C انجام شدند. غلظت اولیه‌ی زیست توده از مرتبه‌ی ۱۰^۶ سلول بر میلی‌لیتر بود. pH محیط به صورت روزانه با سولفوریک اسید یا سدیم هیدروکسید ۱۰N در مقدار ۲ (مطابق جدول ۲) تنظیم می‌شد. برای تعیین غلظت اورانیم، آهن و باکتری، نمونه‌برداری به صورت روزانه انجام و حجم معادل محیط کشت بدون آهن با pH=۲ به محلول تحت آزمایش اضافه می‌شد. حجم ناشی از تبخیر نیز با سولفوریک اسید رقیق با pH=۲ جبران می‌شد.

۴.۲ تجزیه‌ها

شمارش سلولی به صورت مستقیم و با روش ASTM D 4454-85 (Reapproved 2009) انجام شده است [۱۶]. pH و پتانسل محلول با pH متر مدل ۸۲۷ کمپانی متروهم^(۵) اندازه‌گیری شده‌اند. در الکتروود مرجع نقره/نقره کلرید (اندازه‌گیر پتانسیل اکسایش-کاهش)، عنصر مرجع، سیستم محلول Ag/AgCl/KCl (غلظت الکترولیت مرجع ۳ مول بر لیتر) بود. غلظت آهن کل محلول با دستگاه جذب اتمی و غلظت اورانیم در محلول با دستگاه ICP اندازه‌گیری شد.

سلول‌های اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان به صورت هوازی در محیط حاوی اجزای زیر رشد داده شدند [۱۴]:



کشت‌های اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در فلاسک‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری هر یک حاوی ۹۰ میلی‌لیتر محیط و ۱۰ میلی‌لیتر مایه‌ی تلقیح در دمای ثابت ۳۵°C در انکوباتور - تکاننده در سرعت ۱۸۰ rpm گرماگذاری شده و در فاز نمایی برای تلقیح آزمایش‌های فروشویی زیستی به کار گرفته شدند.

۲.۲ سنگ معدن

نمونه‌های سنگ معدن آنومالی‌های ۱ و ۲ معدن ساغند توسط شرکت اکتشاف و تأمین مواد اولیه‌ی صنعت هسته‌ای ایران (امکا) تهیه شدند. ترکیب شیمیایی این دو نوع سنگ معدن به شرح جدول ۱ می‌باشد.

عملیات خردایش این دو نمونه‌ی معدنی با هدف تهیه‌ی سه اندازه‌ی متفاوت از هر یک در گستره‌ی ۸۰ تا ۱۶۰ میکرومتر صورت گرفت. محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات براساس درجه‌ی آزادی در مطالعات میکروسکوپی روی سنگ معدن انتخاب شد. در مطالعات قبلی، اندازه‌ی ذرات برای آزادشدن کانی اورانیم از سنگ معدن آنومالی‌های ۱ و ۲ ساغند، حدود یک‌صد میکرون اعلام شد [۱۵]. نمونه‌های خرد شده، برای تعیین توزیع ذرات مورد تجزیه‌ی سردی قرار گرفتند.

جدول ۱. نتایج تجزیه‌ی عنصری نمونه‌های سنگ معدن

U	S	Cl	MgO	Fe _۲ O _۳	SiO _۲	
۴۲۰ ppm	۴۷۵۵ ppm	۲۷۰۶ ppm	۳۰٪	۳۰٪	۲۸٪	آنومالی ۱
۶۲۲ Ppm	۱۴۴۰۷ ppm	۷۲۴۴ ppm	۱۳٪	۵۸٪	۲۰٪	آنومالی ۲

جدول ۲. مقادیر اسید/باز مصرفی برای ثابت نگه‌داشتن pH محلول*

آنومالی ۲						آنومالی ۱					
d=۱۶۰		d=۱۰۸		d=۸۴		d=۱۶۰		d=۱۰۸		d=۸۴	
اسید (μl)	باز (μl)	اسید (μl)	باز (μl)	اسید (μl)	باز (μl)	اسید (μl)	باز (μl)	اسید (μl)	باز (μl)	اسید (μl)	باز (μl)
۴۰۰	۵۰	۴۵۰	۵۰	۴۲۵	۰	۵۰۰	۲۰	۵۰۰	۴۰	۴۵۰	۵۰

* مقادیر اضافه شده در خلال ۹۶ ساعت اول آزمایش



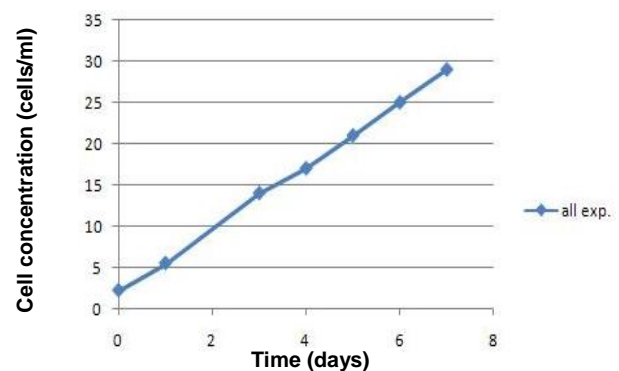
۳. نتایج و بحث

در تمامی شکل‌ها، d برابر اندازه‌ای از حفره‌های سردی است که ۸۰ درصد جرمی ذرات از آن عبور کرده‌اند (d_{80}) و یکای آن میکرومتر می‌باشد؛ هم‌چنین BL مخفف فروشویی زیستی و CL مخفف فروشویی شیمیایی (آزمایش کنترل) می‌باشد.

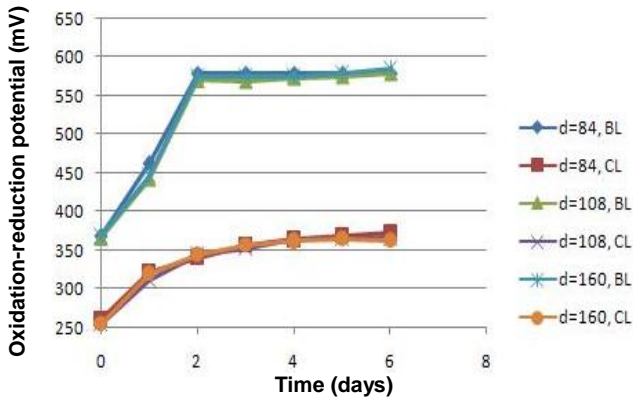
۱.۳ تأثیر اندازه‌ی ذرات بر رشد میکروبی

در این پژوهش، غلظت سلول‌ها در فاز مایع و پتانسیل اکسایش-کاهش محلول به عنوان معیار رشد میکروبی در نظر گرفته شدند. بررسی‌های مختلف نشان داده است که در فروشویی زیستی غیرمستقیم با ماده‌ی مغذی اصلی محلول، بخش اعظم سلول‌ها در محلول به صورت آزاد می‌باشند و تعداد سلول‌های چسبیده به ذرات در مقایسه با سلول‌های آزاد قابل اغماض می‌باشد [۶، ۹، ۱۷ و ۱۸]؛ در نتیجه، غلظت اندازه‌گیری شده به روش میکروسکوپی مستقیم را می‌توان معیار نسبتاً قابل قبولی از غلظت سلولی در محلول در نظر گرفت. در آزمایش‌های مختلف این بررسی، تفاوت چندانی در تغییرات غلظت سلولی با زمان مشاهده نشد. به عبارت دیگر، اندازه‌های متفاوت از ذرات هر دو نوع سنگ معدن در محدوده‌ی آزمایش شده، به میزان قابل توجهی بر رشد سلول‌ها تأثیر نمی‌گذارد؛ ضمن این که سلول‌ها از همان ابتدا وارد فاز نمایی رشد شده و تأخیر مشهودی در فرایند رشد مشاهده نگردید. شکل ۱ نحوه‌ی رشد جمعیت میکروبی در این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

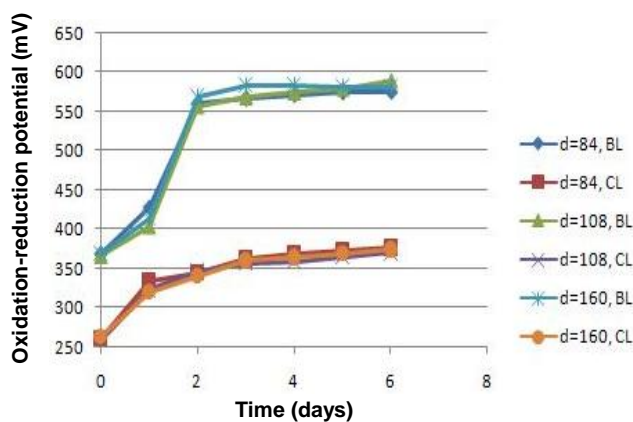
طبق بحث بسامد برخورد و براساس نتایج سایر محققین [۱۰]، محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات در این پژوهش به حد کافی بزرگ‌تر از λ انتخاب شد، لذا طبق تحلیل ارایه شده انتظار می‌رفت در مجموع اثرات برش مکانیکی روی سلول‌ها به غیرفعال‌سازی عمده‌ای در باکتری‌ها منجر نشود که این امر با توجه به روند رشد سلولی (شکل ۱) و نیز فعالیت باکتری‌ها (شکل‌های ۲ و ۳) تأیید شده است.



شکل ۱. تغییرات غلظت سلولی با زمان در محلول حاصل از فروشویی هر دو نوع سنگ معدن.



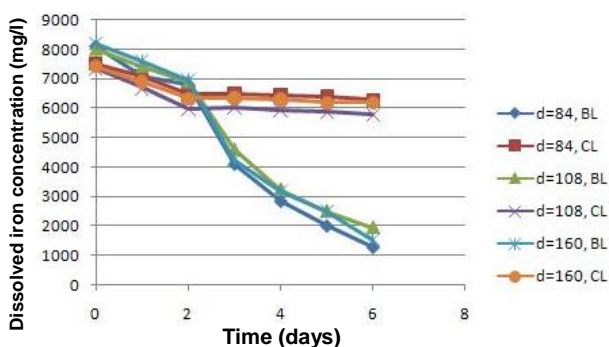
شکل ۲. تغییرات پتانسیل محلول با اندازه‌ی ذرات سنگ آنومالی ۱ در زمان‌های مختلف.



شکل ۳. تغییرات پتانسیل محلول با اندازه‌ی ذرات سنگ آنومالی ۲ در زمان‌های مختلف.

۲.۳ تأثیر اندازه‌ی ذرات بر پتانسیل اکسایش-کاهش

شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات پتانسیل اکسایش-کاهش با زمان را در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهند. براساس این نتایج پتانسیل اکسایش-کاهش محلول چه در آزمایش‌های کنترل و چه در آزمایش‌های میکروبی، از اندازه‌ی ذرات تقریباً تأثیر نمی‌پذیرد و در حضور باکتری‌ها از حدود ۳۵۰ میلی‌ولت به حدود ۶۰۰ میلی‌ولت افزایش می‌یابد در حالی که در آزمایش‌های کنترل، این تغییرات از حدود ۲۵۰ به حدود ۳۵۰ میلی‌ولت می‌باشد. دلیل بدیهی افزایش پتانسیل در آزمایش‌های میکروبی، فعالیت باکتری‌ها و اکسایش میکروبی یون‌های فرو به فریک می‌باشد و افزایش پتانسیل در آزمایش‌های کنترل را می‌توان به اکسایش یون‌های فرو توسط اکسیژن محلول مرتبط دانست [۱۹]. لازم به ذکر است تفاوت پتانسیل‌های اولیه در آزمایش حاوی باکتری با آزمایش کنترل به علت حضور آهن فریک اضافه شده در مایه‌ی تلقیح می‌باشد.



شکل ۵. تغییرات غلظت آهن محلول با اندازه‌ی ذرات سنگ آنومالی ۲ در زمان‌های مختلف.

از آن جایی که تبدیل آهن فرو به فریک در حضور باکتری‌ها به طور کامل انجام می‌شود، رسوب یون‌های فریک و در نتیجه کاهش غلظت آهن محلول نیز بیش‌تر از آزمایش‌های کنترل می‌باشد. در آزمایش‌های کنترل غلظت آهن محلول از حدود ۷۰۰۰ تا ۷۵۰۰ به حدود ۵۸۰۰ تا ۶۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد در حالی که در حضور باکتری‌ها، این کاهش از حدود ۸۰۰۰ به حدود ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که غلظت آهن محلول، تقریباً مستقل از اندازه‌ی ذرات می‌باشد و به طور مستقیم به پتانسیل اکسایش-کاهش وابسته است؛ هرچند که از نظر آهنگ تغییرات بین این دو پارامتر رابطه‌ی منطقی مشاهده نگردید. در آزمایش‌های با سنگ آنومالی ۱، روند کاهش غلظت آهن محلول متناظر با روند افزایش پتانسیل اکسایش-کاهش محلول می‌باشد ولی در آزمایش‌های سنگ آنومالی ۲، شیب کاهش غلظت آهن محلول بعد از ۴۸ ساعت بیش‌تر از قبل می‌باشد. با توجه به ماهیت جامد رسوب یون فریک، و در نتیجه احتمال بروز برخی تأثیرات منفی از جمله افزایش مشکلات فرایندی و نیز غیرفعال‌سازی سطوح واکنش، می‌بایست مطالعات تکمیلی به منظور بررسی تأثیرات کاهش غلظت اولیه‌ی آهن بر نتایج و نیز امکان چندمرحله‌ای کردن فرایند با غلظت‌های متفاوت آهن صورت گیرد.

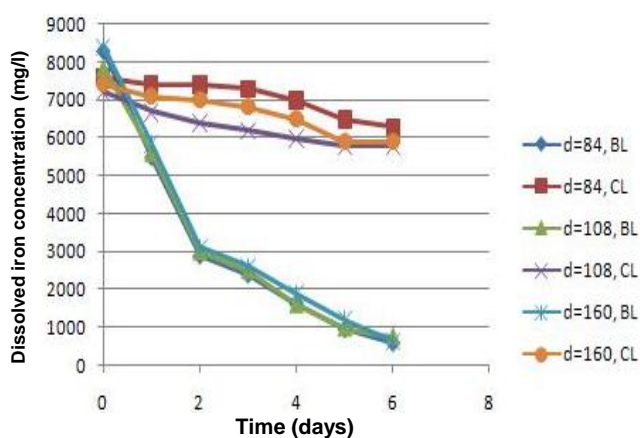
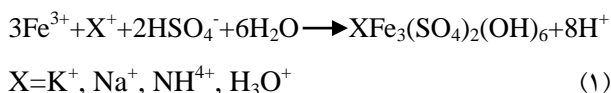
۳.۳. تأثیر اندازه‌ی ذرات بر pH محلول

میزان قدرت اسیدی محیط فروشویی زیستی از موازنه‌ی پروتون بین واکنش‌های مصرف‌کننده (انحلال اکسیدها/ کربنات‌ها، اکسایش آهن و غیره) و واکنش‌های تولیدکننده‌ی سولفوریک اسید و هیدرولیز آهن حاصل می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ نمونه‌ای

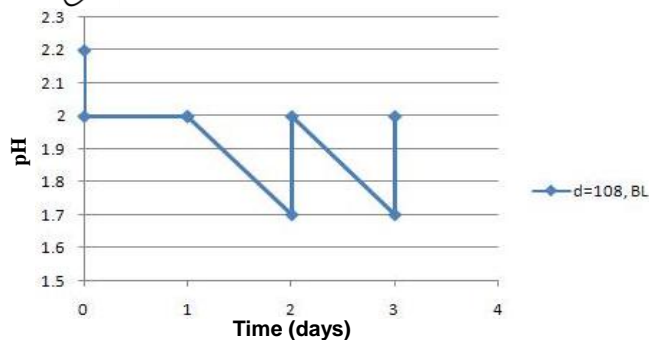
پتانسیل در حضور میکروب‌ها تقریباً طی ۴۸ ساعت به بیشینه مقدار خود می‌رسد که این افزایش در مورد سنگ آنومالی ۱ تقریباً با آهنگ ثابت می‌باشد، در حالی که در مورد سنگ آنومالی ۲ در ۲۴ ساعت اول، آهنگ افزایش پتانسیل به طور قابل ملاحظه‌ای کم‌تر از ۲۴ ساعت دوم می‌باشد؛ چنین روندی به طور خیلی مختصر در تغییرات غلظت سلولی نیز مشاهده شد. دلیل این امر را می‌توان کندبودن فاز شتاب رشد سلولی^(۶) (مرحله‌ی شروع رشد تا رسیدن به آهنگ رشد بیشینه) در مورد سنگ معدن آنومالی ۲ دانست؛ با توجه به ترکیب دو نوع سنگ معدن به کار رفته، محتوای بالاتر اورانیم و کلر در سنگ آنومالی ۲، که از بازدارنده‌های مهم در فعالیت میکروبی می‌باشند، را می‌توان عامل کندبودن فاز شتاب دانست.

۳.۳. تأثیر اندازه‌ی ذرات بر غلظت آهن محلول

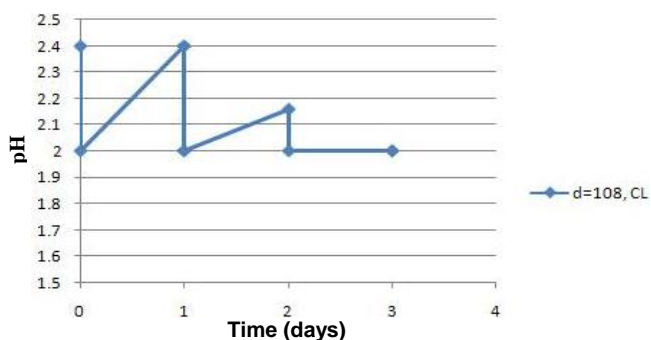
در شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات غلظت آهن محلول با زمان نشان داده شده است. به طور کلی هم در آزمایش‌های کنترل و هم در حضور باکتری‌ها، با افزایش غلظت یون فریک که با افزایش پتانسیل اکسایش-کاهش متناظر می‌باشد، از غلظت آهن محلول کاسته می‌شود که دلیل آن رسوب یون‌های فریک در طول واکنش‌های مربوط از جمله تشکیل ژاروسیت (سولفات آهن هیدروکسی) می‌باشد:



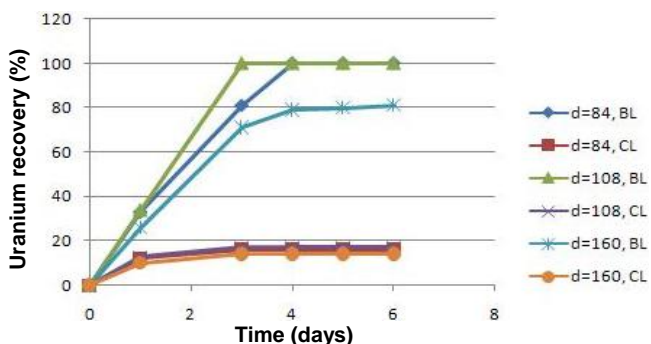
شکل ۴. تغییرات غلظت آهن محلول با اندازه‌ی ذرات سنگ آنومالی ۱ در زمان‌های مختلف.



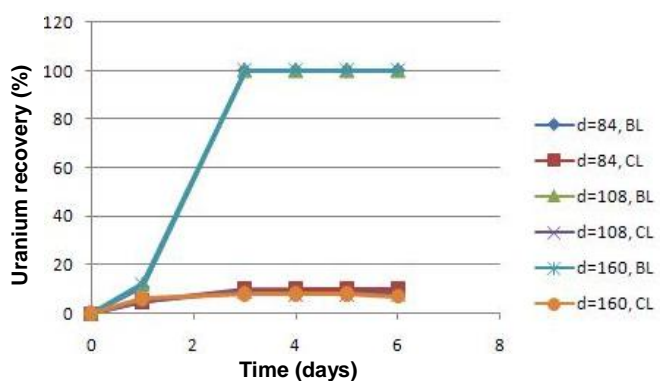
شکل ۶. تغییرات زمانی pH محلول با فروشویی باکتریایی سنگ آنومالی ۱ با اندازه‌ی ذرات برابر با ۱۰۸ میکرومتر.



شکل ۷. تغییرات زمانی pH محلول با فروشویی شیمیایی (آزمایش کنترل) سنگ آنومالی ۱ با اندازه‌ی ذرات برابر با ۱۰۸ میکرومتر.



شکل ۸. تغییرات بازیابی اورانیم با اندازه‌ی ذرات سنگ آنومالی ۱ در زمان‌های مختلف.



شکل ۹. تغییرات بازیابی اورانیم با اندازه‌ی ذرات سنگ آنومالی ۲ در زمان‌های مختلف.

از تغییرات pH در آزمایش‌های انجام شده می‌باشند. مقادیر اسید/باز مصرفی برای ثابت نگه‌داشتن pH محلول در حالت‌های مختلف برای ۹۶ ساعت اول آزمایش در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در آزمایش‌های کنترل، پایین‌ترین pH ثبت شده ۲ بوده است و به این ترتیب فقط در pHهای بالاتر از ۲، اسید اضافه می‌شد. با توجه به مقادیر بسیار کم جدول ۲ که متأثر از مقیاس پایین آزمایش‌ها می‌باشند، و به علت مقادیر متفاوت آهن اولیه که یکی از نتایج آن تفاوت در مقادیر رسوب فریک و تولید پروتون می‌باشد، و خطاهایی مانند خطای اندازه‌گیری pH، نمی‌توان تفسیر درستی از این نتایج ارائه داد؛ ولی آن‌چه که در خصوص تفاوت اندازه‌ی ذرات می‌توان گفت این است که بسته به ماهیت کانی‌هایی که با خردایش بیش‌تر امکان انحلال آن‌ها بالا می‌رود، کاهش اندازه می‌تواند اسیدزا (در خصوص کانی‌های سولفیدی) یا مصرف‌کننده‌ی اسید باشد. در آزمایش‌های این بررسی، عمده‌ی مصرف اسید در ۲۴ ساعت اول آزمایش بوده است که هم می‌تواند ناشی از مصرف در اکسایش یون فرو باشد و هم مربوط به انحلال کانی‌های همراه مصرف‌کننده‌ی اسید که عمدتاً زودانحلال نیز می‌باشند.

۵.۳ تأثیر اندازه‌ی ذرات بر میزان انحلال اورانیم

شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات بازیابی اورانیم با اندازه‌ی ذرات در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها حداقل زمان لازم برای رسیدن به بازیابی بیشینه در سیستم ناپیوسته، سه روز می‌باشد. بازیابی اورانیم از سنگ معدن آنومالی یک، در حالت $d_p = 108 \mu m$ از دو حالت دیگر بیش‌تر است، در حالی که برای آنومالی دو، سطح خردایش $d_p = 160 \mu m$ منجر به آهنگ و میزان برابری از بازیابی شده است. برای آنومالی ۱ با سطح خردایش ۱۰۸ میکرون طی ۳ روز و با سطح خردایش ۸۴ میکرون طی ۴ روز، و برای آنومالی ۲ با هر سه سطح خردایش طی ۳ روز، بازیابی حدود ۱۰۰ درصد به دست آمد. حداکثر بازیابی برای سطح خردایش ۱۶۰ میکرون آنومالی ۱ برابر ۸۰ درصد بود. در آزمایش‌های کنترل نیز حداکثر بازیابی کم‌تر از ۲۰ درصد بوده است.



ذرات کوچک‌تر باعث ایجاد سطح بیش‌تر در واحد جرم می‌شوند، لذا در صورت عدم وجود سایر محدودیت‌ها، آهنگ واکنش فروشویی بالا می‌رود. به نظر می‌رسد تفاوت‌ها در میزان بازیابی و آهنگ بازیابی فلز هدف (شکل‌های ۸ و ۹) بیش‌تر به درجه‌ی آزادی کانی‌های فلز هدف و نیز مزاحمت‌های ناشی از کانی‌های باطله وابسته است.

۴. نتیجه‌گیری

- روش فروشویی زیستی با باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان برای استخراج اورانیم از سنگ آنومالی‌های ۱ و ۲ معدن ساغند، با توجه به بازیابی بالا، گزینه‌ای مناسب برای فرآوری اورانیم می‌باشد.
- فروشویی زیستی اورانیم با میکروارگانسیم‌های معتدل و اسیددوست در گستره‌ی ابعادی ۸۰ تا ۱۶۰ میکرون تا حدی تحت تأثیر اندازه‌ی ذرات سنگ معدن قرار دارد، و این تأثیر ناشی از عوامل متعددی چون درجه‌ی آزادی کانی هدف، افزایش آهنگ واکنش‌ها و ... می‌باشد.
- اندازه‌ی مناسب برای فرآوری میکروبی ذرات سنگ معدن به وسیله‌ی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در رآکتورها، برای آنومالی ۱ حدود ۱۰۰ میکرون و برای آنومالی ۲ حدود ۱۶۰ میکرون می‌باشد.
- براساس نتایج اکسایش، اثرات منفی و سمیت ناشی از حضور اجزای جامد و حل شده‌ی سنگ معدن در محدوده‌ی بررسی شده‌ی پارامترها، محدودکننده‌ی فعالیت باکتری نمی‌باشند، و جمعیت میکروبی رشد یافته به خوبی فرایند مطلوب را به انجام می‌رساند.
- با توجه به رشد و فعالیت بسیار مناسب باکتری در این پژوهش، به نظر می‌رسد افزایش چگالی پالپ برای بهبود اقتصاد فرایند امکان‌پذیر باشد.
- براساس نتایج به دست آمده، حداقل زمان اقامت خوراک در سیستم ناپیوسته، به منظور دستیابی به حداکثر بازیابی، سه روز می‌باشد.
- نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای طراحی رآکتورهای اختلاط کامل در فرآوری میکروبی سنگ معدن آنومالی ۱ و ۲ ساغند قرار گیرد.

تجزیه و تحلیل نحوه‌ی تغییرات بازیابی اورانیم و نیز پتانسیل اکسایش - کاهش و مقایسه‌ی آن‌ها با هم نشان می‌دهد که روند تغییرات بازیابی و پتانسیل اکسایش - کاهش شبیه به هم می‌باشند به گونه‌ای که در آزمایش‌های سنگ آنومالی ۲ که پتانسیل طی افزایش دو مرحله‌ای (با شیب‌های متفاوت) به حداکثر مقدار خود می‌رسد بازده نیز به همین ترتیب و طی دو مرحله با شیب‌های متفاوت به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

با توجه به تأثیر غیرقابل ملاحظه‌ی اندازه‌ی ذرات بر فعالیت باکتری و در نتیجه بر تغییرات پتانسیل اکسایش - کاهش، دلیل متفاوت بودن آهنگ و مقدار نهایی بازیابی برای اندازه‌های مختلف ذرات را باید در جنبه‌های غیرزیستی دنبال کرد. به عبارت دیگر، کنترل‌کننده یا محدودکننده‌ی آهنگ و بازده این فرایند، عوامل غیرزیستی مانند آهنگ واکنش شیمیایی، سطح در دسترس واکنش شیمیایی، حضور عوامل کندکننده یا تسریع‌کننده‌ی انتقال و واکنش واکنش‌گرها و ... می‌باشند.

برای آنومالی ۱، سطح خردایش میانی ($d_{50}=108$) منجر به آهنگ و میزان بالاتر شده است و پس از آن به ترتیب ذرات ۸۴ و ۱۶۰ میکرونی قرار دارند. از جمله‌ی دلایل این تفاوت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کم‌تر بودن میزان بازیابی در اندازه‌ی ۱۶۰ میکرون به دلیل کاهش آزاد شدن کانی هدف با افزایش اندازه در محدوده‌ی بررسی شده می‌باشد.
- بیش‌تر بودن آهنگ بازیابی در اندازه‌ی ۱۰۸ میکرون نسبت به ۸۴ میکرون به دلیل افزایش اثرات منفی خردایش بیش‌تر مانند آزاد شدن کانی‌های همراه و شرکت آن‌ها در واکنش انحلال و ایجاد مزاحمت در انحلال کانی هدف می‌باشد.
- برای آنومالی ۲، هر سه سطح خردایش از آهنگ و میزان بازیابی مشابهی برخوردار بودند. از جمله‌ی دلایل این موضوع می‌توان موارد زیر را برشمرد:
- آزاد شدن کانی هدف در همان حد بالای محدوده‌ی بررسی شده،
- عدم ظهور اثرات منفی خردایش در محدوده‌ی بررسی شده.
- با توجه به انرژی لازم برای خردایش و نیز مشکل‌تر شدن عملیات بعد از فروشویی برای سنگ با ذرات ریزتر، براساس آهنگ و میزان بازیابی مشابه در سطوح خردایش بررسی شده برای سنگ آنومالی ۲، مناسب‌ترین اندازه برای این سنگ در این محدوده از خردایش، حدود ۱۶۰ میکرون می‌باشد. بدیهی است



بی‌نوشت‌ها:

۱. A.F. *Acidithiobacillus Ferrooxidans*
۲. A.T. *Acidithiobacillus Thiooxidans*
۳. L.F. *Leptospirillum Ferrooxidans*
۴. Turbulent

۵. Metrohm
۶. Acceleration Phase

References:

1. Abhilash, S. Singh, K.D. Mehta, V. Kumar, B.D. Pandey, V.M. Pandey, "Dissolution of uranium from silicate apatite ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans*," *Hydrometallurgy*, 95: 70-75 (2009).
2. A. Mishara, N. Pradhan, R.N. Kar, L.B. Sukla, B.K. Mishra, "Microbial recovery of uranium using native fungal strains," *Hydrometallurgy*, 95: 175-177 (2009).
3. J. Lee, S. Kim, K. Kim, I.S. Kim, "Microbial removal of uranium in uranium-bearing black shale," *Chemosphere*, 59: 147-154 (2005).
4. J.A. Munoz, F. Gonzalez, M.L. Blazquez, A. Ballester, "A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore," *Hydrometallurgy*, 38: 39-97 (1995).
5. O.G. Junior, "Bacterial Leaching of uranium ore from Figueira-PR (Brazil) at Laboratory and Pilot scale," *FEMS Microbiology Review*, 11: 237-242 (1993).
6. E.R. Donati, W. Sand, (Eds.), "Microbial processing of metal sulfides," Springer (2007).
7. M.A. Blancarte-Zurita, R.M.R. Branion, R.W. Lawrence, "Particle size effects in the microbiological Leaching of sulfide concentrate by *Thiobacillus Ferrooxidans*," *Biotechnol Bioeng.* 28: 751-755 (1986).
8. G.S. Hansford, J.T. Chapman, "Batch and Continuous biooxidation Kinetics of a refractory gold-bearing pyrite concentrate," *Miner. Eng.* 5: 597-612 (1992).
9. M. Nemati, J. Lowenadler, S.T.L. Harrison, "Particle size effects in bioleaching of pyrite by acidophilic thermophile *Sulfolobus metallicus*," *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 53: 173-179 (2000).
10. H. Deveci, "Effect of particle size and shape of solids on the viability of acidophilic bacteria during mixing in stirred tank reactors," *Hydrometallurgy*, 71: 385-396 (2004).
11. R.S. Cherry, E.T. Papoutsakis, "Hydrodynamic effects on cells in agitated tissue culture reactors," *Bioprocess Engineering*. 1: 21-41(1986).
12. M.P. Doran, "Bioprocess Engineering Principles," Academic Press, San Diego (1995).
13. T. Saririchi, R. Roosta Azad, D. Arabian, A. Molaie, F. Nemati, "On the optimization of sphalerite bioleaching," *Chemical Engineering Journal*, Article in Press (2010).
14. R.M. Atlas, "Media for Environmental Microbiology," Second ed., Taylor & Francis (2005).
15. "Russian federation ministry of atomic energy," Report of Processing technology developed for uranium ores from Saghand deposit Islamic Republic of Iran (1996).
16. ASTM, "D4454-85 Standard Test Method for Simultaneous Enumeration of Total and Respiring Bacteria in Aquatic Systems by Microscopy," Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 11.02 (2009).
17. L. Larsson, G. Olsson, O. Holst, H. Karlsson, "Oxidation of pyrite by *Acidithiobacillus brierleyi*: importance of close contact between the pyrite and the microorganism," *Biotechnol. Lett.* 15: 99-104 (1993).
18. C.J. Han, R.M. Kelly, "Biooxidation capacity of the extremely thermophilic archaeon *Metallosphaera sedula* under bioenergetic challenge," *Biotechnol. Bioeng.* 58: 617-624 (1998).
19. B. Morgan, O. Lahav, "The effect of pH on the kinetics of spontaneous Fe(II) oxidation by O₂ in aqueous solution—basic principles and a simple heuristic description," *Chemosphere*. 68: 2080–2084 (2007).