



اثر اندازه‌ی ذرات در فروشویی میکروبی اورانیم از کانسار عیار پایین آنومالی ۵ ساغند

سعید علمدار میلانی*^۱ - هادی حمیدیان^۲ - کاوه دارابی^۲

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای
۲. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن

چکیده

اثر اندازه‌ی ذرات سنگ معدن آنومالی ۵ ساغند روی فروشویی میکروبی اورانیم به وسیله‌ی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که گونه‌ی میکروبی به کاررفته برای بازیابی اورانیم از کانسنگ آنومالی ۵ ساغند مناسب است. در محدوده‌ی ابعادی بررسی شده، بازیابی اورانیم از کانسار عیار پایین آنومالی ۵ ساغند، در حالت $d_{10}=79\mu m$ بیشینه بوده، و توزیع اندازه‌ی ذرات در محدوده‌ی بررسی شده، تأثیر قابل توجهی بر فعالیت میکروبی ندارد. همچنین، براساس نتایج اکسایش باکتریایی، اثرات منفی و سمیت ناشی از حضور اجزای جامد و حل شده‌ی سنگ معدن، در محدوده‌ی بررسی شده‌ی پارامترها، محدود کننده‌ی فعالیت باکتریایی نبوده و جمعیت میکروبی رشد یافته فرایند فروشویی میکروبی اورانیم را به خوبی به انجام می‌رساند.

کلیدواژه‌ها: فروشویی میکروبی، اندازه‌ی ذرات، اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان، کانسار عیار پایین، آنومالی ۵ ساغند.

۱. مقدمه

فرایندهای هیدرومتالورژی که بیوهیدرومتالورژی نیز بخش مهمی از آنها است، نقش مهمی در بازیابی فلزات از سنگ‌های معدنی کم عیار دارند [۱]. روش بیوهیدرومتالورژی، که در آن فلز به وسیله‌ی ریزجانداران از سنگ معدن بازیابی می‌شود، برای فرآوری کانی‌های کم‌عیار اورانیم نیز به کار گرفته شده است [۲، ۳، ۴، ۵، ۶]. میکروب‌های اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان و اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدان، که محدوده‌ی دمایی رشد آنها ۱۰ تا ۳۷ درجه‌ی سانتی‌گراد و محدوده‌ی pH محیط رشد آنها ۱ تا ۴ است، به طور معمول در این فرایندها به کار گرفته می‌شوند [۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱].

یکی از پارامترهایی که بر بازده فروشویی میکروبی تأثیر می‌گذارد، اندازه‌ی ذرات بعد از خردایش سنگ معدن است. تأثیر اندازه‌ی ذرات را می‌توان به صورت سایش فیزیکی، دسترس پذیری کانی هدف برای فروشویی، انتقال جرم و ... تفسیر کرد. مطالعات محدودی به بررسی اثر اندازه‌ی ذرات در فروشویی میکروبی پرداخته‌اند [۱۲، ۱۳، ۱۴].



پارامتر اندازه‌ی ذرات از دو جنبه قابل بررسی است، یکی تأثیر آن بر عملکرد ریزجانداران و دیگری تأثیر آن بر جنبه‌های سینتیکی، ترمودینامیکی و عملیاتی فرایند فروشویی. در خصوص جنبه‌ی اول، نتایج برخی پژوهش‌ها [۱۵] نشان می‌دهد که یک اندازه‌ی بحرانی وجود دارد که در آن اثر معکوس روی سلول‌ها بیشینه است و پایین‌تر از آن، اثرات منفی کم‌تر می‌شود. اثرات منفی روی سلول‌ها می‌تواند ناشی از برخورد ذرات باشد که با شدت هم‌زدن و غلظت جامدات ارتباط مستقیم دارد [۱۶]. هرچه اندازه‌ی کوچک‌ترین گردابه در جریان گردابی (λ)، به سمت اندازه‌ی میکرومترها میل کند، اثرات معکوس برش روی سلول‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد [۱۷]. حساسیت برش سلول‌ها به اندازه‌ی آن‌ها و وضعیت دیواره‌ی سلولی در آن‌ها وابسته است. در بررسی انجام شده به وسیله‌ی دوسی [۱۵] در سرعت معینی از هم‌زدن، λ برابر ۹ تا $18\mu\text{m}$ محاسبه، و اثرات برش مکانیکی با توجه به اندازه‌ی سلول‌های به کار رفته (۱ تا $1.5\mu\text{m}$) ناچیز در نظر گرفته شد.

بسامد برخورد ذره- ذره به شدت به اندازه‌ی ذره وابسته است و این با افزایش اثرات منفی روی سلول‌ها با کاهش اندازه‌ی ذرات هم‌خوانی دارد. 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 ته‌نشینی ذره کاهش می‌یابد و بیش‌تر ذرات، حرکت سیال در خطوط جریان گردابه‌ای را دنبال می‌کنند، لذا احتمال برخورد ذره- ذره کاهش می‌یابد، زیرا سرعت نسبی ذرات به صفر میل می‌کند. نرخ غیر فعال سازی سلول‌ها در $d/\lambda \approx 1$ به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

در خصوص جنبه‌ی دوم، ذرات کوچک‌تر باعث افزایش سطح و آزاد سازی بیش‌تر کانی هدف و در نتیجه افزایش آهنگ واکنش فروشویی می‌شوند، اما این امر تا جایی منطقی است که باعث آسیب به سلول‌ها نشود؛ ضمن این که کاهش اندازه‌ی ذرات، فرایندهای پایین دستی فرآوری مواد معدنی را مشکل‌تر می‌سازد و هم‌چنین هزینه‌ی خردایش در بالادست افزایش می‌یابد. در عین حال، کاهش اندازه‌ی ذرات باعث آزادسازی بیش‌تر کانی‌های بی‌ارزش (گانگ) نیز می‌شود که انحلال آن‌ها می‌تواند باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و نیز عملکرد نامناسب فرایند شود.

هدف این مقاله تعیین اثرات اندازه‌های ذرات روی بازیابی میکروبی اورانیم از کانسار عیار پایین و سخت انحلال آنومالی ۵ ساغند به وسیله‌ی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در محدوده‌ی ۶۳ تا ۱۸۰ میکرون است.

۲. روش کار

۲.۱ نمونه‌ی معدنی



ماده‌ی معدنی ورودی این پژوهش، سنگ معدن آنومالی ۵ ساغند (با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۱) بود. نمونه برداری به صورت سطحی و سیستماتیک انجام شد. نمونه‌ها ابتدا، با استفاده از سنگ شکن فکی تا اندازه‌ی ۵ میلی‌متر خرد شده و سپس به وسیله‌ی آسیای گلوله‌ای در محدوده‌ی ۶۳ تا ۱۸۰ میکرون آسیا شدند. محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات بر اساس درجه‌ی آزادی در مطالعات میکروسکوپی روی سنگ معدن انتخاب شد. مطالعات قبلی، اندازه‌ی ذرات برای آزاد شدن کانی اورانیم از سنگ معدن آنومالی ۵ ساغند را حدود یک صد میکرون به دست داد [۱۸، ۱۹، ۲۰]. نمونه‌های خرد شده با استفاده از مجموعه سرندهای آزمایشگاهی، طبقه بندی شدند. اندازه‌های در نظر گرفته شده، ۶۹، ۱۰۸ و ۱۶۵ میکرون بود ($d_{80} = 69, 108, 165 \mu m$).

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه‌ی نماینده‌ی سنگ معدن آنومالی ۵ ساغند

ترکیب (%)	عیار (%)	ترکیب (%)	عیار (%)	عنصر عیار (ppm)	عنصر عیار (ppm)	عنصر عیار (ppm)	عنصر عیار (ppm)	عنصر عیار (ppm)	عنصر عیار (ppm)
SiO ₂	۵۵٫۰۳	Na ₂ O	۴٫۲۴	Ba	۴۰۱	Ni	۴۲	Th	۲۲۳
Al ₂ O ₃	۷٫۴	MnO	۰٫۴۴	Co	۴۹	Rb	۱۶	La	۹۴۶
Fe ₂ O ₃	۸٫۱۴	TiO ₂	۲٫۲۲	Cl	۲۲۳	V	۱۴۶	Ce	۱۰۴۳
CaO	۱۲٫۳۱	P ₂ O ₅	۰٫۰۴	Cu	۲۰	W	۱۱۸	Y	۱۴۲۴
K ₂ O	۰٫۱۷	Cr ₂ O ₃	۰٫۰۰۱	Ga	۱۴	S	۵	As	۱۵
MgO	۹٫۴۱	Hf	۱۰	U	۱۰	Hf	۴۵۰	Nd	۲۹۸

۲.۲ میکروب، محیط کشت و مایه‌ی تلقیح

میکروب مورد استفاده، گونه‌ای از میکروب اسید دوست اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان (FN ۴۰۰۷۷۰) بود که از معدن تالمسی جداسازی شده بود [۲۰]. سلول‌های اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان به صورت هوازی در محیط کشت ۹k با ترکیب $(NH_4)_2SO_4, 2 g L^{-1}$; $K_2HPO_4, 0.05 g L^{-1}$; $MgSO_4 \cdot 7H_2O, 0.05 g L^{-1}$; $KCl, 0.1 g L^{-1}$; $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O, 0.14 g L^{-1}$; $FeSO_4 \cdot 7H_2O, 4.0 g L^{-1}$ رشد داده شدند [۱۹، ۲۰، ۲۱]. کشت‌های سلول‌های اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در بالن‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری هریک حاوی ۹۰ میلی‌لیتر محیط و ۱۰ میلی‌لیتر مایه‌ی تلقیح در دمای ثابت ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در دستگاه تکانه‌دار - گرمادهنده، در سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه گرم‌گذاری شدند و در فاز نمایی برای تلقیح آزمایش‌های فروشویی میکروبی به کار گرفته شدند.

۳.۲ روش آزمایش

آزمایش‌های فروشویی میکروبی (ML) در ارلن‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری به صورت دوبر تکرار با یک کنترل (انجام و تکرار آزمایش بدون میکروب) انجام شدند. هر ارلن حاوی ۹۰ میلی‌لیتر محیط کشت، ۵ گرم ماده‌ی معدنی، و ۱۰ میلی‌لیتر مایه‌ی تلقیح بود. در آزمایش‌های کنترل (CL) با جای مایع تلقیح از محیط کشت بدون آهن استفاده شد. آزمایش‌ها در دستگاه گرم‌کننده - تکانه‌دار، در سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه، و دمای ۳۰

درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شدند. pH محیط فروشویی با سولفوریک اسید یا سدیم هیدروکسید روی مقدار ۲ تنظیم می‌شد. برای تعیین غلظت اورانیم، آهن و باکتری، نمونه‌ها به صورت روزانه برداشته، و حجم معادل از محیط کشت بدون آهن با $\text{pH} = 2$ به محیط فروشویی اضافه می‌شد. حجم ناشی از تبخیر با محلول سولفوریک اسید با $\text{pH} = 2$ جبران می‌شد.

۳.۲ تجزیه‌ها

منحنی رشد باکتری به روش شاخص‌کدورت سنجی در طول موج 660nm با استفاده از دستگاه طیف نورسنج مدل ۳۰ analytikjena, specord به دست آمد [۱۹]. pH و پتانسیل محلول با دستگاه میکرو pH متر متلر-تالدو 2500A GmbH اندازه‌گیری شد. الکتروود مرجع نقره/نقره کلرید با الکتروولیت پتاسیم کلرید و الکتروود اندازه‌گیری از جنس پلاتین بود. مقدار اورانیم بازیابی شده در محلول فروشویی، با استفاده از روش پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP)، و مقدار آهن فریک در محلول با روش طیف نورسنجی و در حضور معرف پتاسیم تیوسیانات اندازه‌گیری شد. آهن کل (آهن فرو + آهن فریک) موجود در محلول به روش طیف سنجی جذب اتمی (AAS) تعیین مقدار شد. آهن فرو به صورت اختلاف آهن کل و آهن فریک تعیین شد.

بازیابی اورانیم از رابطه‌ی زیر محاسبه شد [۲۲]

$$\text{Recovery\%} = [(C_v V_v) / (W_s C_s)] \times 100 \quad (1)$$

که در آن W_s (g) وزن سنگ معدن، C_s (%) درصد اورانیم در سنگ معدن، V_v (L) حجم محلول فروشویی، و C_v (g L⁻¹) غلظت اورانیم در محلول فروشویی است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱ اثر اندازه‌ی ذرات بر رشد میکروبی

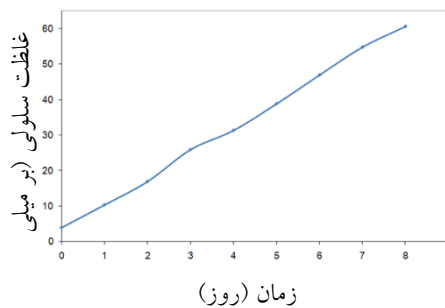
با توجه به این که در فرایندهای بیوهیدرومتالورژی، غلظت آهن فریک در محلول فروشویی به وسیله‌ی فعالیت میکروب‌ها کنترل می‌شود، در این بررسی از غلظت سلول‌ها در فاز مایع و پتانسیل اکسایش-کاهش محلول به عنوان معیار رشد میکروبی استفاده شد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که در فروشویی میکروبی غیرمستقیم با ماده‌ی اصلی محلول، بخش اعظم سلول‌ها در محلول به صورت آزاد بوده و تعداد سلول‌های چسبیده به ذرات در مقایسه با سلول‌های آزاد قابل چشم‌پوشی است [۷، ۱۴، ۲۳، ۲۴]؛ در نتیجه غلظت اندازه‌گیری شده را می‌توان معیار نسبتاً قابل قبولی از غلظت سلولی در محلول در نظر گرفت. در آزمایش‌های مختلف این بررسی، تفاوت چندانی در غلظت سلولی با زمان مشاهده نشد. به عبارت دیگر، اندازه‌های متفاوت ذرات سنگ معدن در محدوده‌ی آزمایش شده، تأثیر قابل توجهی بر رشد سلول‌ها نمی‌گذارد؛ ضمن

این که سلول‌ها از همان ابتدا وارد فاز نهایی (لگاریتمی) رشد شدند و تأخیر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. شکل ۱ نحوه‌ی رشد جمعیت میکروبی در این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

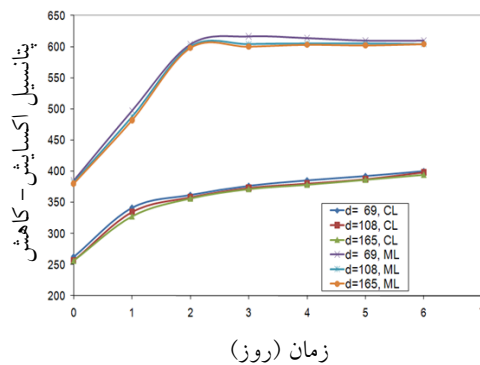
۲.۳ اثر اندازه‌ی ذرات بر پتانسیل اکسایش - کاهش

شکل ۲ تغییرات پتانسیل اکسایش - کاهش با زمان را در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که پتانسیل اکسایش - کاهش محلول هم در آزمایش‌های کنترل و هم در آزمایش‌های میکروبی، تقریباً مستقل از اندازه‌ی ذرات بوده و در حضور باکتری از حدود ۳۸۰ میلی ولت به حدود ۶۰۰ میلی ولت افزایش می‌یابد؛ در حالی که در آزمایش‌های کنترل، این تغییرات از حدود ۲۵۰ میلی ولت به حدود ۴۰۰ میلی ولت است. دلیل این افزایش در آزمایش‌های میکروبی، فعالیت باکتری و اکسایش میکروبی یون‌های فرو به فریک است. افزایش پتانسیل در آزمایش‌های کنترل ناشی از اکسایش یون‌های فرو به وسیله‌ی اکسیژن محلول است [۲۳]. تفاوت موجود بین پتانسیل‌های اولیه در آزمایش‌های میکروبی و کنترل به دلیل حضور آهن فریک در مایه‌ی تلقیح اضافه شده است.

پتانسیل در حضور میکروب طی ۲ روز با آهنگ تقریباً ثابت به بیشینه مقدار خود می‌رسد.



شکل ۱. تغییرات غلظت سلولی با زمان.



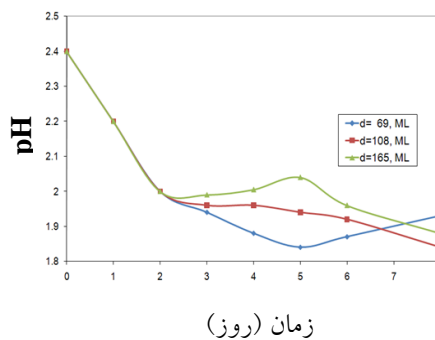
شکل ۲. رابطه بین پتانسیل و زمان.

۳.۳ اثر اندازه‌ی ذرات بر pH محلول

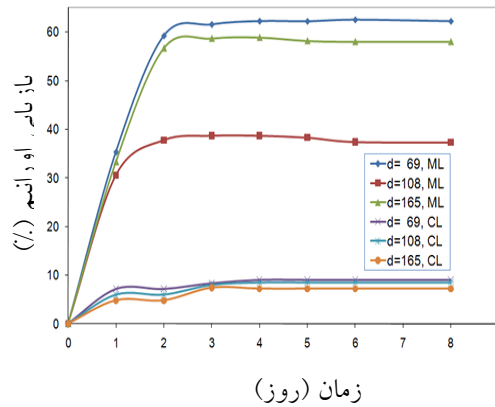
در محیط فروشویی میکروبی، موازنه‌ی پروتون‌ها بین واکنش‌های مصرف کننده (انحلال اکسیدها/کربنات‌ها، اکسایش آهن و ...) و واکنش‌های تولید کننده‌ی سولفوریک اسید و هیدرولیز آهن، قدرت اسیدی محیط را تعیین می‌کند. شکل ۳ تغییرات pH محیط فروشویی میکروبی در آزمایش‌های انجام شده است. با توجه به خط‌هایی مانند خط‌ای اندازه‌گیری pH، آرایه‌ی تفسیر درستی از این نتایج امکان‌پذیر نیست، ولی آنچه که در خصوص تفاوت اندازه‌ی ذرات می‌توان گفت این است که بسته به ماهیت کانی‌هایی که با خریدایش بیش‌تر امکان انحلال آن‌ها بالا می‌رود، کاهش اندازه می‌تواند اسیدزا (کانی‌های سولفیدی) یا مصرف کننده‌ی اسید باشد. از شکل ۳ مشاهده می‌شود که در آزمایش‌های فروشویی میکروبی این بررسی، مصرف عمده‌ی اسید در ۴۸ ساعت اول بوده است که می‌تواند هم ناشی از مصرف یون فرو و هم انحلال کانی‌های مصرف کننده‌ی اسید، که عمدتاً زود انحلال نیز هستند، باشد.

۳.۴ اثر اندازه‌ی ذرات بر بازیابی اورانیم

شکل ۴ تغییرات بازیابی اورانیم با زمان را در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۴ زمان لازم برای رسیدن به بازیابی بیشینه‌ی اورانیم ۲ روز است. بیشینه بازیابی اورانیم از سنگ معدن آنومالی ۵ ساغند برای سطح خریدایش ۶۹ میکرون حدود ۶۳٪ بود. بازیابی اورانیم برای سطح‌های خریدایش ۱۰۸ و ۱۶۵ میکرون، به ترتیب، در حدود ۴۰٪ و ۵۹٪ بود. در آزمایش‌های کنترل نیز بازیابی بیشینه‌ی اورانیم کم‌تر از ۱۰٪ بوده است. با توجه به عدم تأثیر قابل ملاحظه‌ی اندازه‌ی ذرات بر فعالیت باکتری و در نتیجه بر تغییرات پتانسیل اکسایش-کاهش، دلیل متفاوت بودن بازیابی در اندازه‌های مختلف ذرات را باید در جنبه‌های غیر زیستی دنبال نمود. به بیان دیگر، کنترل کننده یا محدود کننده‌ی نرخ و بازده این فرایند، عوامل غیرزیستی مانند آهن‌گ و واکنش شیمیایی، سطح در دسترس واکنش شیمیایی، حضور عوامل کند کننده یا تسریع کننده‌ی انتقال و واکنش واکنش‌گرها و ... هستند.



شکل ۳. رابطه بین pH و زمان.



شکل ۴. بازیابی اورانیم به صورت تابعی از زمان برای سه سطح خردایش مختلف.

سطح خردایش میانی ($d_{\lambda_0} = 10.8 \mu\text{m}$) نسبت به دو سطح خردایش دیگر ۶۹ و ۱۶۵ میکرون منجر به بازده استخراج پایین‌تر شده است. موارد زیر را می‌توان از جمله دلایل این تفاوت‌ها دانست:

- کاهش بازیابی اورانیم با کاهش اندازه‌ی ذرات از ۱۶۵ تا ۱۰۸ میکرون به دلیل افزایش اثرات منفی خردایش بیش‌تر مانند آزاد شدن کانی‌های همراه و شرکت آن‌ها در واکنش‌های انحلال و مزاحمت در انحلال کانی هدف است.
- افزایش بازیابی اورانیم با افزایش خردایش در گستره‌ی دانه بندی از ۱۰۸ تا ۶۹ میکرون به دلیل آزاد شدن کانی هدف و سطح تماس آن با کاهش اندازه در محدوده‌ی بررسی شده است.
- به نظر می‌رسد تفاوت در بازیابی اورانیم بیش‌تر وابسته به درجه‌ی آزادی کانی‌های فلز هدف و نیز مزاحمت‌های ناشی از کانی‌های باطله باشد.

۴. نتیجه‌گیری

- روش بیوهیدرومتالورژی با باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان برای بازیابی اورانیم از کانسار عیار پایین و سخت انحلال آنومالی ۵ ساغند گزینه‌ای مناسب برای فروشویی است.
- بازیابی میکروبی اورانیم با باکتری اسید دوست اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان تا اندازه‌ای تحت تأثیر اندازه‌ی ذرات سنگ معدن در محدوده‌ی ۶۰ تا ۱۶۵ میکرون است، و این تأثیر از عوامل غیر زیستی متعددی چون درجه‌ی آزادی کانی هدف، افزایش آهنگ واکنش‌ها، و ... ناشی می‌شود.
- اندازه‌ی مناسب برای فرآوری میکروبی کانسار آنومالی ۵ ساغند به وسیله‌ی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان، ۶۹ میکرون است. با این وجود، با توجه به بازیابی بسیار نزدیک سطح خردایش ۱۶۵ میکرون (۶۳٪) به سطح خردایش ۶۹ میکرون (۵۹٪)، و با توجه به انرژی لازم برای خردایش، فرآوری

- میکروبی کانسار آنومالی ۵ ساغند در سطح خردایش ۱۶۵ میکرون زیاد غیرمنطقی به نظر نمی‌رسد.
- براساس نتایج اکسایش باکتریایی، اثرات منفی و سمیت ناشی از حضور اجزای جامد و حل شده‌ی سنگ معدن در محدوده‌ی آزمایش شده‌ی پارامترها، محدود کننده‌ی فعالیت باکتری نبوده، و جمعیت میکروبی رشد یافته فرایند بازیابی میکروبی اورانیم از کانساز عیار پایین آنومالی ۵ ساغند را به خوبی به انجام می‌رساند.
- با توجه به رشد و فعالیت بسیار مناسب باکتری، به نظر می‌رسد افزایش چگالی پالپ در جهت بهبود اقتصاد فرایند امکان‌پذیر باشد و می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع:

۱. A. Rubio, F. J. Garcia F.J García Frutos, Bioleaching capacity of an extremely thermophilic culture for chalcopiritic materials, *Minerals Engineering*, ۱۵ (۹) (۲۰۰۲) ۶۸۹-۶۹۴.
۲. 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*, ۹۵(۱-۲) (۲۰۰۹) ۷۰-۷۵.
۳. A. Mishra, S. Singh, K.D. Mehta, V. Kumar, B.D. Pandey, V.M. Pandey, Dissolution of uranium from silicate-apatite ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Hydrometallurgy*, ۹۵(۱-۲) (۲۰۰۹) ۷۰-۷۵.
۴. JongJong-Un Lee, Sung-Min Kim, Kyoung-Woong Kim, In S. Kim, Microbial removal of uranium in uranium-bearing black shale, *Chemosphere*, ۵۹(۱) (۲۰۰۵) ۱۴۷-۱۵۴.
۵. J.A. Muiioz, M.L. Bkizquez, A. Ballester, F. Gonzalez, A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore, *Hydrometallurgy*, ۳۸ (۱۹۹۵) ۷۹-۹۷
۶. O. Garcia O. Garcia Júnior, Bacterial leaching of uranium ore from Figueira- PR, Brazil, at laboratory and pilot scale, *FEMS Microbiology Reviews*, ۱۱(۱-۳) (۱۹۹۳) ۲۳۷-۲۴۲.
۷. Donati, Edgardo R.; Sand, Wolfgang (Eds.), *Microbial Processing of Metal Sulfides*, Springer (۲۰۰۷).
۸. A.D. Agate, Recent advances in microbial mining, *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, ۱۲ (۱۹۹۶) ۴۹۷-۴۹۵.
۹. Klaus Klaus Bosecker, Bioleaching: metal solubilization by microorganisms, *FEMS Microbiology Reviews*, ۲۰ (۳-۴) (۹۹۷) ۵۹۱-۶۰۴.
۱۰. D. E. Rawlings, S. Silver, *Mining with Microbes*, *Nature Biotechnology*, ۱۳ (۱۹۹۵) ۷۷۳ - ۷۷۸.
۱۱. W. W. Krebs, C. Brombacher, P.P. Bosshard, R. Bachofen, H. Brandl, Microbial recovery of metals from solids, *FEMS Microbiology Reviews*, ۲۰ (۳-۴) (۱۹۹۷) ۶۰۵-۶۱۷.
۱۲. Blancarte-Zurita MA, Branion RM, Lawrence RW. Particle size effects in the microbiological leaching of sulfide concentrates by thiobacillus ferrooxidans, *Biotechnol Bioeng*, ۲۸(۵) (۱۹۸۶) ۷۵۱-۵.



۱۳. G.S. Hansford, J.T. Chapman, Batch and continous biooxidation kinetics of a refractory gold-bearing pyrite concentrate, Miner. Eng. ۵ (۱۹۹۲) ۵۹۷-۶۱۲.
۱۴. Nemati M, Lowenadler J, Harrison ST, Particle size effects in bioleaching of pyrite by acidophilic thermophile *Sulfolobus metallicus* (BC), Appl. Microbiol. Biotechnol., ۵۳(۲) (۲۰۰۰) ۱۷۳-۱۷۹.
۱۵. H. Deveci, Effect of particle size and shape of solids on the viability of acidophilic bacteria during mixing in stirred tank reactors, Hydrometallurgy, ۷۱(۳-۴) (۲۰۰۴) ۳۸۵-۳۹۶.
۱۶. R. S. Cherry, E. T. Papoutsakis , Hydrodynamic effects on cells in agitated tissue culture reactors, Bioprocess Engineering , ۱(۱) (۱۹۸۶) ۲۹-۴۱.
۱۷. Pauline M. Doran, Bioprocess Engineering Principles, Academic Press; ۱ edition (May ۲۵, ۱۹۹۵).
۱۸. Kiaie M., Uranium and thorium processing investigation in Saghand-Anomaly ۵, Master degree thesis, Bahonar uni. (۲۰۰۰) ۲۶-۳۶.
۱۹. S.A. Milani, H. Hamidian, Microbial Recovery of Uranium from Low Grade Ore Deposit of ۵th Anomaly of Saghand, Journal of nuclear science and technology, Article in press.
۲۰. H. Hamidiyan, Increasing Uranium Leachability from Refractory and Low Grade Ore Using Microbial Leaching, Ph.D. thesis, Azad university, Researches and Sciences Campus (۲۰۱۰) ۵۳-۱۰۴.
۲۱. Ronald M. Atlas, Handbook of Media for Environmental Microbiology, Second Edition, CRC Press; ۲ edition (March ۲۹, ۲۰۰۵).
۲۲. Z. Chenglong, Z. Youcai, Mechanochemical leaching of sphalerite in an alkaline solution containing lead carbonate, Hydrometallurgy ۱۰۰ (۲۰۰۹) ۵۶-۵۹.
۲۳. L. Larsson, G. Olsson, O. Hoist, H. T. Karlsson, Oxidation of pyrite by *Acidianus brierleyi*: Importance of close contact between the pyrite and the microorganisms, Biotechnology Letters, ۱۵ (۱) (۱۹۹۳) ۹۹-۱۰۴.
۲۴. CJ. Han, RM. Kelly, Biooxidation capacity of the extremely thermoacidophilic archaeon *metallospira sedula* under bioenergetic challenge, Biotechnol. Bioeng., ۵۸ (۱۹۹۸) ۶۱۷- ۶۲۴.