



بازیابی میکروبی اورانیم از کانسار عیار پایین آنومالی ۵ ساغند

سعید علمدار میلانی^{۱*}، هادی حمیدیان^۲، بهرام رضایی^۲

۱. پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران
۲. گروه مهندسی معدن، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، صندوق پستی: ۱۴۳-۱۴۱۱۵، تهران - ایران

چکیده: فروشویی میکروبی اورانیم به وسیله‌ی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در مقیاس آزمایشگاهی از طریق تغییر پارامترهایی چون چگالی پالپ، غلظت یون فرو به عنوان منبع انرژی، pH اولیه‌ی محیط فروشویی، سرعت هم‌زنی بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که گونه‌ی میکروبی به کار رفته برای بازیابی اورانیم از کانسنگ عیار پایین آنومالی ۵ ساغند مناسب است. ۶۰٪ اورانیم در مدت ۵۰ ساعت و چگالی پالپ (W/V) ۲٫۵٪ استخراج شد. بدون فعالیت میکروبی، تنها ۵٪ اورانیم و از طریق فروشویی شیمیایی در محیط سولفوریک اسید، تنها ۸٫۵٪ اورانیم بازیابی شد.

کلیدواژه‌ها: فروشویی میکروبی، اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان، کانسار عیار پایین، ساغند، اورانیم

Microbial Recovery of Uranium from Low Grade Ore Deposit of 5th Anomaly of Saghand

S.A. Milani^{1*}, H. Hamidian², B. Rezai²

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran
2. Mining Engineering dpt., Researches and Science Campus, Azad University, P.O.Box: 14115-143, Tehran – Iran

Abstract: Microbial leaching of uranium from Saghand low grade ore deposit by the acidiphilic mesophile acidithiobacillus ferrooxidans was investigated by changing the parameters such as pulp density, ferrous ions concentration as the resource of energy, initial pH of leaching solution and shaking speeds. The findings indicated that this strain is suitable for uranium recovery from the mentioned ore. About 60% of uranium could be recovered in 50 hours by a pulp density of 2.5%(W/V). In the absence of microbial activity only about 5% of uranium was recovered, and by the sulfuric acid leaching, only about 8.5% of uranium was extracted.

Keywords: Microbial Leaching, Acidithiobacillus Ferrooxidans, Low-Grade Ore Deposit, Saghand, Uranium



۱. مقدمه

اورانیم شش ظرفیتی به سادگی در محیط اسیدی حل می‌شود ولی اورانیم چهار ظرفیتی برای حل شدن ابتدا باید به حالت شش ظرفیتی اکسید شود. در فرایندهای فروشویی شیمیایی غلظت آهن فریک در محلول فروشویی، با تنظیم پتانسیل اکسایش - کاهش از طریق افزودن عامل‌های شیمیایی اکسنده چون سدیم کلرات، کارو اسید^(۱) و منگنز اکسید (پیرلوسیت) کنترل می‌شود [۱۴، ۱۵، ۱۶]. در فرایندهای میکروبی، فعالیت میکروب‌ها این مهم را برعهده دارد. برای تأثیر بیش‌تر واکنش‌گرها بر انحلال اورانیم، پتانسیل اکسایش و کاهش محیط واکنش باید به بیش از ۴۰۰mV برسد. باکتری‌ها می‌توانند از طریق سازوکار و سوخت‌وساز خود کار و تکرارپذیر خود این پتانسیل را تولید و به حدود ۶۵۰ میلی‌ولت برسانند [۱۷].

رفتار کانی‌های حاوی اورانیم در طول عملیات فروشویی را می‌توان به صورت زیر توصیف نمود [۱۸]:

(۱) کانسنگ‌هایی که در آن‌ها اورانیم موجود در شبکه‌ی کانی به راحتی وارد محلول می‌شود و در نتیجه اورانیم به صورت اقتصادی قابل بازیابی است. این دسته از کانسنگ‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند:

- کانی‌های حاوی اورانینیت (یا پیچبلاند به عنوان شکل آمورف آن) و کافینیت که در آن‌ها اورانیم بیش‌تر در حالت چهار ظرفیتی است و در نتیجه نیاز به یک اکسنده دارند. این کانی‌ها در اکثر ذخایر دنیا به چشم می‌خورند. سایر کانی‌های موجود در این گروه که کانی‌های سلیکاته هستند عبارت‌اند از کافینیت و اورانوتوریت. در این نوع کانی‌ها استخراج، بیش‌تر نیازمند اکسنده است [۱۹].

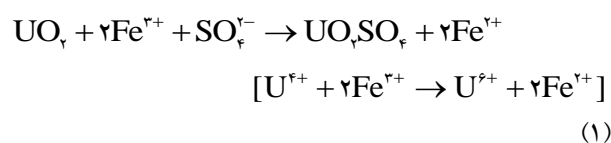
- کانی‌های ثانویه مانند گومیت، بکوورلیت، اتونیت، سالیت، اسکلودوسکیت، توربرنیت، اورانوفن، کارنوتیت و تیویامونیت که در همه‌ی آن‌ها اورانیم در حالت شش ظرفیتی است و به نظر می‌آید که نیازی به اکسنده نباشد. ولی در این مورد باز هم از اکسنده استفاده می‌شود تا از کاهش توسط سایر اجزای کانه یا آهن دو ظرفیتی که از انحلال آهن فلزی در عملیات خردایش به وجود می‌آید جلوگیری شود [۱۸].

(۲) کانه‌هایی که انحلال اورانیم در آن‌ها به سختی صورت می‌گیرد و در آن‌ها کانی‌شناسی و خصوصیات شیمیایی مواد باطله تعیین‌کننده‌ی فرایندند. این دسته شامل اکسیدهای چندگانه هستند و معروف‌ترین آن‌ها برانریت و دیویدیت

استفاده‌ی روزافزون از اورانیم در صنعت هسته‌ای و در تولید برق، و به عنوان منبع انرژی جای‌گزین در صنعت ناوربری و در زیردریایی‌ها به تمام شدن تدریجی ذخایر پرعیار اورانیم انجامیده است. از این‌رو، برای همراهی با تقاضا، روش‌های جدیدی برای بازیابی اورانیم از کانسارهای کم‌عیار توسعه یافته‌اند. با توجه به مشکلات به کارگیری روش‌های سنتی مبتنی بر استفاده از اسیدهای قوی، هزینه‌ی سرمایه‌ای زیاد و هم‌چنین مصرف بالای انرژی در این روش‌ها، استفاده از روش‌های کم‌هزینه و کارآمد برای بازیابی اورانیم از اهمیت بالایی برخوردار است. استخراج اورانیم از کانسارهای عیار پایین از طریق فروشویی شیمیایی مقرون به صرفه نیست چرا که محتوای وزنی اورانیم بسیار پایین است [۱]. لذا، لازم است فرایند جای‌گزینی برای بازیابی مؤثر و مقرون به صرفه‌ی اورانیم توسعه داده شود. تجارب تجاری نشان می‌دهد که فرایند فروشویی میکروبی که از ریزجاندارانی چون باکتری‌ها و قارچ‌ها به عنوان کاتالیزگر استفاده می‌کند، در مقایسه با فرایند فروشویی شیمیایی مقرون به صرفه بوده و از نظر زیست محیطی مناسب است [۱، ۲، ۳، ۴، ۵].

اساس فروشویی میکروبی کانسنگ اورانیم، تولید فریک سولفات از پیریت موجود در کانسنگ از طریق فعالیت باکتری‌ها است. به عبارت دیگر، در طی فرایند، ریزجانداران شرایط شیمیایی مورد نیاز برای انحلال اورانیم را فراهم می‌آورند. یون‌های فلزی ممکن است تأثیرات مشخصی بر روی آنزیم‌های چرخه‌ی سوخت‌وساز ریزجانداران داشته باشند. با این وجود، در مورد اسیدی تیوباسیلوس‌ها، مطالعات نشان داده است که می‌تواند تا مقدار ۱۲ گرم U_3O_8 در لیتر را تحمل نمایند [۶، ۷].

یکی از ریزجاندارانی که به طور گسترده در فرایند فروشویی میکروبی به کار رفته است، اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان است [۱، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳]. این میکروب، یک باکتری اسیددوست است که می‌تواند ترکیبات آهن و سولفور کاهیده شده را اکسید نماید. سازوکار استخراج تسهیل شده‌ی اورانیم به وسیله‌ی عملکرد اکسایشی غیرمستقیم این میکروب به شکل زیر است [۵]





۲.۲ ریزجانداران و محیط کشت

باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان (FN ۴۰۰۷۷۰) تهیه شده از معدن تالمسی، در آزمایش‌های فروشویی میکروبی مورد استفاده قرار گرفت. برای رشد و فعالیت این باکتری محیط کشت ۹k با ترکیب $(NH_4)_2SO_4, 2g L^{-1}$; $K_2HPO_4, 0.5g L^{-1}$; $MgSO_4 \cdot 7H_2O, 0.5g L^{-1}$; $KCl, 0.1g L^{-1}$; $FeSO_4 \cdot 7H_2O, 40g L^{-1}$; $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O,$ به کار رفت.

۳.۲ اندازه‌گیری‌های تجربی

ترکیب فازهای کانی شناختی نمونه‌ی نماینده‌ی کانسنگ آنومالی ۵ ساغند، از طریق ثبت الگوی پراش پودری پرتو ایکس با استفاده از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس مدل PW1800 با خط طیفی تابش تک رنگ K_{α} مس با طول موج 1.5404 \AA تعیین شد. تجزیه‌ی عنصری نمونه‌ی نماینده با استفاده از طیف‌سنج فلورسانسی پرتو ایکس، مدل Axford ED2000 به انجام رسید. pH و پتانسیل اکسایش- کاهش محلول با دستگاه میکرو pH متر متلر- تالدو GmbH 2500A 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 تکنیک پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP) اندازه‌گیری شد. 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 طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) تعیین مقدار شد. آهن فرو به صورت اختلاف آهن کل و آهن فریک تعیین شد.

منحنی رشد باکتری به روش شاخص کدورت‌سنجی در طول موج 660 nm با استفاده از دستگاه طیف نورسنج مدل analytikjena, specord 30 به دست آمد.

۴.۲ روش کار

۱.۴.۲ کشت باکتری و آماده‌سازی ریزجانداران

پس از تلقیح باکتری به محیط کشت و ایجاد شرایط بهینه‌ی رشد، به منظور کنترل رشد باکتری اقدام به تهیه‌ی تصاویر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی گردید. برای این منظور مقداری از محیط کشت تلقیح شده‌ی ۵ روزه در ظرف‌های

است. اورانیم در این دسته از کانی‌ها به صورت چهار ظرفیتی و شش ظرفیتی است و با تیتانیم، آهن و بعضی اوقات وانادیم، توریم و خاکی‌های نادر همراه است [۹، ۱۰].

بیش‌ترین عیار اورانیم کانسنگ آنومالی ۵ ساغند، مربوط به کانی‌های فرعی زیرکن، دیویدیت، اسفن، مونازیت، باسنتازیت و چوکنیت است [۲۰، ۲۱].

فروشویی میکروبی اورانیم از کانسار عیار پایین آنومالی ۵ ساغند با استفاده از باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته است. ابتدا عملیات مقدماتی مانند خردایش و تجزیه‌ی سرنبدی بر روی نمونه‌ی نماینده‌ی کانسار عیار پایین آنومالی ۵ ساغند انجام شد. سپس عمیات فروشویی میکروبی به اجرا درآمد. کارآیی فروشویی میکروبی اورانیم از طریق تغییر پارامترهایی چون چگالی پالپ، غلظت اولیه‌ی یون فرو، pH اولیه‌ی محیط فروشویی، سرعت هم‌زنی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۲. روش تحقیق و مواد

۱.۲ نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

ماده‌ی معدنی ورودی این پژوهش، کانسنگ آنومالی ۵ ساغند بود. نمونه‌برداری به صورت سطحی و سیستماتیک انجام شد. نمونه‌ها ابتدا، با استفاده از سنگ‌شکن فکی تا اندازه‌ی ۵ میلی‌متر خرد و سپس به وسیله‌ی آسیای گلوله‌ای در محدوده‌ی ۶۳ تا ۱۸۰ میکرون آسیا شدند. محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات براساس 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 [۲۱]. آسیای گلوله‌ای مورد استفاده دارای قطر، حجم داخلی و سرعت بحرانی به ترتیب برابر با ۲۸۵ میلی‌متر، ۱/۲ لیتر و ۸۶/۳۶ دور بر دقیقه بود. شرایط آسیا کاملاً بهینه شده و سرعت آن برابر ۷۵ درصد سرعت بحرانی (یعنی ۶۵ دور بر دقیقه) انتخاب شد. نسبت بار خردکننده به ماده‌ی معدنی ۲ به ۱ و حجم کل بار در آسیا برابر ۴۵٪ انتخاب شد [۲۲]. آن‌گاه، نمونه‌های آسیا شده با استفاده از مجموعه سرندهای آزمایشگاهی با ابعاد ۶۳، ۷۵، ۹۰، ۱۲۵، ۱۵۰ و ۱۸۰ میکرون از نظر اندازه طبقه‌بندی شدند.



۴.۴.۲ آزمایش‌های مقایسه‌ای فروشوی میکروبی و شیمیایی

برای مقایسه‌ی کارآیی شیوه‌های مختلف فروشوی، ۴ رشته آزمایش به شرح زیر طراحی و اجرا شد:

- فروشوی شیمیایی در محیط سولفوریک اسید با pH اولیه‌ی برابر ۱،
- فروشوی شیمیایی در محیط کشت اختصاصی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان (آزمایش کنترل)،
- فروشوی میکروبی در حضور مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم بر لیتر فرسولفات هفت آبه ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)،
- فروشوی میکروبی در حضور کانسنگ پیریت به میزان ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم بر تن.

تمام این آزمایش‌ها در شرایط بهینه‌ی پیش از این تعیین شده (محدوده‌ی ابعادی $63+75$ - برای نمونه، چگالی پالپ (W/V) ۲.۵٪، سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه، دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) انجام شد.

۵.۴.۲ تجزیه‌ی شیمیایی

محلول فروشوی در پایان هر آزمایش برای تعیین عیار اورانیم مورد تجزیه‌ی عنصری قرار گرفته، بازیابی اورانیم از رابطه‌ی زیر محاسبه شد

$$\text{Recovery}\% = [(C_2 V_2) / (W_1 C_1)] \times 100 \quad (2)$$

که در آن W_1 (g) وزن نمونه‌ی کانسنگ، C_1 (%) درصد اورانیم در آن، V_2 (L) حجم محلول فروشوی، و C_2 (g L⁻¹) غلظت اورانیم در آن است.

۳. یافته‌ها و تحلیل نتایج

۱.۳ سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی

کانی‌شناسی نمونه‌ی نماینده نشان داد که کانی‌های اصلی آن آلپیت، کوارتز، کلسیت، ترمولیت، اکتینولیت، منیتیت و ایلمنیت هستند. وجود آهن یکی از ضروریات عملیات فروشوی میکروبی است [۲۴] ولی آهن موجود در این کانسنگ به صورت منیتیت است که این شکل از آهن تأثیر مثبتی بر فعل و انفعال‌های میکروبی ندارد بلکه برعکس می‌تواند موجب بروز مشکلاتی در

مخصوص سانتریفیوژ وارد و در مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه رسوب‌گیری شد. رسوب حاصل با استفاده از لوپ در زیر هود بر روی پایه‌های مخصوص میکروسکوپ الکترونی که از قبل تمیز و استریل شده بودند قرار داده شد. سپس این پایه‌ها در زیر هود در دمای محیط به طور کامل خشک شدند. در مرحله‌ی پایانی آماده‌سازی، نمونه‌های روی پایه‌ها برای هادی شدن با بخار طلا پوشانده شدند. در نهایت پایه‌های آماده شده، بر روی شاسی مخصوص میکروسکوپ الکترونی قرار داده شده و از آن‌ها عکس‌برداری شد [۲۳].

برای به دست آوردن منحنی رشد باکتری، به ۴۰ میلی‌لیتر از محیط کشت تازه، مقدار ۵ میلی‌لیتر از مایه‌ی کشت زنده‌ی ۸ روزه‌ی باکتری تلقیح و در زمان‌های معین کدورت‌سنجی انجام شد.

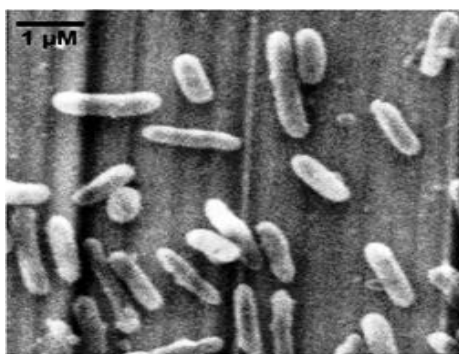
۲.۴.۲ آزمایش‌های فروشوی میکروبی

آزمایش‌های فروشوی میکروبی در ارلن مایه‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری حاوی ۴۰ میلی‌لیتر محیط کشت تازه انجام شدند. پس از افزودن نمونه‌ی سنگ معدن با چگالی پالپ معین، ۴ میلی‌لیتر مایه‌ی تلقیح به غلظت از مرتبه‌ی ۱۰^۶ سلول بر میلی‌لیتر (۱۰ درصد حجمی - حجمی) افزوده شد. آزمایش‌ها در دستگاه گرم‌کننده-تکاننده، در سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه، دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و pH اولیه‌ی ۲.۵ انجام شدند. در فواصل زمانی معین pH محیط و مقدار اورانیم حل شده اندازه‌گیری شد.

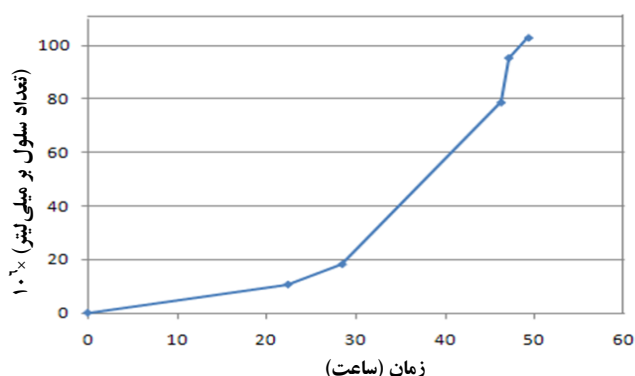
بررسی پارامترهای مؤثر بر عملیات فروشوی میکروبی اورانیم و تعیین مقدار بهینه‌ی آن‌ها با تغییر تنها یک پارامتر در هر زمان^(۲) انجام شد.

۳.۴.۲ آزمایش‌های فروشوی شیمیایی

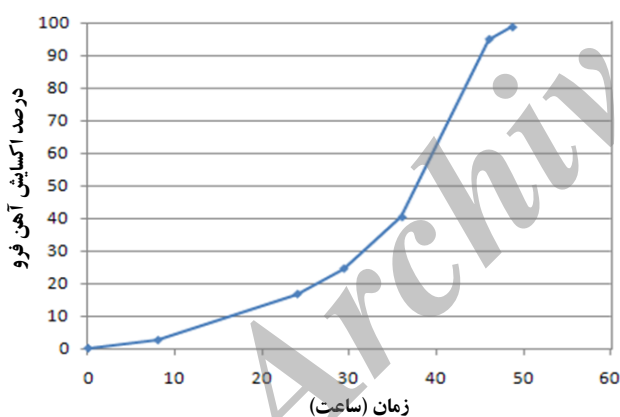
آزمایش‌های فروشوی شیمیایی در شرایط مشابه با شرایط فروشوی میکروبی و در محیط سولفوریک اسید با pH های ۱، ۱/۵ و ۲، در محدوده‌ی دانه‌بندی $63+75$ -، چگالی پالپ (W/V) ۲.۵٪، در شرایط هم‌زنی با سرعت ۱۸۰ دور بر دقیقه، و دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شدند.



شکل ۱. ریزنگار الکترونی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان.



شکل ۲. منحنی رشد باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان.



شکل ۳. درصد اکسایش آهن فرو به صورت تابعی از زمان در محیط کشت باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه، pH اولیه ۲٫۵ و درصد حجمی - حجمی تلقیح ۱۰).

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه‌ی نماینده‌ی کانسنگ آنومالی ۵ ساغند

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	ترکیب
۵۵٫۰۳	۷٫۴	۸٫۱۴	۱۲٫۳۱	۰٫۱۷	۹٫۴۱	۴٫۲۴	۰٫۴۴	۲٫۲۲	۰٫۰۴	۰٫۰۱	عیار (%)
Ba	Co	Cl	Cu	Ga	Hf	Ni	Rb	V	W	S	عنصر
۴۰۱	۴۹	۲۲۳	۲۰	۱۴	۱۰	۴۲	۱۶	۱۴۶	۱۱۸	۵	عیار (ppm)
U	Th	La	Ce	Y	As	Nd	Nb	Zr	Sr	Pb	عنصر
۲۵۰	۱۲۳	۹۴۶	۱۰۴۳	۱۴۲۴	۱۵	۲۹۸	۹۵	۱۷۴	۱۰۳	۵۹	عیار (ppm)

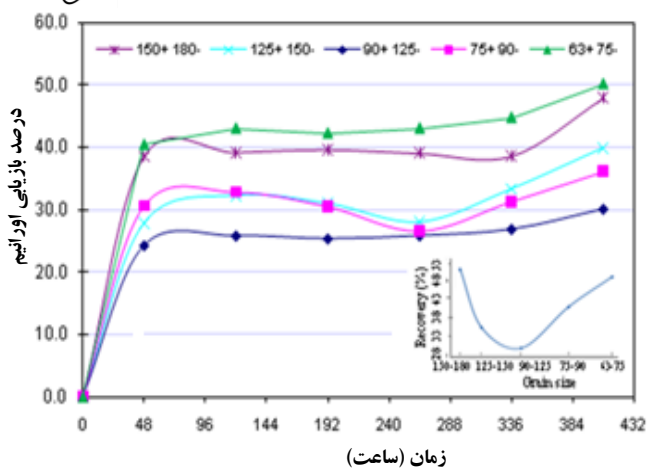
مرحله‌ی انحلال و به ویژه در مرحله‌ی جداسازی شود. وجود کلسیت در این کانسنگ می‌تواند در عملیات فروشویی معمولی و میکروبی موجب بروز مشکلاتی چون مصرف زیاد اسید، افزایش pH و گرانروی پالپ شود. کانی‌های فرعی شناسایی شده در این کانسنگ، اسفن، زیرکن، دیویدیت، آلانیت، روتیل، ایلمنو روتیل، پیریت و کالکوپیریت هستند. مقدار کانی‌های پیریت و کالکوپیریت موجود در این کانسنگ ناچیز است.

تجزیه‌ی عنصری نشان داد که سنگ معدن آنومالی ۵ ساغند به طور متوسط دارای ۲۵۰ گرم بر تن اورانیم و ۱۲۳ گرم بر تن توریم، و خاکی‌های نادر است (جدول ۱). با توجه به سیلیکاته بودن کانسنگ و وجود کانی‌های ایلمنیت، روتیل، زیرکن، اسفن، باستانزیت و موناژیت، این کانسنگ مقاومت زیادی در برابر فروشویی از خود بروز می‌دهد که موجب قرار گرفتن این کانسنگ در رده‌ی کانسنگ‌های سرسخت می‌شود.

۲.۳ مشخصات و منحنی رشد باکتری

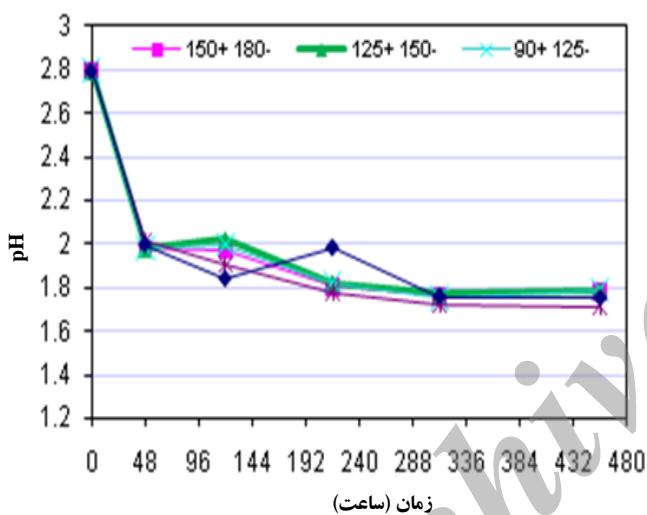
ریزنگار الکترونی باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این باکتری به شکل کپسولی به طول تقریبی ۱٫۰ و عرض ۰٫۳ میکرون است.

منحنی رشد باکتری اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدان در محیط مایع ۹k اندازه‌گیری و در شکل ۲ نشان داده شده است. آهنگ رشد آن هم‌چنین به طور غیرمستقیم و از طریق اندازه‌گیری آهنگ اکسایش یون فرو به یون فریک کنترل شده است [۲۴، ۲۵]. فعالیت اکسایشی آهن فروی این باکتری در شکل ۳ آورده شده است که همان نظم منحنی رشد باکتری را دنبال می‌کند. با توجه به این نمودارها، فاز نمایی یا لگاریتمی رشد این باکتری در محدوده‌ی زمانی ۲۴ تا ۴۸ ساعت پس از تلقیح است. آهنگ اکسایش آهن در حضور باکتری بسیار بالا بود و ظرف ۲ روز همگی آهن فرو به آهن فریک اکسیده شد.



زمان (ساعت)

شکل ۴. تغییرات بازیابی اورانیم با اندازه‌ی ذرات (نمودار داخلی: تغییرات بازیابی با اندازه‌ی ذرات برای زمان ۴۰۸ ساعت)؛ (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه، pH اولیه‌ی ۲٫۸ و چگالی پالپ ۵٪(W/V)).



زمان (ساعت)

شکل ۵. اثر اندازه‌ی ذرات بر pH محیط فروشویی (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه، pH اولیه‌ی ۲٫۸ و چگالی پالپ ۵٪(W/V)).

بنابراین pH در این محدوده مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۶) و تفاوت واضحی بین آزمایش‌هایی که در آن‌ها pH تنظیم شده بود و آزمایش‌هایی که در آن‌ها pH اجازه یافته بود آزادانه ظاهر شود، مشاهده شد. در حالت نخست، منحنی انحلال اورانیم با رفتار شیمیایی نوعی مرتبط و از این‌رو سریع بود، در حالی که در حالت آخر مطابق با فرایند زیست‌شناختی در حال انجام یک تکامل نه چندان واضح وجود داشت.

همان‌طور که در شکل ۶ می‌تواند مشاهده شود، بهترین نتایج بازیابی اورانیم همراه با مصرف هم‌زمان کم اسید (نتایج نشان داده نشده‌اند) در pH=۲٫۵ مشاهده شده‌اند.

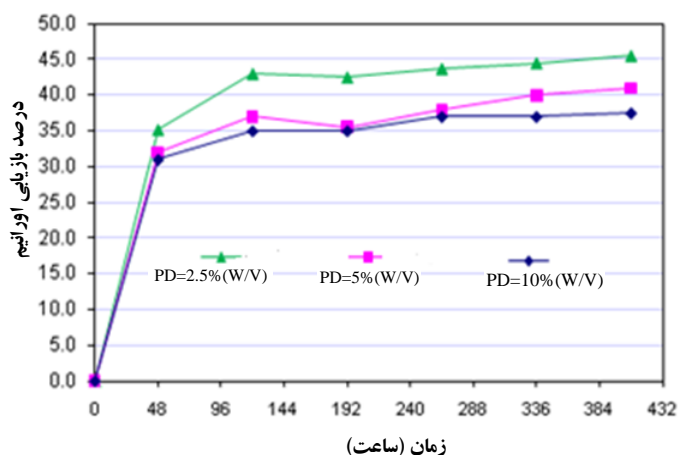
۳.۳ تأثیر پارامترهای مؤثر بر فروشویی زیستی اورانیم ۱.۳.۳ تأثیر دانه‌بندی

برای بررسی تأثیر دانه‌بندی، آزمایش‌های فروشویی میکروبی در شرایط دمایی ثابت ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه و pH اولیه‌ی ۲٫۸ بر روی پنج محدوده‌ی ابعادی از نمونه‌ها انجام شد. شکل ۴ تأثیر اندازه‌ی ذرات بر میزان بازیابی میکروبی اورانیم را در زمان‌های مختلف پس از تلقیح نشان می‌دهد. تغییر بازیابی با اندازه‌ی ذرات در زمان ۴۰۸ ساعت پس از تلقیح در نمودار درونی شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار بازیابی ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. کاهش بازیابی با کاهش اندازه‌ی ذرات از ۱۸۰ تا ۹۰ میکرون به علت افزایش میزان آزادسازی ذرات و باطله‌های موجود در سنگ معدن است. با افزایش خردایش در گستره‌ی دانه‌بندی از ۹۰ تا ۶۳ میکرون میزان بازیابی اورانیم افزایش می‌یابد که این ناشی از افزایش سطح تماس کانی‌های حاوی اورانیم و در نتیجه افزایش نرخ انحلال آن‌ها است. با توجه به انرژی لازم برای خردایش و نیز مشکل تر شدن عملیات بعد فروشویی برای سنگ با ذرات ریزتر و با توجه به این که کانی‌ها به درجه‌ی آزادی مناسب برای انجام فرایند فروشویی رسیده و با افزایش خردایش درجه‌ی آزادی کانی‌ها تغییر محسوسی نخواهد کرد، برای ادامه‌ی عملیات فروشویی میکروبی، از دانه‌بندی ۶۳ تا ۷۵ میکرون برای ذرات استفاده شد.

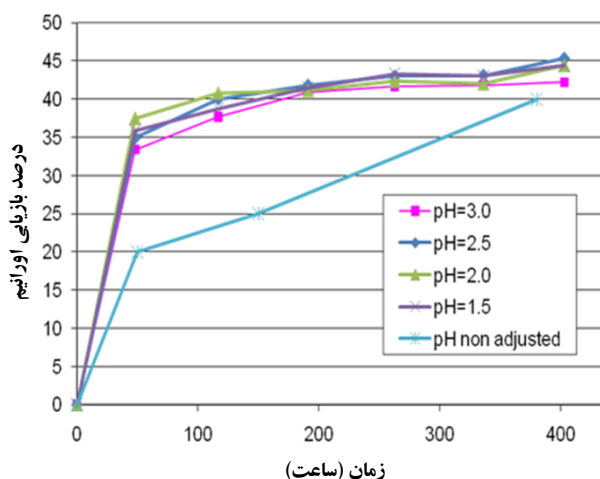
اثر اندازه‌ی ذرات بر روی pH محلول در شکل ۵ نشان داده شده است. آنچه که در خصوص تفاوت اندازه‌ی ذرات می‌توان گفت این است که بسته به ماهیت کانی‌هایی که با خردایش بیش‌تر امکان انحلال آن‌ها بالا می‌رود، کاهش اندازه می‌تواند اسیدزا (در خصوص کانی‌های سولفیدی) یا مصرف‌کننده‌ی اسید باشد. در این آزمایش‌ها عمده تولید اسید در ۴۸ ساعت اول آزمایش بوده است.

۲.۳.۳ اثر pH

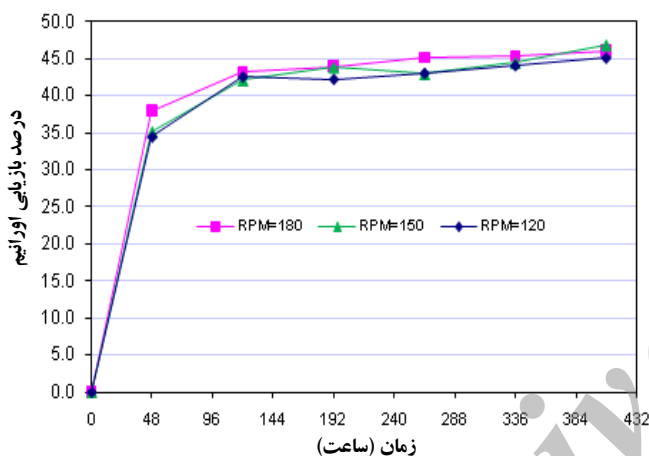
باکتری‌هایی که در فرایندهای فروشویی میکروبی شرکت می‌کنند در محیط با pH ای که از ۱ تا ۳ تغییر می‌یابد، رشد می‌کنند [۲۷]. اما هر کدام دارای pH بهینه‌ی مربوط به خود است که در آن فعالیت میکروبی بیشینه است و از این‌رو مقدار مناسب در این بازه باید تعیین شود و نباید فراموش شود که pH از نقطه‌نظر واکنش‌های شیمیایی نیز مهم است.



شکل ۷. اثر چگالی پالپ (PD) بر بازیابی اورانیم (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه، دانه‌بندی ۶۳+۷۵-).



شکل ۸. اثر pH بر بازیابی میکروبی اورانیم (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه، دانه‌بندی ۶۳+۷۵- و چگالی پالپ ۵٪ (W/V)).



شکل ۹. اثر سرعت هم‌زنی (rpm) بر بازیابی اورانیم (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، دانه‌بندی ۶۳+۷۵-، pH اولیه برابر ۲.۸ و چگالی پالپ ۵٪ (W/V)).

۱۵.۳.۳ اثر مقدار یون فرو

برای بررسی اثر مقدار یون فروی حل شده بر میزان انحلال اورانیم، مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم بر لیتر فرو سولفات هفت آب همراه با ۲ گرم نمونه‌ی سنگ معدن به ابعاد ۶۳+۷۵- به سه ارلن حاوی ۸۰ میلی‌لیتر از محیط کشت تلقیح شده‌ی ۱۰٪ (V/V) منتقل و با سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه در دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج (شکل ۹) نشان داد که بهبودی حاصل از به کارگیری Fe^{2+} ناچیز است چرا که فرایند تنها در مدت ۵۰ ساعت اولیه تسریع شده است. توضیح این رفتار می‌تواند این باشد که Fe^{2+} در آغاز با تولید Fe^{3+} و کاهش pH، به رشد باکتری کمک کرده است، تحت این شرایط با سینتیک تجزیه‌ی کانی نیز همراهی شده است. با این وجود، این

۱۳.۳.۳ اثر چگالی پالپ

برای بررسی تأثیر چگالی پالپ، آزمایش‌های فروشویی میکروبی با مقادیر ۱، ۲ و ۴ گرم از نمونه‌های با دانه‌بندی ۶۳+۷۵- در ۴۰ میلی‌لیتر از محیط کشت تلقیح شده‌ی ۱۰٪ (V/V) (متناظر با چگالی‌های پالپ به ترتیب ۲/۵، ۵ و ۱۰٪ (W/V))، در شرایط ثابت دمایی ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و سرعت هم‌زنی ۱۲۰ دور بر دقیقه انجام شدند. نتایج حاصل در شکل ۷ آورده شده است. نتایج حاکی از کاهش میزان انحلال اورانیم با افزایش چگالی پالپ است. این کاهش با تماس ضعیف کانه با محلول انحلال تلقیح می‌شود. حداکثر میزان انحلال اورانیم در چگالی پالپ ۲/۵٪ (W/V) مشاهده شد.

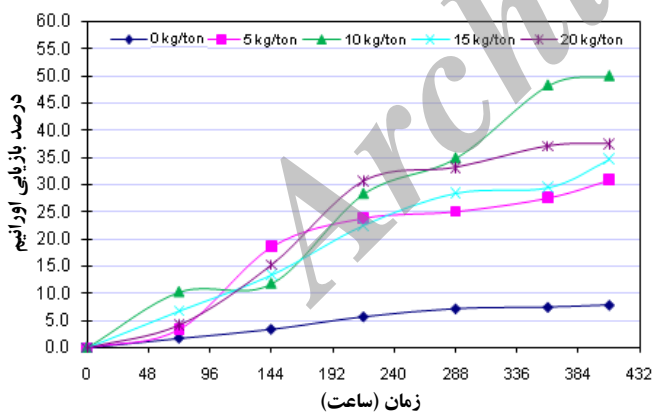
۱۴.۳.۳ اثر سرعت هم‌زنی

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر فروشویی میکروبی سرعت هم‌زنی است. با کاهش سرعت هم‌زنی میزان هوادهی به محیط کشت کاهش یافته و تأمین هوای موردنیاز فعل و انفعال میکروبی دچار مشکل می‌شود. از سوی دیگر سرعت هم‌زنی بالا موجب آشفته‌گی بیش از حد محیط کشت و در نتیجه کاهش بازده فرایند انحلال می‌شود. تأثیر سرعت هم‌زنی بر میزان انحلال اورانیم در سرعت‌های ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ دور بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۸ داده شده‌اند. نتایج حاکی از افزایش کم میزان انحلال اورانیم با افزایش سرعت هم‌زنی است. با وجود این، سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه به عنوان سرعت هم‌زنی بهینه انتخاب شد.



اورانیم مورد مطالعه چنین است. لذا، برای انجام این کار، مقداری کانسنگ حاوی پیریت از مرکز تحقیقات پیشرفته‌ی فرآوری کرج تهیه و با استفاده از آسیای دیسکی تا ابعاد ۶۳ میکرون آسیا شد. نتایج تجزیه‌ی عنصری آن با استفاده از فلورسانسی پرتو ایکس (XRF) در جدول ۲ آورده شده است.

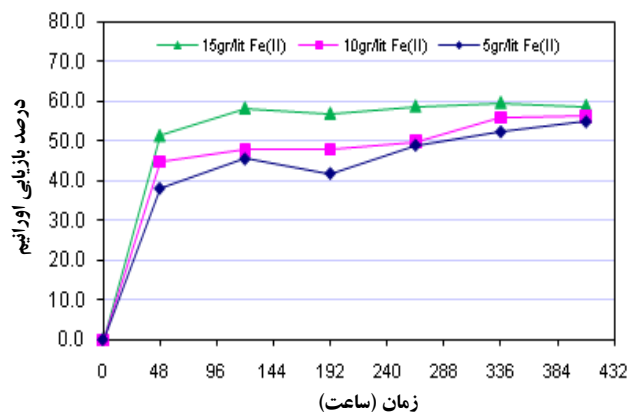
مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم بر تن از کانسنگ پیریت آسیا شده، در اتوکلاو به نمونه‌ی کانسنگ اورانیم و محیط کشت بدون فرسولفات در شرایط بهینه‌ی حاصل از آزمایش‌های پیشین (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه، pH اولیه برابر با ۲٫۸ و چگالی پالپ ۲٫۵٪(W/V)) افزوده شده و در درون دستگاه گرم‌کننده-تکاننده قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، اثراتی شبیه به اثرات افزایش Fe^{2+} یک بار دیگر مشاهده شد. با انحلال اورانیم در آغاز همراهی شده است، هرچند این همراهی در مورد پیریت کم‌تر از آهن است. با این وجود، برخلاف آزمایش‌های قبلی، انحلال اورانیم در بعد از ۵۰ ساعت اول ادامه یافته است، این بدان معنی است که ریزجانداران با جای‌گزین نمودن مقدار Fe^{2+} در محلول، و از این‌رو با جلوگیری از مسدود شدن سطوح خارجی پیریت، بر روی آن عمل نموده‌اند. ملاحظه می‌شود که بازیابی اورانیم با افزایش ۱۰ کیلوگرم بر تن از کانسنگ پیریت بهبود یافته و به ۵۱ درصد رسیده است.



شکل ۱۰. اثر افزودن پیریت به محیط کشت بر بازیابی اورانیم (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه، pH اولیه برابر با ۲٫۸ و چگالی پالپ ۲٫۵٪(W/V)).

جدول ۲. ترکیب کانسنگ پیریت افزوده شده

SO _۳	Fe _۲ O _۳	SiO _۲	CaO	Al _۲ O _۳	Cr _۲ O _۳	MgO	Na _۲ O	K _۲ O	Cu _۲ O	Br	ترکیب
۶۳٫۱	۲۶٫۷	۳٫۷	۰٫۴	۱٫۳	۰٫۲	۱٫۰	۳٫۳	۰٫۱	۰٫۰۴۵	۰٫۰۳	مقدار (%)



شکل ۹. اثر مقدار یون فرو بر بازیابی اورانیم (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه، pH اولیه ۲٫۸ و چگالی پالپ ۲٫۵٪(W/V)).

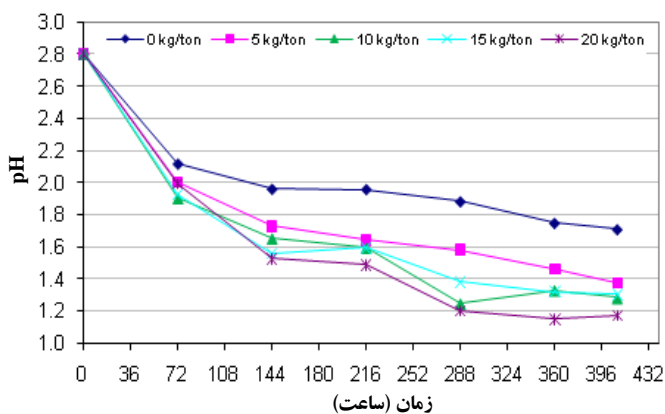
فعالیت باکتریایی مقادیر زیادی یون فریک تولید می‌کند که بخشی از آن به صورت جاروسیت^(۳) رسوب می‌کند [۲۹، ۲۸]، به طوری که غلظت آهن کل در محلول کاهش می‌یابد. این رسوب با کنده‌ای کردن ذرات کانی مانع از تماس آن‌ها با محلول فروشویی می‌شود، و در انحلال اورانیم وقفه ایجاد می‌کند. مطالعات مشابه [۶] تأیید نموده‌اند که تنها مقادیر کمی از یون فریک برای بیشینه نمودن انحلال اورانیم مورد نیاز است.

۶.۳.۳ اثر افزودن پیریت

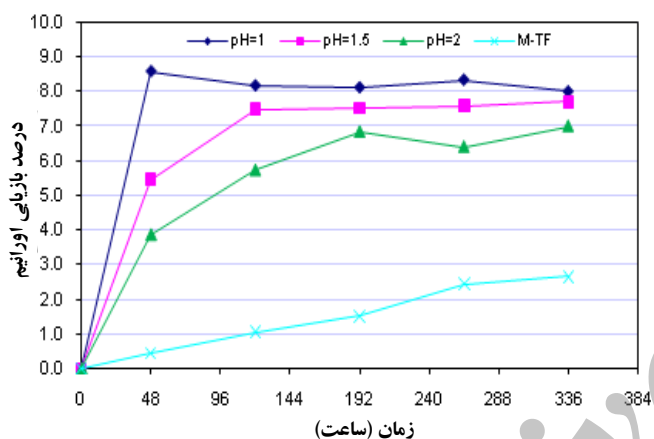
حضور پیریت در فرایند فروشویی میکروبی برای فراهم نمودن یک محیط به اندازه‌ی کافی اسیدی و اکسنده برای انحلال اورانیم ضروری است [۳۰]. بیش‌تر اورانیم به شکل پیچبلاند بوده و از این‌رو مقدار نظری پیریت مورد نیاز برای انحلال اورانیم بر طبق معادله‌ی زیر دو برابر درصد (مولی) UO_2 موجود است



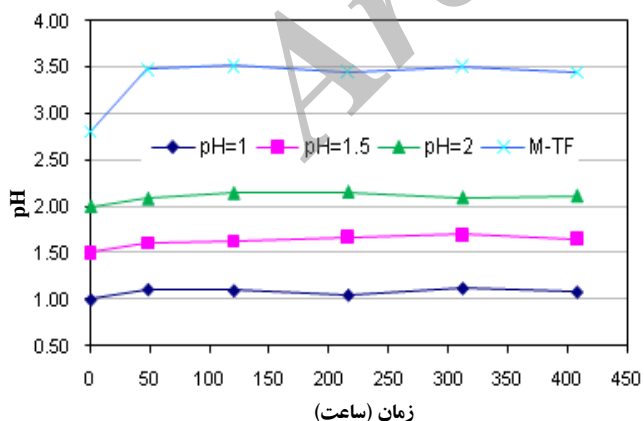
این واقعیت که در حقیقت پیریت بیش‌تری مورد نیاز است ناشی از مصرف اسید و اکسنده به وسیله‌ی مواد معدنی سنگ است. بنابراین، لازم است امکان بهبود فروشویی میکروبی اورانیم از طریق افزودن پیریت بیش‌تر مورد بررسی قرار گیرد، اگر کانسنگ دارای کمبود این سولفید باشد که در مورد کانسنگ



شکل ۱۱. اثر افزودن پیریت بر pH محیط فروشویی (دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه، pH اولیه برابر ۲٫۸ و چگالی پالپ ۲٫۵٪(W/V)).



شکل ۱۲. اثر محیط فروشویی و pH بر بازیابی اورانیم؛ ۱، ۲، ۳: pH محیط سولفوریک اسید، M-TF: محیط کشت استریل بدون تلقیح (محدوده‌ی ابعادی ۶۳+۷۵-، چگالی پالپ ۲٫۵٪(W/V)، سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه، دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد).



شکل ۱۳. تغییرات pH محیط فروشویی با زمان؛ ۱، ۲، ۳: pH محیط سولفوریک اسید، M-TF: محیط کشت استریل بدون تلقیح (محدوده‌ی ابعادی ۶۳+۷۵-، چگالی پالپ ۲٫۵٪(W/V)، سرعت هم‌زنی ۱۸۰ دور بر دقیقه، دما ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد).

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پیریت، pH محیط به میزان زیادی کاهش می‌یابد و در pH های خیلی پایین واکنش تشکیل گوگرد عنصری غالب شده و از میزان انحلال اورانیم کاسته می‌شود [۳۱].

۴.۳ فروشویی شیمیایی

حداکثر بازیابی اورانیم برای فروشویی شیمیایی، در محیط سولفوریک اسید با pH=۱ و در محیط کشت بدون تلقیح، به ترتیب، برابر ۸٫۵ و ۳ درصد به دست آمد (شکل ۱۲). هم‌چنین مشاهده می‌شود که افزایش pH محیط سولفوریک اسید برای فروشویی شیمیایی به مقادیر ۱٫۵ و ۲ بازیابی اورانیم را به دلیل کاهش قدرت اسیدی محیط کاهش می‌دهد.

همان‌سان که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، تغییرات زمانی pH محیط در مدت ۴۰۸ ساعت بسیار ناچیز است.

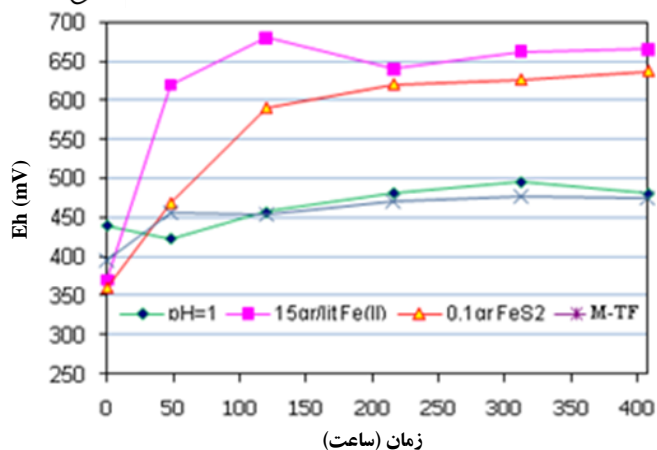
۵.۳ مقایسه‌ی فروشویی میکروبی با فروشویی شیمیایی

۱.۵.۳ تغییرات بازیابی اورانیم

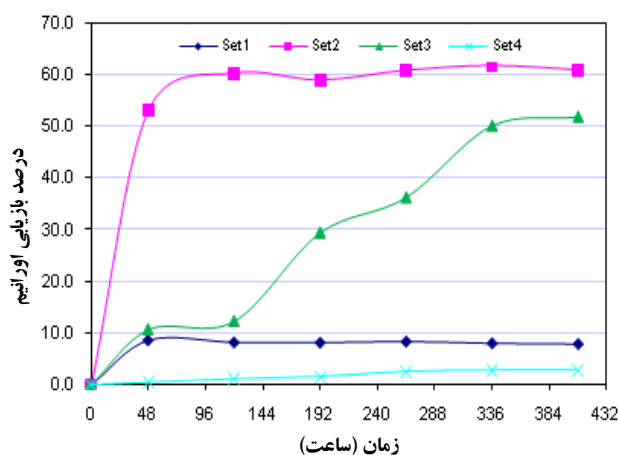
نتایج رشته آزمایش‌های طراحی و اجرا شده برای مقایسه‌ی شیوه‌های مختلف فروشویی کانسنگ اورانیم آنومالی ۵ ساغند (شکل ۱۴) حاکی از آن است که بیش‌ترین میزان بازیابی اورانیم (۶۰ درصد) برای رشته آزمایش‌های ۳ (فروشویی میکروبی در حضور فرسولفات) حاصل شده است. رشته آزمایش‌های ۴ (فروشویی میکروبی در حضور پیریت) میزان بازیابی اورانیم را ۵۱ درصد به دست داد.

مقایسه‌ی رشته آزمایش‌های ۳ و ۴ حاکی از آن است که شیب انحلال اورانیم در مورد فرسولفات زیاد بوده و در مدت زمان ۹۰ ساعت به حدود ۶۰ درصد می‌رسد و در ادامه تغییر محسوسی نمی‌کند. این در حالی است که در رشته آزمایش‌های ۴ روند انحلال اورانیم با شیب کم در مدت زمان ۳۰۰ ساعت به ۵۱ درصد رسیده است. این تفاوت در شیب انحلال می‌تواند به دلیل فوراً قابل دسترسی بودن Fe^{2+} حل شده نسبت به پیریت به آرامی حل‌شونده باشد. از این نظر پیریت می‌تواند برای نگه داشتن تعدادی سلول آهن-اکسند برای یک مدت طولانی مورد استفاده قرار گیرد [۱۷].

حداکثر میزان بازیابی اورانیم در رشته آزمایش‌های ۱ (محیط سولفوریک اسید با pH=۱) و رشته آزمایش‌های ۲ (محیط کشت بدون تلقیح)، به ترتیب، ۸٫۶ و ۲٫۷ درصد به دست آمد. از مقایسه‌ی رشته آزمایش‌های ۱ و ۲ با رشته آزمایش‌های ۳ و ۴ می‌توان به نقش اساسی باکتری و منبع آهن فرو پی برد.



شکل ۱۵. رابطه‌ی بین پتانسیل محیط فروشویی و شیوه‌ی فروشویی (M-TF): فروشویی شیمیایی در محیط کشت بدون تلقیح، pH=1: فروشویی شیمیایی در محیط سولفوریک اسید، Fe(III): فروشویی میکروبی در حضور فرسولفات، FeS_۲: فروشویی میکروبی در حضور پیریت).



شکل ۱۴. رابطه‌ی بین بازیابی اورانیم و شیوه‌ی فروشویی (Set1): فروشویی شیمیایی در محیط سولفوریک اسید، Set2: فروشویی شیمیایی در محیط کشت بدون تلقیح، Set3: فروشویی میکروبی با افزودن فرو سولفات به محیط، Set4: فروشویی میکروبی با افزودن پیریت به محیط).

۴. نتیجه گیری

مطالعه‌ی تأثیر دانه‌بندی ذرات بر فروشویی میکروبی نشان داد که افزایش میزان خردایش کانی حاوی اورانیم موجب افزایش میزان انحلال اورانیم می‌شود. pH محیط کشت تحت تأثیر فعالیت باکتری بوده و باکتری قادر است pH محیط را با فعل و انفعالات الکتروشیمیایی و آنزیم‌های تولیدی (به عنوان کاتالیزگر) بکاهد. تغییرات pH اولیه در بازه‌ی ۱/۵ تا ۳ تأثیر قابل توجهی بر میزان انحلال اورانیم نداشت.

از آن جا که محتوای پیریت کانسنگ مورد مطالعه اندک بود تصمیم به افزودن پیریت به جای فرسولفات گرفته شد. افزودن پیریت به محیط کشت تا مقدار ۱۰ گرم بر لیتر نتایج مثبتی به دنبال داشت. مقایسه‌ی آزمایش‌ها در وضعیت افزودن فرسولفات با وضعیت پیریت حاکی از کاهش شیب و در نتیجه آهنگ انحلال اورانیم در وضعیت پیریت بود.

مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های فروشویی شیمیایی با فروشویی میکروبی در شرایط یکسان حاکی از بالا بودن پتانسیل محیط در حالت میکروبی به دلیل خصوصیت ذاتی ریزجاندار مورد استفاده در تبدیل یون فرو به یون فریک و به دنبال آن افزایش میزان انحلال اورانیم از حدود ۸/۵ درصد در فروشویی شیمیایی به ۶۰ درصد در فروشویی میکروبی همراه با افزودن فرو سولفات و ۵۱ درصد در فروشویی میکروبی همراه با افزودن پیریت است.

۲.۵.۳ تغییرات پتانسیل اکسایش و کاهش

تغییرات پتانسیل محیط واکنش شیوه‌های مختلف فروشویی کانسنگ آنومالی ۵ ساغند، در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فروشویی شیمیایی در محیط سولفوریک اسید و محیط کشت بدون تلقیح، پتانسیل بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌ولت از یک روند افزایشی کند برخوردار بوده و سپس بدون تغییر باقی می‌ماند. اما در فروشویی میکروبی در حضور فرو سولفات، پتانسیل محیط در ۱۰۰ ساعت ابتدایی با یک شیب تند به حدود ۶۵۰ میلی‌ولت رسیده و باکتری در ادامه این پتانسیل را در طی زمان ۴۰۸ ساعت بین ۶۰۰ تا ۶۵۰ میلی‌ولت ثابت نگه می‌دارد. در آزمایشی که در آن به جای فرسولفات، پیریت به محیط افزوده شده است، پتانسیل با شیبی کوچک‌تر از مورد فرو سولفات در ۱۵۰ ساعت اول به حدود ۶۴۰ میلی‌ولت رسیده و باکتری در ادامه این پتانسیل را در مدت ۴۰۸ ساعت بین ۶۰۰ تا ۶۵۰ میلی‌ولت ثابت نگه می‌دارد. به همین دلیل نرخ انحلال اورانیم در آزمایش‌های میکروبی در حضور فرسولفات و پیریت، همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، به دلیل فعالیت باکتری، نسبت به حالت فروشویی شیمیایی بیش‌تر است [۲۹].



۱. Caro's Acid

۳. Jarosite: $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$

۲. One Parameter at a Time

مرجع‌ها:

1. S. Pal, D. Pradhan, T. Das, L.B. Sukla, G. Roy Chaudhury, Bioleaching of low-grade uranium ore using *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Indian J. of Microb.*, 50 (2010) 70-75.
2. G. Rossi, *Biohydrometallurgy*, McGraw-hill, New York (1990).
3. I.G. Petrisor, I. Lazar, T.F. Yen, Bacterial mining, *Petroleum Science and Technology*, 25 (2007) 1347-1352.
4. M.J. Crawford, Mining technology for the new millennium, *Mining Voice*, 50 (1990) 28-34.
5. M.S. Choi, K.S. Cho, D.S. Kim, H.W. Ryu, Bioleaching of uranium from low grade black schists by *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *World J. of Microb. and Biotech.* 21 (2004) 377-380.
6. R. Guay, M. Silver, A.E. Torma, Microbiological leaching of a low-grade uranium ore by *Thiobacillus ferrooxidans*, *Applied Microb. and Biotech.* 3 (1976) 157-167.
7. A.K. Mathur and K.K. Dwivedy, Microbial leaching of uranium from low grade ores: a review, *J. of Atomic Mineral Science*, 2 (1994) 131-142.
8. M.P. Silverman and H.L. Ehrlich, Microbial formation and degradation of minerals, *Advan. Appl. Microbiol.* 6 (1964) 153-206.
9. J.A. Muñoz, F. Gonzalez, A. Ballester, M.L. Blazquez, Bioleaching of a Spanish uranium ore, *FEMS Microb. Reviews*, 11 (1993) 109-120.
10. Gregory J. Olson, Rate of Pyrite Bioleaching by *Thiobacillus ferrooxidans*: Results of an Interlaboratory Comparison, *Applied and Environ. Microb.*, Mar (1991) 642-644.
11. Jayesh Doshisoumya Darshan Mishra, Bioleaching of Lateritic Nickel ore using Chemolithotrophic Micro-Organisms (*Acidithiobacillus ferrooxidans*), Bachelor's Degree Thesis, Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, National Institute of Tech., Rourkela (2007).
12. N. Pradhan, K.C. Nathsarma, Srinivasa Rao, L.B. Sukla, B.K. Mishra, Heap bioleaching of chalcopyrite: A review, *Minerals Eng.* 21 (2008) 355-365.
13. Abhilash, K.D. Mehta, V. Kumar, B.D. Pandey, P.K. Tamarakar, Bioleaching-an Alternate Uranium Ore Processing, *Energy Procedia (Asian Nuclear Prospects)* (2010).
14. International Atomic Energy, Uranium extraction technology, Vienna (1993).
15. B. De Vivo, Uranium geochemistry, mineralogy, geology, exploration and resources, Institution of Mining and Metallurgy (1993) 10-45.
16. S. Mortazavi, M. Karimi, R. Kadkhodaie, S. Rahimi, *Biotechnology, Industrial Microbiology*, Ferdosi University Publication (1996) 114-120.
17. Jong un lee, Sung Min Kim, Kyoung Woong Kim, In S. Kim, Microbial removal of uranium in uranium-bearing black shale, Elsevier, *Chemosphere* (2005) 147-154.
18. R.O. Burt, Gravity concentration from bench scale to plant, *Canadian Mine Proce*, Ottawa, (1976) 21.
19. P.A. Laxen, A fundamental study of the dissolution in acid solution of uranium minerals from south african ores, Pretoria (1973).
20. K. Memar, Mineralogy and petrochemistry of a part of saghand area, central iran, Ph.D thesis university of Bombay (1991) 1-43.
21. M. Kiaie, Uranium and thorium processing investigation in Saghand-Anomaly 5, Master Degree Thesis, Bahonar Uni., (2000) 26-36.
22. M. Gafari, M. Eskandari, Determination of optimum process of ball mill variables, Bachelor's Degree Thesis, Bahonar Uni., Zarand Faculty (2008) 42-50.



23. E. Jorjani, The desulfurization studies of Tabas coal mine(C1 seam) with chemical or biological methods based on characterization studies, Azad university, Science and Research branch, Ph.D. Thesis (2003) 121-122.
24. J.E. Dutrizac and J.C. Mac Donald, Ferric ion as a leaching medium, *Miner. Sci. Eng.*, 6 (1974) 59-100.
25. Hong Peng, Yu Yang, Xuan Li, Guanzhou Qiu, Xueduan Liu, Jufang Huang, Yuehua Hu, Structure analysis of 16S rDNA sequences from strains of acidithiobacillus ferrooxidans, *Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 39(2) (2006) 178-182.
26. M. Nemati, S.T.L. Harrison, G.S. Hansford, C. Webb, Biological oxidation of ferrous sulfate by *Thiobacillus ferrooxidans*: a review on the kinetic aspects, *Biochem Eng J.*, 1 (1998) 171-190.
27. J.A. Mufioz, A. Ballester, F. Gonzilez, M.L. Bliizquez, A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore. Part II: Orbital shaker experiments, *Hydrometallurgy*, 38 (1995) 59-78.
28. Grishin Sergeii, M. Bigham Jerry, H. Tuovinen Olli, Characterization of Jarosite Formed upon Bacterial Oxidation of Ferrous Sulfate in a Packed-Bed Reactor, *Applied and Environ. Micro.* (Dec. 1988) 3101-3106.
29. Jones Brian, W. Renaut Robin, Selective mineralization of microbes in Fe-rich precipitates (jarosite, hydrous ferric oxides) from acid hot springs in the Waitapu geothermal area, North Island, New Zealand, *Sedimentary Geology*, 194 (2007) 77-98.
30. A. Bruynesteyn, The biological aspects of heap and in-place leaching of uranium ores. In: 6th Annu. Uranium Seminar, SME-AIME, New York (1983) 59-65.
31. F. Habashi, A texbook of hydrometallurgy, Department of mining and metallurgy, Laval University, Quebec City, Canada (1993) 430-440.

Archive of SID