بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در استحصال زیستی اورانیوم با استفاده از باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* و کانسنگ آنومالی ۲ ساغند یزد

فائزه فاطمی[۱*]، سمانه جهانی[۲]، عباس رشیدی[۳]، حسن زارع توکلی[٤]

تاریخ دریافت: ۹٤/۲/۲۹
تاریخ تصویب: ۹٤/۱۱/۱۸

چکیده

بیولیچینگ عبارت است از تبدیل زیستی یک ترکیب فلزی نامحلول به شکلی محلول در آب که در این فرایند پارامترهای متعددی تاثیر گذار هستند. یکی از مهم ترین میکروارگانیسم های دخیل در فرایند بیولیچینگ اورانیوم باکتری Acidithiobacillus ferrooxidans می باشد. با توجه به اهمیت و تأثیر پارامترهای محیطی مختلف در

۱* استادیار، پژوهشکده چرخه سوخت، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران
(نویسنده مسئول ffatemi@aeoi.org.ir)
۲ کارشناسی ارشد، گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران
۳ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران
٤ دانشجوی دکتری، پژوهشکده چرخه سوخت، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

فرایند بیولیچینگ اورانیوم و فعالیت باکتری ها، هدف از این تحقیق، به دست آوردن مقادیر بهینه ۵ پارامتر مهم در بهبود فرایند بیولیچینگ اورانیوم می باشد. بدین منظور، از باکتری بومی *Acidithiobacillus ferrooxidans*، محیط کشت APH و کانسنگ معدن آنومالی ۲ ساغند یزد استفاده شد و پارامتر های مختلف موثر در استخراج اورانیوم از جمله دور همزن، pH، دما، چگالی پالپ و غلظت یون فرو اولیه، در سطوح مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق حاکی از آن است که بیشترین میزان استخراج اورانیوم و بیشترین Eh در دور همزن rpm ۱۵۰، pH = ۲، دما ۳۵ درجه سانتی گراد، (PD = ۵٪ (w/v و غلظت ۱۰ گرم بر لیتر از [$FeSO_4.7H_2O$] مشاهده شده است.

واژه های کلیدی: *بهینه سازی، بیولیچینگ، چگالی پالپ، دما، دور همزن، غلظت یون فرو اولیه، pH*

مقدمه

در طبیعت محیط هایی وجود دارند که به شدت اسیدی هستند و جمعیت باکتریایی خاص خود را دارند. گاهی این شرایط اسیدی به کمک فعالیت های انسانی می آید تا بتواند از محیط خود بهتر استفاده کند. بیولیچینگ از جمله این فرایند هاست که در آن تبدیل فلزات از شکل نامحلول به شکل محلول به وسیله اکسیداسیون بیولوژیکی توسط میکروارگانیسم ها انجام می گیرد Olsen et al., (2003); Rawlings, (2005).

میکروارگانیسم ها از طریق روش های مستقیم و غیر مستقیم در این فرایند باعث تمرکز عناصر، غنی شدگی کانیها در محیط لیتوژئوشیمیایی[1] و هیدروژئوشیمیایی[2] و در نهایت باعث افزایش ارزش اقتصادی یک کانسنگ مقاوم و غیراقتصادی می شوند. از آنجایی که به کارگیری روش های معمولی استخراج فلزات در مورد کانسنگ های کم عیار، اقتصادی و مقرون به صرفه نیست، استفاده از روش های جایگزین دیگر مانند بیولیچینگ ضروری تلقی می گردد. مزایای استفاده از میکروارگانیسم‌ها در فرآیندها نسبت به روش‌های متداول عبارتند از: تأثیرات زیست محیطی کمتر بر روی منابع آب و هوا، نیاز به انرژی کمتر و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و در نتیجه سرمایه‌گذاری کمتر. لازم به توضیح می باشد فلزاتی که از تکنولوژی بیولیچینگ در استخراج آنها استفاده می شوند متعدد هستند که از جمله طلا، مس، نقره، اورانیوم، روی، کبالت و نیکل را می توان نام برد Dong et al., (2011); Manafi et. al., (2009)

با توجه به این مطلب که یکی از دغدغه های اساسی در مورد فرایند بیولیچینگ، انجام اقداماتی جهت بهبود، تسریع و افزایش استخراج فلز مورد نظر می باشد، فراهم نمودن شرایط محیطی مطلوب می تواند تأثیر بسیار بسزایی در بازده فرایند بیولیچینگ داشته باشد. عوامل متعددی بر فرآیند بیولیچینگ فلزات تاثیر می گذارند که شامل pH ، دما، دور همزن، فلزات سنگین، یون فریک، چگالی پالپ، مواد معدنی و ترکیبات آلی، نوع کانسنگ، محیط کشت، سویه باکتری، دی اکسید کربن، اکسیژن، ORP (پتانسیل اکسیداسیون و احیا) و ... می باشند Chen et al., (2011). هدف از انجام تحقیق حاضر، بهینه سازی چند پارامتر مهم در فرآیند بیولیچینگ اورانیوم است. با توجه به اهمیت عوامل محیطی در فرایند بیولیچینگ، در این تحقیق سعی بر آن شده است که مقادیر بهینه برخی از پارامترها در حضور باکتری بومی *Acidithiobacillus ferrooxidans*، که مهمترین باکتری در بیولیچینگ اورانیوم می باشد، به دست آید Seifelnassr and Abouzeid, (2013). لازم به ذکر می باشد که باکتری مورد استفاده در این تحقیق، باکتری بومی جدا شده از بندرگچین بندر عباس می باشد که فرایند بهینه سازی

۱ *Lithogeochemical*

2 Hydrogeochemical

بیولیچینگ اورانیوم با استفاده از این باکتری انجام شده است. همچنین، بررسی قابلیت این باکتری در استحصال اورانیوم از کانسنگ آنومالی ۲ ساغند یزد برای اولین بار در ایران انجام می گردد.

مواد و روش ها

باکتری مورد استفاده در این تحقیق، باکتری بومی *Acidithiobacillus ferrooxidans* می‌باشد که در پروژه بیولیچینگ مربوط به سازمان انرژی اتمی ایران از معدن گچین بندر عباس جداسازی شده است Rashidi et al. (2015).

کشت باکتری

مناسب ترین محیط کشت برای رشد باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* و انجام آزمایشات بیولیچینگ، محیط کشت APH است که ترکیبات آن به صورت زیر می باشد Ronald, (1997).

۲ گرم بر لیتر $(NH_4)2SO_4$، ۰/۵ گرم بر لیتر $MgSO_4.7H_2O$، ۰/۵ گرم بر لیتر K_2HPO_4، ۰/۱ گرم بر لیتر KCl، ۰/۰۱ گرم بر لیتر $Ca(NO_3)_2$ و به مقدار ۴۰ گرم بر لیتر $FeSO_4.7H_2O$ به عنوان منبع آهن مورد نیاز باکتری.

پس از آماده سازی محیط کشت، pH آن با استفاده از اسیدسولفوریک ۱۰ نرمال بر روی ۲ تنظیم شد. سپس، مقدار ۹۵ میلی لیتر محیط کشت داخل ارلن های ۲۵۰ میلی لیتری ریخته و ۵ میلی لیتر از باکتری مذکور با غلظت $1/7\times10^7$ (سلول/میلی لیتر) داخل هر ارلن ریخته شد. لازم به توضیح می باشد که غلظت باکتری مورد نظر با استفاده از روش لام نئوبار به دست آمده است.

آزمایشات بیولیچینگ

با توجه به شرایط سازگاری باکتری ها با محیط، ۵% (w/v) چگالی پالپ به عنوان شرایط ثابت انتخاب گردید. بدین صورت که به ارلن هایی که در مرحله قبل آماده سازی شده بودند (حاوی محیط کشت و باکتری) به میزان ۵% (w/v) پودر کانسنگ آنومالی ۲ اضافه شد و در دما و دور همزن انتخابی انکوبه شدند. لازم به توضیح می باشد که در این تحقیق به منظور انجام آزمایشات بیولیچینگ از کانسنگ آنومالی ۲ ساغند یزد در ابعاد $d_{80}=108\mu m$ استفاده شد که آنالیز حاصل از آن در جدول ۱ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۱: آنالیز XRF کانسنگ آنومالی ۲.

Fe_2O_3	S	U	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	P_2O_5	MgO
٪ ۵۷/۲۸	۱۶۸۶۴(ppm)	۶۰۰(ppm)	٪ ۱/۰۳۳	٪۲۰/۶۲۶	٪۰/۰۴۴	٪۰/۱۱۸	٪۱۴/۳۸۸

در هر قسمت از آزمایشات این تحقیق، نمونه کنترل (شاهد) به منظور بررسی اثر عدم حضور باکتری لحاظ شده است. برای این منظور، از محلول باکتریوساید فرمالدهید در متانول به نسبت ۱ به ۹ به جای محلول باکتریایی استفاده گردید. لازم به ذکر می باشد که تمامی آزمایشات دو بار تکرار شده است.

بهینه سازی فرایند

شرایط مطلوب بیولیچینگ اورانیوم از مقالات و گزارش های مربوطه انتخاب و به عنوان شرایط ثابت لحاظ گردید که شامل چگالی پالپ (۵% (w/v))، غلظت اولیه یون فرو ($[FeSO_4.7H_2O]$ = 40 g/l)، pH = ۲، دما ۳۰°C می باشند Rashidi et al., Chen et al., (2013); (2014). پارامترهای مورد نظر در سطوح انتخابی به عنوان شرایط متغیر در هر مرحله از آزمایشات مدنظر قرار گرفت و بهینه آن پارامتر برای شرایط بعدی لحاظ شد. شرایط اولیه انتخابی برای انجام آزمایش ها و سطوح انتخابی در (جدول ۲) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲: شرایط اولیه انتخابی برای انجام آزمایش ها و سطوح انتخابی

پارامترها	شرایط آزمایش (سطوح پارامترها)	شرایط ثابت در آزمایش
دور همزن (rpm)	۱۲۰- ۱۵۰- ۱۸۰	چگالی پالپ (۵٪ (w/v))، غلظت اولیه یون فرو ($[FeSO_4.7H_2O]$ =۴۰ g/l)، pH =۲ ، دما ۳۰°C
دما (°C)	۲۵- ۳۰- ۳۵	دور همزن (۱۵۰= rpm)، چگالی پالپ (۵٪ (w/v))، غلظت اولیه یون فرو (۴۰ g/l= $[FeSO_4.7H_2O]$)، pH =۲
pH	۱/۵- ۲- ۲/۵	دور همزن (۱۵۰= rpm)، چگالی پالپ (۵٪ (w/v))، غلظت اولیه یون فرو (۴۰ g/l= $[FeSO_4.7H_2O]$)، دما ۳۵°C
چگالی پالپ (PD) ٪(w/v)	۵- ۱۰- ۱۵	دور همزن (۱۵۰= rpm)، غلظت اولیه یون فرو (۴۰ g/l= $[FeSO_4.7H_2O]$)، pH=۲، دما ۳۵°C
غلظت اولیه یون فرو ($[FeSO_4.7H_2O]$) (g/l)	۰- ۱۰- ۲۰- ۴۰	دور همزن (۱۵۰= rpm)، چگالی پالپ (۵٪ (w/v))، pH=۲، دما ۳۵°C

* پارامترهایی که زیر آنها خط کشیده شده است، به معنی مقدار بهینه به دست آمده پارامتر مورد نظر با توجه به آزمایشات انجام شده است که در آزمایشات مراحل بعد ثابت در نظر گرفته شده اند.

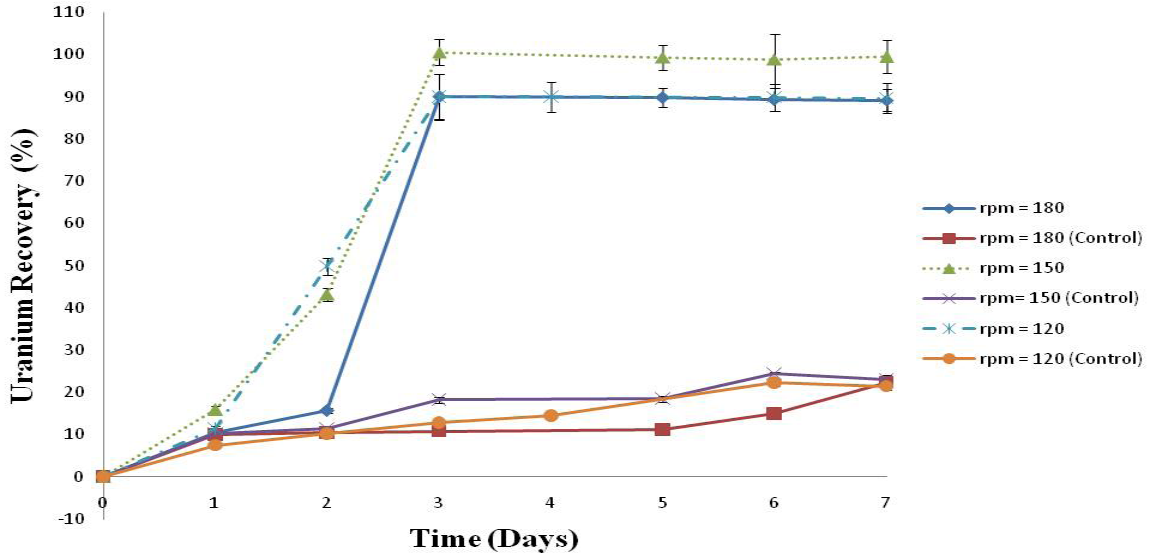
اندازه گیری مقدار اورانیوم استخراج شده و Eh

به منظور اندازه گیری میزان اورانیوم استخراج شده طی فرآیند بیولیچینگ، در توالی های ۲٤ ساعته از ارلن مورد نظر به میزان ۲ میلی لیتر نمونه برداری انجام شد. سپس، ۱ میلی لیتر از نمونه داخل بالن ۵۰ میلی لیتری منتقل شد. ۲ میلی لیتر محلول دی اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید، ۲ میلی لیتر تارتاریک اسید و ۱ میلی لیتر معرف آرسنازو III به بالن مورد نظر اضافه گردید. بالن با استفاده از آب pH برابر ۲ به حجم رسانده شد و به مدت ۱۰ دقیقه نمونه جهت توسعه کامل رنگ نگهداری شد. در نهایت، با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مقدار اورانیوم استخراج شده اندازه گیری شد Golmohammadi et al., (2012). همچنین، میزان تغییرات Eh با استفاده از الکترود مخصوص (Metrohm 827) اندازه گیری شد Mustin et al., (1992). لازم به ذکر می باشد که کاهش حجم ارلن ها با استفاده از آب مقطر pH انتخابی هر آزمایش جبران شده است.

نتایج

بررسی اثر دور همزن در استخراج اورانیوم

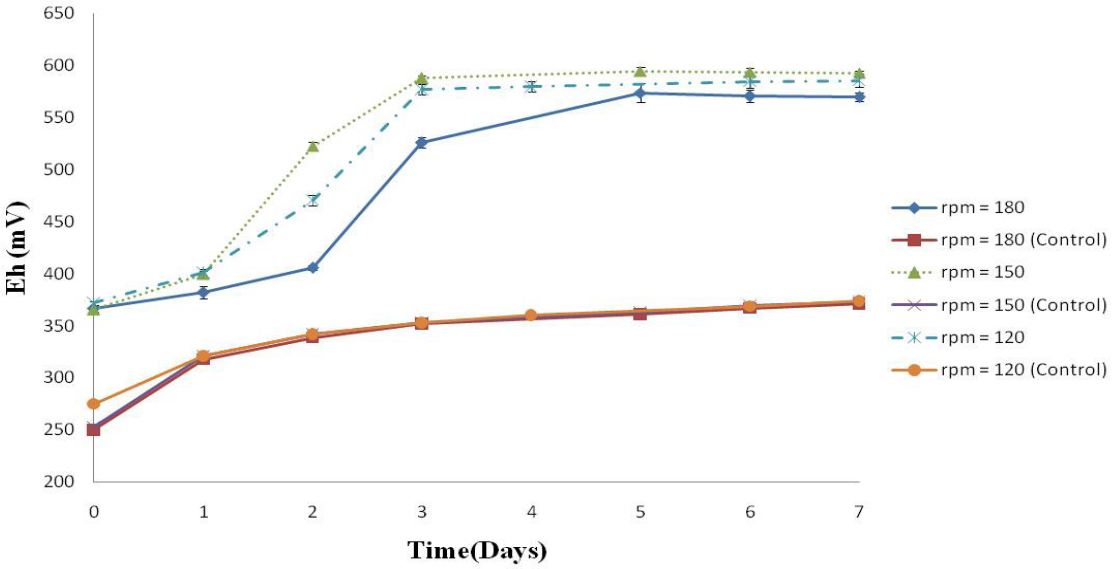
(شکل ۱) نشان دهنده استخراج اورانیوم نسبت به زمان، در حضور باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans*، در دورهای همزن منتخب با استفاده از کانسنگ آنومالی ۲ می باشد. همانگونه که در نتایج مشخص شده است، استخراج اورانیوم با دور همزن ۱۵۰ rpm در روز سوم به حداکثر مقدار (۱۰۰%) خود رسیده است. به علاوه،



شکل ۱: استخراج اورانیوم نسبت به زمان در دورهای همزن مختلف توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* شرایط آزمایش: چگالی پالپ ۵٪ (w/v)، $FeSO_4.7H_2O$ =۴۰ g/l، pH =۲، دما ۳۰°C

آزمایش های کنترل در مقایسه با آزمایش های بیولیچینگ، استخراج بسیار کمتری نشان می دهند که صرفاً به خاطر فعل و انفعالات شیمیایی می باشد. با توجه به (شکل ۲) که نشان دهنده تغییرات Eh در دورهای همزن مختلف است مشخص شد که در دور همزن ۱۵۰ rpm، تغییرات Eh کمی بیشتر از سایر دورها می باشد. بنابراین، با نتایج بدست آمده از بررسی دور همزن در فرایند بیولیچینگ اورانیوم کانسنگ آنومالی ۲ساغند با استفاده از باکتری بومی *Acidithiobacillus ferrooxidans* ۱۵۰ rpm بهینه دور می باشد.

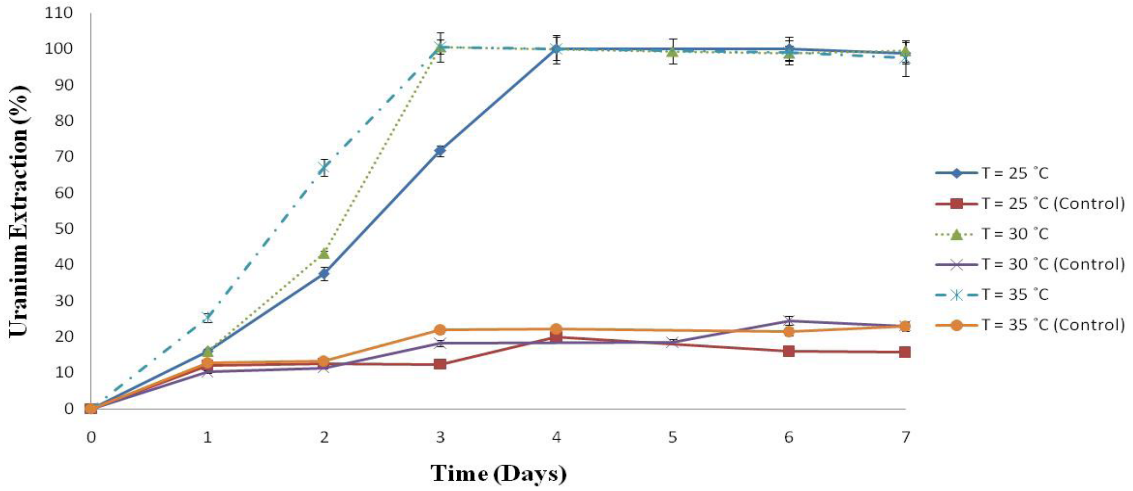
بررسی اثر دما در استخراج اورانیوم



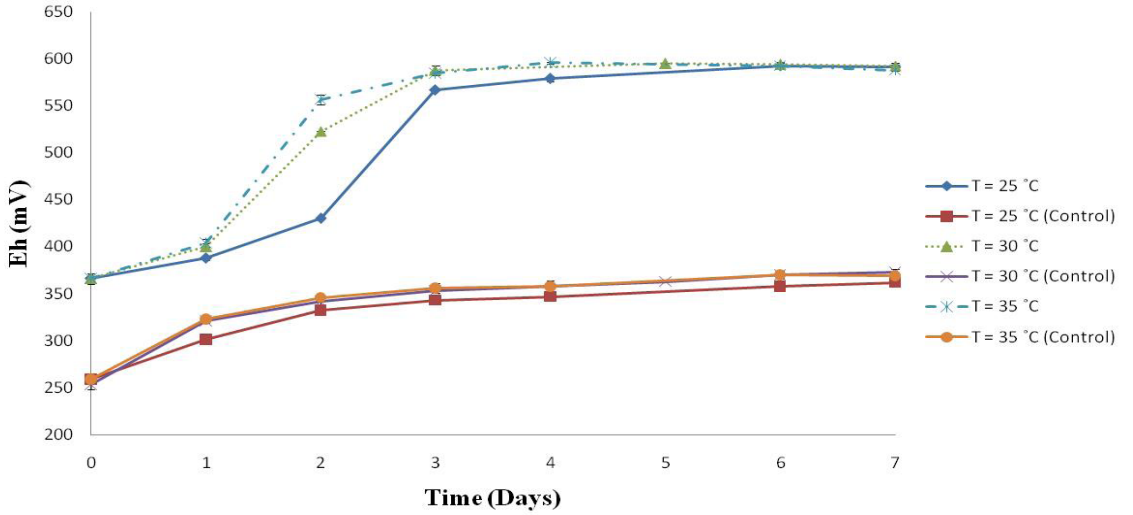
شکل ۲: تغییرات Eh نسبت به زمان در دورهای همزن مختلف توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans*. شرایط آزمایش: چگالی پالپ ۵٪ (w/v)، $FeSO_4.7H_2O$ =۴۰ g/l، pH =۲ ، دما ۳۰°C.

نتایج حاصل از بررسی استخراج اورانیوم در دماهای انتخابی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی گراد نشان داد که در دمای ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی گراد بیشترین میزان استخراج (۱۰۰%) وجود دارد (شکل ۳). به علاوه، (شکل ٤) نشان دهنده این مطلب است که در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد، نرخ افزایش Eh بیشتر از دو دمای دیگر می باشد. با توجه به این مطلب که نرخ استخراج فلز مورد نظر در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد بیشتر است، در نتیجه این دما به عنوان دمای بهینه انتخاب گردید.

بررسی اثر pH در استخراج اورانیوم



شکل ۳: استخراج اورانیوم نسبت به زمان در دماهای مختلف توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* شرایط آزمایش: دور همزن ۱۵۰ rpm، چگالی پالپ ٪۵ (w/v)، $FeSO_4.7H_2O$ =۴۰ g/l، pH =۲.



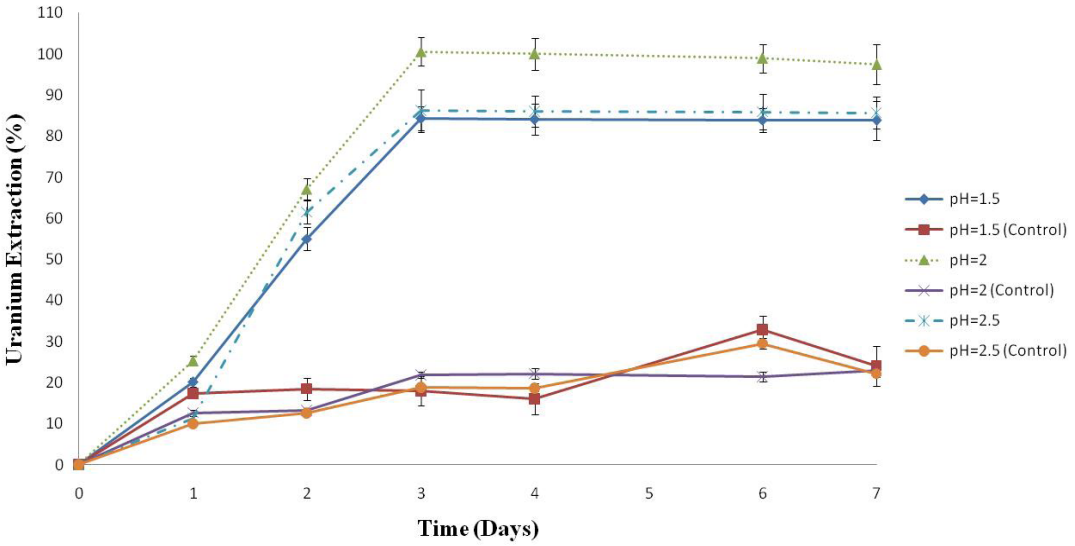
شکل ٤: تغییرات Eh نسبت به زمان در دماهای مختلف توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* شرایط آزمایش: دور همزن ۱۵۰ rpm، چگالی پالپ٪۵ (w/v)، $FeSO_4.7H_2O$ =۴۰ g/l، pH =۲.

شکل ٥ استخراج اورانیوم را نسبت به زمان برای کانسنگ اورانیوم آنومالی ۲ ساغند در pH های مختلف نشان می دهد. همانگونه که از نتایج پیداست استخراج کامل اورانیوم در pH=۲ در روز سوم اتفاق می افتد، در حالیکه حداکثر استخراج اورانیوم در روز سوم در pH=۱/٥ ۸٤% و در pH=۲/٥ برابر با ۸٦% می باشد. تغییرات Eh (شکل ٦) نیز حاکی از اینست که نرخ اکسیداسیون یون فرو و در نهایت انحلال اورانیوم در pH=۲ بهتر از سایر pH ها است. بنابر نتایج حاصل، pH =۲ بهینه pH برای استخراج اورانیوم از کانسنگ اورانیوم آنومالی ۲

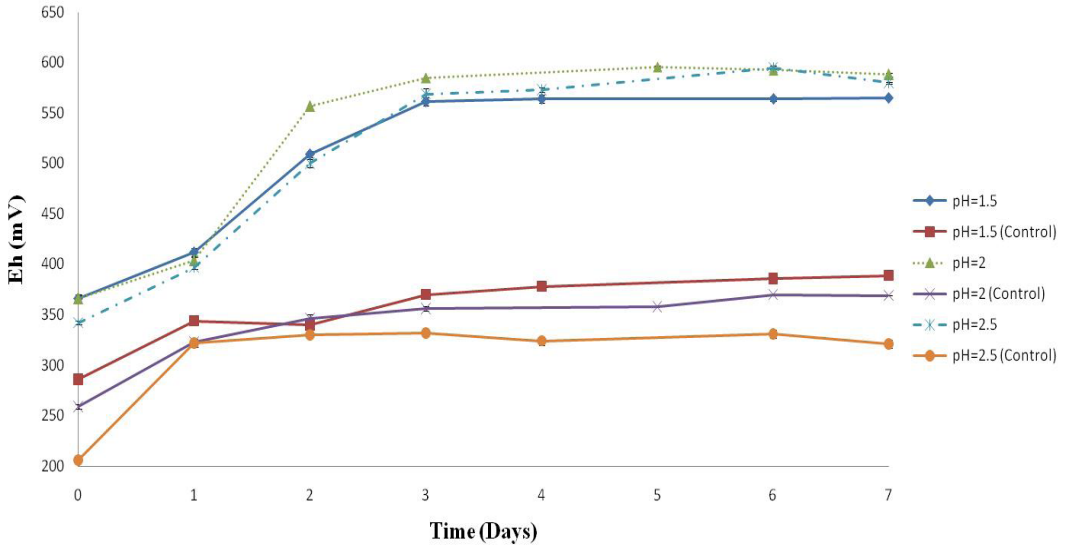
ساغند در حضور باکتری *اسیدیتیوباسیلوس فرواکسیدانس* در نظر گرفته شد.

بررسی اثر چگالی پالپ در استخراج اورانیوم

با توجه به شکل ۷، با افزایش چگالی



شکل ۵: استخراج اورانیوم نسبت به زمان در pHهای مختلف توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans*. شرایط آزمایش: دور همزن ۱۵۰ rpm، چگالی پالپ (w/v) ٪۵، $FeSO_4.7H_2O$ =۴۰ g/l، دما ۳۵°C.

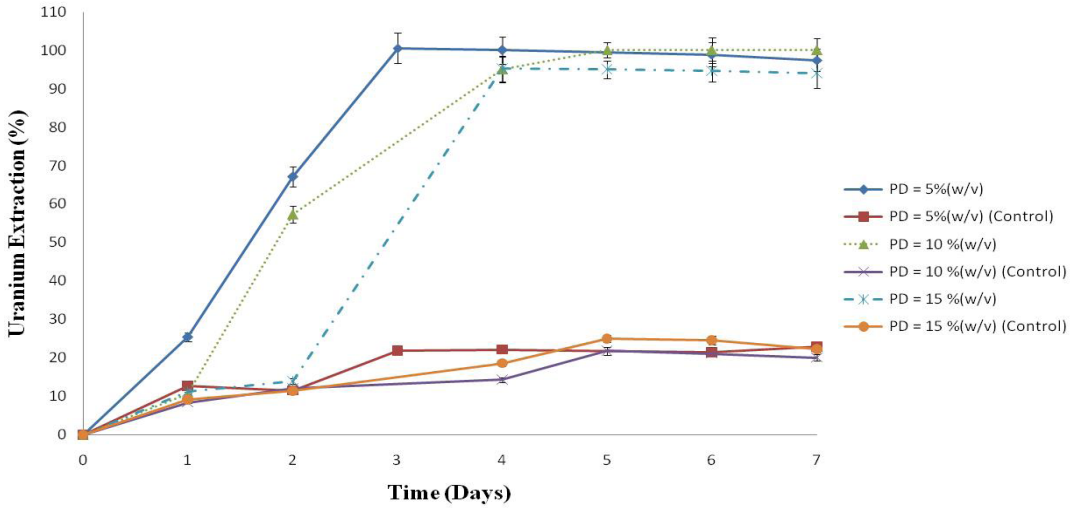


شکل ٦: تغییرات Eh نسبت به زمان در pHهای مختلف توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans*. شرایط آزمایش: دور همزن ۱۵۰ rpm، چگالی پالپ(w/v) ٪۵، $FeSO_4.7H_2O$ =۴۰ g/l، دما ۳۵°C.

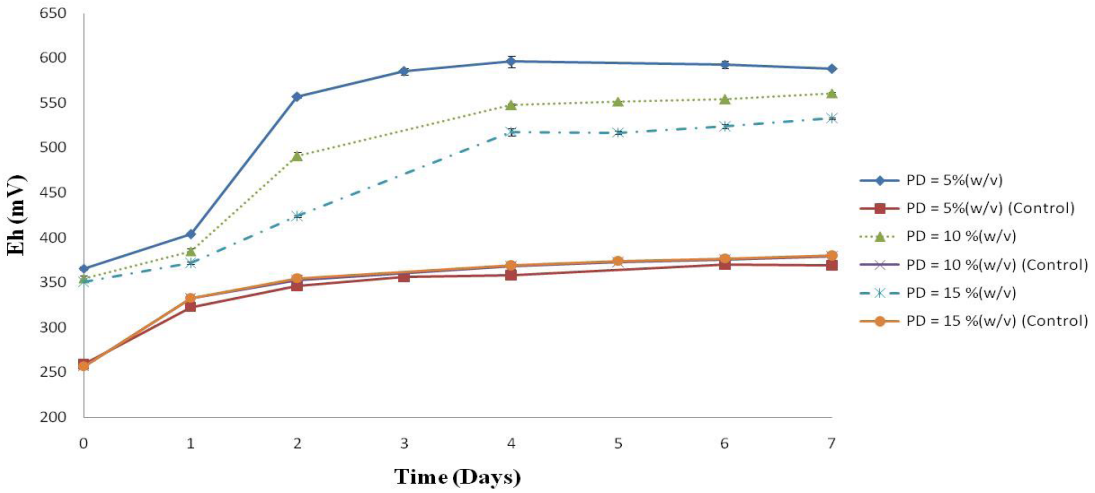
پالپ، نرخ استخراج اورانیوم کاهش می یابد. به طوری که در روز سوم استخراج اورانیوم با PD = ۵%(w/v) به حداکثر مقدار خود)۱۰۰%(می رسد، در حالی که استخراج اورانیوم با PD = ۱۰%(w/v) در روز ۵ به حداکثر استخراج رسیده است.

به علاوه، راندمان استخراج اورانیوم با PD = ۱۵%(w/v) تا روز ۷ حدود ۹۵% می باشد.

بررسی اثر غلظت اولیه یون فرو در استخراج اورانیوم

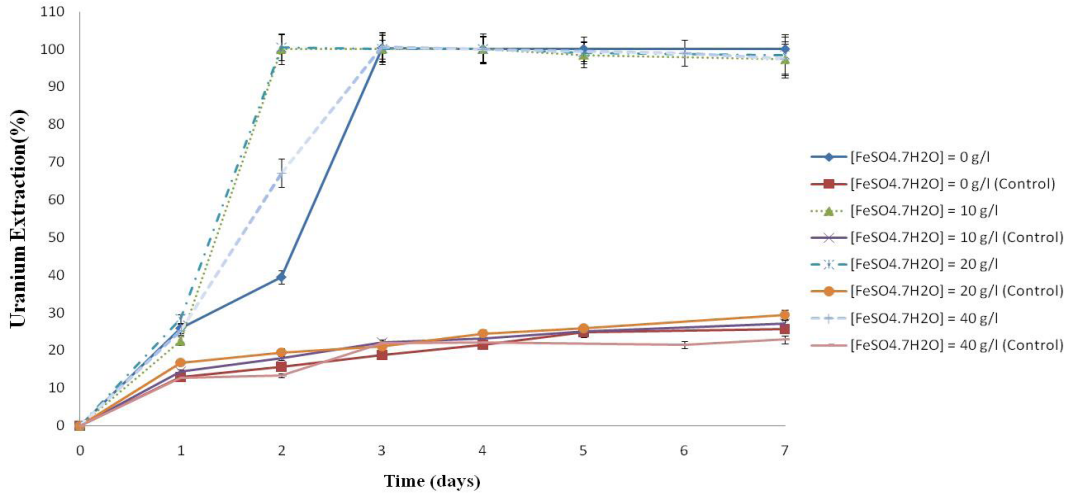


شکل ۷: استخراج اورانیوم نسبت به زمان در چگالی پالپ های مختلف توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* شرایط آزمایش: دور همزن ۱۵۰ rpm، $FeSO_4.7H_2O$ =۴۰ g/l، pH=۲، دما ۳۵.°C

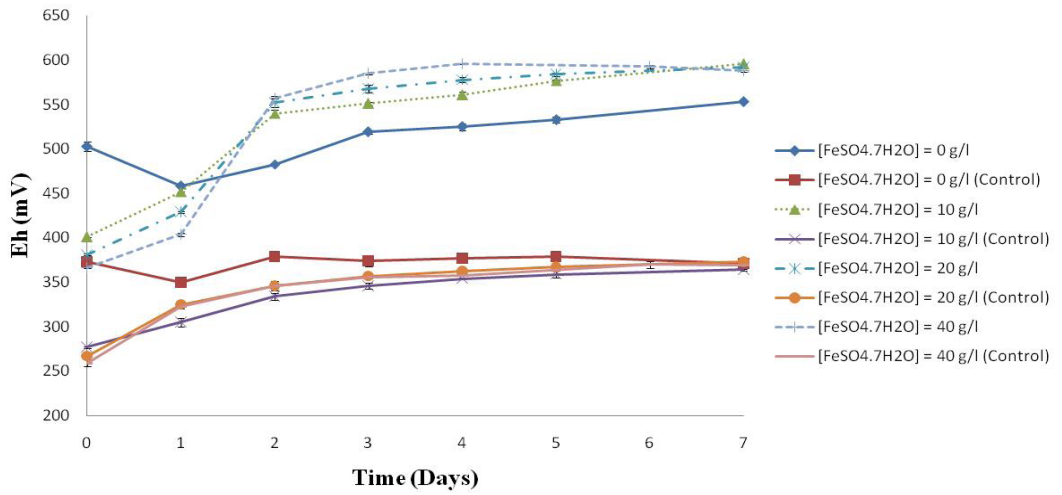


شکل ۸: تغییرات Eh نسبت به زمان در چگالی پالپ های مختلف توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans* شرایط آزمایش: دور همزن ۱۵۰ rpm، $FeSO_4.7H_2O$ =۴۰ g/l، pH=۲، دما ۳۵.°C

نتایج حاصل از بررسی اثر غلظت اولیه یون فرو در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که استخراج کامل اورانیوم در غلظت های ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر از سولفات فرو در روز دوم حاصل شده است. در صورتیکه با غلظت صفر و ۴۰ گرم بر لیتر از سولفات فرو، استخراج کامل اورانیوم در روز سوم مشاهده می شود. لازم به ذکر می باشد که نرخ استخراج اورانیوم در حضور ۴۰ گرم بر لیتر از سولفات فرو بیشتر از صفر گرم بر لیتر از آن می باشد. بنابراین، با توجه به اینکه در غلظت های ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر از سولفات فرو روند استخراج اورانیوم مشابه می باشد و بیشتر از سایر غلظت ها است، غلظت ۱۰ گرم بر لیتر از سولفات فرو به عنوان بهینه برای فرایند بیولیچینگ اورانیوم از کانسنگ آنومالی ۲ ساغند انتخاب شد.



شکل ۹: استخراج اورانیوم نسبت به زمان در غلظت های اولیه مختلف یون فرو توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans*. شرایط آزمایش: دور همزن rpm ۱۵۰، چگالی پالپ (w/v) ۵٪، pH=۲، دما ۳۵°C.



شکل ۱۰: تغییرات Eh نسبت به زمان در غلظت های اولیه مختلف یون فرو توسط باکتری *Acidithiobacillus ferrooxidans*. شرایط آزمایش: دور همزن ۱۵۰ rpm، چگالی پالپ (w/v) ۵٪، pH=۲، دما ۳۵°C.

بحث

مهمترین عامل استخراج اورانیوم در فرایند بیولیچینگ بواسطه یون فریک تشکیل شده از اکسیداسیون یون فرو توسط باکتری اکسید کننده آهن و گوگرد می باشد. بنابراین، افزایش Eh که نشان دهنده انجام فرایند اکسیداسیونی است در استخراج اورانیوم نقش تعیین کننده ای دارد Abhilash and Pandey, (2011). با توجه به تغییرات Eh و میزان استخراج اورانیوم در تحقیق حاضر، می توان نتیجه گرفت که دور همزن بهینه برای فرایند بیولیچینگ اورانیوم با استفاده از سنگ آنومالی ۲ ساغند و باکتری بومی *اسیدیتیوباسیلوس فرواکسیدانس*، ۱۵۰ rpm می باشد (شکل ۱ و ۲). محققان مختلفی در طی آزمایشاتی نشان داده اند که دور همزن دارای نقش تعیین کننده ای در فرایند بیولیچینگ می باشد. آقای ویتن و فیلیپس در تحقیقی اظهار داشتند که میزان اکسیژن، یکی از فاکتورهای مهم در رشد و فعالیت باکتری‌های مورد استفاده در فرآیند بیولیچینگ است. آنها نشان دادند که کاهش سرعت دور همزن، سبب کاهش غلظت باکتری‌های مؤثر در فرایند بیولیچینگ و همین طور کاهش غلظت یون فریک و در نهایت کاهش راندمان استخراج فلز مورد نظر می گردد Witne and Philips, (2001). به علاوه، آقای کوک و همکارانش در طی تحقیقی به این حقیقت دست یافتند که افزایش بیش از حد دور همزن به منظور بهبود در میزان اکسیژن و دی اکسیدکربن، خود به عنوان عاملی جهت آسیب رساندن به باکتری های دخیل در بیولیچینگ می باشد Kock et al., (2004) . همانگونه که از نتایج حاصل از این تحقیق مشخص می باشد اظهارات این محققان تأییدی بر نتایج به دست آمده از این تحقیق است. به علاوه، مطالعات حاصل از تاثیر دما و pH بر روی استخراج اورانیوم از کانسنگ اورانیوم آنومالی ۲ ساغند در حضور باکتری بومی *Acidithiobacillus ferrooxidans* نشان داد که نرخ استخراج اورانیوم در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد و pH =2 دارای بیشترین میزان است (شکل ۳، ٤، ٥ و ٦) که مشابه با نتایج مطالعات آقای مونز و همکارانش بر روی بیولیچینگ اورانیوم معدن افای (FE) در مورد رابطه دما و استخراج باکتریایی اورانیوم می باشد (Munoz et al., (1993). همچنین، مطالعات انجام شده توسط آقای موسوی و همکارانش بر روی باکتری *اسیدیتیوباسیلوس فرواکسیدانس* نشان داد که pH بهینه برای اکسیداسیون آهن فرو،pH بین ۲ تا ۲/۳ می‌باشد Mousavi et al., (2007) . از سویی دیگر، تحقیقات بیولیچینگ اورانیوم آقای رشیدی و همکارانش با استفاده از کانسنگ آنومالی ۱ نشان داده که بیشترین میزان استخراج اورانیوم درpH برابر ۲ می باشد Rashidi et al., (2014) که یافته های این تحقیق را مورد تأیید قرار می دهد.

همانگونه که در شکل ۷ قابل مشاهده است

با افزایش چگالی پالپ میزان راندمان استخراج اورانیوم کاهش می یابد. یکی از دلایل کاهش میزان راندمان استخراج در چگالی پالپ های بالا این است که میزان O_2 موجود که یکی از اساسی ترین مواد مغذی برای رشد باکتری ها محسوب می شود، با افزایش چگالی پالپ کاهش می یابد. همچنین، افزایش چگالی پالپ را می توان با تعداد باکتری ها، کاهش میزان استخراج یون های فلزی در محلول، محدود کننده دسترسی باکتری ها به اکسیژن، دی اکسید کربن و تخریب سلول های باکتریایی با ذرات کانسنگ مرتبط دانست. به بیانی دیگر در چگالی پالپ های کمتر میزان انتقال جرمی اکسیژن بین تولید و مصرف آن متعادل است، در حالی که در چگالی پالپ های بالا نرخ اکسیژن مورد نیاز با میزان اکسیژن تولید شده طی انتقال آن بین گاز و مایع کمتر می باشد Choi et al., (2005); Boon et al., (1998); Akcil et al., (2007). بنابراین، با کاهش چگالی پالپ، رشد باکتری ها بهتر شده و نرخ اکسیداسیون یون فرو افزایش می یابد که باعث افزایش Eh محیط می شود (شکل ۸). نتایج حاصل این بخش از بهینه سازی مطابق با نظرات آقای عبداللهی و همکارانش می باشد که معتقدند چگالی پالپ تأثیر بسیار زیادی در فعالیت باکتری‌ها دارد و هر چه چگالی پالپ افزایش یابد فعالیت باکتری‌ها کاهش می‌یابد Abdollahy et al., (2011). به علاوه، نتایج آزمایشات بیولیچینگ اورانیوم آقای رشیدی و همکاران نیز نتایجی مشابه با نتایج این تحقیق داشته است. آنها نشان دادند که در چگالی پالپ ۵% میزان استخراج اورانیوم در مقایسه با چگالی پالپ های ۱۰ و ۱۵% بیشتر می باشد Rashidi et al., (2014). در رابطه با تأثیر میزان آهن فرو اولیه، نتایج نشان دادند که در عدم حضور آهن فرو اولیه استخراج اورانیوم مشاهده می شود (شکل ۹). دلیل استخراج اورانیوم در عدم حضور سولفات فرو، اکسیداسیون یونهای موجود در کانسنگ از جمله پیریت (FeS_2) می باشد که باعث تولید آهن فریک می شود. در نهایت، آهن فریک تولید شده سبب استخراج اورانیوم از کانسنگ مورد نظر می گردد. مقایسه واکنش های دارای یون فرو با آنهایی که فاقد یون فرو هستند نشان دهنده این مطلب است که مکانیسم غیر مستقیم اساسی ترین مکانیسم کنترل کننده واکنش ها می باشد. همچنین با مقایسه ای که بین آزمایش شاهد و سایر آزمایش ها انجام می شود حضور و اهمیت باکتری ها در فرآیند کاملاً مشخص می باشد. به علاوه، همانگونه که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است، با حضور یون فرو در محیط، رشد باکتری ها بهتر و باعث افزایش نرخ اکسیداسیون یون فرو و افزایش Eh محیط می شود. با توجه به تغییرات Eh در حالت عدم حضور یون فرو، ابتدا کاهش Eh و سپس افزایش آن رخ می دهد (شکل ۱۰). از آنجایی که آهن فرو خود عاملی احیا کننده است در نتیجه در حضور آهن فرو میزان Eh کاهش

می یابد. در نمونه ای که غلظت آهن فرو اولیه صفر است عامل احیاکننده ای وجود ندارد در نتیجه میزان Eh بالا می باشد. با گذشت زمان و استفاده باکتری از پیریت موجود در کانسنگ میزان Eh روند کاهشی داشته و با شروع اکسیداسیون آهن فرو و تبدیل آن به آهن فریک روند تغییرات Eh مجدداً افزایشی خواهد بود.

نتایج

نتایج به دست آمده از این تحقیق حاکی از آن است که بهینه پارامتر های فرایند استحصال زیستی اورانیوم با استفاده از باکتری بومی *Acidithiobacillus ferrooxiduns* و کانسنگ آنومالی ۲ ساغند عبارتند از: دور همزن rpm ۱۵۰، C = ۲ ،pH ۳۵ °(w/v = ۵% = PD (T و ۱۰ گرم بر لیتر از $FeSO_4.7H_2O$.

منابع

Abdollahy, M. Shojaosadati, S.A. Zare Tavakoli, H. Valivand, A. (2011) Bioleaching of Low Grade Uranium Ore of Saghand Mine. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering 30: 71-79.

Abhilash, S. Pandey, B.D. (2011) Role of ferric ions in bioleaching of uranium from low tenor Indian ore. Canadian Metallurgical Quarterly 50: 102-112.

Akcil, A. Ciftci, H. Deveci, H. (2007) Role and contribution of pure and mixed cultures of mesophiles in bioleaching of a pyretic chalcopyrite concentrate. Mineral Engineering 20: 310-318.

Boon, M. Heijnen, J.J. (1998) Gas-liquid mass transfer phenomena in biooxidation experiments of sulphide minerals. a review of literature data Hydrometallurgy 48: 187-204.

Chen, D. Lin, J. Che, Y. Liu, X. Lin, J. (2011) Construction of recombinant mercury resistant *Acidithiobacillus caldus*. Microbiological Research 166: 515-520.

Chen, P. Yan, L. Yue, X. Li, H. (2013) Optimal parameters for bioleaching of realgar using *Acidithiobacillus ferrooxidans* under different growth conditions and mathematical analysis. Biocatalysis and Biotransformation 31: 33-41.

Choi, M.S. Cho, K.S. Kim, D.S. Ryu, H.W. (2005) Bioleaching of uranium from low grade black schists by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. World Journal of Microbiology & Biotechnology 21: 377-380.

Dong, Y. Lin, H. Wang, H. Mo, X. Fu, K. Wen, H. (2011) Effects of ultraviolet irradiation on bacteria mutation and bioleaching of low-grade copper tailings. Minerals Engineering 24: 870–875.

Golmohammadi, H. Rashidi, A. Safdari, S.J. (2012) Simple and rapid spectrophotometric method for determination of uranium (vi) in low grade uranium ores using arsenazo(III). Chemistry and Chemical Technology 6: 245-249.

Kock, S.H. Barnard, P. du Plessis, C.A. (2004) Oxygen and carbon dioxide kinetic challenges for thermophilic mineral bioleaching processes. Biochemical Society Transactions 32: 273-275.

Manafi, Z. Bageri, S.A. Oliazadeh, M. Watling, H. Yaghobi Moghaddam, M; (2009) Column bioleaching of fine particle size fraction of Sarcheshmeh low grade ore. Journal of Microbial Biotechnology 1: 41-47.

Munoz, J.A. Gonzalez, F. Ballester, A. Blazquez, M.L. (1993) Bioleaching of a Spanish uranium ore. FEMS Microbiology Reviews 11:109-120.

Mustin, C. Berthelin, J. Marion, P. Donato, P. (1992) Corrosion and electrochemical oxidation of a pyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*. Applied and Environmental Microbiology 58: 1175-1182.

Mousavi, S. Yaghmaei, S. Jafari, A. (2007) Influence of process variables on biooxidation of ferrous sulfate by an indigenous *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Fuel 86: 993-999.

Olsen, G.J. Brierley. J.A. Brierly, C.L. (2003) Bioleaching review part B: progress in bioleaching application of microbial processes by the minerals industries. Applied Microbiology and Biotechnology 63: 249 – 257.

Rawlings, D.E. (2005) Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. Microbiology Cell Factories 4: 13.

Ronald, M.A. (1997) Handbook of Microbiological Media, 2th edition, Robert Stern, New York.

Rashidi, A. Roosta-Azad, R. Safdari, S.J. (2014) Optimization of operating parameters and rate of uranium bioleaching from a low-grade ore. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 301: 341-350.

Rashidi, A. (2015) Uranium extraction from low grade ore using bioleaching method. F87F053. Nuclear Science and Technology Research Institute.

Seifelnassr, A. Abouzeid, A-Z. (2013) Exploitation of bacterial activities in mineral industry and environmental preservation: an overview Journal of Mining 2013: 1-13.

Witne, J.Y. Philips C.V. (2001) Bioleaching of ok tedi copper concentratrni oxygen and carbon dioxide-enriched air Minerals Engineering 14: 25-48.