مجله علوم و فنون هسته‌ای، دوره ۴۴، شماره ۱، جلد ۱۰۳، بهار ۱۴۰۲

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 44 (2), Serial Number 103, 2023

بهینه‌سازی فرایند احیای اورانیم توسط باکتری *Shewanella RCRI۷* به روش سطح پاسخ در پساب صنعتی

راضیه قاسمی[۱]، الهام راستخواه[۲]، صابره نائیج[۲]، توران ربیعی[۳]، حمزه حسین پور[۳]، سمانه نائیج[۲]، جواد رفیعی[۴]، فائزه فاطمی[۴*]

۱. گروه مهندسی علوم زیستی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۶۱۹۱، تهران- ایران
۲. گروه زیست‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۷۷۵-۱۴۵۱۵، تهران- ایران
۳. ENTC، مرکز تحقیقات هسته‌ای اصفهان، اصفهان - ایران
۴. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

*Email: fatemi81@yahoo.com

مقاله‌ی پژوهشی
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

چکیده

تمام ترکیبات اورانیم، سمی و رادیواکتیو هستند. سمی بودن این عنصر می‌تواند کشنده باشد. با توجه به سمیت شیمیایی و رادیواکتیویته اورانیم، ضروری است از ورود آن به طبیعت جلوگیری شود. پسماندهای خروجی از مراکز صنعتی- هسته‌ای نیز دارای مقادیر مختلفی از اورانیم می‌باشد و لذا حذف این عنصر از پساب این مراکز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سویی دیگر، نظر به اهمیت این عنصر و محدودیت منابع آن، بازیابی اورانیم از پسماندها، دارای ارزش اقتصادی نیز می‌باشد. در پژوهش حاضر، از روش سطح پاسخ (RSM) بر اساس طرح مرکب مرکزی به منظور بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای مختلف بر فرایند احیای اورانیم توسط باکتری *Shewanella* RCRI۷ در پساب واقعی استفاده گردید. معادله‌ی درجه دوم پیشنهاد شده با ضریب همبستگی R^2=۰/۹۴ از کفایت مناسبی برخوردار بوده و حداکثر راندمان احیای اورانیم توسط *Shewanella* RCRI۷ در شرایط بهینه (pH=۵/۷-۶/۵، دمای ۲۶/۶۳ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۱۷ ساعت)، ۹۸٪ براورد شده است. در گام بعدی به منظور تعامل بین متغیرها، رویه‌های سه‌بعدی با تقابل pH و دما؛ دما و زمان؛ pH و زمان به دست آمده و در پایان بر اساس بهینه‌های پیشنهادی احیای اورانیم در پساب واقعی توسط دو روش XRD و اسپکتروفتومتری مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، باکتری *Shewanella* RCRI۷ می‌تواند، به عنوان باکتری با ارزش در احیای زیستی اورانیم از پساب خروجی مراکز صنعتی معرفی گردد. از سوی دیگر استفاده از روش سطح پاسخ می‌توانند درک جامعی از فرایند و مکانیسم احیای زیستی اورانیم توسط باکتری *Shewanella* RCRI۷ و پشتیبانی نظری برای انجام این فرایند ارایه دهد.

کلیدواژه‌ها: احیای زیستی، اورانیم، طراحی آزمایش RSM، باکتری *Shewanella* RCRI۷

Optimization of uranium bioreduction by *shewanella* RCRI7 using Response Surface Design Method (RSM) in industrial waste

R. Ghasemi[1], E. Rastkhah[2], S. Naij[2], T. Rabiee Samani[3], H. Hosseinpour[3], S. Naeij[2], J. Rafiei[4], F. Fatemi*[4]
1. Department of Life Sciences Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Postal code: 1439956191, Tehran – Iran
2. Department of Biology, Faculty of Sciences, Islamic Azad University, P.O.Box: 14515-775, Tehran – Iran
3. ENTC, Isfahan Nuclear Research Center, Isfahan – Iran
4. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran

Research Article
Received 28.9.2021, Accepted 8.1.2022

Abstract

Uranium compounds are toxic and radioactive. Its poisonous properties can be fatal. So, it is necessary to prevent its excessive entry into nature due to uranium's chemical toxicity and radioactivity. Waste from industrial-nuclear centers also has different amounts of uranium; therefore, the removal of this element from the effluent of these centers is essential. On the other hand, due to the importance and limited resources, uranium recovery from waste has economic value. In the present study, the Response Surface Method (RSM) based on the central composite design was used to evaluate and optimize different parameters affecting the bioremediation process of Shewanella RCRI7 in real waste. The proposed second-order model with a correlation coefficient R2 = 0.94 appropriately predicted the experimental data and the maximum uranium reduction efficiency by Shewanella RCRI7 under optimal conditions (pH = 5.7-6.5, Temperature 26.63 °C and Time 117 hours) was estimated to be about 98%. In the next step to interact between the variables, three-dimensional procedures with pH and temperature; temperature and time; pH and time interactions were obtained; finally, the uranium reduction in real effluent was investigated by XRD and spectrophotometric methods. Based on the results, Shewanella RCRI7 is determined as a valuable candidate for uranium bioreduction processes in the determined industrial wastewater. On the other hand, using the response surface methodology can provide a comprehensive understanding of the process, the mechanism of uranium bioremediation by Shewanella RCRI7, and the theoretical support for this process.

Keywords: Bioremediation, Uranium, Response surface design method (RSM), Shewanella RCRI7

۱. مقدمه

حضور اورانیم در رسوبات و آب‌های زیرزمینی در اطراف بسیاری از سایت‌های فراوری اورانیم مشکل جدی جهت مدیریت پسماندهای هسته‌ای بوده که در آن رادیونوکلیدهای باقی‌مانده به سطح زیرین شسته شده و تهدیدی جدی برای سلامتی انسان و محیط طبیعی است [۱، ۲]. میزان آلودگی، ناکارآمدی و روش‌های تصفیه پرهزینه، تلاش برای تعریف روش‌های کم‌هزینه به منظور ارزیابی و اصلاح بسیاری از مکان‌های آلوده به اورانیم را افزایش داده است [۳، ۴، ۵]، از این‌رو کاهش میکروبی U محلول (VI) به U نامحلول (IV) نویدبخش یک استراتژی قابل توجه جهت تصفیه زیست‌محیطی در محیط‌های آلوده به اورانیم می‌باشد [۲]. باکتری‌های به کار رفته در احیای زیستی، با ساختار دیواره و آنزیم‌هایی ویژه در مسیر انتقال الکترون خود، قادر به حذف هم‌زمان فلزات مختلف از محیط اطراف هستند [۶]. برخی از میکروارگانیسم‌ها و یا آنزیم ترشح شده از آن‌ها، در حذف اورانیم مؤثر بوده و در نتیجه در بهبود وضعیت زیست‌محیطی پساب‌ها، نقش مهمی دارند [۷]. بررسی مقالات مختلف علمی نشان می‌دهد که بسته به نوع میکروارگانیسم و شرایط انجام آزمایش، فرایند ترسیب میکروبی اورانیم دارای این قابلیت می‌باشد که در محدوده وسیعی از انواع محلول‌های آبی شامل محلول فروشویی، پساب‌ها، آب‌های آلوده شده به اورانیم و آب دریا به کار گرفته شود [۸].

طیف گسترده‌ای از جنس‌های باکتریایی شامل *Clostridium*، *Shewanella*، *Geobacter*، *Pyrobaculum*، *Desulfotomaculum* و *Desulfoviboro* را می‌توان در فرایند احیا و رسوب‌دهی اورانیم مورد استفاده قرار داد. در این میان در بسیاری از مقالات علمی *S. oneidensis* در مبارزه با نشت زباله‌های هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۹، ۱۰، ۱۱]. این باکتری می‌تواند اورانیم را به عنوان گیرنده الکترون جدید، در زنجیره انتقال الکترون، احیا کند و این فرایند سبب ترسیب اورانیم می‌گردد. اورانیم جامد را می‌توان به راحتی جمع‌آوری نمود و به محل دفن زباله‌های هسته‌ای منتقل کرد [۱۲].

از سوی دیگر، راهکار استفاده از سویه‌های میکروبی بومی در جهت حذف فلزات، در دهه گذشته به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. این شیوه، علاوه بر این‌که مقرون‌به‌صرفه بوده، کم‌ترین اختلال را در محیط‌زیست ایجاد می‌کند. علاوه‌براین، کارآمدی میکروارگانیسم‌ها برای جداسازی اورانیم از محل‌های آلوده، به دفعات در مجموعه‌ای از محیط‌ها از جمله رسوبات آبرفتی اشباع، بهسازی محیط‌های متأثر از استخراج اورانیم از طریق بازیابی در محل و . . . تأیید شده است [۱۳، ۱۴]. بر این اساس و به منظور شناسایی و جداسازی باکتری بومی- ایرانی در سال ۲۰۱۱ بر روی آب دریاچه قوری‌گل تبریز آزمایشات مختلفی صورت گرفت که منجر به شناسایی گونه *S.* RCRIv گردید. درخت فیلوژنی آن با بررسی توالی ژن ۱۶srRNA رسم و مشخص گردید که گونه مورد نظر از لحاظ فیلوژنی به سایر سویه‌های مطالعه شده‌ی این گونه نظیر *S. oneidensis*، *S. putrefaciens* و *S. xiamenensis* شباهت داشته [۱۵] و بیش‌ترین شباهت را تا بیش از ۹۹٫۱ درصد به سویه‌ی *S. oneidensis* MR-۱ دارد. از سوی دیگر، طبق پژوهش‌های ظاهری و همکاران در سال ۲۰۱۷، سویه‌ی RCRIv نیز مانند سویه‌ی MR–۱ عملکرد مناسبی در احیا و رسوب‌دهی اورانیم دارد [۶]. پژوهش حاضر به منظور طراحی و بهینه‌سازی فرایند احیای اورانیم در پساب خروجی مؤسسه تبدیلات اورانیم اصفهان (UCF) به روش سطح پاسخ انجام گرفته است.

۲. مواد و روش

۱.۲ تهیه باکتری

باکتری *Shewanella* RCRIv استفاده شده در پژوهش حاضر سویه بومی- ایرانی است که شباهت بسیار بالایی به باکتری *S. oneidensis* MR-۱ دارد لذا گزینه‌ای مناسب جهت زیست پالایی اورانیم معرفی شده است [۱۶، ۱۷]. جنس *شوانلا* باکتری‌های گرم منفی، میله‌ای‌شکل، دارای یک تاژه قطبی و متحرک هستند. اغلب بی‌هوازی اختیاری‌اند و در رسوبات دریایی یافت می‌شوند [۱۸].

۲.۲ آنالیز بافت پساب

به منظور بازفراوری اورانیم توسط باکتری *Shewanella* RCRIv، از پساب خروجی مؤسسه تبدیلات اورانیم اصفهان (UCF) همراه با آنالیز مشخص‌شده ترکیبات (جدول ۱) استفاده گردید.

جدول ۱. آنالیز پساب سایت فراوری اورانیم و تولید سوخت هسته‌ای

کد پادمانی	کد نمونه	U (mg/l)	Fe (mg/l)	Pb (mg/l)	Na (mg/l)	F^- (g/l)	Cl^- (mg/l)	NO_3^- (g/l)	$*PO_4^{3-}$ (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	CO_3^{2-} (mg/l)
+ ۵QLN/۳۲۸	۱	۲۷٫۵	< ۰٫۵	< ۰٫۵	۳۴۲۹	۱٫۴	۴۰	۱۸٫۷	-	۹۴	۵۸۰	۲۰۱۹
۵QLN/۳۰۴	۲	۲۶٫۵	< ۰٫۵	< ۰٫۵	۳۴۶۵	۱٫۱	۳۶	۱۶٫۰	-	۸۶	۸۶۱	۱۸۸۸
pH=۸	۳	۲۸٫۵	< ۰٫۵	< ۰٫۵	۳۲۵۰	۱٫۱	۳۸	۱۶٫۱	-	۷۵	۹۰۹	۱۸۹۴

۳.۲ طراحی و بهینه‌سازی آزمایش به منظور ارزیابی فاکتورهای مؤثر بر فرایند احیای اورانیم توسط باکتری *Shewanella* RCRI۷

به منظور تعیین فاکتورهای مؤثر در شرایط عملیاتی فرایند احیای اورانیم توسط باکتری مورد نظر، مطالعه برهم‌کنش متغیرها و هم‌چنین تعیین میزان بهینه آن‌ها، اثر سه متغیر دما، pH و زمان در ۵ سطح با پاسخ میزان حذف اورانیم بررسی گردید. بررسی پارامترهای مؤثر در فرایند احیای زیستی و رسوب اورانیم، بر اساس نتایج حاصل از مقالات مرجع و پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی احیای زیستی توسط محققین انجام گرفته است [۶، ۱۸]. ظاهری و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی پارامترهای مختلف عملیاتی شامل دما، pH، چگالی سلولی اولیه و غلظت اولیه‌ی اورانیم، حذف آن را توسط باکتری *Shewanella* RCRI۷ مورد مطالعه قرار دادند. در بررسی‌های صورت گفته، فاکتورهای دما، pH و زمان، جزء مهم‌ترین عوامل مؤثر در این روند می‌باشند [۶]. در ادامه، در این پژوهش با استفاده از نتایج به‌دست آمده، طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در پساب واقعی بررسی گردیده است. شایان ذکر است که در پژوهش حاضر میزان غلظت اولیه اورانیم پساب ثابت بوده (جدول ۱) و چگالی سلولی بهینه شده، 10^9 می‌باشد.

به منظور تحلیل فرایند از روش سطح پاسخ که یکی از کاربردی‌ترین روش‌های تحلیل فرایندهای چند متغیره است [۱۹، ۲۰، ۲۱] استفاده شده است. سطوح مختلف متغیرهای مستقل طراحی آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است:

۴.۲ احیای اورانیم توسط باکتری *Shewanella* RCRI۷

منظور از احیای میکروبی اورانیم، تغییر حالت اکسایش اورانیم از U(VI) به U(IV) با استفاده از باکتری می‌باشد. در این فرایند، باکتری الکترون‌ها را از یک الکترون‌دهنده (مانند استات، هیدروژن مولکولی یا . . .) گرفته و در نهایت به یک گیرنده‌ی نهایی الکترون می‌دهد [۲۲، ۲۳].

جدول ۲. سطوح متغیرهای مستقل در طراحی آزمایش به روش طراحی مرکب مرکزی

متغیر مستقل	تعداد	سطح‌ها				
		$-\alpha$	-۱	۰	+۱	$+\alpha$
pH	A	۳٫۹۸	۵	۶٫۵	۸	۹٫۰۲
مدت زمان (ساعت)	B	۲٫۸۲	۲۶	۶۰	۹۴	۱۱۷٫۱۸
دما	C	۴٫۸۲	۱۳	۲۵	۳۷	۴۵٫۱۸

۱.۴.۲ پیش‌کشت

از باکتری *Shewanella* RCRI۷ نگه‌داری شده در فریزر منفی ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، جهت تهیه‌ی پیش‌کشت به منظور انجام آزمایش احیای اورانیم استفاده شد. بدین منظور، باکتری‌ها در زیر هود و شرایط استریل کامل، به محیط کشت TSB به نسبت ۱ به ۱۰۰ اضافه گردیده و به مدت ۱۸ ساعت در انکوباتور شیکردار با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و دور ۱۵۰ rpm، انکوبه شدند.

۲.۴.۲ اجرای آزمایش احیا

کلیه مراحل انجام فرایند احیا در پژوهش حاضر بر اساس پژوهش ظاهری و همکاران (۲۰۱۷) می‌باشد. محلول احیا به‌کار رفته شامل ویتامین، مواد معدنی، نمک‌های محلول، الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده (جدول ۳) است که ۲۴ ساعت پیش از تلقیح باکتری، تهیه و سپس بی‌هوازی گردید. انجام فرایند احیای اورانیم در شرایط کاملاً بی‌هوازی و در داخل گلاوبگ با استفاده از مخلوط گاز نیتروژن و دی اکسید کربن انجام شده است [۱۶، ۱۷].

پس از انجام واکنش احیا در شرایط بی‌هوازی، یک رسوب (حاوی باکتری و اورانیم) در قسمت کف ویال ۱۰۰ میلی‌لیتری، ته‌نشین گردید. جهت اندازه‌گیری غلظت اورانیم پس از انکوباسیون، محلول و رسوب به کمک کاغذ صافی از هم جدا شدند. آنالیز ICP به منظور تعیین غلظت اورانیم باقی‌مانده در محلول بر روی نمونه برداشت‌شده از سطح محلول احیا، پس از سانتریفیوژ (۵۵۰۰ دور در دقیقه (rpm)، در دمای ۴°C و به مدت ۱۵ دقیقه)، انجام شد. رسوب جهت بررسی احیا اورانیم (VI) به اورانیم (IV) به وسیله اسپکتروفوتومتری[1] و XRD با هدف اثبات احیا اورانیم توسط باکتری *شوانلا* RCRI۷ مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۳. ترکیبات مختلف محلول احیا به‌کار رفته در آزمایش

الکترون‌دهنده		ویتامین (۱۰۰۰×) (در ۱۰۰ سی‌سی)	
ماده	مقدار (ml/L)	ماده	مقدار (g/L)
لاکتات سدیم (٪۵۰)	۵٫۵	p-amino benzoic acid	۰٫۰۵
		Thiamine-HCl	۰٫۰۲
		B_6	۰٫۱
		B_{12}	۰٫۰۰۱

1. Spectrophotometry

۵.۲ تحلیل آماری

به منظور تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت۷ (Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA) استفاده شده است [۲۴، ۲۵].

۳. نتایج و بحث

استفاده از روش‌های زیستی یا زیست‌پالایی در حذف فلزات از پساب‌ها، می‌تواند برخی از محدودیت‌ها و مشکلات مربوط به روش‌های فیزیکوشیمیایی را برطرف نماید و راه‌حل اقتصادی‌تری محسوب می‌شود. بر این اساس در سال‌های اخیر، استفاده از توده‌های زیستی مختلف برای حذف فلزات سنگین از پساب‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۲۶، ۲۷]. باکتری *Shewanella* RCRIv۷ به دلیل شباهت بیش از ۹۹٫۱٪ به سویه *S. oneidensis* MR-۱ گزینه‌ای مناسب جهت زیست‌پالایی اورانیم معرفی شده است [۶، ۱۶، ۱۷]. با این‌وجود لازم است تا آزمایشات مختلفی جهت استفاده‌ی بهینه از این باکتری طراحی و اجرا گردد. از سوی دیگر، انجام آزمایشات کم‌تر با راندمان بالا، از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه می‌باشد، لذا روش‌های مختلفی برای این منظور معرفی شده است.

نتایج آنالیز نشان داد که pH پساب ۸ و حاوی فلزات سنگین نظیر اورانیم، سرب و سایر فلزات نظیر آهن و سدیم می‌باشد. برخی از محققین نیز بیان داشته‌اند که پساب واقعی رادیواکتیو، حاوی اورانیم، فلزات سنگین نظیر Ba، Cr، Fe، Mn، Pb، Ca و Mg می‌باشد [۲۸، ۲۹]. علاوه بر این، حضور یون‌های PO_4^{3-}، SO_4^{2-}، HCO_3^-، CO_3^{2-} نشان‌دهنده‌ی این است که لجن از نظر شیمیایی فعال است [۳۰].

۱.۳ بهینه‌سازی متغیرهای عملیاتی بر اساس طراحی آزمایش با طرح مرکب مرکزی به روش متدولوژی سطح پاسخ (RSM)

طراحی آزمایش با استفاده از یک طرح مرکب مرکزی تحت روش سطح پاسخ، یکی از قدرتمندترین روش‌ها برای مدل‌سازی آماری با استفاده از کم‌ترین تعداد آزمایش‌های تجربی می‌باشد [۲۰]. روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی رویه‌های تحلیلی، امروزه به دلیل مزیت‌های آن به منظور بهینه‌سازی کلاسیک یک متغیر در هر زمان، مانند دست‌یابی به مقادیر زیادی اطلاعات از تعداد کمی آزمایش و امکان ارزیابی اثر متقابل بین متغیرها، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱]. به منظور حصول نتایج منطقی در این مطالعه از روش طراحی مرکب مرکزی CCD (Composite Central Design) در پنج سطح استفاده شده است. بر اساس روش CCD به‌منظور بررسی اثر سه متغیر مندرج در جدول ۲، ۱۸ آزمایش طبق جدول ۴ انجام شد.

جدول ۴. آزمایشات پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به همراه ظرفیت جذب تجربی

آزمایش	pH (A)	مدت زمان (ساعت) (B)	دما (C)	درصد حذف اورانیم
۱	۵	۲۶	۳۷	۲۴٫۵
۲	۸	۲۶	۳۷	۳۰
۳	۶٫۵	۶۰	۴۵٫۱۸	۷۰
۴	۵	۹۴	۱۳	۸۰
۵	۳٫۹۸	۶۰	۲۵	۴۰
۶	۵	۹۴	۳۷	۷۷
۷	۸	۹۴	۳۷	۳۶
۸	۸	۹۴	۱۳	۴۲
۹	۹٫۰۲	۶۰	۲۵	۰
۱۰	۶٫۵	۶۰	۲۵	۹۴٫۸
۱۱	۶٫۵	۶۰	۲۵	۹۴٫۲
۱۲	۶٫۵	۶۰	۲۵	۹۳٫۶
۱۳	۶٫۵	۶۰	۲۵	۹۳٫۲
۱۴	۶٫۵	۶۰	۴٫۸۲	۲۳
۱۵	۶٫۵	۲٫۸۲	۲۵	۶۵٫۶
۱۶	۸	۲۶	۱۳	۳۴٫۲
۱۷	۵	۲۶	۱۳	۳۰٫۵
۱۸	۶٫۵	۱۱۷٫۱۸	۲۵	۹۸

از آنالیز شبکه طراحی آزمایش (جدول ۴) با توجه به سه متغیر عملیاتی و یک متغیر پاسخ درصد تبدیل (R) و انجام ۱۸ آزمایش پیشنهادی، معادله درجه دوم پیشنهادی زیر به دست می‌آید:

$$Removal\ (\%) = -۵۶۹٫۷۸۴۵۰ + ۱۶۰٫۶۲۴۱۷ * pH + ۲٫۲۶۳۸۶ * Time + ۶٫۴۰۷۱۰ * Temp - ۰٫۲۱۶۱۸ * pH * Time - ۸٫۳۳۳۳۳ * ۱۰^{-۳} * pH * Temp + ۳٫۶۷۶۴۷ * ۱۰^{-۴} * Time * Temp - ۱۱٫۸۵۶۶۵ * pH^{۲} - ۴٫۱۷۶۳۶ * ۱۰^{-۳} * Time^{۲} - ۰٫۱۲۰۲۰ * Temp^{۲}$$

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۴، آزمایشات پیشنهادی نشان می‌دهند که باکتری مذکور در محیط‌های به شدت بازی و اسیدی دارای راندمان درصد حذف مطلوب و حداکثری نیست.

هم‌چنین به‌منظور ارزیابی کفایت مدل از تحلیل واریانس استفاده شد. مقدارهای p-value کم‌تر از ۰٫۰۵ و مقدار F بالاتر در تحلیل واریانس، بیان‌گر مناسب‌تر بودن مدل برازش شده می‌باشد. با توجه به مقادیر p-value و F مدل ارایه شده که به ترتیب ۰٫۰۰۰۶ و ۱۳٫۶۱ می‌باشد، می‌توان گفت که مدل پیشنهادی از کفایت مناسبی برخوردار است. علاوه بر این، مقادیر R^2 و R^2 تعدیل‌شده[1] به ترتیب برابر ۰٫۹۴ و ۰٫۸۷ است

1. Adjusted R2

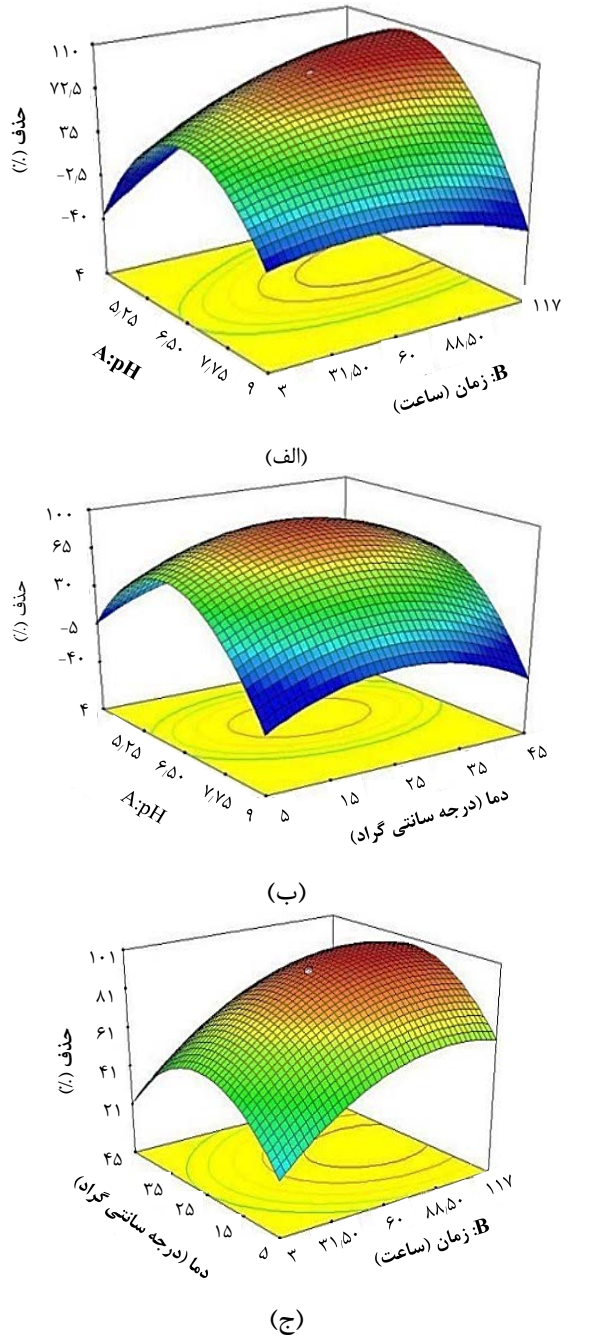
(جدول ۵). هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد ارتباط بهتری بین نتیجه‌های آزمایشگاهی و محاسبه‌شده وجود دارد [۳۲]. نتایج نشان می‌دهد که مدل ارایه‌شده به خوبی داده‌های تجربی را پیش‌بینی کرده است.

نتایج تحلیل واریانس (جدول ۵) نشان داده است که متغیرهای A و B (اسیدیته و مدت زمان) از نظر آماری با p-value کم‌تر از ۰٫۰۵ و F-value بالاتر، مؤثرترین عوامل و متغیر C (دما) با p-value بالاتر از ۰٫۰۵ و F-value پایین، کم‌ترین تأثیر را در حذف زیستی اورانیم دارند. شکل‌های مختلف ۱ (A تا C) اثر فاکتورهای اصلی و برهم‌کنش بین فاکتورها را نشان داده است.

شکل ۱ الف تأثیر زمان تماس، اسیدیته و برهم‌کنش این دو فاکتور را بر روی حذف زیستی اورانیم نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان گفت که اسیدیته تأثیر بسیار زیادی بر فرایند دارد، به گونه‌ای که در اسیدیته‌های نزدیک به ۶، ظرفیت حذف زیستی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این موضوع به این دلیل است که میکروارگانیسم‌های زنده، شرایط اسیدی نزدیک به خنثی را بیش‌تر ترجیح می‌دهند و فعالیت آن‌ها در این محدوده بالاتر است [۳۳]. تأثیر مثبت زمان بر ظرفیت حذف زیستی اورانیم به دلیل فراهم نمودن زمان کافی برای فعل و انفعالات میکروارگانیسم‌ها و تبدیل کردن اورانیم ۶+ ظرفیتی به ۴+ ظرفیتی می‌باشد. در واقع، با افزایش زمان تماس، میکروارگانیسم زمان بیش‌تری برای حذف اورانیم در اختیار دارند و به همین دلیل عملکرد بهتری در زمان‌های بالا حاصل می‌شود. شکل ۱ ب تأثیر دما، اسیدیته و برهم‌کنش این دو فاکتور را بر روی حذف زیستی اورانیم نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌کنید، شکل حاصل مشابه چتر شده است. در واقع از این شکل برداشت می‌شود که در شرایط میانی پارامترهای اسیدیته (۶) و دما (۲۵ درجه)، میکروارگانیسم عملکرد مناسب‌تری دارد. به‌دلیل مشابه می‌توان گفت که میکروارگانیسم شرایط دمایی محیطی را ترجیح می‌دهد و در این دما فعالیت بالاتری برای حذف اورانیم از خود نشان می‌دهد. شکل ۱ ج تأثیر دما، زمان تماس و برهم‌کنش این دو فاکتور را بر روی حذف زیستی اورانیم نشان می‌دهد. با توجه به شکل، افزایش زمان تماس به‌دلیل فراهم نمودن زمان کافی برای حذف یون‌های اورانیم توسط میکروارگانیسم‌ها باعث افزایش ظرفیت حذف زیستی می‌شود. هم‌چنین، ظرفیت حذف در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به دلیل فعالیت بهتر میکروارگانیسم‌ها بالاتر است. بهینه پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و پاسخ تجربی به‌دست آمده از آزمایش در جدول ۶ آمده است.

جدول ۵. تحلیل واریانس برای پارامترهای معادله درجه دوم حذف زیستی اورانیم

مرجع	مدل درجه دوم			
	DF	Sum of squares	F-value	p-value
مدل	۹	۱۵۶۶۰٫۰۵	۱۳٫۶۱	۰٫۰۰۰۶
A	۱	۱۳۷۵٫۷۷	۱۰٫۷۶	۰٫۰۱۱۲
B	۱	۲۱۲۳٫۳۸	۱۶٫۶۱	۰٫۰۰۳۶
C	۱	۲۶۲٫۲۴	۲٫۰۵	۰٫۱۹
AB	۱	۹۷۲٫۴۱	۷٫۶۱	۰٫۰۲۵
AC	۱	۰٫۱۸	۰٫۰۰۱۴	۰٫۹۷
BC	۱	۰٫۱۸	۰٫۰۰۱۴	۰٫۹۷
A^2	۱	۹۰۰۲٫۲۵	۷۰٫۴۱	<۰٫۰۰۰۱
B^2	۱	۲۹۴٫۸۳	۲٫۳۱	۰٫۱۶۷۴
C^2	۱	۳۷۸۹٫۴	۲۹٫۶۴	۰٫۰۰۰۶
		R^2= ۰٫۹۴	R^2_{adj}=۰٫۸۷	



شکل ۱. رویه‌های سه‌بعدی احیازیستی اورانیم: A: اثر متقابل زمان و اسیدیته (T=۲۵ °C)، B: اثر متقابل دما و اسیدیته (ساعت۶۰=زمان)، C: اثر متقابل زمان و دما (pH=۶٫۵).

جدول ۶. بهینه پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و پاسخ تجربی

فاکتور	مقدار بهینه	درصد پیش‌بینی‌شده	پاسخ تجربی	درصد خطای نسبی
اسیدیته	۶٫۵-۵٫۷	۱۰۰	۹۷	۳
دما	۲۶٫۶۳			
زمان تماس (ساعت)	۱۱۷			

پس از حصول بهینه پیشنهادی توسط نرم‌افزار (جدول ۶)، به منظور بررسی کاربرد باکتری *شوانلا* RCRIv در شرایط عدم بهینه، فرایند حذف، در pH پساب و دمای بهینه و زمان ۲۴ ساعت در مقیاس آزمایشگاهی نیز انجام پذیرفت. نتایج تجربی به دست آمده در شرایط مختلف پساب (جدول ۷) راندمان ۹۸-۹۹ درصد را ارایه داده است.

باکتری *شوانلا* RCRIv قادر است اورانیم را ابتدا جذب و سپس احیا نماید، در غلظت پایین اوارنیم و زمان کوتاه‌تر، ابتدا جذب و پس از تکمیل ظرفیت آن، احیا صورت می‌گیرد. بنابراین، فرایند غالب، جذب زیستی می‌باشد. از آن‌جا که شرایط هوازی و یا بی‌هوازی بر فرایند جذب مؤثر نمی‌باشد، میزان درصد حذف اورانیم نیز تفاوت چشمگیری را نشان نمی‌دهد. با توجه به پژوهش‌های مختلفی که با استفاده از روش سطح پاسخ در بررسی فرایند احیا و حذف اورانیم از محلول‌های آبی انجام گرفته است [۳۴، ۳۵، ۳۶] و نیز نتایج حاصل از پژوهش حاضر، می‌توان بیان داشت که استفاده از RSM برای بهینه‌سازی پارامترهای دخیل در فرایند قابل اعتماد و مناسب است.

جدول ۷. بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر درصد حذف اورانیم

گروه‌های مورد مطالعه	موارد مورد بررسی	درصد حذف
گروه یک (بی‌هوازی)	پساب و باکتری	۹۸٫۶
گروه دو (بی‌هوازی)	پساب، باکتری و الکترون‌دهنده	۹۹٫۲
گروه سه (بی‌هوازی)	پساب، باکتری، الکترون‌دهنده و ویتامین	۹۸٫۷
گروه یک (هوازی)	پساب و باکتری	۹۸٫۳
گروه دو (هوازی)	پساب، باکتری و الکترون‌دهنده	۹۹
گروه سه (هوازی)	پساب، باکتری، الکترون‌دهنده و ویتامین	۹۸٫۷

گروه یک بی‌هوازی: شامل پساب و باکتری است که بررسی در عدم حضور عوامل الکترون‌دهنده و ویتامین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

گروه دو بی‌هوازی: شامل پساب، باکتری و عوامل الکترون‌دهنده است که بررسی در عدم حضور ویتامین در دو تکرار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

گروه سه بی‌هوازی: شامل تمامی عوامل تأثیرگذار از قبیل پساب، باکتری و عوامل الکترون‌دهنده و ویتامین است.

گروه یک هوازی: شامل پساب و باکتری است که بررسی در عدم حضور عوامل الکترون‌دهنده و ویتامین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

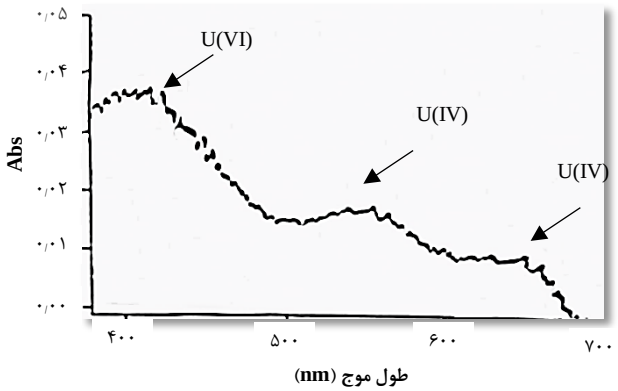
گروه دو هوازی: شامل پساب، باکتری و عوامل الکترون‌دهنده است که بررسی در عدم حضور ویتامین مورد ارزیابی قرار گرفته است.

گروه سه هوازی: شامل تمامی عوامل تأثیرگذار از قبیل پساب، باکتری و عوامل الکترون‌دهنده و ویتامین است.

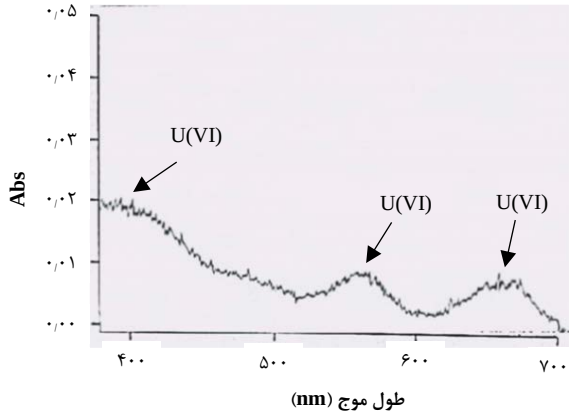
۲.۳ بررسی مکانیسم احیای اورانیم توسط باکتری *Shewanella* RCRIv در پساب به روش XRD و اسپکتروفتومتری

به منظور اثبات احیای اورانیم در پساب توسط باکتری و با اطلاع از امکان عدم سنجش کمی و دقیق آن در غلظت و زمان پایین، بررسی به دو روش XRD و اسپکتروفتومتری صورت گرفت.

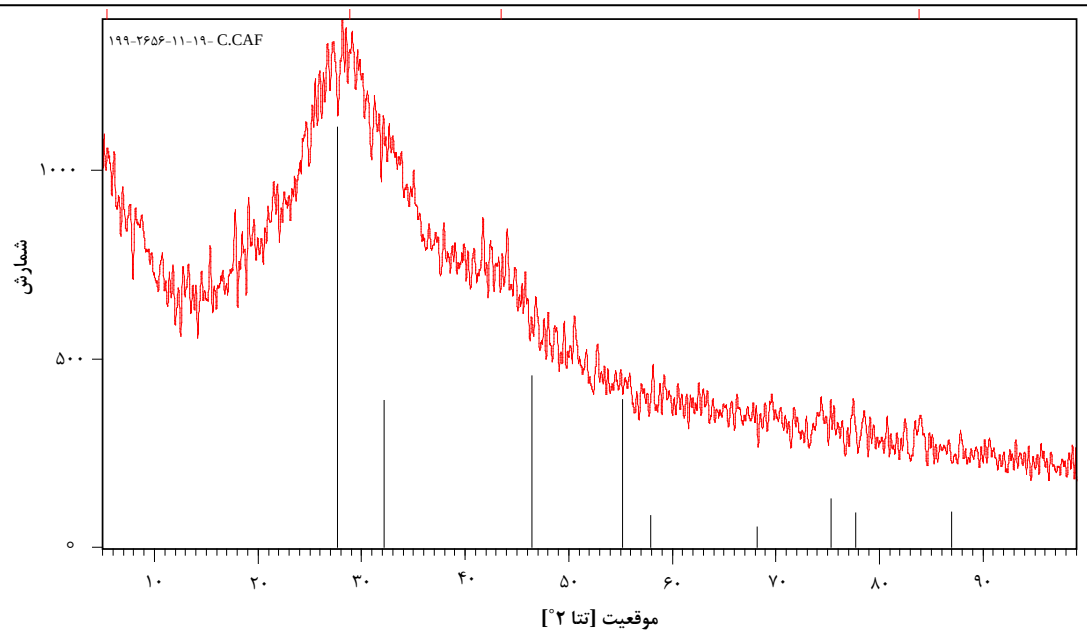
آزمایشات در پساب واقعی با غلظت اورانیم ۶۵ ppm، با دو روش اسپکتروفتومتری (در زمان‌های بهینه ۱۱۷ و ۲۴ ساعت) و XRD (زمان انکوباسیون یک ماهه)، مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این غلظت، پیک اورانیم چهار ظرفیتی هم در نمونه ۲۴ و هم در نمونه ۱۱۷ ساعته به وضوح نشان داده شده است (شکل ۲ و ۳). هم‌چنین نتایج XRD (زمان انکوباسیون یک ماهه)، پیک‌های اورانینیت را به خوبی نشان می‌دهد (شکل ۴). این نتایج تأییدی دیگر بر این نکته می‌باشد که باکتری *شوانلا* RCRIv به صورت غیروابسته به نیترات، به خوبی قادر به احیای اورانیم می‌باشد و فرایند احیا را در همان ۲۴ ساعت اولیه آغاز می‌کند.



شکل ۲. اسپکتروم محلول احیا در پساب واقعی حاوی ۶۵ ppm اورانیم در مدت زمان ۱۱۷ ساعت.



شکل ۳. اسپکتروم محلول احیا در پساب واقعی حاویی ۶۵ ppm اورانیم در مدت زمان ۲۴ ساعت.



شکل ۴. بررسی حضور یا عدم حضور اورانینیت در نمونه‌های پساب واقعی حاوی ۶۵PPM اورانیم در شرایط بهینه به روش پراش پرتو ایکس. جایگاه پیک‌های استاندارد اورانینیت ((U (IV) نیز با رنگ مشکی مشخص شده است.

مطالعات مختلف، جهت اثبات احیای اورانیم با استفاده از آنالیز XRD و اسپکتروفتومتری به منظور بررسی وجود اورانینیت انجام شده است. مطالعات خیجنیاک[1] و همکاران (۲۰۰۵)، بر روی یک باکتری ترموفیل به نام *ترموترباکتریوم فریردوسنس*[2] [۳۷] و نیز پژوهش روه[3] و همکاران (۲۰۰۲)، بر روی سویه‌ای از جنس *ترموآنئروباکتر*[4] [۳۸]، احیای زیستی اورانیم را اثبات می‌کند. از طرفی دیگر، در پژوهش وانگ[5] و همکاران (۲۰۱۸)، احیای اورانیم توسط باکتری *شوانلا پوترفانسیس* در حضور ریبوفلاوین و AQS به عنوان شاتل‌های الکترونی مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش به کمک XRD، احیای اورانیم را به صورت اورانینیت در عدم حضور این شاتل‌ها توسط باکتری نشان داده و بیان می‌کند که باکتری در حضور این شاتل‌ها قادر است اورانیم را به صورت U(IV) غیراورانینیتی رسوب دهد، چرا که اورانینیت دارای کریستال‌های مکعبی و مشخص بوده، اما اورانیم (IV) مشاهده شده، آمورف است. این موضوع می‌تواند امکان وجود اورانیم احیا شده غیراورانینیتی را در رسوبات حاصل از احیای اورانیم نشان دهد [۳۹]. فرانسیس و همکاران (۲۰۰۸)، احیای اورانیم توسط چند سویه از جنس *کلستریدیوم*[6] را با روش اسپکتروفتومتری به اثبات رسانده‌اند. آن‌ها هم‌چنین در PHهای مختلف، این بررسی را انجام داده و دریافتند که اورانیم در PHهای نزدیک به خنثی پیک بلندتری نشان داده و در نتیجه احیا در این شرایط بهتر صورت گرفته است. هم‌چنین، آن‌ها احیا اورانیم توسط این باکتری‌ها را در چند غلظت متفاوت انجام داده و دریافتند که این باکتری در غلظت ۰٫۶ میلی‌مولار نسبت به غلظت‌های پایین‌تر احیا مناسب‌تری دارد [۴۰]. قاسمی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی روند حذف اورانیم توسط Shewanella RCRIY در غلظت‌های مختلف اورانیم، انجام پذیرفتن عمل احیا را در باکتری‌های زنده و غیرزنده تأیید نمودند [۱۶]. از طرفی نیز اثبات گردیده است که فرایند جذب بر احیا مقدم بوده و سریع‌تر از آن رخ می‌دهد و از سویی تسهیل‌کننده احیا است [۴۱]. براساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر باکتری Shewanella RCRIY گزینه مناسبی جهت انجام فرایند احیا و جذب اورانیم می‌باشد که با استفاده از روش‌های مختلف مدل-سازی آماری از جمله روش سطح پاسخ می‌توان هزینه‌های اقتصادی طرح را کاهش داد.

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، می‌توان بیان داشت که روش سطح پاسخ، روشی کارآمد برای طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی فرایند احیای زیستی اورانیم می‌باشد و با استفاده از این روش، امکان بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر

1. Khijniak
2. *Thermoterrabacterium Ferrireducens*
3. Roh
4. *Thermoanaerobacter*
5. Wang
6. *Clostridium*

فرایند با تعداد کم‌تری آزمایش به طور کارامد وجود دارد. نتایج نشان داده است که درصد حذف اورانیم توسط باکتری در غلظت مورد نظر پساب، در تمامی شرایط در حداکثر راندمان (۹۸-۹۹ درصد) می‌باشد که این امر، تأییدی بر این نکته است که باکتری *Shewanella* RCRIv دارای ارزش بالایی در حذف اورانیم از پساب با مکانیسم احیا می‌باشد و می‌توان آن‌را به عنوان مدلی بومی و کارامد برای پالایش اورانیم از محیط‌زیست معرفی نمود.

مراجع

1. U.S. Department of Energy, *Final site observational work plan for the UMTRA project Old Rifle site GJO-99-88-TAR. U.S. Department of Energy*, Grand Junction, Colo (1999).
2. H.A. Vrionis, et al, *Microbiological and geochemical heterogeneity in an in situ uranium bioremediation field site*, Appl. Environ. Microbiol., 71(10), 6308 (2005).
3. R.T. Anderson, et al, *Stimulating the in situ activity of Geobacter species to remove uranium from the groundwater of a uraniumcontaminated aquifer*, Appl. Environ. Microbiol., **69**, 5884-5891(2003).
4. J.D. Istok, *In situ bioreduction of technetium and uranium in a nitrate-contaminated aquifer*, Environ. Sci. Technol., **38**, 468-475 (2004).
5. J.M. Senko, et al, *In-situ evidence for uranium immobilization and remobilization*, Environ. Sci. Technol., **36**, 1491-1496 (2002).
6. A. Zaheri Abdehvand, et al, *Removal of U (VI) from aqueous solutions using Shewanella sp. RCRI7, isolated from Qurugöl Lake in Iran*, Radiochim. Acta., **105(2)**, 109-120 (2017).
7. A. Abdelouas, et al, *Biological reduction of uranium in groundwater and subsurface soil*, Sci. Total. Environ., **250(1-3)**, 21-35 (2000).
8. J.D. Wall, L.R. Krumholz, *Uranium reduction*, Annu. Rev. Microbiol., **60**, 149-166 (2006).
9. R.K. Sani, B.M. Peyton, A. Dohnalkova, *Comparison of uranium (VI) removal by Shewanella oneidensis MR-1 in flow and batch reactors*, Water Res., **42(12)**, 2993-3002 (2008).
10. L. Sheng, J. Szymanowski, J.B. Fein, *The effects of uranium speciation on the rate of U (VI) reduction by Shewanella oneidensis MR-1*, Geochim. Cosmochim. Acta., **75(12)**, 3558-3567 (2011).
11. L. Sheng, J.B. Fein, *Uranium reduction by Shewanella oneidensis MR-1 as a function of NaHCO3 concentration: surface complexation control of reduction kinetics*, Environ. Sci. Technol., **48(7)**, 3768-3775 (2014).
12. K. Venkateswaran, *Polyphasic taxonomy of the genus Shewanella and description of Shewanella oneidensis sp.*, Int. J. Syst. Evol. Microbiol., **49(2)**, 705-724 (1999).
13. K.H. Williams, et al, *Bioremediation of uranium-contaminated groundwater: a systems approach to subsurface biogeochemistry*, Curr. Opin. Biotechnol., **24(3)**, 489-497 (2013).
14. S.G. Mirlahiji, K. Eisazadeh, *Bioremediation of Uranium via Geobacter spp.*, J. Res. Dev., **187(1477)**, 1-7 (2014).
15. V. Tarhriz, et al, *Isolation and characterization of some aquatic bacteria from Qurugol Lake in Azerbaijan under aerobic conditions*, Adv. Environ. Biol., **5(10)**, 3173-3179 (2011).
16. R. Ghasemi, et al, *Evaluation of mtr cluster expression in Shewanella RCRI7 during uranium removal*, Arch. Microbiol., **202(10)**, 2711-2726 (2020).
17. M. Zarei, et al, *U (VI) tolerance affects Shewanella sp. RCRI7 biological responses: growth, morphology and bioreduction ability*, Arch. Microbiol., **204(81)**, 1-13 (2021).
18. K.R. Czerwinski, M.F. Polz, *Uranium enrichment using microorganisms*, Ed: Google Patents (2008).
19. C. Cojocaru, G. Zakrzewska-Trznadel, *Response Surface Modeling and Optimization of Copper Removal from Aqua Solutions Using Polymer Assisted Ultrafiltration*, J. Membrane Sci., **298**, 56-70 (2007).
20. A. Ozer, et al, *Biosorption of Copper(II) Ions on Enteromorpha Prolifera: Application of Response Surface Methodology (RSM)*, Chem. Eng. J., **146**, 377–387 (2009).
21. J.I. Khattar, S. Shailza, *Optimization of Cd2+ Removal by the Cyanobacterium Synechocystis Pevalekii Using the Response Surface Methodology*, Process Biochem., **44**, 118–121 (2009).
22. D.R. Lovley, et al, *Enzymatic iron and uranium reduction by sulfate-reducing bacteria*, Marine Geology., **113(1-2)**, 41-53 (1993).
23. D.R. Lovley, et al, *Microbial reduction of uranium*, Nature., **350(6317)**, 413-416 (1991).
24. H. Sohbatzadeh Lonbar, *Experimental investigation of operational parameters involved in uranium biosorption in fixed-bed columns using composite biosorbent of Pseudomonas-chitosan*, PhD thesis. Amirkabir University of Technology & Nuclear Science and Technology Research Institute (2016).
25. A. Witek-Krowiak, et al, *Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process*, Bioresour. Technol., **160**, 150-160 (2014).
26. R. Boopathy, *Factors limiting bioremediation technologies*, Bioresour.Technol., **74**, 63-67 (2000).
27. T.A. Kurniawan, et al, *Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals*, Chem. Eng. J., **118**, 83-98 (2006).
28. J.R. Silva, A.C. De Melo Ferreira, A.C.A. Da Costa, *Uranium biosorption under dynamic conditions: Preliminary tests with Sargassum filipendula in real radioactive wastewater containing Ba, Cr, Fe, Mn, Pb, Ca and Mg*, J. Radioanal. Nucl. Chem., **279(3)**, 909-914 (2009).
29. S. Pal, et al, *Bioleaching of low-grade uranium ore using Acidithiobacillus ferrooxidans*, Indian J. Microbiol., **50(1)**, 70-75 (2010).

30. A.M. Soliman, et al, *Selective removal of uranium from wastewater using sludge collected from refinery wastewater treatment: Equilibrium, thermodynamic and kinetics studies*, J. Water. Process. Eng., **19**, 267-276 (2017).
31. M.A. Bezerra, et al, *Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry*, Talanta., **76(5)**, 965-977 (2008).
32. M. Pourkhalil, et al, *Optimization of the Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide by Response Surface Method*, J. Petroleum Res., **29(3-98)**, 131-144 (2019).
33. C. Kim, E. Ndegwa, *Influence of pH and temperature on growth characteristics of leading foodborne pathogens in a laboratory medium and select food beverages*, Austin Food Sci., **3(1)**, 1-8 (2018).
34. H. Sohbatzadeh, et al, *U (VI) biosorption by bi-functionalized Pseudomonas putida@ chitosan bead: Modeling and optimization using RSM*, Int. J. Biol. Macromol., **89**, 647-658 (2016).
35. N. Hashemi, et al, *Optimization of uranium biosorption in solutions by Sargassum boveanum using RSM method*, Adv. Environ. Res. (AER)., **9(1)**, 65-84 (2020).
36. Ş. Sert, M. Eral, *Uranium adsorption studies on aminopropyl modified mesoporous sorbent (NH2–MCM-41) using statistical design method*, J. Nucl. Mater., **406(3)**, 285-292 (2010).
37. T. Khijniak, et al, *Reduction of uranium (VI) phosphate during growth of the thermophilic bacterium Thermoterrabacterium ferrireducens*, Appl. Environ. Microbiol., **71(10)**, 6423-6426 (2005).
38. Y. Roh, et al, *Isolation and characterization of metal-reducing Thermoanaerobacter strains from deep subsurface environments of the Piceance Basin, Colorado*, Appl. Environ. Microbiol., **68(12)**, 6013-6020 (2002).
39. P. Wang, et al, *Effects of riboflavin and AQS as electron shuttles on U (vi) reduction and precipitation by Shewanella putrefaciens*, RSC Adv., **8**, 30692-30700 (2018).
40. A. Francis, C. Dodge, *Bioreduction of uranium (VI) complexed with citric acid by Clostridia affects its structure and solubility*, Environ. Sci. Technol., **42(22)**, 8277-8282 (2008).
41. A. Korenevsky, T.J. Beveridge, *The surface physicochemistry and adhesiveness of Shewanella are affected by their surface polysaccharides*, Microbiol., **153(6)**, 1872-1883 (2007).

COPYRIGHTS
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله
راضیه قاسمی، الهام راستخواه، صابره نائیج، توران ربیعی، حمزه حسین پور، سمانه نائیج، جواد رفیعی، فائزه فاطمی (۱۴۰۱)، بهینه‌سازی فرایند احیای اورانیم توسط باکتری Shewanella RCRI۷ به روش سطح پاسخ در پساب صنعتی، ۱۰۳، ۱۵-۲۳

DOI: 10.24200/NST.2023.1329 **Url**: https://jonsat.nstri.ir/article_1329.html