مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۹۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 94, No. 4, 2021

بهینه‌سازی حذف کارآمد سرب توسط *Bacillus* sp. Strain STG-83 با استفاده از روش رویه پاسخ جهت زیست‌پالایی پساب‌های آلوده

سما سلیمی[۱]، پریسا تاجرمحمد قزوینی*[۲]، رضا دباغ[۲]، اسماعیل عیوضی[۳]

۱. دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، صندوق پستی: ۴۷۵۹۱-۵۵۱۹۷، مراغه - ایران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران ـ ایران

۳. گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، تهران - ایران

*Email: ptajer@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۱۴

چکیده

خطرات زیست محیطی پساب‌های حاوی فلزات سنگین از جمله سرب، توجه پژوهشگران را برای پاک‌سازی آن‌ها با استفاده از روش‌های نوین مانند زیست پالایی متمرکز کرده است. در این مطالعه توانایی جذب زیستی سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 مورد ارزیابی قرار گرفت. از روش رویه پاسخ با طراحی مرکب مرکزی توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت جهت بهینه‌سازی پارامترهایی چون pH، مقدار جاذب زیستی و غلظت اولیه سرب استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل درجه دوم پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت با $R^۲$=۰٫۹۹۳۸، به خوبی رفتار فرایند را پیش‌بینی کرده و جذب زیستی در pH=۴٫۵، غلظت اولیه سرب ۲۹۷٫۹۵ $mg.L^{-۱}$، مقدار جاذب ۱ $g.L^{-۱}$ بهینه می‌شود که برابر با ۱۴۹٫۵۹۵ $mg.g^{-۱}$ dry weight می‌باشد. هم‌چنین داده‌های تجربی با ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ برازش شد. نتایج نشان داد که مدل لانگمویر با $R^۲$=۰٫۹۶۱ مناسب‌تر است. مطالعات سینتیکی نیز نشان داد که ظرفیت جذب در ۵ دقیقه به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. نهایتاً با توجه به پتانسیل ارزشمند این باکتری در جذب زیستی سریع و بالای سرب، *Bacillus* sp. strain STG-83 به عنوان یک جاذب باکتریایی با ارزشی جهت فرایندهای زیست پالایی سرب معرفی شده و کارایی روش رویه پاسخ در مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند جذب زیستی سرب توسط باکتری مذکور تأیید می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: باکتری، جذب زیستی، زیست پالایی، سرب، طراحی آزمایش

Optimization of efficient lead removal by *Bacillus* sp. Strain STG-83 using response surface methodology for bioremediation of contaminated wastewater

S. Salimi[1], P. Tajer-Mohammad-Ghazvini*[2], R. Dabbagh[2], E. Eivazi[3]

1. Faculty of Basic Sciences, Maragheh Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 55197-47591, Maragheh - Iran
2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran
3. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, P.O.Box: 11155-4563, Tehran - Iran

Research Article

Received 29.12.2019, Accepted 3.2.2020

Abstract

Environmental hazards of wastewater containing metals, including lead, have attracted researchers' attention on their cleanup using novel methods such as bioremediation. In the present study, the biosorption ability of lead by *Bacillus* sp. Strain STG-83 was evaluated. Response surface methodology with central composite design by the Design Expert software was used to optimize parameters such as pH, biomass concentration, and initial lead concentration. The results showed that the quadratic model proposed by Design Expert software with a correlation coefficient of R^2=0.9938 predicted the process behavior properly; lead biosorption by the bacteria was optimized at pH=4.5, initial concentration of lead 297.95 mg. L^{-1}, and the amount of adsorbent 1 $g.L^{-1}$, which is equal to 149.595 mg. g^{-1} dry weight. Also, the experimental data were fitted with Langmuir and Freundlich isotherms. The results showed that the Langmuir model is more suitable with R^2=0.961. Kinetic studies showed that adsorption capacity reached its maximum value within 5 minutes. Ultimately, due to the valuable potential of this bacterium in rapid and high biosorption of lead, *Bacillus* sp. strain STG-83 is introduced as a valuable bacterial sorbent for lead bioremediation processes and performance of response surface methodology in modeling and optimizing lead biosorption process by *Bacillus* sp. strain STG-83 is confirmed.

Keywords: Bacteria, Biosorption, Bioremediation, Lead, Experiment design

۱. مقدمه

فلزات سنگین از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط زیست به شمار می‌آیند که در چند دهه اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. میزان ورود آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین با منشاء انسانی به درون اکوسیستم بسیار فراتر از میزان ورود آن‌ها به وسیله فرایندهای طبیعی است [۱-۲]. سرب به طور گسترده‌ای در تأسیسات هسته‌ای به عنوان ماده محافظ به صورت آجر سربی، ورق، پشم یا غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرم فیزیکی مواد محافظ سرب به ماهیت استفاده از آن بستگی دارد. علاوه بر این، امروزه از رنگ‌های پایه و مواد اولیه سربی به طور معمول در ساخت بسیاری از امکانات استفاده می‌گردد [۳]. اخیراً فلز سرب به عنوان یک آلاینده مهم خروجی بسیاری از صنایع از جمله تولید باتری، شیشه و سرامیک، آب‌کاری فلزات، صنایع رنگ و آفت‌کش، تولید سوخت و مواد پتروشیمی و هم‌چنین به عنوان یکی از آلاینده‌های مهم در پساب‌ها و ضایعات معادن اورانیم مطرح است. پسماندها، ضایعات و پساب‌های حاصل از استخراج اورانیم از سنگ‌معدن حاوی ایزوتوپ‌های رادیواکتیو اورانیم، توریم و رادیم و هم‌چنین غلظت قابل‌توجهی از فلزات سنگین سرب، مولیبدن و وانادیم است. پسماندها و پساب‌های حاصل از استخراج اورانیم در صورت عدم کنترل و پالایش می‌توانند منبع اصلی آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی باشند [۴-۵]. در مطالعات مختلف شواهدی مبنی بر این‌که تجمع سرب در بدن انسان‌ها بسته به میزان و مدت زمان تماس، محدوده وسیعی از اثرات بیولوژیکی را دربر می‌گیرد، ارایه شده است [۶]. مسمومیت حاد سرب اغلب به دلیل بلع تصادفی سرب به‌ویژه در قالب ترکیبات سرب محلول مانند استات و نیترات است. ترکیبات معدنی نامحلول و پایدار سرب کم‌تر سمی هستند، زیرا میزان جذب آن‌ها از دستگاه گوارش کم است. با این وجود چنین ترکیبات غیرمحلولی هم با انباشت در بافت‌ها می‌توانند در نتیجه انحلال آهسته منجر به آزاد شدن سرب به مایعات بدن و ایجاد مسمومیت گردند [۳].

مشکل اصلی در خصوص فلزات سنگین این است که غیرقابل تجزیه بوده و پس از ورود به بدن موجودات زنده در بافت‌ها ذخیره می‌شوند. بنابراین حضور آن‌ها حتی در غلظت‌های بسیار کم نیز حایز اهمیت بوده و حذف و بازیابی آن‌ها از پساب‌های صنعتی و محلول‌های آبی از اهمیت بسیاری برخوردار است [۱]. روش‌های متعددی برای حذف فلزات از پساب‌های صنعتی وجود دارد که به طور عمده به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش‌های زیستی و روش‌های غیرزیستی. مطالعات نشان داده است که در آینده فرایندهای میکروبی به دلیل افزایش احتیاج به حذف ایمن فلزات سمی و هم‌چنین کم کردن مشکلات زیست محیطی می‌توانند نقش مهمی در آمایش محیط‌زیست و پساب‌ها بازی کنند. روش‌های زیستیِ جذب می‌تواند از طریق سیستم‌های مرده (مانند جذب زیستی[1]) یا زنده (مانند تجمع زیستی[2]) صورت گیرد. تجمع زیستی فرایندی است که به متابولیسم سلول‌های زنده وابسته است و در آن یون‌های فلزی به درون سلول جذب می‌شوند. اما جذب زیستی فرایندی مستقل از متابولیسم سلولی است و تنها دیواره و سطوح بیرونی سلول درگیر فرایند جذب می‌شوند. از مزیت‌های جذب زیستی نسبت به تجمع زیستی می‌توان به عدم نیاز به صرف زمان و هزینه‌ی مواد مغذی برای رشد و نگه‌داری سلول‌ها، حساس نبودن جاذب به محیط سمّی و محدود نبودن به شرایط مناسب برای رشد و در نتیجه افزایش دامنه شرایط عملیاتی نظیر دما، pH، غلظت اولیه‌ی فلز و ... اشاره کرد. جذب زیستی به سبب فراوانی و قیمت مناسب جاذب، سرعت بالای جذب، بازدهی بالا، قابلیت جذب از محلول های بسیار رقیق، امکان بازیافت مواد جذب شده، مصرف مجدد جاذب و عدم تولید پسابِ سمّی روش مناسبی به شمار می‌آید [۷-۹]. از معیارهای انتخاب مواد زیستی به عنوان یک جاذب زیستی مناسب می‌توان به ظرفیت جذب تعادلی بالا و سینتیک جذب مناسب اشاره کرد [۱۰-۱۱].

امروزه تنوع جاذب‌های میکروبی در فرایندهای پاک‌سازی فلزات سنگین به دلیل توانایی سازگاری میکروب‌ها، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از آن‌جا که تا به امروز تنها بخش کوچکی از سویه‌های میکروبی موجود در طبیعت مورد بررسی قرار گرفته است، جستجو و شناسایی سویه‌های جدید با پتانسیل جذب زیستی بالا نسبت به فلزات هم‌چنان ادامه دارد. بنابراین بررسی و شناسایی پتانسیل جذب زیستی فلزات سنگین سویه‌های میکروبی جدید جدا شده از ایران می‌تواند یکی از مباحث حایز اهمیت برای فرایندهای زیست پالایی فلزات باشد. از آن‌جا که یک فرایند، مشتمل بر متغیرهای قابل‌کنترل و غیرقابل کنترل است، معمولاً وجود عوامل مختلف و متعدد درگیر در یک طرح منجر به افزایش تعداد آزمایش و

1. Biosorption
2. Bioaccumulation

صرف هزینه گزاف و زمان طولانی می‌شود. بنابراین سعی می‌شود روند انجام آزمایش به یک طرح منظم تبدیل شده، اطلاعات به دست آمده تنظیم شده و تا حد ممکن تعداد آزمایش‌های لازم کاهش یابد، به گونه‌ای که مجموعه این اعمال به بهینه‌سازی طرح بیانجامد. روش رویه پاسخ[1] (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری برای طراحی آزمایش، ساخت مدل، تخمین تأثیر متغیرها و هم‌چنین جستجوی نقاط بهینه پاسخ حاصل از این متغیرها می‌باشد. روش رویه پاسخ شاخه‌ای مهم از طراحی آزمایش بوده و یک تکنولوژی مهم در توسعه یک فرایند جدید و بهینه‌سازی عملکرد آن در جهت بهتر کردن کیفیت و ساختار محصولات جدید به شمار می‌رود [۱۲، ۱۳]. بنابراین در پژوهش حاضر، ارزیابی جذب زیستی فلز سرب توسط باکتری بومی ایران *Bacillus* sp. strain STG-83 دارای پتانسیل‌های ارزشمند در فرایندهای زیست پالایی اکسی آنیون‌های سلنیم و تلوریم [۱۴]، در شرایط مختلف عملیاتی با استفاده از طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ منبع میکروارگانیسم

باکتری مورد استفاده در این پژوهش، باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 می‌باشد. این باکتری یک سویه میکروبی جدید از ایران است که توالی جدید ژن ۱۶S rRNA باکتری مذکور در پایگاه اطلاعاتی GenBank در Biotechnology Information (NCBI) National Center for تحت عدد دسترسی توالی نوکلئوتیدی EF051255 (Nucleotide sequence accession number) ثبت شده است [۱۴].

۲.۲ آماده‌سازی محلول فلزی سرب

محلول مادر سرب (۱۰۰۰ $mg.L^{-1}$) از نمک نیترات سرب ($Pb(NO_3)_2$) (ساخت شرکت مرک) تهیه گردید. به منظور دست‌یابی به غلظت‌های پایین‌تر از سرب، محلول مادر رقیق شد. برای جلوگیری از اثر تداخلی آلاینده‌ها تمام ظروف به کار رفته با ۰/۵ HNO_3 نرمال و آب دو بار تقطیر شسته شدند. pH هر محلول به وسیله ۰/۲ HNO_3 نرمال و ۰/۲ NaOH نرمال تنظیم گردید [۱۵].

۳.۲ آماده‌سازی جاذب باکتریایی جهت انجام آزمایش‌های جذب زیستی

باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 در محیط کشت مایع نوترینت (شرکت مرک ,Nutrient Broth) در دمای ۳۰ °C، دور همزن ۱۵۰ rpm، به مدت ۲۴ ساعت کشت داده شد. به منظور جمع‌آوری زیست توده[2] باکتریایی، محیط کشت در دمای ۴ °C، دور ۵۰۰۰ rpm به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس سلول‌های باکتری با آب مقطر شسته و در آزمایش‌های جذب استفاده شدند. وزن خشک زیست‌توده باکتریایی نیز بعد از شستشوی سلول‌ها و خشک شدن آن‌ها در دمای ۶۰ °C مشخص شد.

۴.۲ آزمایش‌های حالت ناپیوسته

در این مطالعه آزمایش‌های جذب در حجم ۱۰ ml محلول سرب، دور همزن ۱۵۰ rpm و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد انجام و از سانتریفیوژ با دور ۱۰۰۰۰ rpm، به مدت ۱۵دقیقه یا فیلتر غشایی ۰/۲ میکرون برای جداسازی باکتری از محلول سرب استفاده شد. آنالیز غلظت سرب در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌بینی نشر اتمی- پلاسمای جفت شده القایی[3] مورد سنجش قرار گرفت.

۵.۲ ارزیابی اطلاعات

مقدار یون فلز جذب شده توسط زیست‌توده باکتریایی با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید [۸]:

$$Q = (V_0C_0 - V_fC_f)/M \qquad (۱)$$

که Q مقدار جذب فلز ($mg.g^{-1}$ dry weight)، V_0 و V_f به ترتیب حجم اولیه و نهایی محلول یون فلز (L)، C_0 غلظت اولیه یون فلز در محلول ($mg.L^{-1}$)، C_f غلظت نهایی یون فلز در محلول ($mg.L^{-1}$) و M وزن خشک زیست‌توده (g) می‌باشد.

بازده جذب یا R (%) نیز از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$R(\%) = ۱۰۰ \times (C_o - C_f) / C_o \qquad (۲)$$

1. Response Surface Methodology

2. Biomass
3. ICP-Optical Emission Spectroscopy

۶.۲ طراحی آزمایش

در این پژوهش، روش رویه پاسخ (RSM) برای ارزیابی فرایند جذب زیستی سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 و بهینه‌سازی آن مورد استفاده قرار گرفت. مراحل روش RSM عبارتند از: ۱) انتخاب متغیرهای مستقل که بیش‌ترین تأثیر را بر روی فرایند دارند. ۲) انتخاب طراحی آزمایش و تهیه ماتریس آزمایش‌ها بر اساس مدل طراحی انتخاب شده، ۳) انجام محاسبات ریاضی-آماری برای مدل کردن تابع چند جمله‌ای، ۴) بررسی اهمیت و مناسب بودن مدل و ۵) به دست آوردن مقدار بهینه برای هر کدام از متغیرها [۱۲، ۱۳].

در این مرحله سه متغیر تأثیرگذار pH در محدوده ۱٫۳ تا ۴٫۶۸، غلظت اولیه سرب از $mg.L^{-1}$ ۱۲٫۰۵ تا $mg.L^{-1}$ ۲۹۷٫۹۵ و مقدار جاذب در محدوده $g.L^{-1}$ ۰٫۳ تا $g.L^{-1}$ ۳٫۶۸ در پنج سطح α -، ۱-، 0، ۱+ و α+ مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۱). بر اساس متغیرها و مقادیر آن‌ها، یک سری شامل ۲۰ آزمایش با استفاده از طراحی مرکب مرکزی[1] (CCD) طراحی گردید. آزمایش‌ها در حجم mL ۱۰ محلول سرب، دور همزن rpm ۱۵۰، دمای °C ۳۰ به مدت زمان ۱۲۰ دقیقه انجام گرفت. هم‌چنین برای تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار آماری Design-Expert 7.0 (Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA) استفاده شد [۱۶]. بهینه‌سازی با نرم‌افزار نیز انجام گرفت. به منظور صحت‌سنجی مدل در پیش‌بینی مقادیر تجربی، نقطه بهینه توسط نرم‌افزار پیش‌بینی شد و آزمایش‌های نقطه بهینه با دو بار تکرار در آزمایشگاه انجام شد. متغیرهای روش طراحی مرکب مرکزی و سطح‌های کد شده هر یک در جدول ۱ ارایه شده‌اند.

جدول ۱. متغیرهای روش طراحی مرکب مرکزی و سطح‌های کد شده هر یک

متغیر	نماد	سطح‌ها				
		- α	-۱	0	+۱	α+
pH	A	۱٫۳	۲	۳	۴	۴٫۶۸
مقدار جاذب ($g.L^{-1}$)	B	۰٫۳	۱	۲	۳	۳٫۶۸
غلظت اولیه سرب ($mg.L^{-1}$)	C	۱۲٫۰۵	۷۰	۱۵۵	۲۴۰	۲۹۷٫۹۵

1. Central Composite Design

۷.۲ ایزوترم‌های جذب

نتایج جذب توسط دو مدل ایزوترمی فروندلیچ[2] و لانگمویر[3] مورد ارزیابی قرار گرفت. ایزوترم فروندلیچ، جذب بر روی سطوح ناهمگن را توصیف می‌کند. در این مدل فرض بر این است که سطح جاذب دارای مراکز جذب با میزان تمایل متفاوت است و در ابتدا مراکز جذب مستحکم‌تر پر شده و سپس بقیه به‌ترتیب استحکام، پر می‌شوند. یکی از معایب این ایزوترم این است که قادر به محاسبه بیشینه میزان جذب نیست؛ بنابراین تنها در محدوده غلظت‌های پایین تا متوسط کارآیی دارد. ایزوترم فروندلیچ برخلاف ایزوترم لانگمویر جذب سطحی را به صورت چند لایه در نظر می‌گیرد [۸]. مدل ایزوترمی جذب فروندلیچ توسط رابطه ۳ مطالعه گردید:

$$log\ (Q) = (1/n)\ log\ C_f + log\ k_f \qquad (۳)$$

که در آن Q مقدار جذب فلز توسط جاذب، C_f غلظت فلز در محلول، و k_f و n ثابت‌های مدل هستند. مقدار ثابت‌های k_f و n مدل فروندلیچ از روی عرض از مبداء و شیب منحنی محاسبه شده است [۸].

در ایزوترم لانگمویر فرض بر این است که یک مولکول جذب‌شونده تنها یک مرکز جذب را اشغال می‌کند و مولکول‌های جذب شده هیچ برهم‌کنشی با یک‌دیگر ندارند. بدین‌ترتیب جذب مولکول اول هیچ اثری بر جذب مولکول‌های بعدی نخواهد گذاشت. این ایزوترم پدیده‌ی جذب را به صورت موضعی در نظر می‌گیرد، به این مفهوم که مولکول‌ها در مرکز جذب باقی می‌مانند تا دفع شوند. نیروهایی که از طرف جاذب بر مولکول‌های جذب شده وارد می‌شود از قطر یک مولکول فراتر نمی‌رود؛ در نتیجه جذب به صورت تک لایه خواهد بود. گرمای جذب نیز در ایزوترم لانگمویر ثابت فرض شده و مستقل از میزان جذب است؛ در نتیجه سطح جاذب از لحاظ انرژی جذب همگن در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. مدل ایزوترمی جذب لانگمویر توسط رابطه (۴) مطالعه گردید:

$$1/Q = 1/Q_{max} + 1/\ Q_{max} bC_f \qquad (۴)$$

در این رابطه Q مقدار جذب فلز توسط جاذب و C_f غلظت فلز در محلول است. Q_{max} در این رابطه بیشینه جذب دست

2. Freundlich
3. Langmuir

یافتنی به وسیله سیستم می‌باشد و b مربوط به میل بین ماده جاذب و ماده حل شده است. [۸].

۸.۲ سینتیک جذب

اثر زمان بر روی جذب زیستی سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 در مجاورت با ۱۰ mL محلول فلزی سرب در شرایط بهینه به دست آمده از طراحی آزمایش در زمان‌های ۵، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰، ۳۶۰ و ۴۲۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. سلول‌ها بعد از پایان زمان‌های مجاورسازی، جدا شده و غلظت سرب در محلول رویی توسط دستگاه طیف‌بینی نشر اتمی-پلاسمای جفت شده القایی سنجیده شد.

۹.۲ بررسی جذب سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 تیمار شده با اتوکلاو

جهت انجام این مطالعه، ابتدا سلول‌های باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 با حرارت اتوکلاو (۱۲۱ °C به مدت ۱۵ دقیقه) تیمار گردید. سپس سلول‌های باکتریایی تیمار شده با اتوکلاو و سلول‌های باکتریایی شاهد (بدون تیمار) با محلول فلزی سرب در شرایط بهینه به دست آمده در بخش طراحی آزمایش مجاور شدند. در پایان مرحله مجاورسازی، سلول‌ها جدا شده و محلول‌ها برای تجزیه و تحلیل توسط دستگاه طیف‌بینی نشر اتمی- پلاسمای جفت شده القایی آماده شدند.

۳. نتایج

۱.۳ طراحی آزمایش به منظور ارزیابی فاکتورهای مؤثر بر فرایند جذب زیستی سرب و بهینه‌سازی آن

برای تعیین اثرات اصلی و برهم‌کنش سه متغیر pH، غلظت اولیه سرب و مقدار جاذب بر جذب زیستی سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 از طراحی مرکب مرکزی (CCD) در روش رویه پاسخ استفاده شد. مقادیر متغیرها و پاسخ‌های آزمایشگاهی در جدول ۲ ارایه شده است. مدل پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار به صورت زیر تعریف شده است:

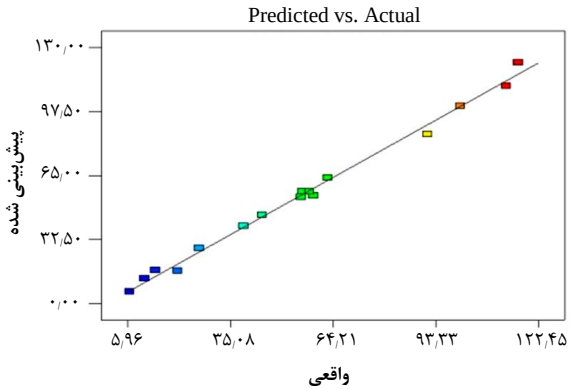
$$Q = -۹۷٫۳۲۳۶۵ + ۴۳٫۹۴۳۳۹ * pH + ۲۲٫۹۳۷۵۷ * dose + ۰٫۶۱۰۲۵ * conc - ۷٫۹۴۹۲۵ * pH * dose - ۰٫۰۱۷۷۳۰ * pH * conc - ۰٫۱۰۵۹۹ * dose * conc - ۳٫۴۴۶۶۷ * pH^۲ + ۰٫۰۳۲۲۴۸ * dose^۲ + ۶٫۸۹۳۴۶E - ۰۰۵ * conc^۲$$

جدول ۲. مقادیر متغیرها و پاسخ‌های آزمایشگاهی طراحی مرکب مرکزی در روش رویه پاسخ

ردیف	شماره آزمایش	(A) pH	(B) مقدار جاذب ($g.L^{-1}$)	(C) غلظت اولیه سرب ($mg.L^{-1}$)	Q ($mg.g^{-1}$ dry weight)
۷	۱	۲	۳	۲۴۰	۶۲٫۶۶۸۱
۸	۲	۴	۳	۲۴۰	۵۵٫۱۲۷۴
۱۹	۳	۳	۲	۱۵۵	۵۵٫۵۵۵۷
۶	۴	۴	۱	۲۴۰	۱۱۶٫۶۲۶
۱۳	۵	۳	۲	۱۲٫۰۵	۶٫۵۳۹۴
۳	۶	۲	۳	۷۰	۲۰٫۱۲۴۸
۱۰	۷	۴٫۶۸	۲	۱۵۵	۵۸٫۶۳۶۳
۱۱	۸	۳	۰٫۳۲	۱۵۵	۹۰٫۹۸۷۵
۱۷	۹	۳	۲	۱۵۵	۵۷٫۱۱۹۳
۱۶	۱۰	۳	۲	۱۵۵	۵۶٫۷۵۴۵
۴	۱۱	۴	۳	۷۰	۱۰٫۷۵۶۵
۵	۱۲	۲	۱	۲۴۰	۱۰۰٫۲۲۵
۱۵	۱۳	۳	۲	۱۵۵	۵۷٫۴۳۲
۱۴	۱۴	۳	۲	۲۹۷٫۹۵	۱۱۳٫۲۶۳
۱۸	۱۵	۳	۲	۱۵۵	۵۶٫۷۰۲۴
۹	۱۶	۱٫۳۲	۲	۱۵۵	۳۸٫۸۵۱۷
۱	۱۷	۲	۱	۷۰	۱۳٫۷۸۹۴
۲۰	۱۸	۳	۲	۱۵۵	۵۷٫۵۳۶۳
۲	۱۹	۴	۱	۷۰	۴۴٫۰۷۳۹
۱۲	۲۰	۳	۳٫۶۸	۱۵۵	۲۶٫۱۸۰۳

تحلیل واریانس به منظور تأیید مؤثر بودن اثرات اصلی و برهم‌کنشی متغیرها انجام شد. به طور کلی، مقدار P کم‌تر از ۰٫۰۵ و مقدار F بزرگ در جدول تحلیل واریانس نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر متغیرها با سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد. مقادیر P و F مدل پیشنهادی به ترتیب برابر با ۰٫۰۰۰۱ > و ۱۷۹٫۵۲ می‌باشد که دلالت بر صحت مدل پیشنهادی دارد. هم‌چنین مقادیر $R^۲$ و $R^۲_{adj}$ به ترتیب برابر با ۰٫۹۹۳۸ و ۰٫۹۸۸۳ می‌باشند که نشان می‌دهند مدل پیشنهادی به خوبی قادر است مقادیر تجربی را پیش‌بینی کند. در بحث کفایت مدل، شکل ۱ انحراف داده‌های تجربی از داده‌های پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. با توجه به نزدیکی داده‌های تجربی به خط ترسیم‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که معادله درجه دوم اریه شده به خوبی فرایند جذب سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 را توصیف می‌کند.

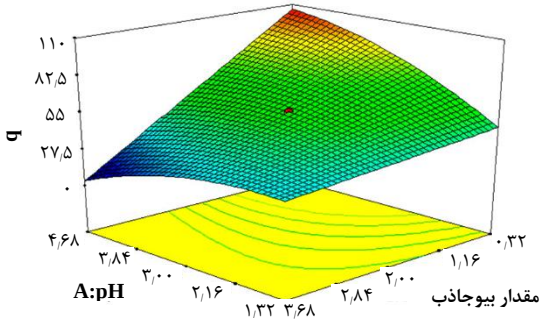
در جدول ۳، تحلیل واریانس مدل، فاکتورهای اصلی و برهم‌کنش فاکتورها مشاهده می‌گردد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که فاکتورهای اصلی (A، B و C) و ترم‌های AB، BC و اثرات مرتبه دوم $A^۲$ از لحاظ آماری (p-value <۰٫۰۵) بر روی فرایند تأثیرگذار و مابقی (>p-value۰٫۰۵) بدون تأثیر می‌باشند. در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ رویه‌های سه‌بعدی جذب سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 نشان داده شده است.



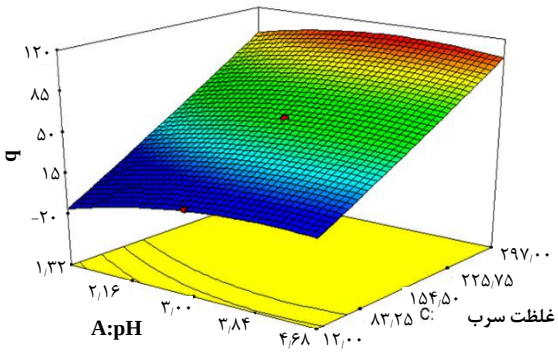
شکل ۱. مقایسه مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده مقدار Q به‌منظور ارزیابی کفایت مدل.

جدول ۳. تحلیل واریانس مدل پیشنهادی

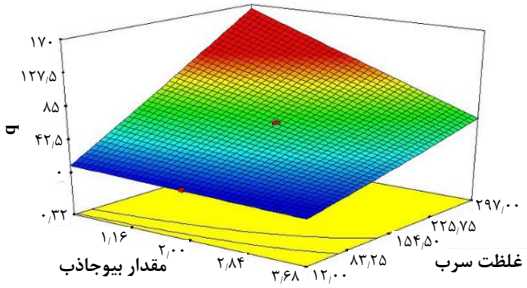
مرجع	Sum of squares	df	Mean square	F value	p-value
مدل	۱۸۹۴۱٫۸۳	۹	۲۱۰۴٫۶۵	۱۷۹٫۵۲	< ۰٫۰۰۰۱
A	۲۹۱٫۰۸	۱	۲۹۱٫۰۸	۲۴٫۸۳	۰٫۰۰۰۶
B	۴۰۴۴٫۷۷	۱	۴۰۴۴٫۷۷	۳۴۵٫۰۰	< ۰٫۰۰۰۱
C	۱۳۲۵۰٫۱۸	۱	۱۳۲۵۰٫۱۸	۱۱۳۰٫۱۹	< ۰٫۰۰۰۱
AB	۵۰۵٫۵۲	۱	۵۰۵٫۵۲	۴۳٫۱۲	< ۰٫۰۰۰۱
AC	۱۸٫۱۷	۱	۱۸٫۱۷	۱٫۵۵	۰٫۲۴۱۶
BC	۶۴۹٫۳۲	۱	۶۴۹٫۳۲	۵۵٫۳۸	< ۰٫۰۰۰۱
A^2	۱۷۱٫۲۰	۱	۱۷۱٫۲۰	۱۴٫۶۰	۰٫۰۰۳۴
B^2	۰٫۰۱۵	۱	۰٫۰۱۵	۱٫۲۷۸ E-۰۰۳	۰٫۹۷۲۲
C^2	۳٫۵۷	۱	۳٫۵۷	۰٫۳۰	۰٫۵۹۲۹



شکل ۲. رویه‌های سه‌بعدی برهم‌کنش پارامترهای مقدار جاذب زیستی ($g.L^{-1}$) و pH بر مقدار جذب زیستی سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 در غلظت اولیه سرب $155\ mg.L^{-1}$.



شکل ۳. رویه‌های سه‌بعدی برهم‌کنش مقدار غلظت اولیه سرب ($mg.L^{-1}$) و pH بر مقدار جذب زیستی سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 در مقدار جاذب زیستی $2\ g.L^{-1}$.



شکل ۴. رویه‌های سه‌بعدی برهم‌کنش مقدار غلظت اولیه سرب (mg/l) و مقدار جاذب زیستی (g/l) بر مقدار جذب‌زیستی سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 در pH ۳.

نتایج نشان داد بهترین شرایط برای جذب سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 در محدوده pH برابر با ۴ است. هنگامی‌که pH از ۲ تا ۴ افزایش می‌یابد، مقدار جذب فلز سرب به وسیله زیست‌توده از ۴۸٫۸۷ mg/g dry weight به ۵۸٫۱ $mg.g^{-1}$ dry weight افزایش می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد که pH مهم‌ترین عامل مؤثر بر جذب زیستی فلزات است. این عامل بر میزان حلالیت یون‌های فلزی و شیمی دیواره سلول اثر می‌گذارد. در pHهای پایین اسیدی، H^+ با یون فلزی کاتیونی رقابت می‌کند و جایگاه‌های اتصال جاذب توسط H^+ اشغال می‌شوند و یون‌های فلزی کاتیونی در محلول به‌دلیل نیروی دافعه، کم‌تر به جاذب نزدیک می‌شوند. در pHهای بالاتر، غلظت H^+ کاهش می‌یابد و سطح جاذب نیز بار منفی بیش‌تری می‌گیرد، در نتیجه میزان جذب یون‌های کاتیون افزایش می‌یابد [۱۸، ۱۹].

به طور کلی جذب می‌تواند وابسته به غلظت اولیه فلز باشد. آزمایش‌های جذب سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 در محلول‌های کاتیون‌های فلزی با غلظت‌های اولیه مختلف سرب نشان داد که غلظت‌های اولیه مختلف سرب بر روی جذب سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 تأثیرگذار می‌باشد. مقدار جذب فلز سرب توسط این سویه با افزایش غلظت سرب، به‌دلیل افزایش نیرو محرکه انتقال جرم افزایش می‌یابد. هنگامی‌که غلظت اولیه سرب از ۷۰ تا ۲۴۰ $mg.L^{-1}$ افزایش می‌یابد، مقدار جذب فلز سرب از ۲۶٫۲۹ $mg.g^{-1}$ dry weight تا ۸۸٫۵۸ $mg.g^{-1}$ dry weight افزایش پیدا می‌کند. در غلظت‌های پایین یون فلز، نسبت مول‌های اولیه حل‌شونده به مساحت سطح جاذب کم است و میزان جذب وابستگی چندانی به غلظت اولیه حل‌شونده ندارد.

غلظت اولیه‌ی یون فلز، یک نیروی محرکه برای غلبه بر مقاومت در برابر انتقال جرم یون فلزی در فازهای مایع و جامد ایجاد می‌کند و با افزایش میزان غلظت اولیه، نیروی محرکه انتقال جرم بین دو فاز افزایش می‌یابد و به تبع آن میزان جذب افزایش خواهد یافت [۹، ۱۸].

هم‌چنین نتایج نشان داد که مقدار جذب یون سرب برای زیست‌توده باکتریایی *Bacillus* sp. strain STG-83 با افزایش غلظت زیست‌توده به دلیل کافی نبودن مقدار سرب حل‌شده درون محلول برای پوشاندن گروه‌های عاملی سطح جاذب، کاهش می‌یابد. برای مثال هنگامی‌که غلظت زیست‌توده باکتریایی از ۱ $g.L^{-1}$ به ۳ $g.L^{-1}$ افزایش می‌یابد، مقدار جذب فلز سرب از ۷۴٫۱۸ $mg.g^{-1}$ dry weight تا ۳۹٫۷۶ $mg.g^{-1}$ dry weight کاهش پیدا می‌کند. در حالی‌که بازده جذب از ۴۷٪ تا ۷۴٫۶۷٪ افزایش می‌یابد. بازده جذب به میزان جاذب بستگی دارد. مقدار بیش‌تر جاذب در محلول، میزان جایگاه‌های قابل جذب را افزایش داده و در نتیجه بازده جذب افزایش می‌یابد [۹، ۱۸].

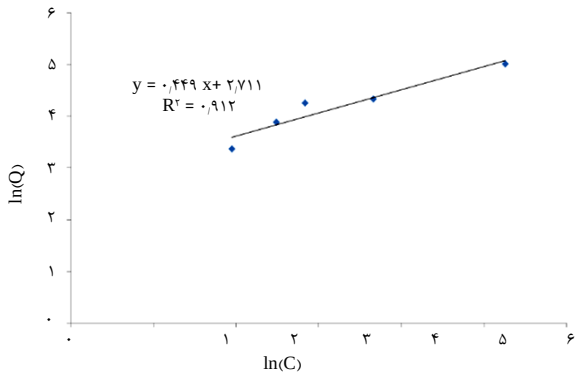
در این پژوهش به منظور بررسی میزان دقت عمل مدل، یک سری دوتایی از آزمایش‌ها در نقطه بهینه (پیش‌بینی شده توسط مدل) و دو نقطه تصادفی که قبلاً مورد آزمایش قرار نگرفته است، انجام شد. پاسخ‌های تجربی و پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، در جدول ۴ گزارش شده است. با مقایسه‌ی مقدار پیش‌بینی‌شده و مقدار واقعی حاصل از انجام آزمایش، بار دیگر اعتبار و صحت مدل درجه دوم تأیید می‌شود. نتایج این جدول نشان‌دهنده صحت پیش‌بینی نقاط تجربی مدل است.

جدول ۴. مقایسه پاسخ تجربی و پاسخ پیش‌بینی‌شده در شرایط بهینه و نقاط تصادفی

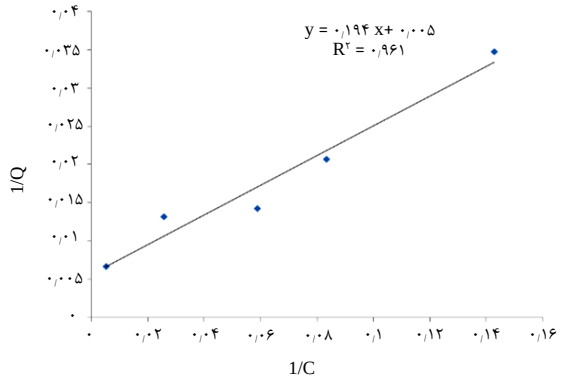
آزمایش	pH	غلظت اولیه سرب (mg/l)	غلظت جاذب زیستی (g/l)	پاسخ پیش‌بینی شده (mg/g)	پاسخ تجربی (mg/g)
۱	۳	۱۰۰	۳	۲۵٫۶۴	۲۵٫۷۸
۲	۴	۲۰۰	۱	۱۰۳٫۹	۱۰۱٫۴
۳ (نقطه بهینه)	۴٫۵	۲۹۷٫۹۵	۱	۱۵۰٫۴۲	۱۴۹٫۵۹۵

۳.۲ ایزوترم‌های جذب

روابط تعادلی بین جاذب و ماده جذب‌شونده و تعیین پارامترهای تعادلی به کمک ایزوترم‌های جذب اطلاعات مهمی در خصوص نحوه توزیع مولکول‌های ماده جذب‌شونده درون فاز مایع و نحوه رسیدن به تعادل در فازهای جامد و مایع ارایه می‌دهد که در طراحی‌های بعدی سیستم‌های جذب نیز قابل استفاده می‌باشد. بنابراین، در این پژوهش نتایج جذب توسط دو مدل ایزوترمی شناخته شده فروندلیچ و لانگمویر مورد ارزیابی قرار گرفت. هر دو مدل برای توصیف داده‌های موازنه جذب زیستی یون سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 مناسب بودند (شکل‌های ۵ و ۶).



شکل ۵. مدل فروندلیچ برای جذب زیستی سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 (pH ۴٫۵ و مقدار جاذب زیستی ۱ $g.L^{-1}$).



شکل ۶. مدل لانگمویر برای جذب زیستی سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 (pH ۴٫۵ و مقدار جاذب زیستی ۱ $g.L^{-1}$).

ضرایب همبستگی برای دو مدل ایزوترمی فروندلیچ و لانگمویر به ترتیب برابر با ۰٫۹۱۲ و ۰٫۹۶۱ است. نتایج نشان داد که مدل لانگمویر مناسب‌تر است. در نتایج ارزیابی داده‌ها با مدل فروندلیچ، K_f و n دو ثابت مدل فروندلیچ می‌باشند. K_f و n به ترتیب مشخص‌کننده ظرفیت جذب و شدت جذب می‌باشند. بزرگی K_f و n تعیین‌کننده ظرفیت جذب بالای جاذب و جداسازی آسان یون‌ها از محلول می‌باشد. مقدار n بزرگ‌تر از ۱ نشان می‌دهد که نمودار Q در مقابل C_f محدب شده و جذب مساعد می‌باشد و غیرممکن است که ظرفیت جذب در غلظت‌های بالا افزایش پیدا کند. به دلیل آن‌که اشباع جذب زیستی دلیل فیزیکی دارد [۱۶]. در این پژوهش، مقدار n برابر با ۲٫۲۲۵ که بالاتر از ۱ بود، نشان‌دهنده این حقیقت است که یون‌های سرب تحت شرایط آزمایش شده به طور مطلوب و به راحتی از محلول آبی توسط زیست‌توده باکتریایی جذب می‌شوند. ثابت K_f مربوط به گنجایش جذب زیستی می‌باشد. ثابت K_f به دست آمده برای این باکتری برابر با ۱۵٫۰۸۲ $mg.g^{-1}$ است که نشان‌دهنده گنجایش جذب بالای سرب برای زیست‌توده باکتریایی است.

در نتایج ارزیابی داده‌ها با مدل لانگمویر، Q_{max} و b دو ثابت مدل لانگمویر هستند که به‌ترتیب مربوط به ظرفیت جذب و میل ترکیبی می‌باشند. به طور معمول برای یک جاذب زیستی خوب، یک Q_{max} بالا مطلوب و پسندیده است [۸، ۲۰]. در این پژوهش مدل لانگمویر ارتباط بهتری با داده‌ها نشان داد. Q_{max} آزمایش‌های جذب سرب توسط باکتری برابر با ۱۷۸٫۵۷ $mg.g^{-1}$ بود. مقدار b نیز برابر با ۰٫۰۲۸۹ می‌باشد. در جدول ۵ بیشینه ظرفیت جذب (Q_{max}) سرب برای تعدادی از جاذب‌های زیستی مختلف گزارش شده است. این جدول نشان می‌دهد که تا به امروز باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 در مقایسه با جاذب‌های دیگر، پتانسیل بالایی در جذب و جداسازی یون سرب داشته است.

جدول ۵. مقایسه بیشینه ظرفیت جذب سرب توسط تعدادی از جاذب‌های زیستی مختلف

جاذب زیستی	بیشینه ظرفیت جذب سرب ($mg.g^{-1}$)	مرجع
Stenotrophomonas maltophilia	۷۴٫۴	[۲۱]
Saccharomyces cerevisiae	۱۱۶٫۷	[۲۲]
Amanita rubescens	۳۸٫۴	[۲۳]
Pseudomonas putida 13	۶۴٫۵۹	[۲۴]
Solanum melongena leaves	۵۵٫۵	[۲۵]
Olive tree pruning	۲۳٫۳	[۲۶]
Lemna perpusilla Torr	۸۶٫۹	[۲۷]
Chestnut bur	۷۴٫۳	[۲۲]
Bacillus sp. strain STG-83	۱۷۸٫۵۷	پژوهش حاضر

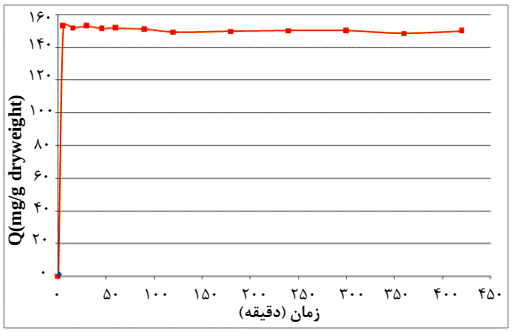
۳.۳ سینتیک جذب

در این آزمایش، جذب سرب توسط زیست‌توده باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 تحت شرایط بهینه جذب زیستی در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷).

مقدار جذب فلز سرب در ۵ دقیقه اول برابر با ۱۵۳٫۱۶۵±۳ $mg.g^{-1}$ dry weight است که سپس ثابت می‌شود. سینتیک سریع در جذب یون سرب یکی از نقاط قوت باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 می‌باشد. مطالعات پیشین در مورد اثر پارامتر زمان در جذب فلزات توسط میکروارگانیسم‌ها نشان داده است که عملیات جذب می‌تواند در دو مرحله صورت گیرد: مرحله اول که مرحله سریع جذب بر روی سطح است و سپس مرحله دوم که مرحله آهسته انتقال جرم داخلی سلول می‌باشد. سطح زیست‌توده اولین قسمتی است که در تماس با یون‌های فلزی قرار می‌گیرد. حال با توجه به جذب سریع سرب در ۵ دقیقه اولیه مجاورت، می‌توان گفت که احتمالاً بیش‌ترین میزان جذب سرب به صورت جذب زیستی توسط باکتری می‌باشد [۷، ۱۸، ۲۸].

۴.۳ بررسی جذب سرب توسط *Bacillus* sp. strain STG-83 تیمار شده با اتوکلاو

با توجه به نمودار شکل ۸، میزان جذب یون سرب توسط باکتری اتوکلاو شده نسبت به باکتری شاهد به میزان اندکی کاهش یافته است. میزان جذب از ۱۴۹٫۵۹۵ $mg.g^{-1}$ dry weight برای باکتری شاهد به ۱۴۷٫۲ $mg.g^{-1}$ dry weight برای باکتری اتوکلاو شده کاهش یافته است. این کاهش ناچیز در بازده جذب می‌تواند به دلیل تغییرات ناچیز در جایگاه‌های اتصال سرب در سطح سلول توسط دمای بالا باشد. هم‌چنین نتایج حاصل تأییدی بر جذب سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 به صورت غیرفعال و غیروابسته به متابولیسم و به صورت جذب سطحی می‌باشد [۹، ۲۸].



شکل ۷. تأثیر زمان بر روی مقدار جذب فلز سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83.

شکل ۸. اثر تیمار اتوکلاو بر روی مقدار جذب زیستی سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

هدف مطالعه حاضر، بررسی پتانسیل جذب زیستی یون سرب توسط باکتری بومی *Bacillus* sp. strain STG-83 در شرایط مختلف عملیاتی و بهینه‌سازی فرایند جداسازی زیستی به روش رویه پاسخ (RSM) با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت می‌باشد. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که:

۱. مدل درجه دوم پیشنهادی با ضریب همبستگی R^2 = ۰٫۹۹۳۸ به خوبی مقادیر تجربی را پیش‌بینی و هم‌چنین تحلیل واریانس مؤثر بودن مقدار جاذب، غلظت اولیه سرب و pH را بر فرایند جذب زیستی تأیید کرد.

۲. ظرفیت جذب سرب در شرایط بهینه pH=۴٫۵، غلظت اولیه ۲۹۷٫۹۵ $mg.L^{-1}$ سرب و مقدار ۱ $g.L^{-1}$ جاذب برابر با ۱۴۹٫۵۹۵ mg/g dry weight به دست آمد، که نشان‌دهنده پتانسیل ارزشمند باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 در کاربردهای زیست پالایی سرب از پساب‌های آلوده می‌باشد. هم‌چنین نتایج به دست آمده تأیید کارایی روش رویه پاسخ در مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند جذب‌زیستی سرب توسط باکتری *Bacillus* sp. strain STG-83 می‌باشد.

۳. ایزوترم لانگمویر با ضریب همبستگی R^2= ۰٫۹۶۱ بهترین تطابق را با داده‌های تجربی دارد.

مطالعات سینتیکی نشان داد که جذب‌زیستی سرب توسط باکتری در مدت زمان ۵ دقیقه به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد؛ سریع بودن عمل جذب زیستی توسط باکتری به عنوان یک مزیت در فرایندهای زیست پالایی صنعتی به شمار می‌رود.

مراجع

1. J.D. Van Horn, H. Huang, *Uranium (VI) bio-coordination chemistry from biochemical, solution and protein structural data*, Coordination Chemistry Reviews, **250**, 765-775 (2006).
2. M. Jansson-Charrier, et al, *Dynamic removal of uranium by chitosan: influence of operating parameters*, Water Science and Technology, **34**, 169 (1996).
3. IAEA, *Management of Problematic Waste and Material Generated During the Decommissioning of Nuclear Facilities*, Technical Reports Series No. 441, International Atomic Energy Agency, Vienna (2006).
4. A. Abdelouas, *Uranium mill tailings: geochemistry, mineralogy, and environmental impact*, Elements, **2**, 335-341 (2006).
5. K. Thomas, *Management of wastes from uranium mines and mills*, Int. At. Energy Agency Bull, **23**, 33-35 (1981).
6. L. Hajiaghababaei, et al, *Highly efficient removal and preconcentration of lead and cadmium cations from water and wastewater samples using ethylene-diamine functionalized SBA-15*, Desalination, **266**, 182-187 (2011).
7. B. Volesky, *Biosorption process simulation tools*, Hydrometallurgy, **71**, 179-190 (2003).
8. K. Vijayaraghavan, Y.-S. Yun, *Bacterial biosorbents and biosorption*, Biotechnology Advances, **26**, 266-291 (2008).
9. P. Tajer-Mohammad-Ghazvini, et al, *Cobalt separation by Alphaproteobacterium MTB-KTN90: Magnetotactic bacteria in bioremediation*, Bioprocess and biosystems engineering, **39**, 1899-1911 (2016).
10. B. Volesky, *Sorption and Biosorption, Montreal-St. Lambert*, Quebec, Canada, BV Sorbex Inc, **11**, 258-263 (2003).
11. S. Schiever, *Multi-metal ion exchange in biosorption*, in, PhD. Thesis, Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal, (1996).
12. L. Eriksson, et al, *Design of experiments, Principles and Applications*, Learn ways AB, Stockholm, (2000).
13. M.J. Anderson, P.J. Whitcomb, *RSM simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments*, Productivity Press, (2016).
14. M.R. Soudi, et al, *Bioprocessing of seleno-oxyanions and tellurite in a novel Bacillus sp. strain STG-83: A solution to removal of toxic oxyanions in presence of nitrate*, Journal of Hazardous Materials, **165,** 71-77 (2009).

15. S. Ghorbanzadeh Mashkani, P. Tajer Mohammad Ghazvini, *Biotechnological potential of Azolla filiculoides for biosorption of Cs and Sr: Application of micro-PIXE for measurement of biosorption*, Bioresource Technology, **100**, 1915-1921 (2009).
16. A. Witek-Krowiak, et al, *Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process*, Bioresource Technology, **160**, 150-160 (2014).
17. Y. Li, et al, *Removal of copper from aqueous solution by carbon nanotube/calcium alginate composites*, Journal of Hazardous Materials, **177**, 876-880 (2010).
18. R. Kasra-Kermanshahi, M. Bahrami-Bavani, P. Tajer-Mohammad-Ghazvini, *Microbial clean-up of uranium in the presence of molybdenum using pretreated Acidithiobacillus ferrooxidans*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, **322**, 1139-1149 (2019).
19. M. Malakootian, Z. Khodashenas Limoni, M. Malakootian, *The efficiency of lead biosorption from industrial wastewater by micro-alga spirulina platensis*, International Journal of Environmental Research, **10**, 357-366 (2016).
20. S. Tunali, A. Cabuk, T. Akar, *Removal of lead and copper ions from aqueous solutions by bacterial strain isolated from soil*, Chemical Engineering Journal, **115**, 203-211 (2006).
21. S.K. Sen, et al, *Contribution of hot spring bacterial consortium in cadmium and lead bioremediation through quadratic programming model*, Journal of Hazardous Materials, **265**, 47-60 (2014).
22. X. Ma, et al, *Efficient biosorption of lead (II) and cadmium (II) ions from aqueous solutions by functionalized cell with intracellular $CaCO_3$ mineral scaffolds*, Bioresource Technology, **185**, 70-78 (2015).
23. A. Sarı, et al, *Adsorption characteristics of Cu (II) and Pb (II) onto expanded perlite from aqueous solution*, Journal of Hazardous Materials, **148**, 387-394 (2007).
24. X. Xu, et al, *A facile approach for surface alteration of Pseudomonas putida I3 by supplying K_2SO_4 into growth medium: Enhanced removal of Pb(II) from aqueous solution*, Bioresource Technology, **232**, 79-86 (2017).
25. G. Yuvaraja, et al, *Biosorption of Pb (II) from aqueous solution by Solanum melongena leaf powder as a low-cost biosorbent prepared from agricultural waste*, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, **114**, 75-81 (2014).
26. A. Ronda, et al, *Combustion of a Pb(II)-loaded olive tree pruning used as biosorbent*, Journal of Hazardous Materials, **308**, 285-293 (2016).
27. Y. Tang, et al, *Removal of lead ions from aqueous solution by the dried aquatic plant*, Lemna perpusilla Torr, Journal of Hazardous Materials, **244-245**, 603-612 (2013).
28. F. Malekzadeh, et al, *Biosorption of tungstate by a Bacillus sp. isolated from Anzali lagoon*, World Journal of Microbiology and Biotechnology, **23**, 905-910 (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
سما سلیمی، پریسا تاجرمحمد قزوینی، رضا دباغ، اسماعیل عیوضی (۱۳۹۹)، بهینه‌سازی حذف کارآمد سرب توسط Bacillus sp. Strain STG-۸۳ با استفاده از روش رویه پاسخ جهت زیست‌پالایی پساب‌های آلوده، ۹۴، ۱۰۲-۱۱۱

DOI: 10.24200/nst.2020.1178
Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1178.html

.