



بررسی جذب و تثبیت استرانسیم توسط زئولیت آنالسیم اصلاح شده با سرب هگزاسیانوفرات

نسیم قیصر سلوط^۱، آرمن آوانس^۱، حمید سپهریان^۲، رضا داورخواه^۲، جواد فصیحی^۲، علی یداللهی^{۲*}

۱. گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، صندوق پستی ۵۵۱۸۱۸۳۱۱۱، مراغه- ایران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۱۱۳۶۵۳۴۸۶، تهران - ایران

چکیده:

در این بررسی زئولیت آنالسیم اصلاح شده با سرب هگزاسیانوفرات برای جذب و تثبیت استرانسیم مورد استفاده قرار گرفت. برای بهینه‌سازی فرایند جذب استرانسیم از محلول‌های آبی و بررسی اثر پارامترهای pH (۲-۱۰)، مقدار جاذب (۰/۰۶-۰/۱۴ گرم)، غلظت اولیه استرانسیم (۱۰-۷۰ میلی‌گرم بر لیتر) و دما (۱۵-۵۵ °C) بر میزان جذب، طرح مرکب مرکزی (CCD) در روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) به‌کار گرفته شد. همچنین با آمایش گرمایی جاذب بارگذاری شده در دماهای مختلف، تثبیت استرانسیم در آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت اولیه استرانسیم در محلول تأثیرگذارترین پارامتر در فرایند جذب با آنالسیم اصلاح شده بوده و در شرایط بهینه ۹ pH، دمای ۲۵ °C، غلظت اولیه استرانسیم ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و با استفاده از ۰/۰۶ گرم جاذب، بیشترین میزان جذب ۹۹/۸۱٪ به دست آمد. همچنین آمایش گرمایی جاذب بارگذاری شده در دمای ۱۱۰۰ °C نشان‌دهنده عملکرد مناسب جاذب برای تثبیت استرانسیم بود، به نحوی که کم‌تر از ۰/۱۹٪ از استرانسیم بارگذاری شده، توسط محلول‌های مختلف فروشسته شد.

کلیدواژه‌ها: استرانسیم، زئولیت آنالسیم، جذب و تثبیت، روش طراحی آزمایش سطح پاسخ.

Investigation of adsorption and stabilization of strontium by Analcim zeolite modified with lead hexacyanoferrate

Nasim gheisar solout¹, Armen Avanes¹, Hamid Sepehrian², Reza Davarkhah², Javad Fasihi², Ali yadollahi^{2*}

1. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Maragheh, P.O.BOX: 5518183111, Maragheh, Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX: 113653486, Tehran, Iran

Abstract:

In this study, Analcim zeolite modified with lead hexacyanoferrate was employed for adsorption and stabilization of strontium (Sr). To optimize Sr adsorption from aqueous solutions and evaluate the effect of parameters such as pH (2-10), adsorbent dosage (0.06-0.14 gr), initial Sr concentration (10-70 mg/L) and temperature (15-55°C) on adsorption process, central composite design (CCD) in response surface methodology (RSM) was applied. Also, Sr-loaded Analcim zeolite was subjected to heat treatment process and the performance of Sr stabilization was evaluated by leaching test. The results showed the initial concentration of Sr in solution is the most effective parameter in adsorption process using modified Analcim under optimal conditions of pH of 9, initial Sr concentration of 10 mg/L, temperature of 25°C and adsorbent dosage of 0.06 g, maximum Sr removal of 99.81%. Also, thermal treatment of Sr loaded Analcim at 1100 °C leads to proper stabilization of strontium, so that less than 0.19% of the loaded strontium was leached by different leaching solutions.

Keywords: Strontium, Analcim Zeolite, Adsorption and Stabilization, RSM.

Email: aliyadolahi09@gmail.com

۱. مقدمه

پسماندهای هسته‌ای حاوی عنصرهای پرتوزا با نیمه عمر بالا به عنوان یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌های زیست محیطی شناخته شده است. استرانسیم-۹۰ به علت نیمه عمر بالا و بازده تولید بالا در فرایند شکافت هسته‌ای، از مهم‌ترین محصولات شکافت محسوب می‌شود، که در پسماندهای هسته‌ای وجود دارد [۱]. یکی از روش‌های آمایش پسماندهای مایع، استفاده از فناوری جذب با استفاده از جاذب‌های مختلف است. استفاده از جاذب‌های معدنی و به ویژه زئولیت‌ها به علت پایداری بالا در برابر تابش و گرما، گزینش‌گری بالا و مقرون به صرفه بودن مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند [۲]. اسمیکلاس و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی حذف Co^{2+} و Sr^{2+} ، Cs^{+} از محلول‌های آبی از طریق جذب روی کلینوپتیلولیت طبیعی محلی صربستان پرداخت [۳]. در پژوهش حاضر، زئولیت آنالسیم منطقه مشکین شهر برای جذب و تثبیت استرانسیم از محلول‌های پسماند آبی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای گوناگون بر عملکرد جذب استرانسیم توسط جاذب آنالسیم طراحی آزمایش CCD^1 در روش پاسخ سطح (RSM^2) مورد استفاده قرار گرفت. پس از جذب استرانسیم از محلول پسماند نیز، جاذب بارگذاری شده جهت تثبیت استرانسیم تحت آمایش گرمایی قرار گرفته و عملکرد تثبیت توسط آزمون‌های فروشویی بررسی شد.

۲. روش کار

۱.۲ مواد و دستگاه‌ها

کلیه مواد شیمیایی به کار رفته در آزمایش‌ها دارای خلوص آزمایشگاهی و از شرکت مرک (آلمان، Darmstad) تهیه شد. در تمام آزمایش‌ها از آب بدون یون استفاده شد. تعیین pH بادیستگاه pH سنج مدل ۷۸۰ شرکت مترآهم و برای هم زدن نمونه‌ها از تکاننده مدل کالکام استفاده شد. تجزیه عنصری نمونه‌های حاوی استرانسیم توسط طیف‌سنج نشر اتمی - پلاسمای جفت‌شده ی القایی (ICP-OES) مدل اپتیما ۷۳۰۰ دی. وی انجام گرفت. طراحی آزمایش (RSM) و تحلیل داده‌ها به کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت انجام شد.

۲.۲ آماده‌سازی زئولیت آنالسیم اصلاح شده با سرب هگزاسیانوفرات

۵ گرم زئولیت آنالسیم با ۵۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۵ مول بر لیتر سرب نیترات در دمای 25°C در تکاننده با سرعت ۱۸۰ rpm و به مدت ۳ ساعت هم‌زده شد. سپس محلول صاف شده و زئولیت باقی‌مانده با ۲۵ میلی‌لیتر محلول ۰/۵ مول بر لیتر پتاسیم هگزاسیانوفرات آغشته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت. آن‌گاه محلول صاف شده و زئولیت چند مرتبه با آب مقطر شستشو داده شده و زئولیت اصلاح شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای 80°C در آون گذاشته شد تا خشک شود. تمام این مراحل جهت اطمینان از اصلاح کامل زئولیت ۳ مرتبه تکرار شد [۴].

۳.۲ آزمایش‌های جذب به روش طراحی CCD

برای بهینه‌سازی فرایندها معمولاً از تکنیک‌های آماری چند متغیره از جمله روش پاسخ سطح (RSM) استفاده می‌شود. در این مطالعه طرح عاملی مرکب مرکزی (CCD) برای طراحی آزمایش‌های جذب استرانسیم به کار گرفته شد. در این روش از ۵ سطح برای هر عامل استفاده شد که کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار هر پارامتر به ترتیب با $-\alpha$ و $+\alpha$ نشان داده شده و مقادیر میانی با -1 ، 0 و $+1$ مشخص شدند. در این مطالعه با توجه به آزمایش‌های اولیه انجام شده و بررسی تحقیقات قبلی صورت گرفته در این زمینه [۴-۶]، بازه مناسب برای پارامترهای موثر در فرایند جذب استرانسیم مشخص شد. پارامترهای مورد بررسی و سطوح هر یک در جدول (۱) نشان داده شده است. سپس برای بررسی اثر پارامترها تعداد ۳۰ آزمایش توسط روش طراحی ازمایش CCD تعیین شد (جدول (۲)).

¹ Central composite design

² Response surface methodology

آزمایش‌های جذب استرانسیم طبق طراحی آزمایش CCD مطابق با جدول (۲) انجام گرفت، برای انجام هر آزمایش مطابق با شرایط ارائه شده در جدول (۲)، میزان مشخصی از جاذب با ۲۰ میلی لیتر محلول (در pH و غلظت اولیه استرانسیم مشخص) در دمای معین در شیکر با دور ۱۸۰ دور در دقیقه به مدت ۳ ساعت در تماس قرار داده شد و پس از انجام فرآیند جذب، جاذب با کاغذ صافی از محلول جدا شده و غلظت استرانسیم باقی مانده در محلول با طیف‌سنج نشر اتمی - پلاسما جفت‌شده‌ی القایی (ICP-OES) اندازه‌گیری و بازده جذب استرانسیم با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد:

$$\%R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

که در آن R درصد جذب استرانسیم، C_i و C_f به ترتیب، غلظت اولیه و غلظت نهایی استرانسیم (میلی گرم بر لیتر) در محلول خوراک است.

جدول ۱. عامل‌ها و سطوح استفاده شده در طرح عاملی CCD

عامل	واحد	سطح +α	سطح +۱	سطح صفر	سطح -۱	سطح -α
pH		۱۰	۸	۶	۴	۲
دما	°C	۵۵	۴۵	۳۵	۲۵	۱۵
غلظت اولیه استرانسیم	mg/L	۷۰	۵۵	۴۰	۲۵	۱۰
میزان جاذب	g	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۱	۰٫۰۸	۰٫۰۶

جدول ۲. آزمایش‌های طراحی شده به روش CCD و نتایج به دست آمده

ردیف	pH	دما (°C)	غلظت اولیه استرانسیم (mg/L)	مقدار جاذب (g)	درصد جذب (R)
۱	۴	۲۵	۵۵	۰٫۱۲	۶۰٫۵۱
۲	۶	۳۵	۷۰	۰٫۱	۵۲٫۰۱
۳	۱۰	۳۵	۴۰	۰٫۱	۷۰٫۱۵
۴	۸	۴۵	۲۵	۰٫۱۲	۹۲٫۳۹
۵	۶	۳۵	۴۰	۰٫۱	۷۰٫۰۷
۶	۴	۴۵	۲۵	۰٫۱۲	۸۳٫۹۸
۷	۶	۳۵	۴۰	۰٫۱	۷۰٫۰۵
۸	۴	۲۵	۲۵	۰٫۰۸	۸۲٫۰۱
۹	۶	۳۵	۴۰	۰٫۱	۷۰٫۰۰
۱۰	۴	۲۵	۵۵	۰٫۰۸	۴۷٫۸۴
۱۱	۴	۴۵	۲۵	۰٫۰۸	۶۹٫۱۱
۱۲	۴	۴۵	۵۵	۰٫۱۲	۷۵٫۰۰
۱۳	۴	۴۵	۵۵	۰٫۰۸	۵۵٫۵۶
۱۴	۸	۲۵	۲۵	۰٫۱۲	۹۱٫۳۲
۱۵	۶	۵۵	۴۰	۰٫۱	۷۱٫۸۲
۱۶	۶	۳۵	۴۰	۰٫۱	۷۰٫۱۵
۱۷	۶	۳۵	۱۰	۰٫۱	۹۸٫۹۲
۱۸	۶	۳۵	۴۰	۰٫۰۶	۶۰٫۰۱
۱۹	۴	۲۵	۲۵	۰٫۱۲	۸۷٫۸۵
۲۰	۸	۴۵	۵۵	۰٫۰۸	۶۸٫۱۶
۲۱	۸	۲۵	۲۵	۰٫۰۸	۸۱٫۲۲

۷۹,۲۳	۰,۱۲	۵۵	۴۵	۸	۲۲
۲۸,۶۲	۰,۱	۴۰	۳۵	۲	۲۳
۶۵,۰۳	۰,۱۲	۵۵	۲۵	۸	۲۴
۷۰,۱۰	۰,۱	۴۰	۳۵	۶	۲۵
۵۹,۹۲	۰,۱	۴۰	۱۵	۶	۲۶
۷۸,۶۹	۰,۰۸	۲۵	۴۵	۸	۲۷
۶۳,۸	۰,۰۸	۵۵	۲۵	۸	۲۸
۹۶,۰۰	۰,۱۴	۴۰	۳۵	۶	۲۹
۷۰,۰۰	۰,۱	۴۰	۳۵	۶	۳۰

۴.۲ آزمایش تثبیت استرانسیم به روش آمایش حرارتی

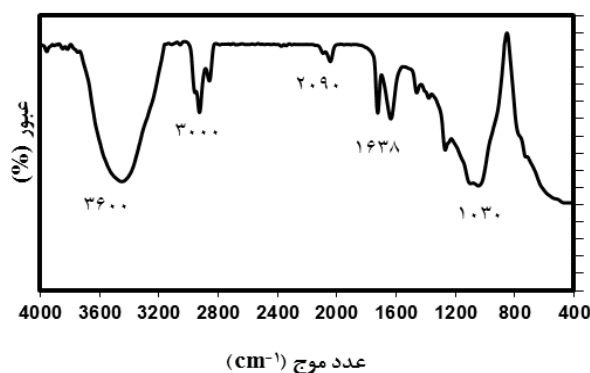
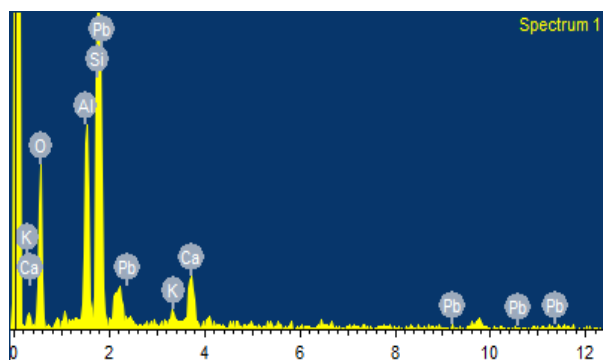
پس از جذب استرانسیم توسط جاذب، به منظور تثبیت استرانسیم جاذب در آون با دمای 90°C قرار داده شد تا خشک شود. سپس جاذب به کوره منتقل و در دماهای 300°C ، 600°C ، 900°C قرار داده شد. در ادامه، جاذب‌های آمایش گرمایی شده، به وسیله 20 میلی‌لیتر از محلول‌های 0.1 مول بر لیتر $(\text{NaOH}, \text{NaCl}, \text{HNO}_3)$ و آب مقطر، تحت آزمون فروشویی قرار گرفتند. در نهایت محلول فروشویی صاف شده و مقدار استرانسیم آن به وسیله طیف‌سنج طیف‌سنج نشر اتمی - پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی (ICP-OES) تعیین و درصد فروشویی استرانسیم با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد.

$$\%L = \frac{C_I \times v}{f_{Sr} \times m} \times 100 \quad (2)$$

در این معادله، L درصد فروشویی استرانسیم، C_I غلظت استرانسیم در محلول فروشویی (میلی‌گرم بر لیتر)، v حجم محلول فروشویی (لیتر)، f_{Sr} درصد استرانسیم در جاذب و m جرم جاذب بارگذاری شده (میلی‌گرم) است.

۴.۲ مشخصه‌یابی زئولیت آنالسیم اصلاح شده

چنانچه در طیف FTIR شکل ۱ مشاهده می‌شود شدیدترین قله‌ی موجود در 1032 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات داخلی زئولیت است که در مرجع نمودار IR آنالسیم این قله کاملاً مشخص است [۴]. دو نوار جذبی واقع در 1638 cm^{-1} و در محدوده $300-3600 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به مولکول آب موجود در ساختار نمونه است. نوار جذبی واقع در 2090 cm^{-1} نشان‌دهنده پیوند C-N و اصلاح درست جاذب است. الگوی EDS (شکل ۲) جاذب اصلاح شده نیز حضور اتم‌های سرب در نمونه زئولیت را تأیید می‌کند.



شکل ۲. الگوی EDS زئولیت آنالسیم اصلاح شده با سرب هگزاسیانو فرات

شکل ۱. طیف FTIR زئولیت آنالسیم اصلاح شده با سرب هگزاسیانو فرات

۶.۲ بررسی جذب استرانسیم توسط روش سطح پاسخ

نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) داده‌های به‌دست آمده از روش طراحی آزمایش در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامترهای غلظت اولیه و مقدار جاذب بیش‌ترین تاثیر را روی میزان جذب استرانسیم دارند. بر اساس نتایج تحلیل واریانس، سطح پاسخ به‌دست آمده به صورت معادله (۳) رابطه بین پارامترها و درصد جذب استرانسیم توسط جاذب آنالسیم اصلاح شده را نشان می‌دهد.

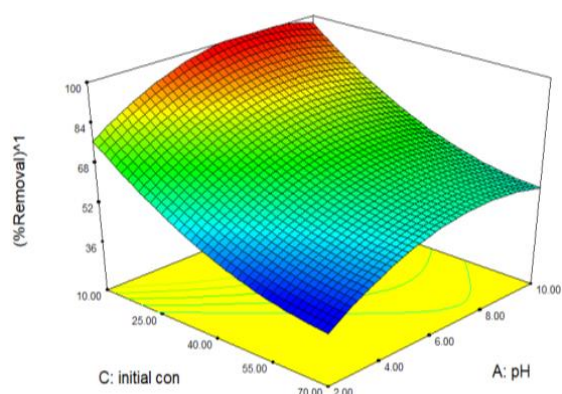
$$(\%R)Sr = 70.13 + 5.88 \times A + 6.70 \times B - 10.22 \times C + 1.93 \times D + 3.69 \times C \times D - 4.06 \times A^2 + 3.09 \times B^2 + 2.46 \times C^2 \quad (3)$$

علامت مثبت در جلوی پارامترها نشان دهنده اثر مثبت متغیر بر مدل و علامت منفی نشان‌دهنده تاثیر منفی بر مدل است [۸]. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) دقت مدل درجه دوم را تایید کرده و با توجه به داده‌های آماری (R^2 ، Adjusted R^2 و Predicted R^2) به دست آمده، مدل به طور کامل معنی‌دار است. نتایج نشان می‌دهد که غلظت اولیه استرانسیم در محلول تاثیرگذارترین پارامتر در فرایند جذب بوده و مقدار جاذب و pH در رتبه‌های بعدی قرار دارند. ولی افزایش دمای فرایند جذب تاثیر چندانی بر میزان جذب استرانسیم نداشته و منجر به افزایش جزئی در آن می‌شود.

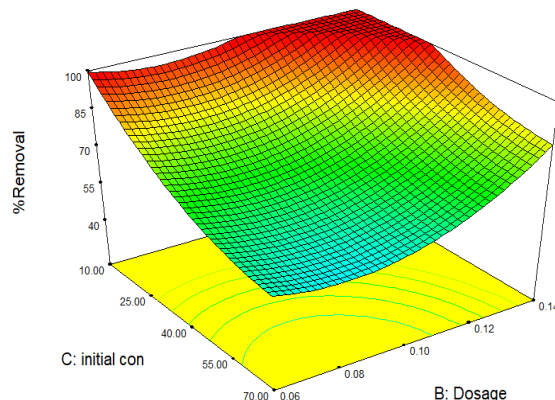
در شکل‌های ۳ و ۴ نمودارهای سه‌بعدی اثرات متقابل پارامترهای مقدار جاذب، غلظت اولیه و pH بر درصد حذف استرانسیم نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA)

منبع	جمع مربعات	درجه‌ی آزادی	میانگین مربعات	ارزش F	معنی‌داری
مدل	۵۷۴۱٫۲۱	۸	۷۱۷٫۶۵	۲۰٫۲۹	<۰٫۰۰۰۱
A-pH	۸۲۸٫۸۵	۱	۸۲۸٫۸۵	۲۳٫۴۴	<۰٫۰۰۰۱
B-میزان جاذب	۱۰۷۸٫۷۰	۱	۱۰۷۸٫۷۰	۳۰٫۵۰	<۰٫۰۰۰۱
C- غلظت اولیه استرانسیم	۲۵۰۶٫۳۵	۱	۲۵۰۶٫۳۵	۷۰٫۸۷	<۰٫۰۰۰۱
D-دما	۸۹٫۴۷	۱	۸۹٫۴۷	۲٫۵۳	۰٫۱۲۶۶
CD	۲۱۷٫۵۶	۱	۲۱۷٫۵۶	۶٫۱۵	۰٫۰۲۱۷
A ^۲	۴۶۲٫۳۱	۱	۴۶۲٫۳۱	۱۳٫۰۷	۰٫۰۰۱۶
B ^۲	۲۶۷٫۶۲	۱	۲۶۷٫۶۲	۷٫۵۷	۰٫۰۱۲۰
C ^۲	۱۶۸٫۹۸	۱	۱۶۸٫۹۸	۴٫۷۸	۰٫۰۴۰۳
R ^۲	۰٫۹۵	Adjusted R ^۲	۰٫۹۲	Predicted R ^۲	۰٫۸۹



شکل ۴. نمودار سه‌بعدی اثرات متقابل pH و غلظت اولیه استرانسیم بر درصد جذب آن.



شکل ۳. نمودار سه‌بعدی اثرات متقابل مقدار جاذب و غلظت اولیه استرانسیم بر درصد جذب آن.

همان‌طور که از نمودارهای شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است که افزایش مقدار جاذب از ۰٫۰۶ تا ۰٫۱۴ گرم منجر به افزایش بازده جذب استرانسیم شده و میزان آن به ۱۰۰٪ می‌رسد. این امر نشان‌دهنده افزایش تعداد سایت‌های جذب جاذب در دسترس برای جذب یون‌های استرانسیم در محلول است. افزایش pH محلول از ۲ تا ۱۰ نیز باعث افزایش بازده جذب استرانسیم می‌شود. در این محدوده pH، گونه غالب استرانسیم Sr^{2+} بوده و با افزایش میزان pH و یا به عبارت بهتر کاهش غلظت یون هیدرونیوم در محیط، رقابت مابین این یون و یون استرانسیم برای برهمکنش با سایت‌های موجود در جاذب کاسته شده و میزان جذب استرانسیم افزایش می‌یابد. همچنین افزایش غلظت اولیه استرانسیم در محلول منجر به کاهش میزان بازده جذب می‌گردد. این امر نشان‌دهنده اشباع شدن سایت‌های جذب از گونه جذب شونده بوده و کاهش بازده جذب در غلظت‌های بالاتر فلز به علت کاهش سایت‌های جذب در دسترس است.

جدول ۴. شرایط بهینه جذب استرانسیم توسط زئولیت آنالسیم اصلاح شده

درصد جذب استرانسیم (آزمایش واقعی)	درصد جذب استرانسیم (طبق مدل)	مقدار جاذب (گرم)	غلظت اولیه فلز (میلی‌گرم بر لیتر)	دما (°C)	pH
۹۹٫۸۱	۱۰۰	۰٫۰۶	۱۰	۲۵	۹

پس از تعیین مدل پاسخ سطح، شرایط بهینه برای رسیدن به بیشترین درصد جذب با استفاده کم‌ترین مقدار جاذب در محدوده غلظت مورد بررسی توسط مدل به دست آمده تعیین و نتیجه آن با آزمایش در شرایط واقعی تایید شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود (جدول ۴)، در شرایط بهینه، ۹۹٫۸۱٪ استرانسیم توسط جاذب تهیه شده جذب شده است.

۷.۲ بررسی تثبیت استرانسیم توسط آزمون فروشویی

پس از آمایش گرمایی جاذب حاوی یک درصد وزنی استرانسیم در دماهای مختلف، عملیات فروشویی آن انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما تغییراتی در شکل ظاهری جاذب‌ها ایجاد می‌شود [۱۷]. نتایج میزان فروشویی استرانسیم با استفاده از آزمون فروشویی توسط ۴ محلول مختلف برای نمونه‌های آمایش گرمایی شده در دماهای مختلف در جدول (۵) درج شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای آمایش مقدار استرانسیم فروشسته شده از جاذب آمایش گرمایی شده کاهش یافته و میزان تثبیت استرانسیم در جاذب آنالسیم اصلاح شده افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد، آمایش گرمایی در دماهای ۹۰۰ و ۱۱۰۰°C شرایط مناسبی برای تثبیت استرانسیم درون جاذب آنالسیم فراهم می‌کند، به نحوی که در این شرایط کمتر از ۱٪ استرانسیم موجود در ماتریس زئولیت فروشسته می‌شود.

جدول ۵. میزان فروشویی استرانسیم از جاذب آمایش گرمایی شده در دماهای مختلف

دما (°C)	فروشویی با آب مقطر	فروشویی با محلول ۰/۱ مول بر لیتر HNO ₃	فروشویی با محلول ۰/۱ مول بر لیتر NaCl	فروشویی با محلول ۰/۱ مول بر لیتر NaOH
۳۰۰	۳/۰۳	۰/۵۵	۱۲/۴۱	۴/۰۲
۶۰۰	۰/۶۵	۰/۰۵	۵/۴۵	۰/۹۶
۹۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۶۸	۰/۵۵
۱۱۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰۷	۰/۱۹	۰/۱۷

۳. بحث و نتیجه‌گیری:

روش طراحی آزمایش (RSM)، عملکرد مناسبی در مدل‌سازی فرایند جذب استرانسیم توسط زئولیت آنالسیم اصلاح شده با سرب هگزاسیانوفرات داشته و امکان بهینه‌سازی پارامترهای موثر در فرایند برای دستیابی به اهداف مختلف را به راحتی فراهم می‌کند. نتایج جذب استرانسیم توسط زئولیت آنالسیم اصلاح شده با سرب هگزاسیانوفرات نشان داد که پارامترهای غلظت اولیه استرانسیم، مقدار جاذب و pH به ترتیب تاثیرگذارترین پارامترها در فرایند جذب بوده و تغییر دمای فرایند، تاثیر چندانی بر عملکرد جذب ندارد. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده عملکرد مطلوب زئولیت آنالسیم اصلاح شده با سرب هگزاسیانوفرات برای جذب و تثبیت استرانسیم است. هم‌چنین آمایش گرمایی آنالسیم بارگذاری شده توسط استرانسیم در دمای ۱۱۰۰°C منجر به تثبیت استرانسیم درون فاز بلوری آنالسیم می‌شود به نحوی که میزان فروشویی آن توسط محلول‌های مختلف کم‌تر از ۰/۱۹٪ است.

مراجع

- [1] Faghihian, H., Moayed, M., Firooz, A., & Irvani, M. Evaluation of a new magnetic zeolite composite for removal of Cs⁺ and Sr²⁺ from aqueous solutions: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Comptes rendus chimie*, 17(2), 108-117, (2014).
- [2] Başçetin, E., & Atun, G. Adsorptive removal of strontium by binary mineral mixtures of montmorillonite and zeolite. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 55(2), 783-788, (2009).
- [3] Smičiklas, I., Dimović, S., & Plečaš, I. Removal of Cs¹⁺, Sr²⁺ and Co²⁺ from aqueous solutions by adsorption on natural clinoptilolite. *Applied Clay Science*, 35(1-2), 139-144, (2007).
- [4] Abdel-Karim, A. A. M., Zaki, A. A., Elwan, W., El-Naggar, M. R., & Gouda, M. M. Experimental and modeling investigations of cesium and strontium adsorption onto clay of radioactive waste disposal. *Applied Clay Science*, 132, 391-401, (2016).
- [5] Kiran B, Kaushik A, Kaushik C. Response surface methodological approach for optimizing removal of Cr (VI) from aqueous solution using immobilized cyanobacterium. *Chemical Engineering Journal*. 126(2-3):147-53, (2007).
- [6] Rahman, R. A., Moamen, O. A., Abdelmonem, N., & Ismail, I. M. Optimizing the removal of strontium and cesium ions from binary solutions on magnetic nano-zeolite using response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *Environmental research*, 173, 397-410, (2019).
- [7] N. Gheisar-solout et al. Immobilization of Strontium in Spent Sr-Analcime Zeolite by Heat Treatment, at the 11th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2020), Fouman, Gilan, (2020).