



بررسی رفتار جذبی یون اورانیم از محلول آبی بر روی رزین XAD-۴ آغشته‌شده با عامل کمپلکس‌کننده اسیدی

زهرا شیرینی یکتا*

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

*Email: zshiri@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۴/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۹

چکیده

از مهم‌ترین آلاینده‌های پایدار و غیرقابل تجزیه فلزات سنگین هستند، که از سمی‌ترین آلاینده‌ها در محیط زیست به‌شمار می‌روند. بنابراین حذف این آلاینده‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. اورانیم به عنوان یکی از فلزات سنگین، یک رادیونوکلئید طبیعی است که به دلیل سمیت جدی و خاصیت پرتوزایی دارای اثرات مخرب بر روی سلامت انسان و محیط زیست می‌باشد. در این پژوهش رزین آمبرلیت XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف بیس ۲-هیدروکسی بنزآلدئید (۲-دی آمینو اتان (H₂L)) برای جذب اورانیم از محلول آبی به کار برده شد. تأثیر پارامترهای مؤثر مانند pH فاز آبی، زمان تماس، مقدار جاذب و وابستگی دمایی فرایند مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ۹۸٪ یون‌های اورانیم در شرایط بهینه pH ۵/۵، مقدار جاذب ۰/۱ گرم، زمان تماس ۶۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، یون اورانیم با غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر از ۲۰ میلی‌لیتر محلول آبی جذب می‌شود. مقایسه درصد جذب رزین آغشته‌نشده با رزین آغشته‌شده با لیگاند باز شیف نشان می‌دهد که نمودار جذب یون اورانیم در مقابل pH به سمت مقادیر pH پایین‌تر (تقریباً ۱ ΔpH) تغییر می‌کند و رفتار جذبی رزین در pH ۵/۵ با افزایش میزان جذب از ۵۲٪ به ۹۸٪ بهبود می‌یابد. داده‌های سینتیکی و جذبی به ترتیب با معادله شبه مرتبه دوم و هم‌دمای فروندلیچ به خوبی مطابقت دارند. بررسی ترمودینامیکی نیز نشان داد که فرایند جذب یون مورد مطالعه بر مبنای آنتروپی است.

کلیدواژه‌ها: اورانیم، جذب، رزین XAD-۴، کمپلکس‌کننده

Investigation of the adsorption behavior of uranium ion from aqueous solution on the impregnated XAD-4 resin with acidic complexing agent

Z. Shiri-Yekta*

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Research Article

Received 1.7.2023, Accepted 31.7.2023

Abstract

One of the most problematic persistent and non-degradable pollutants are heavy metals, which are among the most toxic pollutants in the environment. Therefore, removing these pollutants is of particular importance. Uranium, as one of the heavy metals, is a natural radionuclide that harms human health and the environment. This is due to its serious toxicity and radiation properties. In this research, Amberlite XAD-4 resin impregnated with bis-2-hydroxybenzaldehyde 1,2-diaminoethane (H₂L) Schiff base ligand was used for uranium adsorption from aqueous solution. The effect of effective parameters such as aqueous phase pH, contact time, amount of adsorbent and temperature dependence on the process was investigated. The results showed that 98% of uranium ions were absorbed under the optimal conditions of pH 5.5, adsorbent amount 0.1 g, contact time 60 min. From 20 mL of aqueous solution at 25 C, uranium ions with a concentration of 20 mg/L were quantitatively removed. Comparing the adsorption percentage of non-impregnated resin with impregnated resin with Schiff base ligand shows a shift in uptake of uranium ions vs. pH curves towards lower pH values (about ΔpH 0.51) and the adsorption behavior of the resin at pH 5.5 improves with increasing adsorption from 52% to 98%. The kinetic and adsorption data are in good agreement with the pseudo-second-order equation and Freundlich isotherm, respectively. A thermodynamic analysis also revealed that the ion adsorption process is entropy-based.

Keywords: Uranium, Adsorption, XAD-4 resin, Complexing



۱. مقدمه

توسعه فن‌آوری و رشد روزافزون فعالیت‌های صنعتی از یک طرف و رعایت نکردن فاکتورهای زیست محیطی از طرف دیگر سبب شده است تا طی چند دهه اخیر مقادیر بسیار بالایی از آلاینده‌ها وارد محیط زیست شوند. از مهم‌ترین آلاینده‌های پایدار و غیر قابل تجزیه فلزات سنگین هستند، که از سمی‌ترین آلاینده‌ها در محیط زیست به‌شمار می‌روند. بنابراین حذف این آلاینده‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. اورانیم یک عنصر شیمیایی با نماد U است و عدد اتمی آن ۹۲ می‌باشد. اورانیم به طور طبیعی فلزی است سخت، سنگین و پرتوزا. اورانیم یکی از چگال‌ترین فلزات پرتوزا است که در طبیعت به صورت اکسید یا نمک‌های مخلوط در مواد معدنی (مانند اورانیت یا کارونیت) یافت می‌شود. اورانیم طبیعی شامل ۹۹٫۳٪ ایزوتوپ ^{238}U و ۰٫۷٪ ^{235}U است [۱]. اورانیم یک رادیونوکلید طبیعی است که به دلیل سمیت جدی و خاصیت پرتوزایی دارای اثرات مخرب بر روی سلامت انسان و محیط زیست می‌باشد.

روش‌های مختلفی از جمله هم‌رسوبی، استخراج مایع-مایع، تبادل یون و جذب برای حذف یون‌های فلزی به کار برده می‌شود [۲-۵]. روش جذب هم‌اکنون به دلیل ویژگی‌ها و مزایای آن نسبت به سایر روش‌های ذکر شده، به‌طور گسترده برای جذب یون اورانیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال می‌توان به استفاده از پوشش پلیمری [۶]، استفاده از نانوکامپوزیت مغناطیسی هیدروکسی‌آپاتیت [۷]، استفاده از جاذب هیبریدی ساخته شده برپایه‌ی استانیک تنگستومولیدو فسفات و SBA-۱۵ کروی [۸]، نانوالیاف پلی‌استایرن‌آکریلونیتریل-پلی‌کربنات [۹] و استفاده از هیدروکسید لایه‌ای دوگانه‌ی منیزیم-آلومینیم [۱۰] اشاره کرد. روش جذب با استفاده از رزین‌ها نیز یکی از مؤثرترین روش‌ها است. رزین‌ها به دلیل انتخاب‌پذیری مناسب و پایداری مکانیکی یکی از مؤثرترین جاذب‌ها به‌شمار می‌روند که با اصلاح سطح آن با عوامل کمپلکس‌کننده گوناگون می‌توان حتی کارایی آن را بهبود بخشید، به عنوان مثال: XAD-۴ [۱۱-۲۱]، XAD-۷ [۲۲-۲۴]، XAD-۱۶ [۲۵] و XAD-۱۱۸۰ [۲۶].

با توجه به اهمیت جذب و جداسازی یون‌های اورانیم در ادامه به نمونه‌هایی از کاربرد این رزین‌ها در جذب این یون پرداخته شده است. در سال ۲۰۰۰ آمبرلایت XAD-۲ با نمک دی سدیم (او-۲) دی هیدروکسی بنزن-۳-دی سولفونیک اسید (Tiron) توسط کومار و همکاران عامل‌دار شد. رزین کیلیت حاصل، برای پیش‌تغلیظ یون‌های مس، کبالت، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و اورانیم استفاده شد. ظرفیت جذب رزین برای ۹ فلز به ترتیب ۱۴۰، ۹۵، ۶۵، ۱۲۶، ۱۲۶، ۱۱۱،

۱۰۱، ۵۶ و ۷۷ میلی‌گرم یون فلزی بر گرم رزین بود [۲۷]. در سال ۲۰۰۱ کومار و همکاران از رزین آمبرلایت XAD-۲ عامل‌دار شده با کوبین‌آلیزارین به پیش‌تغلیظ اورانیم پرداختند. مقادیر pH بهینه برای حداکثر جذب یون فلزی بین ۵ تا ۷ بود. حداکثر ظرفیت جذب رزین در محدوده ۰٫۹۴-۵٫۲۸ میلی‌گرم فلز بر گرم رزین مشخص شد [۲۸]. در سال ۲۰۰۵ متیلدا و همکاران از رزین آمبرلایت XAD-۴ آغشته شده به سوکسینیک اسید برای جداسازی یون اورانیم در حضور سایر یون‌های معدنی استفاده کردند. ظرفیت جذب رزین عامل‌دار شده ۱۲۳ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد. گونه‌های مختلف کاتیونی و آنیونی در مقادیر ۲۰۰ برابر در طول پیش‌تغلیظ اورانیم موجود در محلول نمونه تداخلی نداشتند. مطالعات جنبشی و ایزوترم جذب نیز برای درک ماهیت جذب اورانیم با رزین عامل‌دار شده با سوکسینیک اسید انجام شد [۲۹]. در سال ۲۰۱۲ ازمیر و همکارش از ژئوباسیلیوس تثبیت شده بر روی رزین آمبرلایت XAD-۴ به عنوان یک استخراج‌کننده فاز جامد برای پیش‌تغلیظ یون‌های اورانیم استفاده کردند. پارامترهای مؤثر بر پیش‌تغلیظ مانند pH محلول نمونه، غلظت اورانیم، حجم و نوع شوینده، سرعت جریان و اثر یون‌های تداخل‌کننده مورد مطالعه قرار گرفتند. pH بهینه برای جذب اورانیم ۵ بود و حداکثر ظرفیت جاذب ۱۱ میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمد [۳۰]. در سال ۲۰۱۹ رزین XAD-۲۰۱۰ آغشته شده به آلیزارین رد-S به عنوان جاذب برای جداسازی و پیش‌تغلیظ یون‌های اورانیم و توریم توسط فوآد و همکاران به کار برده شد و بهینه‌سازی شرایط جذب و شستشوی این یون‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. مدل ایزوترم لانگ‌مویر بهترین برازش داده‌های تجربی را با حداکثر ظرفیت جذب ۲۰٫۲ میلی‌گرم بر گرم برای اورانیم و ۱۸٫۲۵ میلی‌گرم بر گرم برای توریم داشت. فرایند سینتیک جذب یون‌های فلزی توسط جاذب سنتز شده نیز شبه درجه دوم را نشان داد [۳۱].

رزین آمبرلایت XAD-۴ به دلیل دارا بودن مساحت سطح ویژه $150-900 \text{ m}^2/\text{g}$ رزین مناسبی برای آغشته شدن است [۳۲]. از طرفی بازهای شیف نیز ترکیباتی هستند که به علت وجود اتم‌های دهنده الکترون در ساختارشان و توانایی در پذیرش یون‌های فلزی، به شکل گسترده‌ای در کمپلکس شدن یون‌های فلزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۳-۳۶]. بنابراین در این پژوهش کمپلکس‌کننده باز شیف بیس ۲-هیدروکسی بنزالدهید (او-۲) دی آمینو اتان (H_2L) (شکل ۱) برای آغشته‌سازی رزین آمبرلایت XAD-۴ به کار گرفته شد تا تأثیر حضور آن در توانایی رزین جهت جذب اورانیم از محلول آبی مورد بررسی قرار گیرد.



مقطر شستشو داده شد و سپس در آون با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید.

۲.۲ روش انجام آزمایش

به منظور بررسی خواص جذبی رزین آغشته به باز شیف، ابتدا pH محلول حاوی اورانیم با استفاده از محلول‌های رقیق هیدروکسید سدیم و نیتریک اسید تنظیم شد. ۰/۱ گرم از جاذب آماده شده به همراه ۲۰ میلی‌لیتر از محلول حاوی ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر از یون‌های اورانیم، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۶۰ دقیقه با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه در شیکر قرار داده شد. سپس غلظت یون مورد نظر در محلول با استفاده از روش ICP اندازه‌گیری شد و درصد جذب و ظرفیت جاذب از رابطه‌های زیر محاسبه گردید:

$$Up = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q = C_0 - C_e \times \frac{V}{M} \quad (2)$$

که در آن C_0 و C_e به ترتیب غلظت اولیه و تعادلی گونه یونی جذب‌شونده (میلی‌گرم بر لیتر) است، V حجم فاز آبی برحسب لیتر و M جرم جاذب برحسب گرم هستند.

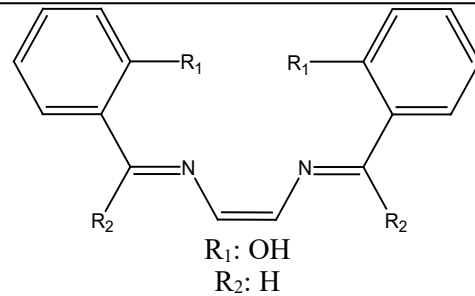
۴. نتایج و بحث

۴.۱ شناسایی لیگاند سنتز شده و رزین آغشته‌شده

ساختار لیگاند باز شیف H_2L با استفاده از طیف FT-IR و پیک‌های مشاهده شده در عدد موجی‌های $\nu_{C=C}=1578 \text{ cm}^{-1}$ ، $\nu_{O-H}=3450 \text{ cm}^{-1}$ ، $\nu_{C-H}=2902 \text{ cm}^{-1}$ ، $\nu_{C=N}=1636 \text{ cm}^{-1}$ شناسایی و تأیید شد [۳۸، ۳۷]. طیف FTIR مربوط به رزین آمبرلایت XAD-۴ قبل و بعد از آغشته‌شدن به لیگاند باز شیف H_2L در شکل ۲ نشان داده شده است. محدوده‌ی این طیف بین 400 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} می‌باشد. در طیف (الف) پیک‌های $1594/82 \text{ cm}^{-1}$ و $1491/26$ ، $1442/99$ ، $3021/97$ - $2916/43$ به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های کششی و خمشی گروه‌های C-H و C-H_۲ آلیفاتیک می‌باشند [۳۹]. با ظاهر شدن پیک $1633/76 \text{ cm}^{-1}$ (ارتعاش کششی C=N) و $3800-3200 \text{ cm}^{-1}$ (ارتعاش کششی O-H) در طیف (ب) حضور لیگاند در ساختار رزین تأیید گردید و نشان‌دهنده آغشته‌سازی موفق رزین توسط لیگاند باز شیف می‌باشد.

۲.۴ بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرایند جذب

عوامل مؤثر بر جذب یون اورانیم توسط رزین XAD-۴ آغشته‌شده با لیگاند باز شیف H_2L در کار حاضر شامل pH، زمان تماس، جرم جاذب و دما می‌باشند. نتایج نشان داد که رزین XAD-۴ آغشته‌شده میزان جذب یون اورانیم را افزایش می‌دهد.



شکل ۱. ساختار لیگاند باز شیف بیس ۲-هیدروکسی بنزالدهید او-۲دی آمینو اتان (H_2L).

۲. مواد شیمیایی و دستگاه‌ها

نمک نیترات اورانیل ($UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) با خلوص تجزیه‌ای از شرکت مرک تهیه و محلول مادر ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اورانیم با حل کردن مقدار مشخصی از این نمک در آب دوبار تقطیر آماده شد. رزین آمبرلایت از شرکت آلدریچ، ۲-هیدروکسی بنزالدهید و اتیلن دی آمین برای سنتز لیگاند باز شیف از شرکت مرک خریداری شدند. تنظیم pH محلول با استفاده از محلول‌های نیتریک اسید و سدیم هیدروکسید و با pH متر (Metrohm ۸۲۷) انجام گردید. جداسازی جاذب از محلول آبی توسط سانتریفیوژ با سرعت بالا ($30K$ -Sigma) صورت گرفت. طیف‌سنج نشری اتمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP) برای تعیین غلظت یون اورانیم در نمونه‌های آبی به کار رفت. طیف‌سنج مادون قرمز ساختار جاذب مورد استفاده قرار گرفت.

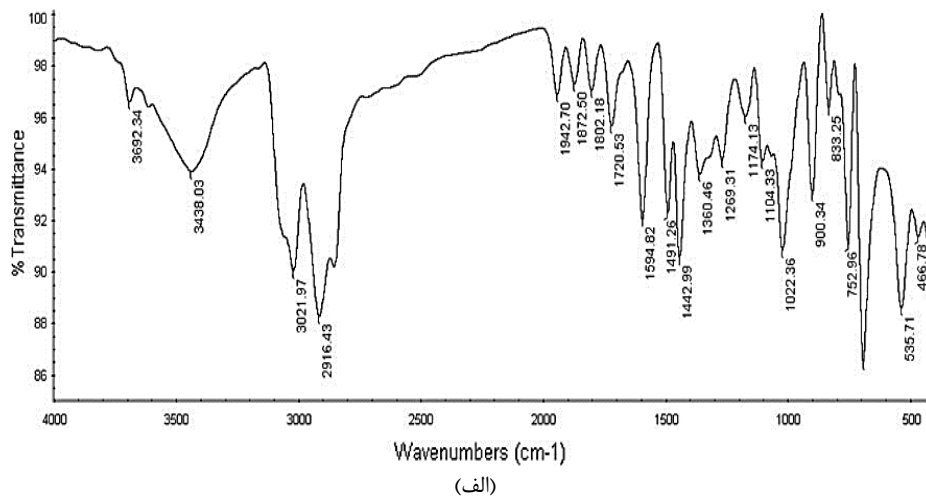
۳. روش کار

۳.۱ آماده‌سازی رزین آمبرلایت XAD-۴ آغشته‌شده

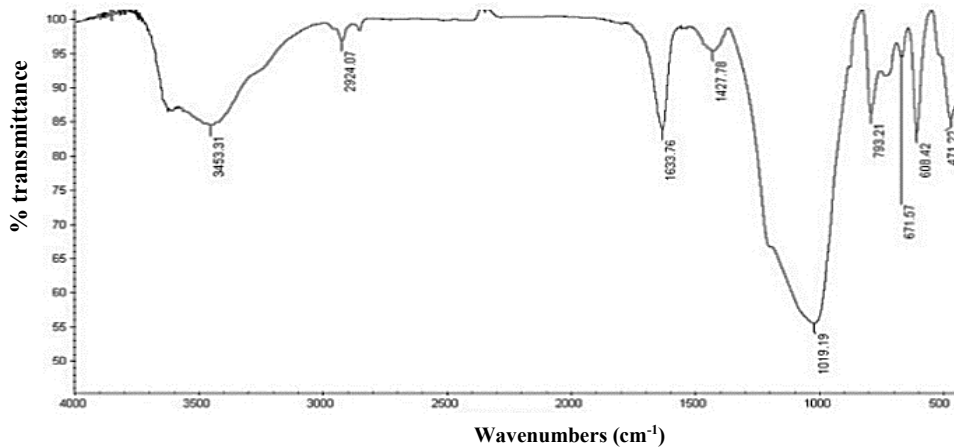
برای سنتز لیگاند باز شیف بیس ۲-هیدروکسی بنزالدهید او-۲دی آمینو اتان (H_2L) طبق روش گزارش شده [۳۷]، ۲-هیدروکسی بنزالدهید (۱/۲۳ گرم، ۰/۱ مول) در محلول اتانول (۳۰ میلی‌لیتر) با اتیلن دی آمین (۰/۳۹ گرم، ۰/۱۰۵ مول) به مدت ۲ ساعت رفلاکس شد. سپس حلال تبخیر و رسوب زرد به دست آمد. ترکیب جامد ته‌نشین شده فیلتر شد، چندین بار با اتانول و آب شستشو داده شد تا هر گونه اثری از مواد اولیه واکنش نداده حذف گردد.

جهت حذف ناخالصی‌ها و باز کردن خلل و فرج داخل رزین جهت مطلوب شدن فرایند آغشته‌سازی، ابتدا رزین چندین بار با متانول و آب مقطر شستشو داده شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد. سپس ۴ گرم رزین با ۱ گرم از لیگاند باز شیف سنتز شده در حلال دی‌کلرومتان به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد رفلاکس و سپس بعد صاف کردن چندین بار با متانول و آب





(الف)



(ب)

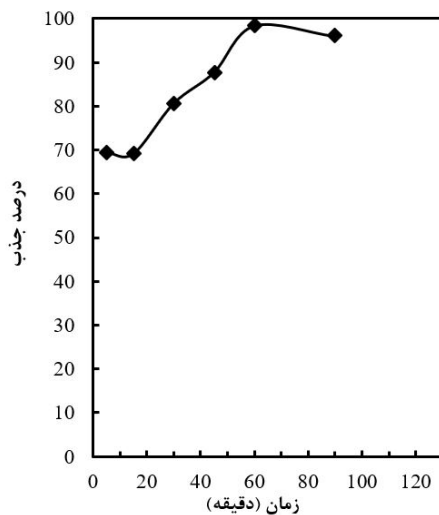
شکل ۲. طیف FT-IR، (الف) رزین XAD-۴ [۳۹] و (ب) رزین XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H₂L.

۱.۲.۴ بررسی اثر pH

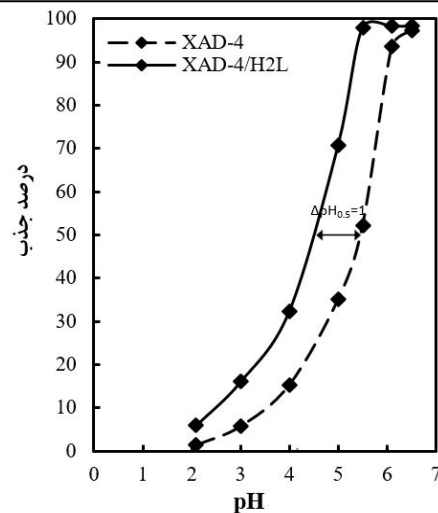
یکی از عوامل تعیین کننده در میزان قابلیت جذب سطحی، pH می باشد. به منظور مطالعه اثر pH، ۲۰ میلی لیتر محلول حاوی غلظت اولیه ۲۰ میلی گرم بر لیتر از یون فلزی در گستره pH ۲ تا ۶/۵ با ۰/۱ گرم از جاذب (رزین آغشته نشده و رزین آغشته شده با لیگاند بازشیف) مورد بررسی قرار گرفتند و همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، جذب یون اورانیم روی هر دو رزین در محلول های اسیدی کاهش یافته و با افزایش pH افزایش می یابد. بر اساس نتایج حاصل، حداکثر جذب در pH های ۶/۵ و ۵/۵ به ترتیب برای رزین XAD-۴ آغشته نشده و رزین XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H₂L مشاهده شد. در pH های پایین به دلیل افزایش اسیدیته، غلظت یون H⁺ افزایش یافته و با یون فلزی مورد مطالعه رقابت می کند. با افزایش pH میزان یون H⁺ در محیط کاهش می یابد که این امر باعث افزایش میزان جذب خواهد شد [۱۱، ۴۰]. مقایسه فرایند جذب دو جاذب نشان می دهد که حضور لیگاند بازشیف در ساختار رزین در کارایی جذب تأثیرگذار بوده است به طوری که اختلاف درصد جذب دو جاذب به طور قابل توجهی

در pH های بالا افزایش یافته و نمودار جذب به سمت pH های اسیدی جابه جا شده است (ΔpH_{۰.۵}). با توجه به این که در ساختار لیگاند به کار برده شده برای آغشته سازی سطح رزین گروه های عاملی شامل هیدروکسیل و آمین وجود دارد، در pH های پایین به دلیل اسیدی بودن محیط و حضور یون H⁺ میزان دپروتونه شدن گروه های عاملی لیگاند و همچنین اتصال یون اورانیم به لیگاند کاهش یافته و در نتیجه اختلاف درصد جذب دو جاذب کم تر می باشد (در pH ۳ افزایش میزان جذب از ۵/۷٪ به ۱۶٪). اما در pH های بالا به دلیل دپروتونه شدن گروه های عاملی لیگاند و وجود جفت الکترون آزاد روی اتم های نیتروژن و اکسیژن، لیگاند برای اتصال به یون فلزی مناسب بوده و اختلاف درصد جذب دو جاذب برای یون اورانیم به طور قابل توجهی افزایش می یابد (در pH ۵/۵ افزایش میزان جذب از ۵۲٪ به ۹۸٪). با توجه به بهبود میزان کارایی جذب با آغشته سازی رزین توسط لیگاند بازشیف، مراحل بعدی بر روی جاذب آغشته شده انجام گرفت. بنابراین براساس نتایج حاصل از این بخش و با توجه به میزان جذب بیش تر در pH های بالا، برای ادامه کار جاذب آغشته شده در pH ۵/۵ به کار برده شد.

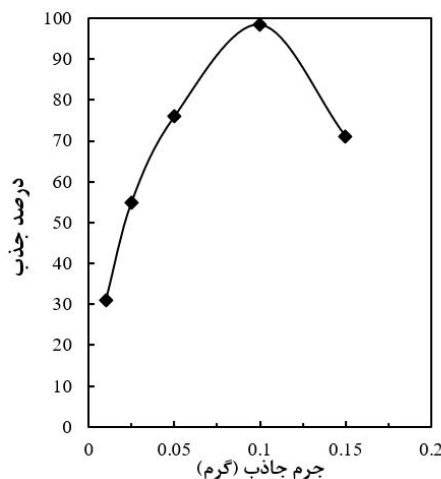




شکل ۴. اثر زمان تماس بر جذب یون اورانیم با استفاده از رزین XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H₂L.



شکل ۳. اثر pH بر جذب یون اورانیم از محلول آبی با استفاده از رزین XAD-۴ آغشته نشده و آغشته شده با لیگاند باز شیف H₂L.



شکل ۵. اثر جرم جاذب بر جذب یون اورانیم با استفاده از رزین XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H₂L.

۴.۲.۴ بررسی اثر دما

دما یک پارامتر مهم در فرایند جذب است. برای مشاهده تأثیر دما در سیستم مورد مطالعه، نمودار درصد جذب یون اورانیم به عنوان تابعی از دما (محدوده ۱۰-۳۵ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۶ نشان داده شده است. تأثیر دما بر روی جذب یون اورانیم محلول آبی توسط جاذب XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H₂L در pH ۵/۵ و غلظت یون فلزی ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر مورد مطالعه قرار گرفت. راندمان حذف یون اورانیم با افزایش دما از ۱۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی گرماگیر بودن فرایند جذب می‌باشد. دما در واقع انرژی جنبشی یون‌های اورانیم و تعداد برخوردهای آن‌ها با سطح جاذب را افزایش می‌دهد و دسترسی مؤثرتر و کارآمدتر به سطح جاذب را برای آن‌ها آسان می‌کند [۴۴، ۴۵]. افزایش دمای بیش‌تر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌تواند منجر به تغییر در ساختار لیگاند باز شیف شده و میزان جذب را کاهش دهد.

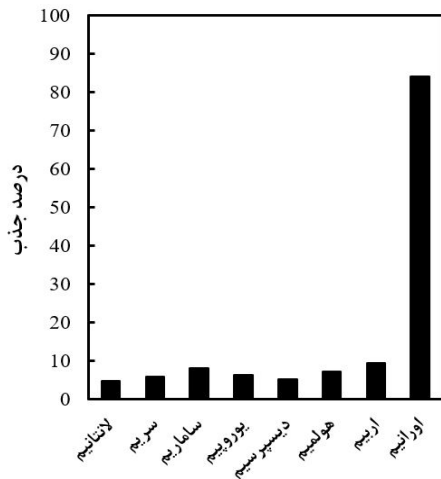
۴.۲.۴ اثر زمان تماس

به منظور مطالعه اثر زمان تماس جاذب و یون اورانیم، ۲۰ میلی‌لیتر محلول حاوی غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر از یون فلزی با pH ۵/۵ با ۰/۱ گرم از جاذب XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H₂L در زمان‌های ۵-۱۲۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان می‌دهد جاذب در زمان‌های کوتاه ۲۰-۵ دقیقه تقریباً جذب ثابت و قابل‌ملاحظه‌ای دارد که با افزایش زمان به دلیل امکان تماس بیش‌تر مواد جذب‌شونده با جاذب و وجود سایت‌های فعال خالی، مقدار جذب افزایش و در زمان ۶۰ دقیقه به بیش‌ترین مقدار می‌رسد (>۹۸٪). در زمان‌های بالاتر با اشباع شدن جاذب از یون اورانیم فرایند جذب به تعادل می‌رسد. بنابراین زمان جذب بهینه برای یون اورانیم ۶۰ دقیقه انتخاب گردید [۴۱].

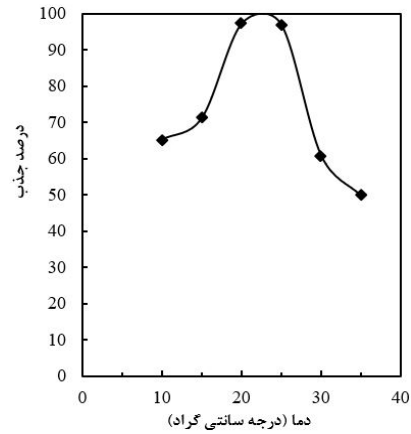
۴.۲.۴ بررسی اثر مقدار جاذب

به منظور مطالعه اثر جاذب، مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ گرم از جاذب XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H₂L با ۲۰ میلی‌لیتر محلول حاوی غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر از یون‌های فلزی در pH و زمان تماس بهینه مورد بررسی قرار گرفتند و همان‌طور که نتایج موجود در شکل ۵ نشان می‌دهد، با افزایش مقدار جاذب تا ۰/۱ گرم، تعداد مکان‌های در دسترس برای جذب افزایش می‌یابد و کارایی جذب بالا می‌رود. افزایش بیش‌تر از ۰/۱ گرم جاذب منجر به کاهش میزان جذب می‌شود که می‌تواند به دلیل متراکم شدن جاذب و پوشانده شدن محل‌های اتصال و کاهش در مناطق جذبی توسط غلظت‌های بالای جاذب باشد [۴۲، ۴۳].





شکل ۷. بررسی اثر حضور یون‌های لانتانیدی بر جذب یون اورانیوم با استفاده از رزین XAD-۴ آغشته‌شده با لیگاند باز شیف H_۲L.



شکل ۶. اثر دما بر جذب یون اورانیوم با استفاده از رزین XAD-۴ آغشته‌شده با لیگاند باز شیف H_۲L.

۵.۲.۴ بررسی اثر یون‌های مزاحم

به منظور مطالعه اثر حضور یون‌های لانتانیدی، محلول حاوی غلظت اولیه ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر از یون‌های فلزی لانتانیم (La)، سریم (Ce)، ساماریوم (Sm)، یوروپیم (Eu)، دیسپرسیم (Dy)، هولیم (Ho) و آریم (Er) در حضور ۰/۱ گرم جاذب رزین XAD-۴ آغشته‌شده با لیگاند باز شیف H_۲L در pH ۵/۵ مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود یون اورانیوم در مقایسه با سایر یون‌ها به صورت گزینشی جذب می‌شود.

۳.۴ بررسی مدل‌های سینتیکی فرایند جذب

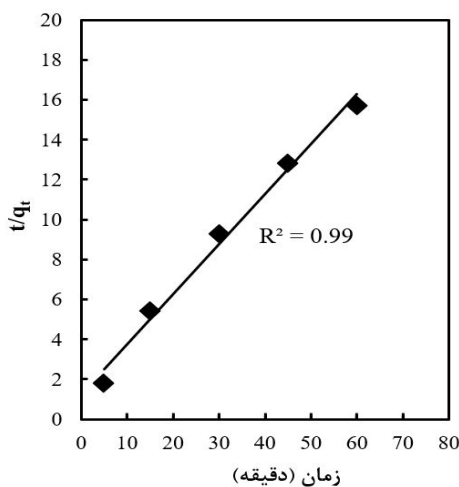
به منظور بررسی سینتیک فرایند جذب، داده‌های به‌دست آمده توسط معادلات شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، الویج و تابع توان بررسی و پارامترهای سینتیکی با توجه به نمودارهای خطی معادلات محاسبه شد (جدول ۱). نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل داده‌های حاضر نشان داد که جذب اورانیوم بر روی جاذب آغشته‌شده با ضریب همبستگی R^۲=۰/۹۹ با معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم توصیف شده است (شکل ۸). معادله شبه مرتبه دوم به صورت زیر است:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_r q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

که در آن q_e و q_t به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت جذب تعادلی و ظرفیت جذب در زمان t (min) بر حسب mg/g است. K_r ثابت سرعت مدل شبه مرتبه دوم بر حسب g/(mg.min) می‌باشد. از آنجایی که در ساختار لیگاند باز شیف اتم‌های دهنده‌ی الکترون اکسیژن و نیتروژن وجود دارند بنابراین این دو گروه عاملی محل‌های جذب غالب برای یون اورانیوم هستند. بنابراین نتایج حاصل نشان می‌دهد در طی فرایند جذب، مکانیسم شامل اشتراک الکترون یا انتقال الکترون بین یون‌های اورانیوم و گروه‌های عاملی لیگاند نشاندهنده شده بر سطح جاذب بوده است [۴۶، ۴۷].

جدول ۱. پارامترهای سینتیک جذب اورانیوم توسط جاذب XAD-۴ آغشته‌شده با لیگاند باز شیف H_۲L

پارامترها	مدل سینتیکی
۰/۰۸۶	شبه مرتبه اول
K_1 (g/mg.min)	
۳/۶۹	$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{K_1}{2.303} t$
q_e (mg/g)	
۰/۷۴	
R^2	
۰/۰۵۰	شبه مرتبه دوم
K_2 (g/mg.min)	
۴/۰۰	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_r q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$
q_e (mg/g)	
۰/۹۹	
R^2	
۱/۹۳	الویج
a (mg/g.min)	
۰/۴۱	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(a\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$
β (g/mg)	
۰/۸۰	
R^2	
۲/۱۴	تابع توان
a (mg/g)	
۰/۱۳	تابع توان
b (mg/g.min)	
۰/۸۲	
R^2	

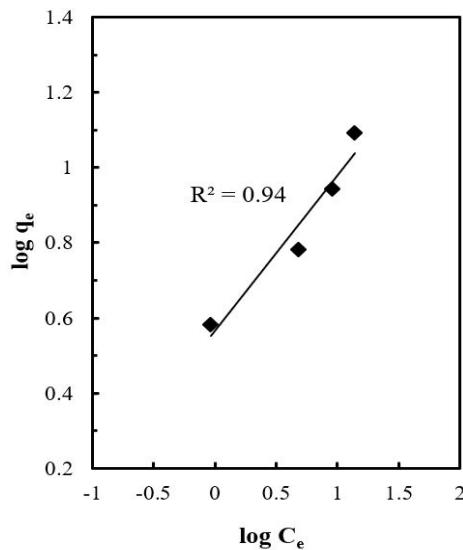


شکل ۸. نمودار سینتیکی شبه مرتبه دوم برای جذب یون اورانیوم با استفاده از رزین XAD-۴ آغشته‌شده با لیگاند باز شیف H_۲L.



جدول ۲. پارامترهای همدمای جذب اورانیوم توسط جاذب XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H_۲L

پارامترها	همدمها	
۱۵/۳۸	q _{max} (mg/g)	
۰/۲۰	b (L/mg)	لانگمویر
۰/۸۵	R ^۲	
۲/۴۳	n	
۳/۶۹	K _f (mg/g)	فروندلیچ
۰/۹۴	R ^۲	
۳/۱۷	a(L/g)	
۰/۸۷	b (kJ/mol)	تمکین
۰/۸۴	R ^۲	



شکل ۹. نمودار همدمای فروندلیچ برای جذب یون اورانیوم با استفاده از رزین XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H_۲L.

۵.۴ مطالعه ترمودینامیک جذب

در فرایند جذب پارامترهای ترمودینامیکی اطلاعات مهم و کاربردی درباره خود به خودی بودن و سازوکار واکنش می‌دهند و دارای نقشی اساسی می‌باشند. برای بررسی خود به خودی بودن یک فرایند فاکتورهای انرژی و آنتروپی بسیار حایز اهمیت می‌باشد. با توجه به مقدار ΔG° می‌توان سازوکار فرایند جذب را بررسی کرد. رابطه‌ی تغییر انرژی آزاد گیبس (ΔG°) با توجه به ثابت‌های توزیع K_d در دماهای مختلف با استفاده از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (7)$$

از طرفی تغییر انرژی آزاد با آنتالپی و آنتروپی (ΔH° و ΔS°) از طریق معادله گیبس-هلمهولتز مربوط می‌شود:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (8)$$

۴.۴ بررسی همدمهای جذب

توصیف نحوه تعامل ماده جذب‌شونده با جاذب با استفاده از معادله‌های همدمای مهم است. در این کار، سه معادله لانگمویر، فروندلیچ و تمکین مورد بررسی قرار گرفتند. در همدمای لانگمویر فرض بر این است که جذب به صورت تک لایه و همگن اتفاق می‌افتد و همه مکان‌های جذب یکسان و هر سایت تنها یک مولکول یا اتم را در خود جای می‌دهد. معادله لانگمویر را می‌توان با توجه به رابطه ۴ بیان کرد:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}b} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (4)$$

که در آن C_e غلظت تعادل یون‌های باقی‌مانده در محلول برحسب (mg/L) ، q_e مقدار یون‌های فلزی جذب‌شده در واحد وزن جاذب پس از تعادل (mg/g) ، q_{max} حداکثر ظرفیت جذب جاذب برحسب (mg/g) ، و b ثابت لانگمویر برحسب (L/mg) است. مقادیر q_{max} و b را می‌توان از شیب و عرض از مبدأ نمودار خطی C_e/q_e در مقابل C_e به دست آورد.

همدمای فروندلیچ جذب را در سطوح ناهمگن و به صورت چندلایه‌ای بیان می‌کند که با معادله ۵ بیان می‌شود:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (5)$$

که در آن K_f ثابت ظرفیت تبادل یونی نسبی جاذب (mg/g) و n ثابت فروندلیچ است. این ثابت‌ها با رسم نمودار $\log q_e$ در مقابل $\log C_e$ حاصل می‌شوند. شرایط جذب مطلوب زمانی ایجاد می‌شود که $n > 1$ باشد.

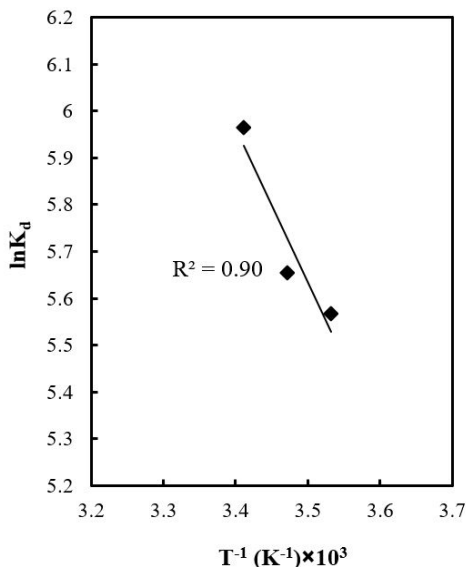
معادله همدمای تمکین به صورت معادله زیر است:

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln(aC_e) \quad (6)$$

که در آن R ثابت جهانی گاز $(kJ/K.mol)$ ، T دمای مطلق (K) ، b ثابت تمکین مربوط به گرمای جذب (kJ/mol) و a ثابت همدمای تمکین (L/g) است. رسم q_e در مقابل $\ln C_e$ به ما این امکان را می‌دهد a و b مربوطه را ارزیابی کنیم.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای به دست آمده از معادله‌های همدمای در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. از داده‌ها مشخص گردید که ضرایب همبستگی (R^2) برای همدمهای لانگمویر و تمکین به ترتیب حدود ۰/۸۵ و ۰/۸۴ بوده، در حالی که برای همدمای فروندلیچ ۰/۹۴ بوده است. شکل ۹ نمودار $\log q_e$ در مقابل $\log C_e$ را نشان می‌دهد. از داده‌های این نمودار آشکار است که فرایند جذب توسط مدل فروندلیچ بهتر از مدل‌های دیگر توصیف شده است. بنابراین فرایند جذب یون فلزی بر روی یک سطح ناهمگن توسط جذب چند لایه رخ می‌دهد. ابتدا سایت‌های اتصال قوی‌تر اشغال می‌شود و سپس با افزایش میزان اشغال سایت‌ها قدرت اتصال کاهش می‌یابد [۴۶، ۴۸].





شکل ۱۰. تغییرات $\log K_d$ برحسب T^{-1} در جذب یون اورانیم با استفاده از جاذب XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H_2L .

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه، جاذب XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H_2L برای بهبود جذب یون اورانیم از محلول های آبی بررسی شد. بررسی اثر pH با استفاده از جاذب XAD-۴ آغشته نشده و جاذب XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف H_2L نشان داد که با افزایش pH، جذب یون فلزی افزایش می یابد. همچنین با آغشته سازی رزین توسط لیگاند H_2L ، نمودار pH جذب ۱ واحد به سمت pH پایین تر تغییر می کند و جذب یون های اورانیم بهبود می یابد. داده های تجربی جذب با موفقیت با استفاده از همدمای فروندلیچ برازش شدند و داده های سینتیکی برای مدل های جنبشی مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. بررسی ها نشان داد که داده ها تطابق بهتری با مدل شبه مرتبه دوم دارند. در بررسی ترمودینامیکی مقادیر مثبت تغییرات آنتالپی نشان دهنده گرماگیر بودن فرایند جذب یون اورانیم با استفاده از رزین آغشته شده می باشد. میزان تغییرات آنتروپی در فرایند جذب مقداری مثبت به دست آمد که بیانگر بالا رفتن میزان بی نظمی در لایه مرزی جامد و محلول است. مقایسه ظرفیت جذب جاذب مورد مطالعه برای یون های اورانیم با برخی جاذب های دیگر گزارش شده نشان داد که جاذب مورد مطالعه نسبت به جاذب های ذکر شده عملکردی بهتر و حتی نزدیک تر می تواند داشته است.

با ترکیب دو رابطه ۷ و ۸، معادله ۹ که نشان دهنده وابستگی دمایی K_d می باشد، به دست می آید:

$$\log K_d = -\frac{\Delta H^0}{2,30,3RT} + \frac{\Delta S^0}{2,30,3R} \quad (9)$$

از رسم تغییرات $\log K_d$ به صورت تابعی از معکوس دمای مطلق (T^{-1}) خط راستی حاصل می شود (شکل ۱۰) که با توجه به اطلاعات آن (عرض از مبدأ و شیب) امکان تعیین داده های ترمودینامیکی $\Delta H^0 (kJ/mol) = 27,39$ ، $\Delta S^0 (kJ/mol.K) = 0,14$ و $\Delta G^0 (kJ/mol) = -14,44$ در دمای ۲۹۳/۱۵ کلوین فراهم می شود. مقدار مثبت آنتالپی برای جذب یون اورانیم توسط این رزین نشان دهنده گرماگیر بودن واکنش های جذب و منفی بودن مقدار انرژی آزاد گیبس نشان دهنده خود به خودی بودن فرایند جذب است. به طوری که مقادیر $-80 < \Delta G < -400$ نشان دهنده جذب شیمیایی و مقادیر $0 < \Delta G < 20$ نشان دهنده جذب فیزیکی می باشد. همچنین مقادیر بین ۲۰- تا ۸۰- کیلو ژول بر مول ترکیبی از جذب فیزیکی و شیمیایی است. طبق مقادیر حاصل شده در این تحقیق (کمتر از ۰) می توان نتیجه گرفته که فرایند جذب فیزیکی است. میزان تغییرات مثبت آنتروپی در فرایند جذب نیز بیانگر بالا رفتن میزان بی نظمی در لایه مرزی جامد و محلول است. لذا مقادیر آنتروپی (مثبت) نیروی محرکه فرایند جذب خواهد بود [۱۱].

۶.۴ مقایسه جاذب حاضر با برخی جاذب های دیگر

ظرفیت جذب رزین XAD-۴ آغشته شده با لیگاند باز شیف در کار حاضر با برخی رزین های آغشته شده دیگر برای جذب یون اورانیم مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان داد جاذب مورد مطالعه با حداکثر ظرفیت جذب ۱۵/۳۸ میلی گرم بر گرم نسبت به رزین آمبرلیت XAD-۲ آغشته شده با نمک دی سدیم ۲۰-دی هیدروکسی بنزن-۳-دی سولفونیک اسید (Tiron) با ظرفیت جذب ۷/۷ میلی گرم بر گرم [۲۷]، رزین آمبرلیت XAD-۲ آغشته شده با کوین آلیزارین با ظرفیت جذب ۵/۲۸ میلی گرم بر گرم [۲۸]، رزین آمبرلیت XAD-۴ آغشته شده به سوکسینیک اسید با ظرفیت جذب ۱۲/۳ میلی گرم بر گرم [۲۹]، رزین آمبرلیت XAD-۴ آغشته شده با ژئوباسیلوس با ظرفیت جذب ۱۱ میلی گرم بر گرم [۳۰] و رزین XAD-۲۰۱۰ آغشته شده به آلیزارین رد-S با ظرفیت جذب ۲۰/۲ میلی گرم بر گرم [۳۱] دارای عملکردی بهتر و یا نزدیک می باشد.



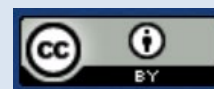
1. Yi Z, Yao J. Kinetic and equilibrium study of uranium(VI) adsorption by *Bacillus licheniformis*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012;293:907.
2. Kagaya S, Miwa S, Mizuno T, Tohd K. Rapid coprecipitation technique using yttrium hydroxide for the preconcentration and separation of trace elements in saline water prior to their ICP-AES determination. *Analytical Sciences*. 2007;23:1021.
3. Wang J, Li C, Sakanishi K, Nakazato T, Tao H, Takanohashi T, Takarada T, Saito I. Investigation of the remaining major and trace elements in clean coal generated by organic solvent extraction. *Fuel*. 2005;84:1487.
4. Tokman N, Akman S, Ozeroglu C. Determination of lead, copper and manganese by graphite furnace atomic absorption spectrometry after separation/concentration using a water-soluble polymer. *Talanta*. 2004;63:699.
5. Matsubara I, Takeda Y, Ishida K. Simple and rapid determination of trace amounts of gold (III), palladium (II), and platinum (IV) in industrial waste solutions after recovery of noble metals by combined. *Analytical Sciences*. 2003;19:1427.
6. Kholqi S, Torab Mostaeidi M, Fourati Rad H. Fabrication of intelligent polymeric coating for uranium nuclear decontamination. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2023;102:41 [In Persian].
7. Bagherzadeh M, Saberi D. Magnetically assisted uranyl removal by using magnetic hydroxyapatite nanocomposite. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2022;101:103 [In Persian].
8. Aghayan H, Yavari R, Ghasemi Mobtaker H, Yousefi T. Studies on the adsorption behavior of uranium onto a synthesized hybrid material based on the spherical SBA-15 and tin tungstomolybdophosphate. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2019;88:72 [In Persian].
9. Naderi A, Ghoreishi S.M, Firouzzare M, Almasian M.R. Production and Modification of Poly(Styrene-Acrylonitrile)-Polycarbonate Nanofibers and Evaluation of its Adsorption Behavior on Uranium in Aqueous Solutions. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2019;86:75 [In Persian].
10. Khodadadi Darban A, Seddighi H, Fasihi J, Koleini J. Kinetic, Thermodynamic and Adsorption Mechanism of Uranium (VI) Ions from Aqueous Solutions Using Mg/Al Layered Double Hydroxide. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2019;86:64 [In Persian].
11. Yarahmadi A, Zarandi M.N, Khani M.H. Investigation of effective parameters of Lanthanum and Cerium Adsorption from Aqueous solutions using Amberlit XAD-7 resin impregnated With DEHPA. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2022;100:103 [In Persian].
12. Shahida Sh, Ali A. Determination of europium (III) in environmental samples using a flow injection analysis system with on-line preconcentration and spectrophotometric detection. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014;300:423.
13. Shahida Sh, Ali A, Khan M.H. Flow injection on-line spectrophotometric determination of thorium (IV) after preconcentration on XAD-4 resin impregnated with oxytetracycline. *Journal of the Iranian Chemical Society*. 2014;11:1.
14. Khanchi A.R, Pourmatin A, Akbari N, Mojarabi M.H, Abhari A. Investigation of the Adsorption Behavior of Strontium (II) and Yttrium (III) on the Impregnated XAD-4 Resin with HDEHP in Acidic Media. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2013;62:59 [In Persian].
15. Shahida Sh, Ali A, Khan M.H. On-line spectrophotometric determination of scandium after preconcentration on XAD-4 resin impregnated with nalidixic acid. *Journal of the Iranian Chemical Society*. 2013;10:461.
16. Shahida Sh, Ali A, Khan M.H, Saeed M.M. Flow injection online spectrophotometric determination of uranium after preconcentration on XAD-4 resin impregnated with nalidixic acid. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013;185:1613.
17. Shahida Sh, Ali A, Khan M.H, Saeed M.M. Flow injection on-line determination of uranium after preconcentration on XAD-4 resin impregnated with dibenzoylmethane. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2011;289:929.
18. Ali A, Shahida Sh, Khan M.H, Saeed M.M. Online thorium determination after preconcentration in a minicolumn having XAD-4 resin impregnated with N-benzoylphenylhydroxylamine by FI-spectrophotometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2011;288:735.
19. Saberyan K, Zolfonoun E, Shamsipur M, Salavati-Niasari M. Amberlite XAD-4 Impregnated With a New Pentadentate Schiff base: a Chelating Collector for Separation and Preconcentration of Trace Amounts of Gallium (III) and Indium (III). *Acta Chimica Slovenica*. 2010;57:222.
20. Kaur H, Agrawal Y.K. Functionalization of XAD-4 resin for the separation of lanthanides using chelation ion exchange liquid chromatography. *Reactive and Functional Polymers*. 2005;65:277.
21. Çekiç S.D, Filik H, Apak R. Use of an o-aminobenzoic acid-functionalized XAD-4 copolymer resin for the separation and preconcentration of heavy metal (II) ions. *Analytica Chimica Acta*. 2004;505:15.
22. Hosseini-Bandegharai A, Allahabadi A, Rahmani-Sani A, Rastegar A, Khamirchi R.A, Mehrpouyan M, Hekmat-Shoar R, Pajohankia Z. Thorium removal from weakly acidic solutions using titan yellow-impregnated XAD-7 resin beads: kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2016;309:761.
23. Hosseini S.H, Rahmani-Sani A, Jalalabadi Y, Karimzadeh M, Hosseini-Bandegharai A, Kharghani K, Allahabadi A. Preconcentration and determination of ultra-trace amounts of U (VI) and Th (IV) using titan yellow-impregnated Amberlite XAD-7 resin. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2015;95:277.
24. El-Sofany E.A. Recovery and Separation of Cu (II) and Cd (II) from Nitrate Medium using Impregnated Resin, CYANEX-301/Amberlite XAD-7. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*. 2004;37:111.
25. Lee W, Lee S.E, Lee C.H, Kim Y.S, Lee Y.I. A chelating resin containing 1-(2-thiazolylazo)-2-naphthol as the functional group; synthesis and sorption behavior for trace metal ions. *Microchemical Journal*. 2001;70:195.



26. Tokaloğlu Ş, Büyükbaş H, Karta Ş. Preconcentration of trace elements by using 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol functionalized Amberlite XAD-1180 resin and their determination by FAAS. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2006;17:98.
27. Kumar M, Rathore D.P.S, Singh A.K. Metal ion enrichment with Amberlite XAD-2 functionalized with Tiron: analytical applications. *Analyst*. 2000;125:1221.
28. Kumar M, Rathore D.P.S., Singh A.K. Quinalizarin anchored on Amberlite XAD-2. A new matrix for solid-phase extraction of metal ions for flame atomic absorption spectrometric determination. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. 2001;370:377.
29. Metilda P, Sanghamitra K, Mary Gladis J, Naidu G.R.K, Prasada Rao T. Amberlite XAD-4 functionalized with succinic acid for the solid phase extractive preconcentration and separation of uranium (VI). *Talanta*. 2005;65:192.
30. Ozdemir S, Kilinc E. Geobacillus thermoleovorans immobilized on Amberlite XAD-4 resin as a biosorbent for solid phase extraction of uranium (VI) prior to its spectrophotometric determination. *Microchimica Acta*. 2012;178:389.
31. Fouad H, Abu Elenein, Orabi A, Abdulmoteleb S. A new extractant impregnated resin for separation of traces of uranium and thorium followed by their spectrophotometric determination in some geological samples. *SN Applied Sciences*. 2019;1:309.
32. Rafati H, Noparast M, Khanchi A.R. Selective Sorption of La (III) and Ce (III) from Simulated Solution Containing Metal Ions Using Amberlite XAD-4 Resin Impregnated with Cyanex 302. *Iranian Journal of Mining Engineering*. 2007;1:23 [In Persian].
33. Çimen A, Torun M, Bilgic A. Immobilization of 4-amino-2-hydroxyacetophenone onto silica gel surface and sorption studies of Cu (II), Ni (II), and Co (II) ions. *Desalination and Water Treatment*. 2015;53:2106.
34. Wang Q, Gao W, Liu Y, Yuan J, Zhijun X, Zeng Q, Li Y, Schröder M. Simultaneous adsorption of Cu (II) and SO₄²⁻ ions by a novel silica gel functionalized with a ditopic zwitterionic Schiff base ligand. *Chemical Engineering Journal*. 2014;250:55.
35. Radi S, Basbas N, Tighadouini S, Bacquet M, Degoutin S, Cazier F. New amine-modified silica: Synthesis, characterisation and its use in the Cu (II)-Removal from aqueous solutions. *Progress in Nanotechnology and Nanomaterials*. 2013;2:108.
36. Ghaedi M, Sharifpour E. Chemically modified nano silica gel with 2-((3silylpropylimino) methyl)-2-hydroxy-1-naphthol (SPIMHN) as good and efficient adsorbent for solid phase extraction. *Desalination and Water Treatment*. 2012;41:315.
37. Fathi S.A.M, Parinejad M, Yaftian M.R. Multidentate nitrogen/oxygen donor ionophores; their use as selective extracting and mobile-carrier agents for copper (II) ions. *Separation and Purification Technology*. 2008;64:1.
38. Shiri-Yekta Z, Yaftian M.R. Anion control selectivity of neutral N4-type schiff base extractants towards transition metal ions. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2010;29:11.
39. Fathy M, Moghny Th.A, Allah A.E.A, Alblehy A.E. Cation exchange resin nanocomposites based on multi-walled carbon nanotubes. *Applied Nanoscience*. 2014;4:103.
40. Ahmadi S.J, Akbari N, Shiri-Yekta Z, Mashhadizadeh M.H, Pourmatin A. Adsorption of strontium ions from aqueous solution using hydrous, amorphous MnO₂-ZrO₂ composite: a new inorganic ion exchanger. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014;299:1701.
41. Taheri M, Khajenoori M, Shiri-Yekta Z, Zahakifar F. Application of Plantain leaves as a bio-adsorbent for biosorption of U(VI) ions from wastewater. *Radiochim. Acta*. 2023. doi.org/10.1515/ract-2022-0109.
42. Tajer-Mohammad-Ghazvini P, Kasra-Kermanshahi R, Nozad-Golikand A, Sadeghizadeh M, Ghorbanzadeh-Mashkani S, Dabbagh R. Cobalt separation by Alphaproteobacterium MTB-KTN90: magnetotactic bacteria in bioremediation. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2016;39:1899.
43. Mahmoud M.E, Nabil G.M, Mahmoud S.M.E. High performance nano-zirconium silicate adsorbent for efficient removal of copper (II), cadmium (II) and lead (II). *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 2013;4:1.
44. Li X, Li F, Jin Y, Jiang C. The uptake of uranium by tea wastes investigated by batch, spectroscopic and modeling techniques. *Journal of Molecular Liquids*. 2015;209:413.
45. Deshmukh P, Sar S.K, Ghosh P.K. Efficient exclusion of uranyl ion from aqueous medium by a novel magnetic bio adsorbent (Phyllanthus emblica bark). *Groundwater for Sustainable Development*. 2021;14:100625.
46. Taheri M, Khajenoori M, Shiri-Yekta Z, Zahakifar F. Study of biosorption of uranyl from aqueous solution by tea waste using RSM method. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2023. Article in Press [In Persian].
47. Sabanovic E, Muhic-Sarac T, Nuhanovic M, Memic M. Biosorption of uranium(VI) from aqueous solution by Citrus limon peels: kinetics, equilibrium and batch studies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2019;319:425.
48. Aly Z, Luca V. Uranium extraction from aqueous solution using dried and pyrolyzed tea and coffee wastes. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013;295:889.

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

شیری یکتا، زهرا. (۱۴۰۳). بررسی رفتار جذبی یون اورانیم از محلول آبی بر روی رزین XAD-۴ آغشته شده با عامل کمپلکس کننده اسیدی. مجله علوم و فنون هسته‌ای،

دوره ۴۵، شماره ۲، جلد ۱۰۸، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۱۵-۱۲۴. URL: https://jonsat.nstri.ir/article_1587.html. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1587>

