



جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) از محلول‌های آبی با استفاده از نانو ذرات تبادل گر یونی SnO_2

عبدالرضا نیلچی*، سمیه رسولی گرمارودی، طاهره شریعتی دهاقان

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

چکیده: با گسترش استفاده از انرژی هسته‌ای به عنوان انرژی جایگزین سوخت‌های فسیلی، تولید پسمان‌های پرتوزا نیز افزایش یافته است. لذا پژوهش در زمینه تهیه جاذب‌های جدید و بررسی ویژگی‌های آن‌ها برای جذب مواد پرتوزا ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله، اکسید قلع با ساختار نانو، به عنوان جاذب برای یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV)، از طریق ته‌نشینی همگن در حضور اوره ساخته شده است. شناسایی ساختار ترکیب ساخته شده، با استفاده از تکنیک پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) به انجام رسید. سطح ویژه ذرات جاذب و میزان تخلخل آن‌ها از طریق جذب و واجذب نیتروژن اندازه‌گیری شد. نتایج حاکی از آن است که نمونه‌ی ساخته شده دارای ساختار قلع اکسید طبیعی بوده و اندازه‌ی متوسط ذرات، ۳۰ نانومتر و مساحت سطح آن‌ها ۲۷٫۵ مترمربع بر گرم بود. خواص تبادل یونی نانوذرات ساخته شده، با اندازه‌گیری ضریب توزیع یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) در روش جذب ناپیوسته بررسی گردید. تأثیر متغیرهای عملیاتی pH، زمان تماس فاز محلول و تبادل گر بر ضریب توزیع بررسی و شرایط بهینه برای عملکرد مطلوب تبادل گر در جذب این یون‌ها تعیین گردید.

کلیدواژه‌ها: نانوذرات قلع دی‌اکسید، اورانیم، توریم، ته‌نشینی همگن

Sorption of Uranium(VI) and Thorium(IV) Ions from Aqueous Solutions by Nano Particle of Ion Exchanger SnO_2

A. Nilchi*, S. Rasouli Garmarodi, T. Shariati Dehaghan

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

Abstract: Due to the extensive use of nuclear energy and its replacement for fossil fuels in recent decades, the radioactive waste production has increased enormously. The vast majority of the radioactive wastes products, are in the liquid form and consequently their treatment is of great importance. In this paper, tin oxide with nano-structure has been synthesized as an absorbent by the homogenous sedimentation method in the presence of urea, so as to adsorb uranium(VI) and thorium(IV) ions. The results obtained from the XRD, SEM and nitrogen adsorption/desorption analyses on the tin oxide sample showed the cassiterite structure with an average particle size of 30 nanometer and a specific surface area of 27.5 m^2/g . The distribution coefficients of uranium and thorium were studied by means of batch method. The effects of different variables such as pH and time of contact between the exchanger and solution were investigated and the optimum conditions for sorption of these ions were determined.

Keywords: Tin Oxide Nano-Particles, Uranium, Thorium, Homogenous Sedimentation

*email: anilchi@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۳۰



۱. مقدمه

اورانیم در طبیعت به صورت رادیوایزوتوپ‌های ^{238}U و ^{235}U یافت می‌شود. اورانیم ممکن است از طریق تنفس یا بلع و یا در موارد استثنایی از طریق شکاف پوست وارد بدن شود. اورانیم از طریق پوست جذب نمی‌شود و ذرات آلفای گسیلیده از این عنصر نمی‌تواند در پوست نفوذ کند. بنابراین اورانیم در خارج از بدن نمی‌تواند به اندازه‌ی اورانیم در داخل بدن خطرناک باشد. اگر اورانیم وارد بدن شود ممکن است موجب سرطان شده و یا به کلیه‌ها آسیب برساند. تمام ترکیبات اورانیم سمی و پرتوزا هستند و منجر به صدمات جبران‌ناپذیر کلیوی شده و در موارد حاد موجب از کار افتادگی کلیه و در نهایت مرگ موجود زنده می‌شوند. ترکیبات اورانیم به شدت جذب روده و ریه می‌شوند و خطرات پرتوشناختی آن باقی می‌ماند. چنانچه ترکیبات اورانیم از طریق تنفس وارد بدن شوند در ریه‌ها رسوب می‌کنند و سپس تجزیه شده و از طریق جریان خون به کلیه‌ها می‌رسند [۱]. برخلاف اورانیم، توریم و ترکیبات و آلیاژهای آن مصارف گسترده‌ای دارند. نگهداری و جابه‌جایی توریم دو خطر عمده دارد. اولاً، چنانچه توریم از طریق بلع وارد بدن شود تابش آلفای آن خطرناک است و می‌تواند منجر به صدمه به مغز استخوان و یا مرگ شود. خطر دیگر مربوط به پرتو گاما است که از آن گسیل می‌شود.

با توجه به استفاده‌ی روز افزون از اورانیم و توریم در صنعت و سمیت آن‌ها، توانایی تشخیص و تعیین دقیق مقدار آن‌ها در محیط اطراف و کنترل آلودگی ناشی از آن‌ها امری حیاتی و مهم می‌باشد. برای جداسازی انتخابی این یون‌ها از محلول‌های رقیق آبی و نمونه‌های پساب، شیوه‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به پیش تغلیظ، استخراج با حلال، الکترولیز و تبادل یون اشاره کرد. بسیاری از این روش‌ها غیراقتصادی، پرهزینه، دارای بازده پایین برای حذف یون‌ها و همراه با تولید آلودگی‌های ثانویه بوده و برای غلظت‌های پایین غیرمفیدند. استخراج فاز جامد روشی است که معمولاً برای پیش تغلیظ و جداسازی ذرات آلی و غیرآلی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به دلیل غنی‌سازی بالاتر و عدم حضور امولسیون برای نمونه‌های خطرناک ایمن‌تر است [۲، ۳ و ۴]. امروزه از جاذب‌های مختلف برای تصفیه‌ی پسمان‌های مایع استفاده می‌شود. اما با توجه به لزوم

جداسازی بیش‌ترین مقدار ممکن مواد پرتوزا، پژوهش در زمینه‌ی تهیه‌ی جاذب‌های جدید و بررسی ویژگی‌های آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله تهیه‌ی نانو ذرات قلع اکسید و کاربرد آن‌ها در جذب یون‌های اورانیم و توریم مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

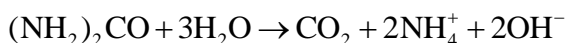
۲. روش تحقیق

۲.۱. مواد شیمیایی و دستگاه‌ها

کلیه‌ی واکنش‌گرهای شیمیایی مورد استفاده با درجه‌ی خلوص تجزیه‌ای بوده و از شرکت‌های آلدریچ یا مرک تهیه شدند. برای تعیین ساختار بلوری جاذب‌ها از پراش‌سنج مدل Philips PW1130 استفاده گردید. تعیین غلظت عناصر با طیف‌سنج نشر اتمی پلاسما‌ی جفت شده‌ی القایی (ICP-AES) مدل Perkin-Elmer 5500 به انجام رسید. از میکروسکوپ الکترونی روبشی Cambridge S360 برای بررسی اندازه‌ی ذرات، شکل و ساختار نمونه‌ی تهیه شده، بهره گرفته شد. سطح تماس و مقدار میانگین قطر حفرات ماده‌ی ساخته شده با استفاده از تخلخل‌سنج مدل Quantachrome NovaWin2 تعیین شد.

۲.۲. روش ساخت نانو ذرات قلع دی‌اکسید

برای تهیه‌ی نانو ذرات قلع دی‌اکسید، محلول‌های آبی تتراکلرید قلع پنج آبه و اوره به غلظت به ترتیب، ۰/۰۵ و ۰/۱ مول بر لیتر با یکدیگر مخلوط و به آرامی تا رسیدن به دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت داده شد و این حرارت‌دهی برای مدت ۸ ساعت در همین دما ادامه یافت. در تمامی این مدت محلول به آرامی هم‌زده شد. در این دما اوره به تدریج تجزیه شده و غلظت یون‌های آمونیم و کربنات در محلول افزایش یافت



با توجه به تجزیه‌ی تدریجی اوره، pH محیط به آرامی و به صورت همگن افزایش یافت که موجب پیدایش و رشد یکسان ذرات با ابعاد نانومتر شد. در ادامه، محلول به کمک حمام آب و یخ، سرد گردید. برای حذف یون‌های کلر، رسوب حاصله با آب



محتوی ۲۰ میلی گرم بر لیتر از یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) در یک هم‌زن ترموستاتی با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۵ تا ۳۰ دقیقه در تماس قرار داده شد.

۵.۲ بررسی اثر غلظت یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) بر میزان جذب آن‌ها

۲۰ میلی لیتر از محلول یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) به غلظت‌های ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر همراه با ۰٫۱ گرم قلع دی اکسید در هم‌زن با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه قرار داده شد. سایر پارامترها ثابت نگه داشته شد. پس از گذشت ۵ ساعت، ضریب توزیع یون‌های توریم (IV) و اورانیم (VI) از رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید.

۶.۲ تأثیر دما بر میزان جذب اورانیم (VI) و توریم (IV) ۲۰ میلی لیتر از محلول یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) به غلظت ۲۰ میلی گرم بر لیتر و $pH=6$ همراه با ۰٫۱ گرم از نانو ذرات قلع دی اکسید در دماهای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درجه سانتی گراد در هم‌زن با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ ساعت قرار داده شد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ ساختار جاذب ساخته شده

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود الگوی پراش پرتو ایکس نانو ذرات قلع دی اکسید ساخته شده دارای قله‌های مشخصی در صفحات [۱۱۰]، [۱۰۱]، [۲۰۰]، [۲۱۱]، [۲۲۰]، [۳۱۰]، [۱۱۲]، [۳۰۱] است [۵].

ریزننگار الکترونی جاذب تهیه شده (شکل ۲) نشان داد که توزیع اندازه‌ی ذرات یکنواخت است. در واقع، تجزیه‌ی تدریجی اوره و افزایش یکنواخت pH محیط از بهم چسبیدگی و کلوخه شدن نانو ذرات جلوگیری کرده است.

سطح ویژه و قطر متوسط حفرات جاذب سنتز شده با استفاده از روش تخلخل‌سنجی بر پایه‌ی تئوری بروناور-امت-تیلر^(۱)، به ترتیب، برابر با ۲۷٫۵۵ مترمربع بر گرم و ۲۰٫۰۴ نانومتر تعیین گردید.

دو بار تقطیر شده، شسته شد و پس از هر مرحله شستشو، جداسازی رسوب از محلول با استفاده از سانتریفیوژ در سرعت ۸۵۰۰ دور بر دقیقه و در مدت ۳۰ دقیقه به انجام رسید. فرایند شستشو و جداسازی رسوب با استفاده از سانتریفیوژ پنج بار تکرار شد.

در نهایت، عدم حضور یون‌های کلر در محلول، با اضافه نمودن نقره نیترات به کسری از محلول و عدم تشکیل اضافه رسوب سفیدرنگ نقره کلرید مورد بررسی قرار گرفت. پس از حذف کامل یون‌های کلر، رسوب به دست آمده به مدت ۲۴ تا ۷۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه‌ی سانتی گراد در آون قرار داده شد. در ادامه پودر خشک شده، در مدت ۲ ساعت و در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد درون کوره تکلیس شد. با توجه به مطالعات انجام شده، افزایش غلظت اولیه‌ی محلول قلع تراکلرید و نیز افزایش دمای تکلیس، باعث افزایش اندازه‌ی نانو ذرات تولید شده می‌گردد.

۳.۲ بررسی تأثیر pH بر ضریب توزیع یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV)

برای تعیین pH بهینه‌ی جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV)، ۰٫۱ گرم جاذب و ۲۰ میلی لیتر محلول حاوی ۲۰ میلی گرم بر لیتر از یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) با pH های مختلف از ۱ تا ۷ در هم‌زن ترموستاتی با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه و به مدت ۵ ساعت هم‌زده شد. غلظت تعادلی یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) در محلول اندازه‌گیری و ضرایب توزیع با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه گردید

$$K_d = \frac{C_i - C_f}{C_f} \times \frac{V}{M} \quad (1)$$

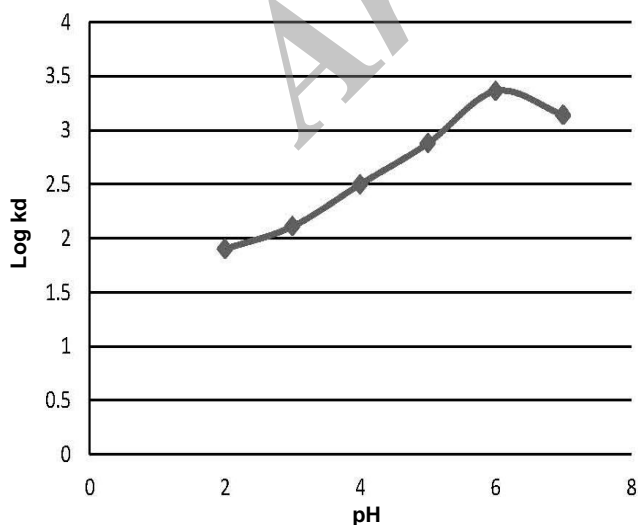
که در آن C_i و C_f ، به ترتیب، غلظت (میلی گرم بر لیتر) اولیه و نهایی یون فلزی در محلول، V حجم محلول بر حسب لیتر و M جرم جاذب بر حسب گرم است.

۴.۲ بررسی اثر زمان تماس بر میزان جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV)

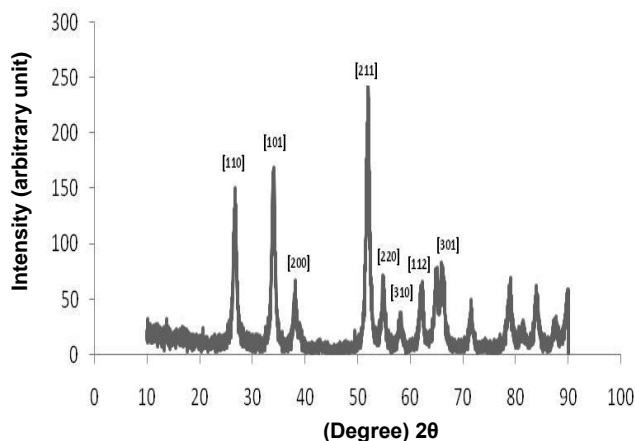
برای بررسی تأثیر زمان تماس بر میزان جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV)، ۰٫۱ گرم جاذب با ۲۰ میلی لیتر از محلول



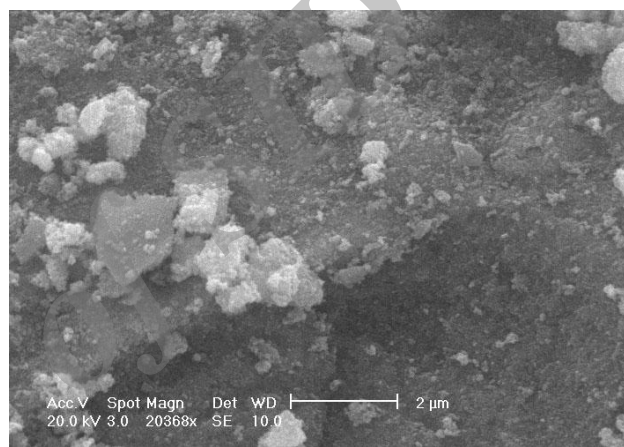
۵ به شکل $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+}$ ، و در pHهای بالاتر از ۵ به شکل $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_6^+$ ، در محلول حضور دارند و همین تغییر شکل میزان جذب یون‌های اورانیم (VI) را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۷]. با تغییر pH محیط شکل یون‌های توریم (IV) در محلول نیز تغییر می‌کند. در pHهای اسیدی یون‌های توریم (IV) به شکل $\text{Th}(\text{OH})_2^{2+}$ و در pHهای بالاتر به شکل $\text{Th}_2(\text{OH})_6^{4+}$ در می‌آیند [۸]. با افزایش pH از ۲ تا ۷، به علت تغییر خواص سطح نانو ذرات قلع دی اکسید و نیز تغییر شکل یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) موجود در محلول، میزان جذب یون‌های مذکور به وسیله نانو ذرات قلع دی اکسید افزایش یافته و در $\text{pH}=6$ به بیشینه مقدار خود رسیده است. در pHهای پایین‌تر به دلیل رقابت بین پروتون‌ها و یون‌های فلزی میزان جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) کم‌تر است. هم‌چنین یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) با تغییر pH رفتار مشابهی نشان می‌دهند. بالاتر از ۷ به دلیل رسوب یون‌های اورانیم (VI) و امکان هیدرولیز قلع دی اکسید مورد بررسی قرار نگرفته است [۹ و ۱۰]. نتایج به دست آمده برای تغییرات درصد جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) با زمان، در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر میزان جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) به ترتیب در زمان‌های ۲۰۰ و ۱۸۰ دقیقه پس از شروع واکنش جذب اتفاق می‌افتد. بالا بودن آهنگ جذب در ابتدای واکنش به علت وجود جای‌گاه‌های جذب بیش‌تر بر روی سطح جاذب است.



شکل ۳. تغییرات لگاریتم ضریب توزیع اورانیم با pH محلول.



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس نانو ذرات قلع دی اکسید ساخته شده.



شکل ۲. ریزنگار الکترونی نانو ذرات ساخته شده (بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰۰).

۲.۳ اثر پارامترهای مختلف بر میزان جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV)

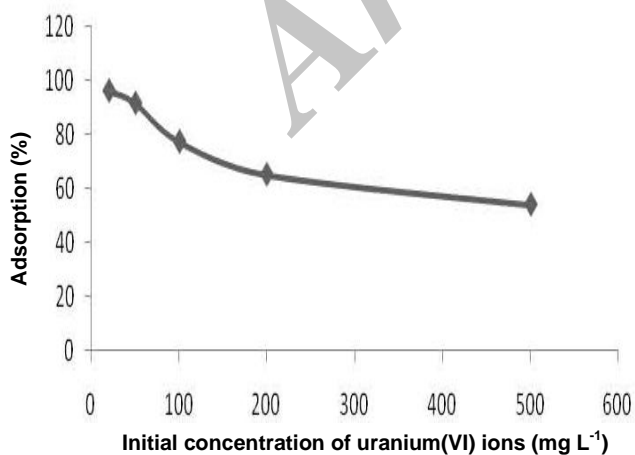
pH محیط نقش مهمی در میزان جذب یون‌های فلزی بر روی جاذب دارد. تغییرات ضریب توزیع یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) با تغییر pH در محدوده‌ی ۲ تا ۷ در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. با توجه به این که نقطه‌ی ایزوالکتریک نانو ذرات قلع دی اکسید تقریباً در $\text{pH}=7$ قرار دارد، با افزایش pH از ۲ تا ۷ و نزدیک شدن به نقطه‌ی ایزوالکتریک به دلیل تغییر خواص سطح و تبدیل نانو ذرات قلع دی اکسید به تبادل‌گر کاتیونی، توانایی جذب آن برای خارج‌سازی یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) از محلول افزایش یافته است [۶]. تغییرات pH از طریق تغییر شکل یون‌های اورانیم (VI) در محلول، سبب تغییر در میزان جذب آن‌ها به وسیله نانو ذرات قلع دی اکسید می‌شود. یون‌های اورانیم (VI) در محدوده‌ی pHهای پایین‌تر از



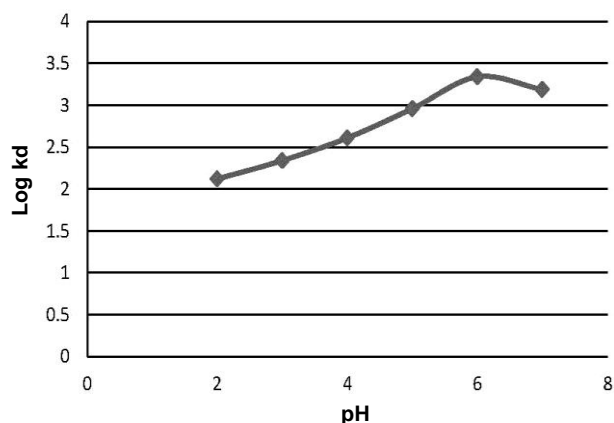
جایگاه‌های جذب موجود بر روی جاذب با افزایش مقدار یون‌های فلزی جاذب اشباع شده و جذب یون‌های اضافی انجام نمی‌شود. ایزوترم‌های جذب، معادلاتی برای تشریح حالت تعادلی جزء جذب شونده بین فاز جامد و سیال می‌باشند. توصیف ایزوترم‌های جذب به دو روش کمی و کیفی انجام می‌شود. در روش کمی مهم‌ترین ایزوترم‌ها عبارت‌اند از ایزوترم‌های لانگمویر^(۱) و فرن‌دلیچ^(۲). در این ایزوترم‌ها با استفاده از درجه‌ی رگرسیون و ثابت ایزوترم‌ها، می‌توان به توانایی و ظرفیت جاذب در جذب یون‌های فلزی پی برد. با توجه به نتایج به دست آمده برای جذب یون‌های فلزی اورانیم و توریم در شکل‌های ۹ و ۱۰، جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) به وسیله نانو ذرات قلع دی اکسید از ایزوترم فرن‌دلیچ تبعیت می‌کند.

در ایزوترم فرن‌دلیچ، جذب به صورت چند لایه بوده و بسته به نوع جاذب لایه‌های مختلفی از فلز بر روی آن جذب می‌گردد. شکل ۱۱ نحوه‌ی جذب فلز بر روی جاذب در حالت‌های تک‌لایه‌ای و یا چندلایه‌ای را نشان می‌دهد.

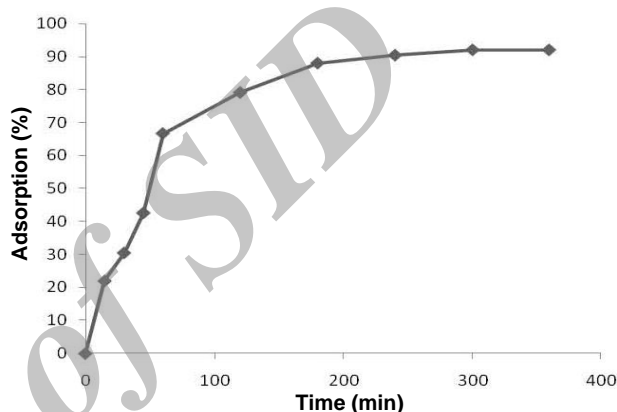
با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ با افزایش دما در محدوده‌ی ۱۵ تا ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد درصد جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) افزایش یافته و پس از آن با افزایش دما تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد میزان جذب تغییر نکرده است. با توجه نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، برای جذب مطلوب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) به وسیله‌ی نانو ذرات قلع دی اکسید، مناسب است.



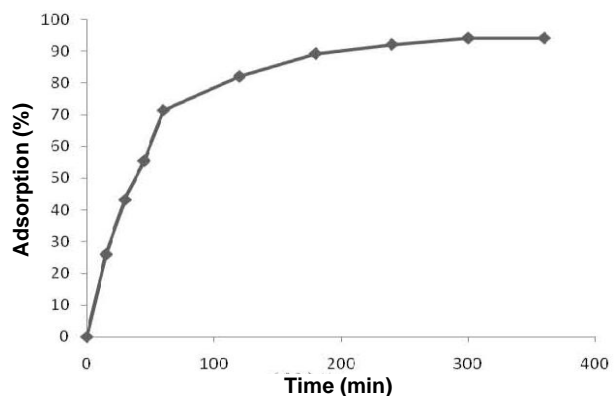
شکل ۷. اثر افزایش غلظت اولیه یون‌های اورانیم (VI) بر میزان جذب آن‌ها.



شکل ۴. تغییرات لگاریتم ضریب توزیع توریم با pH محلول.

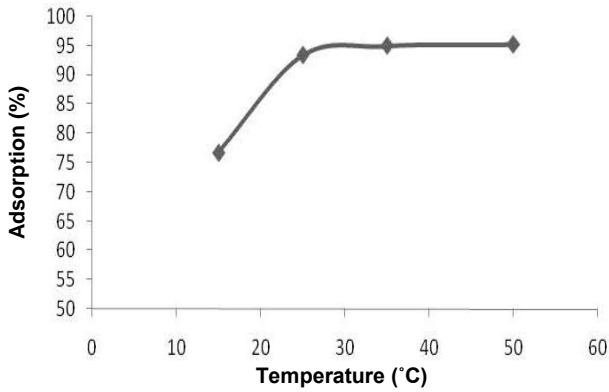


شکل ۵. تغییرات درصد جذب اورانیم با زمان.

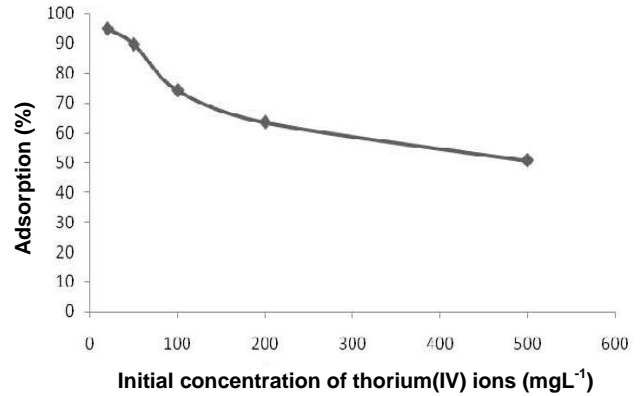


شکل ۶. تغییرات درصد جذب توریم با زمان.

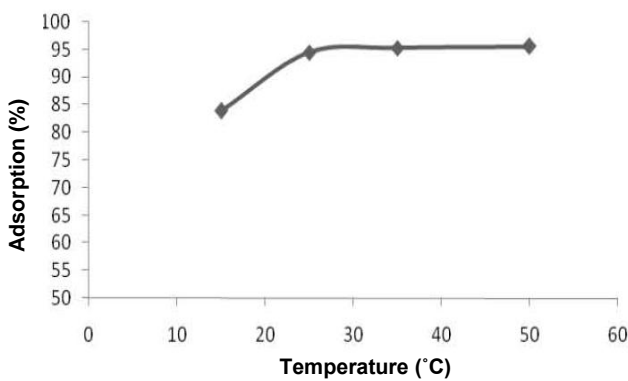
نتایج حاصل از بررسی اثر غلظت اولیه یون‌های فلزی اورانیم و توریم بر درصد جذب آن‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. براساس این شکل‌ها با افزایش غلظت اولیه یون فلزی میزان درصد جذب آن کاهش می‌یابد. این پدیده را می‌توان چنین توصیف کرد که با توجه به ثابت بودن تعداد



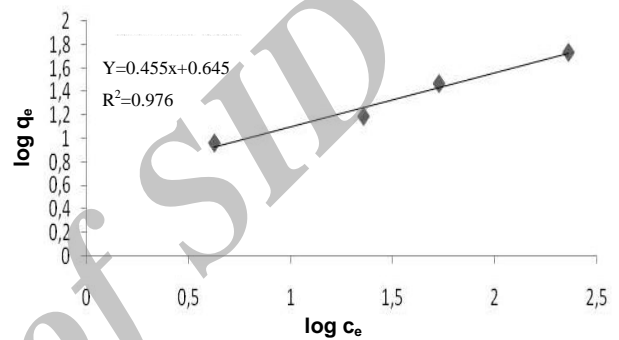
شکل ۱۲. اثر تغییر دما بر درصد جذب اورانیم.



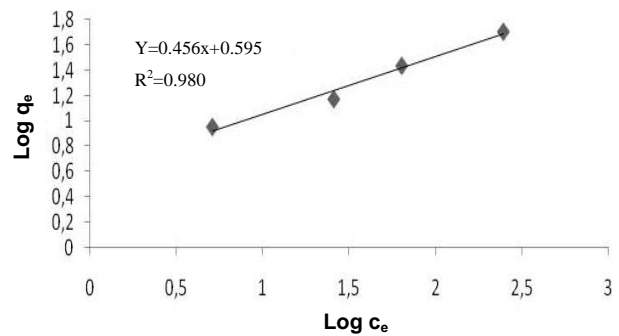
شکل ۸. اثر افزایش مقدار اولیه یون‌های توریم بر میزان جذب آن‌ها.



شکل ۱۳. اثر تغییر دما بر درصد جذب توریم.



شکل ۹. ایزوترم فرندلیچ برای جذب اورانیم.



شکل ۱۰. ایزوترم فرندلیچ برای جذب توریم.

۳.۳ پارامترهای ترمودینامیکی واکنش جذب

پارامترهای ترمودینامیکی واکنش جذب اورانیم و توریم بر روی نانو ذرات قلع دی اکسید از رابطه‌ی زیر محاسبه شد

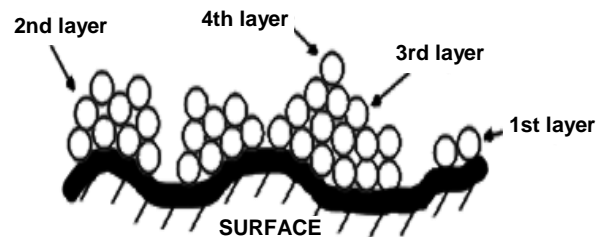
$$\ln K_d = \frac{-\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (2)$$

که در آن ΔH° (kJ/mol) تغییرات آنتالپی، ΔS° (kJ/k mol) تغییرات آنتروپی و T (k) دمای واکنش می‌باشد.

با توجه به رابطه‌ی (۲) از رسم نمودار $\ln K_d$ بر حسب $1/T$ خط راستی به دست می‌آید (شکل ۱۴) که شیب و عرض از مبدأ آن، به ترتیب، مقادیر ΔH° و ΔS° را به دست می‌دهند. انرژی آزاد گیبس، ΔG° از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (3)$$

با توجه به مقدار مثبت ΔH° و مقدار منفی ΔG° (جدول ۱) فرایند جذب گرماگیر و خودبه‌خودی است.



شکل ۱۱. جذب تک‌لایه‌ای و چندلایه‌ای.

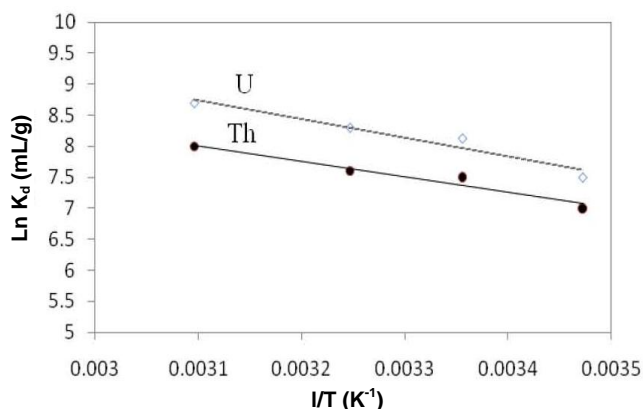


پی‌نوشت‌ها:

۱. BET
۲. Langmuir
۳. Freundlich

References:

1. T. Prasada Rao, P. Metilda, J. Mary Gladis, "Preconcentration techniques for uranium(VI) and thorium (IV) prior to analytical determination—an overview," *Talanta*, 68, 1047–1064 (2006).
2. Ch. Siva Kesava Raju, M.S. Subramanian, "Sequential separation of lanthanides, thorium and uranium using novel solid phase extraction method from high acidic nuclear wastes," *Journal of Hazardous Materials* 145, 315-322 (2007).
3. Ch. Siva Kesava Raju, M.S. Subramanian, "A novel solid phase extraction method for separation of actinides and lanthanides from high acidic streams," *Separation and Purification Technology*, 55, 16-22 (2007).
4. A. Fujiwara, Y. Kameo, A. Hoshi, T. Haraga, M. Nakashima, "Application of extraction chromatography to the separation of thorium and uranium dissolved in a solution of high salt concentration," *Journal of Chromatography, A*, 1140, 163–167 (2007).
5. JCPDS card of SnO₂, card no. 41-1445.
6. C. Liang, Y. Shimizu, T. Sasaki, N. Koshizaki, "Synthesis of Ultrafine SnO_{2-x} Nano crystals by Pulsed Laser-Induced Reactive Quenching in Liquid Medium," *Journal of Physical Chemistry B* 107, 9220-9225 (2003).
7. T.P. Rao, P. Metilda, J.M. Gladis, "Preconcentration techniques for uranium (VI) and thorium (IV) prior to analytical determination," *Talanta* 68, 1047-1064 (2006).
8. K.A. Krau, R.W. Holmbe, "Semiannual Progress Report," Oak Ridge National Laboratory, Chemistry Division, Oak Ridge, Tenn. April (1954).
9. T.S. Anirudhan, P.G. Radhakrishnan, "Improved performance of a biomaterial-based cation exchanger for the adsorption of uranium(VI) from water and nuclear industry wastewater," *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 250–257 (2009).
10. D.K. Bhattacharyya, N.C. Dutta, A. De, "Adsorption of several tracer cations and separation of ²³⁴Th from ²³⁸U and ^{113m}In from ¹¹³Sn on tin dioxide," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 140, 121-131 (1990).



شکل ۱۴. نمودار تغییرات $\ln K_d$ بر حسب $1/T$ برای جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) به وسیله یون‌های نانو ذرات قلع دی اکسید.

جدول ۱. پارامترهای ترمودینامیکی برای جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV)

عناصر	U	Th
ΔH° (kJ/mol)	۲۵,۱۶۶	۲۰,۸۰۱
ΔS° (kJ/k mol)	۰,۱۵۱	۰,۱۳۱
دما (K)	- ΔG° (kJ/mol)	
۲۸۸	۱۸,۳۲	۱۶,۹۲
۲۹۸	۱۹,۸۳	۱۸,۲۴
۳۰۸	۲۱,۳۴	۱۹,۵۴
۳۲۳	۲۳,۶۱	۲۱,۵۱

۴. نتیجه‌گیری

نانو ذرات قلع دی اکسید به عنوان جاذب جامد، از طریق ته‌نشینی همگن در حضور اوره ساخته شدند. با افزایش یکنواخت pH محلول، نانو ذرات قلع دی اکسید با توزیع اندازه‌ی یکنواخت و شبکه‌ی بلوری منظم، بدون کلوخه شدن تهیه و به عنوان جاذب برای جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) به کار گرفته شدند. مطالعات تخلخل‌سنجی اندازه‌ی نانو ذرات قلع دی اکسید ساخته شده را ۳۰ نانومتر و سطح ویژه‌ی آن‌ها ۲۷,۵۵ مترمربع بر گرم به دست داد. از مطالعات جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV)، ضرایب توزیع اورانیم و توریم به ترتیب برابر با ۲۲۹۶/۱۵ و ۳۱۶۲/۲۸ میلی لیتر بر گرم تعیین شد که این نشان‌دهنده‌ی آن است که نانو ذرات قلع دی اکسید توانایی جذب یون‌های اورانیم (VI) و توریم (IV) از محلول‌های آبی را دارند. البته اختلاف مقادیر ضرایب توزیع، به اندازه‌ای نیست که بتوان این یون‌ها را به طور کامل از یکدیگر جدا کرد. هم‌چنین پارامترهای ترمودینامیکی بیان‌گر آن است که فرایند جذب اورانیم و توریم گرماگیر است.