



حذف اورانیل به کمک میدان مغناطیسی با استفاده از نانوکامپوزیت مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت

مجتبی باقرزاده^{۱*}، داوود صابری^۲

۱. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

۲. گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، کدپستی: ۸۶۴۸۱۴۶۴۱۱، شهرضا - ایران

*Email: mbagherzadeh@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۹

چکیده

در تحقیق حاضر نانوذرات هیدروکسی آپاتیت مغناطیسی (Fe_3O_4/HAP) به منظور جذب و حذف یون‌های اورانیل برای اولین بار به روش هم‌رسوبی تهیه شدند. برای این کار جاذب‌هایی با نسبت‌های وزنی متفاوت (Fe_3O_4/HAP)، (۱:۱)، (۱:۲)، (۱:۳) و (۱:۵) تهیه شدند. پس از مشخصه‌یابی فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی توانایی آن‌ها در جذب یون اورانیل از طریق سنجش اورانیل به روش طیف‌سنجی جذب ماوراء بنفش - مریی با استفاده از عامل کمپلکس‌کننده آرسنازو (III) پی‌گیری شد. اثر پارامترهای تجزیه‌ای از قبیل دما، pH، مدت تماس، مقدار جاذب، غلظت محلول اورانیل و اثر مزاحمت سایر کاتیون‌ها بر میزان جذب اورانیل توسط جاذب بررسی شد. آزمایشات نشان داد مقدار ۰/۰۱۵ گرم از نمونه Fe_3O_4/HAP (۱:۵)، در pH ۷ و در مدت زمان ۱۵۰ دقیقه بیش‌ترین میزان اورانیل را جذب و حذف می‌کند. نانوذرات تهیه شده در ابعاد 17 ± 2 nm، قادر به جذب اورانیل در غلظت بین ۰/۲-۱۰۰ ppm بوده و بیش از ۹۶٪ اورانیل را حذف می‌نمایند. در دمای $25^\circ C$ ظرفیت جذب 99.82 mg/g به دست آمد. نتایج حاصله توانایی بالای این نانوذرات در جذب و حذف اورانیل و پتانسیل بالای آن‌ها در تصفیه پساب‌های حاوی اورانیل، را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: اورانیل، نانوذرات مغناطیسی، هیدروکسی آپاتیت

Magnetically assisted uranyl removal by using magnetic hydroxyapatite nanocomposite

M. Bagherzadeh^{*1}, D. Saberi²

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran
2. Department of Chemistry, Faculty of Science, Islamic Azad University of Shahreza, Postal Code: 8648146411, Shahreza - Iran

Research Article

Received 19.5.2021, Accepted 31.7.2021

Abstract

Magnetic hydroxyapatite nanoparticles (Fe_3O_4/HAP) are prepared in the present work to remove uranyl ions via coprecipitation method for the first time. The sorbent was prepared with the weight ratio of magnetic nanoparticles to hydroxyapatite (Fe_3O_4/HAP) as (1:1), (1:2), (1:3), and (1:5). After finding physical, chemical, and magnetic features, their ability to absorb uranyl ions was examined via UV-Vis method, measuring the absorbance of element complex with arsenazo (III). The effects of parameters such as temperature, pH, contact time, rate of the adsorbent, the concentration of uranyl, and the effects of interference of other ions on the removal of uranyl were analyzed. Also, the experiments showed that the highest rate of uranyl was absorbed by using 0.015 g Fe_3O_4/HAP (1:5) during 150 min at pH equal to 7. The prepared nanoparticles in 17 ± 2 nm could absorb uranyl in the concentration range of 0.2-100 ppm, eliminating over 96% of uranyl. The absorbing capability of 99.82 mg/g was obtained at $25^\circ C$. The results indicate the high potential of the prepared nano-particles in absorbing and eliminating uranyl and show its capability in the waste water containing uranyl.

Keywords: Uranyl, Magnetic nanoparticles, Hydroxyapatite



۱. مقدمه

وجود آلودگی‌ها در محیط زیست یکی از مشکلات امروزی جوامع بشری است و یکی از مهم‌ترین این آلودگی‌ها فلزات سنگین می‌باشند. میزان فلزات سنگین که در نتیجه‌ی فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی وارد محیط زیست می‌شود رو به افزایش است و این در حالی است که استفاده از این فلزات به عنوان مواد شیمیایی در جوامع امروزی اجتناب‌ناپذیر است. فلزات سنگین در بدن موجودات دریایی انباشته شده و از طریق زنجیره‌ی غذایی به بدن انسان و سایر موجودات هم منتقل می‌شوند. بنابراین حذف یا کاهش غلظت آن‌ها در پساب‌های صنعتی امری ضروری به شمار می‌رود. اورانیم یک آلودگی معمول در بسیاری از تأسیسات صنایع فراوری اورانیم و محل‌های معدن اورانیم می‌باشد. بیش‌ترین مقدار اورانیم از طریق فعالیت‌های اتمی وارد محیط زیست می‌شود، که همین امر باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی نیز می‌شود [۱].

روش‌های مختلف تصفیه بیولوژیکی، طی نیمه دوم قرن بیستم توسعه یافت و تصفیه اصولی پساب از اواخر قرن ۱۸ و اوایل قرن ۱۹ میلادی آغاز شد. تصفیه‌ی پساب‌ها در صنایع با روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی امکان‌پذیر است. مطالعه خواص پساب به منظور تعیین مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی پساب، غلظت اجزاء تشکیل‌دهنده پساب و بهترین روش کاهش غلظت مواد آلوده موجود در پساب، صورت می‌پذیرد. برخی از مهم‌ترین روش‌های گزارش شده شامل رسوب شیمیایی، انعقاد- رسوب‌دهی و تعویض یونی می‌شوند، اما این روش‌ها یا لجن زیادی تولید می‌کنند و یا برای پاک‌سازی آب‌هایی با غلظت پایین فلز سنگین کارآمد نیستند [۲، ۳]. روش‌های دیگری مانند فیلتراسیون غشایی، الکترودیالیز، الکترودیالیز غشایی و ترسیب الکتروشیمیایی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج آن‌ها گزارش شده است. اما در اکثر این روش‌ها، از مواد گران‌قیمت استفاده می‌شود و هزینه‌های اجرایی آن‌ها به قدری بالا است که برای کشورهای در حال توسعه مناسب نیستند [۲، ۴]. از سوی دیگر، جذب سطحی روشی مقرون به صرفه است که معمولاً در آن از مواد ارزان‌قیمت و با کارایی بالا استفاده می‌شود و روشی آسان در میان فرایندهای فیزیکی- شیمیایی محسوب می‌شود [۵]. روش‌های متعددی تاکنون برای جذب و بازیافت اورانیل مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶، ۷]. در این روش‌ها از مواد جاذب مختلفی استفاده شده است. توسعه جاذب‌های ارزان‌قیمت و با ظرفیت جذب بالا، یکی از پارامترهای مهم در تجاری‌سازی فرایند جذب سطحی است. تاکنون جاذب‌های مختلفی مانند کربن فعال [۸]، رس [۹]،

آلومینای فعال [۱۰]، سیلیکا [۱۱]، زئولیت [۱۲] و هیدروکسی آپاتیت^۱ (HAP) [۱۳] جهت حذف فلزات سنگینی از آب و پساب مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در میان روش‌های مختلف حذف U(VI)، روش استخراج فاز جامد به عنوان روشی کارآمد و امیدوارکننده، همواره مطرح بوده است [۱۴-۱۶]. نانو هیدروکسی آپاتیت با وجود منابع گسترده، غیرسمی بودن و کاربردهای متعدد با راندمان بالا، در جداسازی رادیونوکلیدها از محلول آبی، یکی از گزینه‌های اصلی برای استفاده در روش استخراج فاز جامد می‌باشد. اخیراً نیز گزارشی در مورد جذب U(VI) با نانوذرات هیدروکسی آپاتیت دوپ شده با Ag(I) و Ca(II) منتشر شده است [۱۷]. بعلاوه، از مزایای استفاده از HAP در حذف اورانیل واکنش شیمیایی بین U(VI) با HAP در محلول می‌باشد [۱۸]. اما، اندازه کوچک ذرات جاذب‌های نانو مقیاس جداسازی آن‌ها را از فاز محلول با مشکل روبه‌رو می‌کند و برای جدا نمودن آن‌ها از فاز واکنش نیاز به فیلتراسیون یا سانتریفوژ را ضروری می‌سازد.

بررسی متون نشان می‌دهد، نانوذرات مغناطیسی (Fe_3O_4) به دلیل داشتن سرعت اتصال بالا، حلالیت خوب، حرکت سریع، ورود راحت به سلول، ناشی از ابعاد نانومتری و نسبت سطح/حجم بالا و کنترل عالی رفتار تجمع ناشی از خاصیت مغناطیسی، به طور گسترده‌ای در علوم مختلف از جمله در علم شیمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۹]. در اکثر مواقع جهت اتصال گزینشی، نیاز مبرم به اصلاح نانوذرات مغناطیسی سنتز شده احساس می‌شود. برای رفع این مشکلات می‌توان نانوذرات مغناطیسی را به‌وسیله‌ی پوششی پایدار و انتخاب‌گر اصلاح نمود [۲۰، ۲۴]. برای رسیدن به این هدف نانوذرات مغناطیسی توسط پوشش‌های آلی یا معدنی اصلاح می‌گردند [۶]. بررسی متون علمی نشان داد که یکی از مواد جاذب با ظرفیت بالا در جذب اورانیم هیدروکسی آپاتیت می‌باشد. اما تاکنون از ترکیب نانوذرات مغناطیسی با هیدروکسی آپاتیت برای جذب و حذف یون اورانیل استفاده نشده است. هدف از انجام این پژوهش تهیه هیدروکسی آپاتیت مغناطیسی به روش هم‌رسوبی و بررسی عوامل مؤثر بر میزان جذب و توانایی آن در حذف اورانیل از محیط آبی می‌باشد.

۲. بخش تجربی

۱۰۲ مواد شیمیایی

مواد شیمیایی نظیر نیترات اورانیم شش‌آبه، آرسنازو، کلرید آهن (III) شش‌آبه، کلرید آهن (II) چهارآبه، استیک اسید، نیترات کلسیم و پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات با درجه خلوص تجزیه‌ای، از شرکت مرک تهیه شدند.



بالن به شدت تکان خورد). محلول را توسط آب مقطر به حجم رسانده و به شدت تکان داده شد. میزان جذب محلول‌ها در طول موج ۶۵۰ نانومتر بعد از ۱۵ دقیقه یادداشت شد [۲۵]. برای بررسی جذب یون اورانیل به این گونه عمل شد که ابتدا نمونه محلول اورانیم تهیه شد. با افزودن HCl (۲ مولار) یا NaOH (۲ مولار) در pH مدنظر تنظیم شد. مقدار مشخصی از جاذب (Fe_۳O_۴/HAP) به ظرف حاوی محلول اورانیم اضافه شد. پس از اختلاط در زمان مشخص جاذب با استفاده از یک آهن‌ربای دائمی از محیط واکنش جدا شد. در ادامه غلظت یون اورانیل باقی‌مانده با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتری به روش شرح داده شده در فوق، میزان جذب یون اورانیل پی‌گیری شد.

۳. نتایج

۱.۳ مشخصه‌یابی نانومواد تهیه شده

نانوذرات حاصله به روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی نظیر XRD، SEM، TEM، FTIR و VSM مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل ۱ به الگوی پراش اشعه X از نانوذرات Fe_۳O_۴/HAP با نسبت‌های وزنی (۱:۱)، (۱:۲)، (۱:۳) و (۱:۵) ارایه شده‌اند. با توجه به قله‌های مشاهده شده در شکل ۱ و مقایسه آن‌ها با الگوهای پراش Fe_۳O_۴ [۲۴] و HAP [۲۵] در مراجع می‌توان ظهور قله‌ها در ۲θ های ۳۰، ۵۷ و ۶۲ درجه را به صفحات بلوری (۲۲۰)، (۵۱۱) و (۴۴۰) ذرات Fe_۳O_۴ و قله‌های ظاهر شده در ۲θ های ۱۰، ۲۵٫۸، ۲۸٫۶، ۳۲٫۷، ۳۴ و ۵۰ درجه را به ترتیب به صفحات بلوری (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۲۱۰)، (۳۰۰)، (۲۰۲)، (۳۱۰)، (۲۱۳) هیدروکسی آپاتیت متناظر نمود [۲۶]. بنابراین در این کار ذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت Fe_۳O_۴/HAP به طور موفقیت‌آمیز از ترکیب دو ذرات مغناطیسی Fe_۳O_۴ و هیدروکسی آپاتیت HAP سنتز شده‌اند. شکل ۲، ریخت‌شناسی و توزیع اندازه نانوذرات Fe_۳O_۴/HAP سنتز شده را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که نانوذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت به صورت نامنظم متراکم شده‌اند و تراکم بالای این نانوذرات سبب شده که دارای سطحی ناصاف و متخلخل باشد [۲۷]. در شکل سمت چپ داخل شکل، تصویر TEM از نانو ذرات دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است، طی فرایند تهیه نانو ذرات، اندازه ذرات در حد نانومتر (۱۷ nm) باقی‌مانده است، که این امر در فرایند جذب بسیار اهمیت دارد و باعث افزایش میزان جذب توسط ذرات جاذب می‌شود.

۲.۲ سنتز نانوذرات مغناطیسی (Fe_۳O_۴)

نانوذرات مغناطیسی (Fe_۳O_۴) به روش هم‌رسوبی تهیه شدند [۲۴].

۳.۲ سنتز نانوذرات هیدروکسی آپاتیت (HAP)

برای تهیه HAP، ابتدا اسیداستیک را در یک بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته سپس کلسیم نیترات و پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات را به آن اضافه کرده حل می‌نماییم و به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول به مدت ۳۰ دقیقه به هم‌زده شد. در مرحله بعد NaOH ۲ مولار به صورت قطره قطره به محلول مرحله قبل اضافه شد تا pH محلول به ۱۳ برسد. سپس سوسپانسیون حاصل در دمای ۳۷ °C به شدت به هم خورده و پس از گذشت شش ساعت نانو ذرات سفیدرنگ حاصله، چهار بار توسط آب دوبار تقطیر شسته و جدا شدند. نانوذرات حاصله (HAP) نیز به عنوان جاذب مورد استفاده قرار گرفتند.

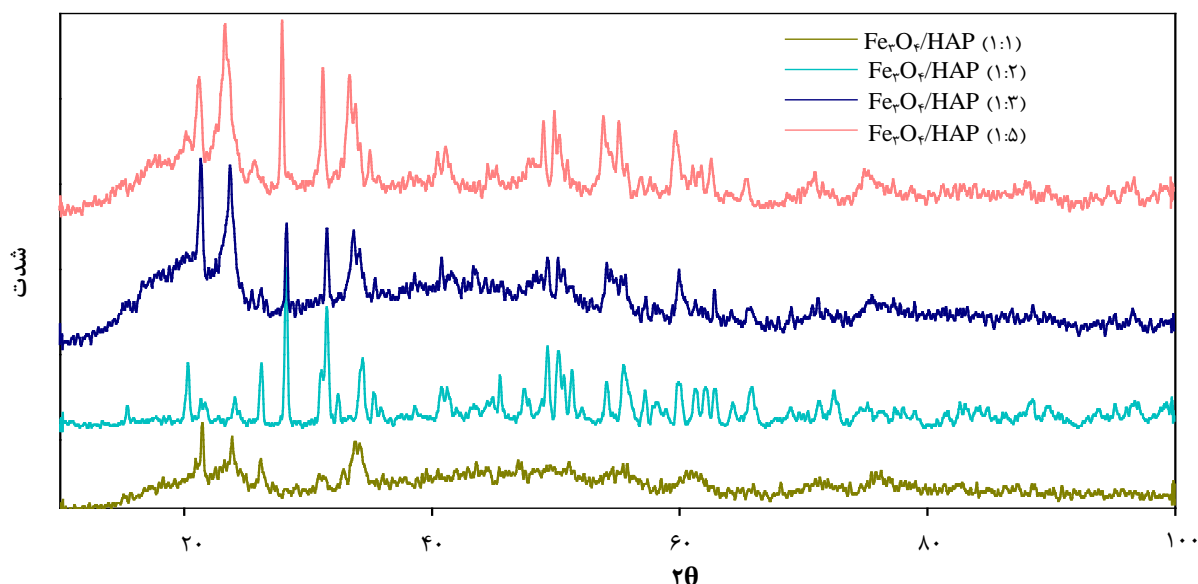
۴.۲ سنتز نانوذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت (Fe_۳O_۴/HAP)

بعد از سنتز نانوذرات هیدروکسی آپاتیت، هدف مغناطیسی کردن این ذرات توسط نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن (Fe_۳O_۴) با نسبت‌های وزنی متفاوت بود. برای این کار مقادیر مشخصی از نانوذرات مغناطیسی Fe_۳O_۴ تهیه شده در مراحل قبل به محلول تهیه شده در مرحله اول ۲-۲ اضافه شد و سوسپانسیون حاصله به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. سپس قطره قطره محلول NaOH ۲ مولار به سوسپانسیون مرحله قبل اضافه تا تا pH آن به ۱۳ برسد. زمانی که pH محلول به ۱۳ رسید محلول ۶ ساعت در دمای ۳۷ °C درجه نگه داشته شد. نانو ذرات حاصله سه بار با آب دوبار تقطیر شسته و توسط یک آهن ربای دائمی جدا شدند.

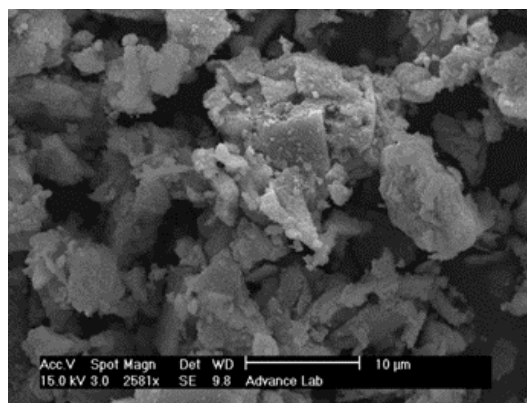
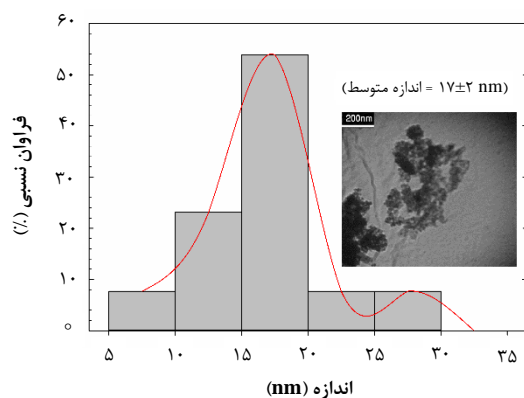
۵.۲ روش کار

غلظت یون اورانیل در محلول به روش اسپکتروفوتومتری تعیین شد. برای این کار ابتدا از محلول اورانیم ۵۰ ppm به ترتیب حجم‌های ۰، ۰٫۱، ۰٫۲۰، ۰٫۴۰، ۰٫۶۰، ۰٫۸۰ و ۱٫۰ میلی‌لیتر برداشته و به بالن‌های ۲۵ میلی‌لیتری منتقل گردید. سپس به هر بالن ۱ قطره معرف تیمول‌بلو اضافه شد. با افزودن HCl (۱ مولار) یا NaOH (۱ مولار) رنگ محلول داخل بالن‌ها را به رنگ قرمز کم‌رنگ تنظیم، سپس به ترتیب به آن ۱٫۰ میلی‌لیتر بافر کلرو استیک‌اسید، ۱٫۰ میلی‌لیتر محلول EDTA و ۱٫۰ میلی‌لیتر محلول آرسنازو افزوده شد (در هر مرحله‌ی افزایش





شکل ۱. الگوهای پراش پرتوی ایکس $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ با نسبت‌های وزنی (۱:۱)، (۱:۲)، (۱:۳) و (۱:۵).



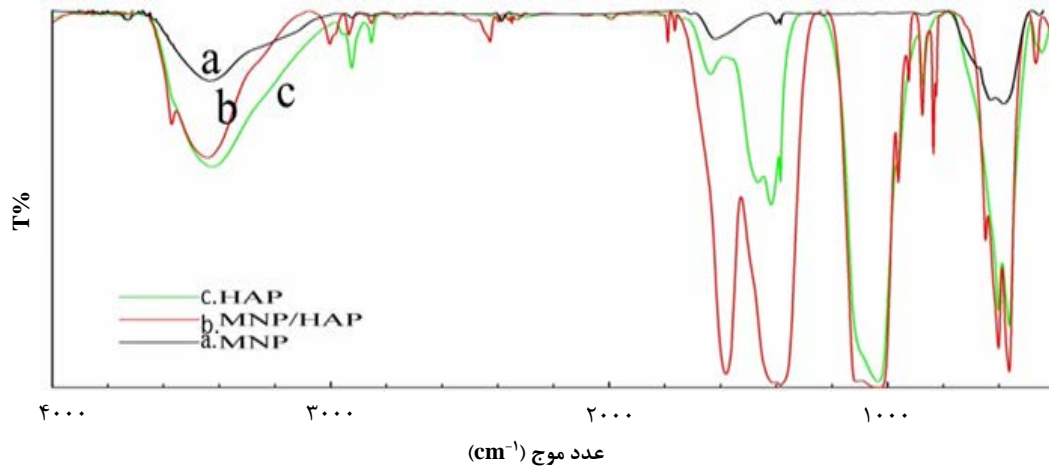
شکل ۲. تصویر SEM (سمت راست با بزرگ‌نمایی ۱۰ میکرومتر) و نمودار توزیع اندازه ذرات حاصله از تصویر TEM (بزرگ‌نمایی ۲۰۰ نانومتر) از نمونه $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ با نسبت (۱-۵).

شده است. پیک‌های مذکور در طیف ذرات مغناطیسی مشاهده نشده است. پیک‌های ظاهر شده در طیف‌های شکل ۳ در حدود $3500\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ مربوط به وجود اندکی آب در نمونه‌ها می‌باشد [۲۸].

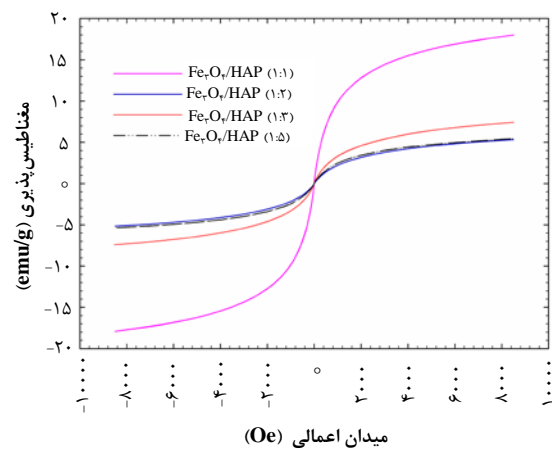
از دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM) برای تعیین ویژگی مواد مغناطیسی مختلف استفاده می‌شود. بر اساس منحنی‌های VSM به دست آمده در دمای اتاق، می‌توان رفتار مغناطیسی این نانوذرات را مشخص کرد. شکل ۴ منحنی VSM نانوذرات $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ با نسبت‌های وزنی مختلف (۱:۱)، (۱:۲)، (۱:۳) و (۱:۵) HAP تهیه شده را نشان می‌دهد که نتایج آن در جدول ۱ خلاصه شده است.

برای شناسایی گروه‌های عاملی روی سطح ذرات مغناطیسی MNP، ذرات هیدروکسی آپاتیت HAP و ذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ از روش FTIR استفاده شد. در شکل ۳ طیف Fe_3O_4 شاهد پیک تیزی در 582 cm^{-1} می‌باشیم که پیوندهای Fe-O را در نمونه‌های Fe_3O_4 و $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ را تأیید می‌کند [۲۴]. در شکل ۳ طیف HAP، مدهای کششی و خمشی PO_4^{3-} در 603 ، 566 ، 1035 و $1420\text{--}1576\text{ cm}^{-1}$ و یک پیک کوچک در حدود 872 cm^{-1} مربوط به باند پیوند P-O ساختار آپاتیت است مشاهده می‌شود این پیک‌ها به طور تیزتر در شکل ۳ طیف نهایی، که مربوط به ذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ مشاهده





شکل ۳. طیف FTIR مربوط به نانوذرات Fe_3O_4 /HAP و HAP.



شکل ۴. منحنی VSM نانوذرات Fe_3O_4 /HAP با نسبت وزنی مختلف (۱:۱)، (۱:۲)، (۱:۳) و (۱:۵) و پاسخ آن‌ها در محلول به میدان مغناطیسی خارجی.

۲.۳ کارایی نانوذرات Fe_3O_4 /HAP در جذب و حذف اورانیل

شمتیک ۱ نحوه برهم‌کنش نانوجاذب تهیه شده در جذب و حذف اورانیل را نشان می‌دهد. درصد حذف یون اورانیل توسط نانوذرات مغناطیسی شده هیدروکسی‌آپاتیت در این کار در مقایسه با نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت و نانوذرات Fe_3O_4 در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت وزنی HAP در نمونه‌ها میزان جذب و حذف اورانیل از محلول ۵۰ ppm اورانیم افزایش می‌یابد و برای نمونه‌ی جاذب Fe_3O_4 /HAP با نسبت وزنی (۵:۱) مقدار درصد کارایی حذف اورانیل ۸۵٫۹٪ به دست آمده است، که قابل مقایسه با نمونه‌ی هیدروکسی‌آپاتیت غیرمغناطیسی با درصد کارایی حذف ۹۲٫۶٪ می‌باشد.

جدول ۱. اطلاعات منحنی VSM استخراج شده از شکل ۴

نمونه	Ms/(emu/g)	Mr/(emu/g)	Hc(Oe)
Fe_3O_4	۴۲	۰٫۰۲~۰	۲٫۱
Fe_3O_4 /HAP(۱-۱)	۱۸٫۴	۰٫۰۲~۰	۱
Fe_3O_4 /HAP(۲-۱)	۷٫۴	۰٫۰۲~۰	۱
Fe_3O_4 /HAP(۳-۱)	۵٫۵	۰٫۰۲~۰	۱
Fe_3O_4 /HAP(۵-۱)	۵٫۱	۰٫۰۲~۰	۱

اطلاعات به دست آمده از منحنی VSM بیان‌گر پاسخ‌پذیری بالای نانوذرات مغناطیسی تهیه شده به میدان مغناطیسی خارجی و همچنین خاصیت برتر سوپراپارامغناطیسی این نانوذرات می‌باشد. اهمیت بالا از این نظر است که نانوذرات Fe_3O_4 تهیه شده پس از برداشتن میدان مغناطیسی از روی آن‌ها دیگر خاصیت مغناطیسی نخواهد داشت. پاسخ ذرات تهیه شده به میدان مغناطیسی در تصویر شکل ۴ نمایش داده شده است. ذرات هیدروکسی‌آپاتیت تهیه شده به یک آهن‌ربای مغناطیسی پاسخ می‌دهند.

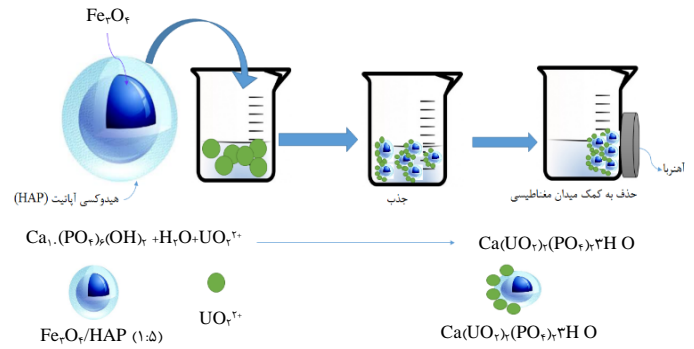


هیدروکسی آپاتیت، جذب شیمیایی نیز در سطح جاذب صورت می‌پذیرد. این موضوع باعث افزایش میزان اورانیل جذب شده توسط جاذب می‌شود. بنابراین با افزایش نسبت وزنی HAP میزان جذب اورانیل توسط جاذب‌های Fe_3O_4/HAP نیز افزایش می‌یابد. به‌طور کلی مقایسه ظرفیت جذب جاذب‌های Fe_3O_4/HAP با نسبت مختلف نشان داد که استفاده Fe_3O_4 با اندازه نانومتر، و اصلاح Fe_3O_4 توسط HAP باعث افزایش ظرفیت جذب جاذب می‌شود و نمونه‌های Fe_3O_4/HAP با نسبت وزنی (۱-۵) ظرفیت جذب بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد، بنابراین در ادامه تحقیق از این نمونه‌ها برای جذب اورانیل از محلول‌های آبی استفاده شد.

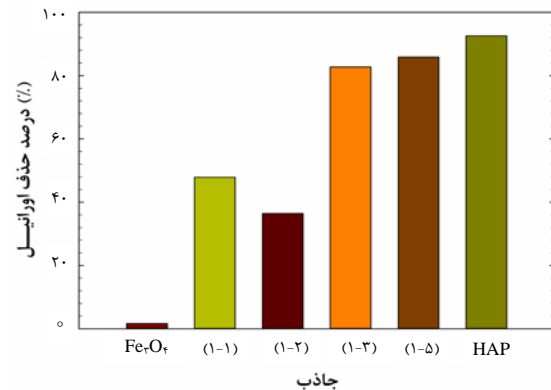
عامل pH می‌تواند از مهم‌ترین عوامل محیطی در فرایند جذب اورانیل باشد، زیرا در تعادل جذب یون اورانیل اثر می‌گذارد. به‌دلیل این‌که بار الکتریکی سطح جاذب و در نتیجه رفتار واکنش تعادلی تشکیل کمپلکس بین کلسیم- فسفات موجود در سطح ذرات جاذب و یون اورانیل موجود در محلول وابسته به pH محیط است، بررسی اثر pH بر میزان جذب اورانیل توسط جاذب مورد نظر، ضروری به‌نظر می‌رسد. به این منظور اثر pH بر میزان جذب اورانیل توسط جاذب مورد بررسی قرار گرفت. گروه‌های عاملی مختلف نظیر OH، COOH، NH_2 و ... به‌واسطه‌ی داشتن برهم‌کنش با یون هیدرونیوم (H_3O^+) در pH مختلف دارای بارهای متفاوتی می‌باشند. برای بررسی تغییرات pH در سطح ذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت باید به شیمی سطح نانوذرات هیدروکسی آپاتیت در تماس با محلول آبی توجه داشت. سطح این نانوذرات در تماس با آب دارای چهار گونه شیمیایی PO_4^- ، $CaOH^\circ$ ، POH° و $CaOH_2^+$ می‌باشد. ترکیب جزئی این گونه‌ها در pHهای مختلف در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در pH قلیایی سطح هیدروکسی آپاتیت دارای گونه‌های شیمیایی PO_4^- و $CaOH^\circ$ است بنابراین سطح دارای بار منفی است و در pHهای کاملاً اسیدی سطح نانوذرات دارای گونه‌های شیمیایی POH° و $CaOH_2^+$ بوده و سطح ذرات دارای بار مثبت است [۲۹].

جدول ۲. مقدار جذب اورانیل توسط جاذب با نسبت مختلف؛ غلظت اورانیوم ۵۰ ppm؛ مقدار جاذب ۰٫۱۲ گرم، زمان تماس؛ یک ساعت

نوع جاذب	q (mg/g)
Fe_3O_4	۰٫۳۷
HAP	۱۸٫۵۲
$Fe_3O_4/HAP(1-1)$	۹٫۵۸
$Fe_3O_4/HAP(2-1)$	۷٫۲۸
$Fe_3O_4/HAP(3-1)$	۱۶٫۵۴
$Fe_3O_4/HAP(5-1)$	۱۷٫۱۷



شما تیک ۱. شمای از نحوه جذب و حذف اورانیل از محلول.

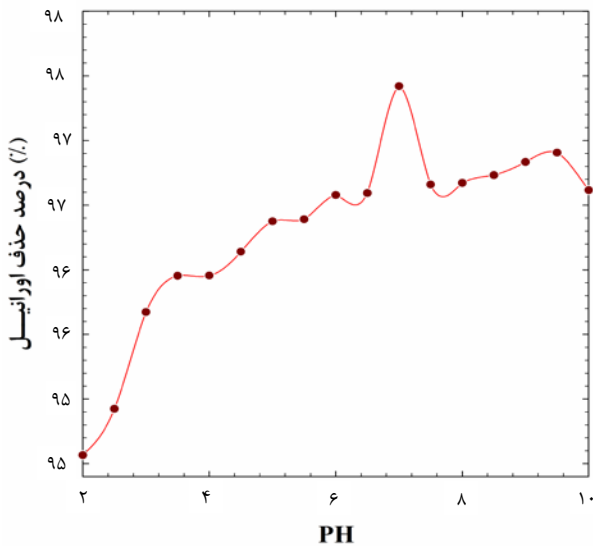


شکل ۵. درصد جذب اورانیل توسط جاذب‌های Fe_3O_4/HAP ، غلظت اورانیوم ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار جاذب ۰٫۱۲ گرم، زمان تماس یک ساعت.

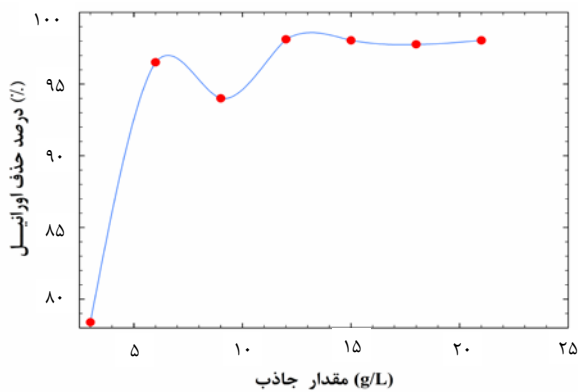
همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش نسبت وزنی هیدروکسی آپاتیت در نمونه‌ها میزان حذف و جذب اورانیل از محلول افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیش‌تر هیدروکسی آپاتیت اثر مغناطیسی کاهش می‌یابد و بنابراین زمان جداسازی جاذب مغناطیسی افزایش می‌یابد. مزیت نانوذرات مغناطیسی شده هیدروکسی آپاتیت تهیه شده در این کار میزان نزدیکی درصد کارایی نمونه‌ها بر هیدروکسی آپاتیت غیرمغناطیسی است، در حالی که نانوذرات تهیه شده دارای خاصیت مغناطیسی نیز می‌باشد.

همان‌طور که اطلاعات جدول ۲ نشان می‌دهد، ذرات جاذب اصلاح شده Fe_3O_4/HAP با نسبت وزنی (۱-۵) ظرفیت جذب بسیار بیش‌تری را نسبت به Fe_3O_4 از خود نشان می‌دهند. این اختلاف می‌تواند به این صورت بیان شود که، در فرایند جذب توسط Fe_3O_4 تنها عاملی که در جذب یون اورانیل دخالت دارد، وجود جاذبه‌ی الکتروستاتیک می‌باشد که طی آن یون‌های اورانیل موجود در محلول خود را به سطح Fe_3O_4 می‌رسانند. اما در فرایند جذب اورانیل توسط نانوکامپوزیت با نسبت‌های مختلف HAP، به دلیل وجود هیدروکسی آپاتیت در سطح خارجی نانوکامپوزیت، علاوه بر عامل جاذبه‌ی الکتروستاتیک، تشکیل کمپلکس بین گروه‌های عاملی کلسیمی و فسفاتی





شکل ۷. نمودار اثر pH بر میزان جذب اورانیل؛ غلظت محلول اورانیوم ۵۰ ppm، مقدار جاذب، ۰/۱۵ گرم، مدت زمان تماس یک ساعت.



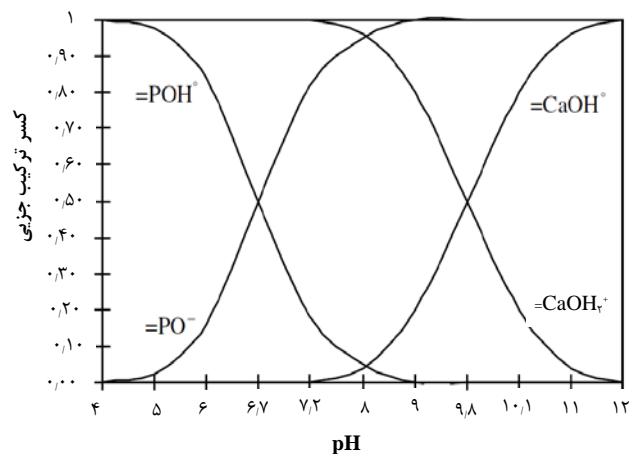
شکل ۸. نمودار اثر مقدار جاذب بر میزان جذب اورانیل؛ غلظت محلول اورانیوم ۵۰ ppm، مقادیر متفاوت جاذب، مدت زمان تماس یک ساعت.

نتایج حاصله به این مفهوم است که با افزایش مقدار نانوذرات تا ۰/۱۵ گرم محلهای آزاد بر روی سطح نانوذرات افزایش می‌یابد ولی بعد از این مقدار می‌توان گفت که این محلها در سطح نانوذرات به دلیل اشغال شدن توسط یونهای اورانیل ثابت می‌شود و در نتیجه ظرفیت جذب با افزایش مقدار جاذب (بیشتر از ۰/۱۵ گرم)، افزایش نمی‌یابد بر اساس نتایج به دست آمده مقدار مناسب برای جذب یون اورانیل مقدار ۰/۱۵ گرم از $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ می‌باشد.

مدت زمان تماس جاذب و محلول اورانیوم، به دلیل واکنش جذب سطحی و واکنش تشکیل کمپلکس بین کلسیم- فسفات موجود در جاذب (HAP) و اورانیل موجود در محلول، نقش مهمی بر میزان جذب اورانیل توسط جاذب را ایفا می‌کند. به همین دلیل لازم است تا مقدار جذب اورانیل از محلول توسط جاذب را در مدت زمانهای تماس متفاوت اندازه‌گیری کرد و

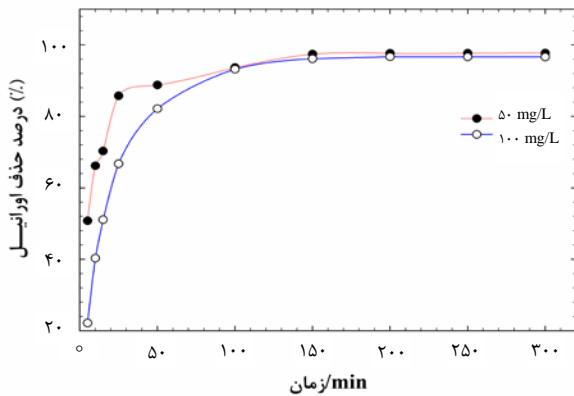
تأثیر pH بر میزان جذب اورانیل در غلظت ۵۰ ppm از آن توسط جاذب $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ بررسی شد که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در pHهای اسیدی در مقایسه با محیط قلیایی تا حدودی درصد جذب یون اورانیل کم‌تر است و در pHهای قلیایی میزان جذب یون اورانیل افزایش پیدا کرده است. دلیل این امر را با توجه به مطالب مذکور می‌توان این‌گونه بیان کرد که در pHهای اسیدی سطح ذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت $\text{HAP}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ دارای بار مثبت می‌باشد و در نتیجه با حضور یون اورانیل روی سطح، بین سطح و یون اورانیل دافعه به وجود آمده و سبب کاهش درصد جذب می‌شود. در pHهای قلیایی سطح ذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت $\text{HAP}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ دارای بار منفی است، به دلیل حضور یون اورانیل مثبت، جاذبه الکترواستاتیکی برقرار می‌شود که سبب افزایش درصد جذب اورانیل می‌شود. از نتایج حاصله بهترین pH برابر با ۷ انتخاب شد.

مقدار جاذب یکی از پارامترهای بسیار مهم برای تعیین ظرفیت جذب آن می‌باشد. برای بررسی اثر مقدار نانوذرات $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{HAP}$ بر میزان جذب اورانیل از محلول آبی طبق روش شرح داده شده آزمایشات انجام شد. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، با افزایش مقدار جاذب تا ۰/۱۵ گرم، درصد حذف یون اورانیل از محلول به میزان ۹۸/۰۴۴٪ افزایش یافته و پس از آن با افزایش مقدار جاذب درصد حذف اورانیل افزایش نمی‌یابد.

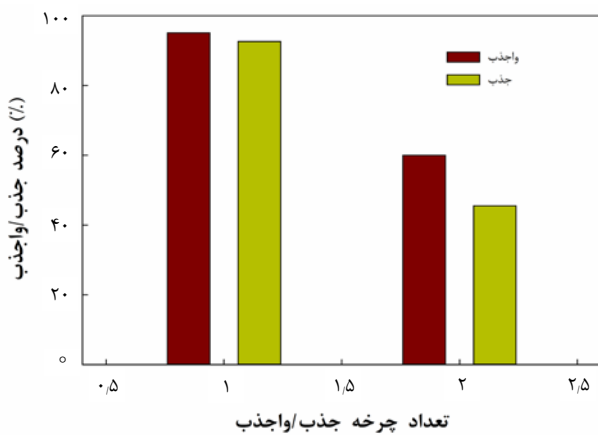


شکل ۶. سطح هیدروکسی آپاتیت در تماس با آب در pHهای مختلف [۲۹].





شکل ۹. اثر مدت زمان تماس اورانیم با جاذب بر میزان حذف اورانیل؛ مقدار جاذب، ۰٫۱۵ گرم؛ غلظت اورانیم، ۵۰ و ۱۰۰ ppm؛ pH ۷، مدت زمان‌های تماس متفاوت.



شکل ۱۰. نتایج بازیابی جاذب با استفاده از محلول HCl غلظت اورانیم، ۵۰ ppm؛ مقدار جاذب، ۰٫۱۵ گرم؛ pH ۷، زمان تماس، ۱۵۰ دقیقه.

جدول ۳. نتایج بازیابی جاذب Fe_3O_4/HAP غلظت اورانیم، ۵۰ ppm با استفاده از محلول HCl

درصد جذب قبل از بازیابی	محلول شوی (mol/liter)	درصد اورانیل جذب شده
۹۵٫۱۴	HCl ۰٫۱	۹۲٫۶۶
۹۵٫۱۴	HCl ۰٫۱	۴۵٫۵۲
درصد جذب اورانیل بعد از بازیابی ۵۹٫۸۰		

با توجه به نتایج جدول ۳ شستشوی نمونه Fe_3O_4/HAP با محلول (mol/L) ۰٫۱ HCl درصد بازیابی جاذب بالاتری را نسبت به زمانی که از محلول (mol/L) ۰٫۱ HCl استفاده شده، نشان می‌دهد. زمانی که جاذب بازیابی شده توسط محلول ۰٫۱ HCl مولار برای جذب اورانیل مورد استفاده قرار گرفت مشخص شد هنوز میزان ۹۲٫۶۶ درصد اورانیل جذب جاذب است، بنابراین جاذب به خوبی بازیابی نشده است. در ادامه با استفاده از محلول ۰٫۱ HCl مولار، جاذب را مورد بازیابی

زمان تعادل را به دست آوریم، به این دلیل که در زمان تعادل، میزان حذف اورانیل از محلول توسط جاذب به بیشترین مقدار خود می‌رسد و باعث اشباع شدن جایگاه‌های فعال موجود در جاذب، که در جذب اورانیل نقش مؤثری را ایفا می‌کنند، می‌شود. به همین منظور، میزان اورانیل جذب شده از محلول ۱۰۰ و ۵۰ ppm اورانیم توسط ۰٫۱۵ گرم جاذب Fe_3O_4/HAP در زمان‌های تماس مختلف اندازه‌گیری شد. شکل ۹ درصد جذب اورانیل در زمان‌های مختلف را گزارش می‌دهد. میزان جذب اورانیل توسط جاذب با افزایش مدت زمان تماس اورانیم با جاذب تا زمان ۱۵۰ دقیقه به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. در زمان‌های اولیه آزمایش به دلیل تراکم زیاد یون اورانیل و در نتیجه افزایش تعداد برخوردهای مؤثر اورانیل با جایگاه‌های فعال موجود در ساختار جاذب تهیه شده، میزان جذب شدن اورانیل بیشتر می‌باشد. واکنش تشکیل کمپلکس بین کلسیم- فسفات موجود در جاذب و اورانیل موجود در محلول یک واکنش تعادلی می‌باشد.

که در آن یون اورانیل موجود در محلول با کلسیم- فسفات جاذب تشکیل کمپلکس می‌دهد. واکنش تشکیل کمپلکس با گذشت زمان تا رسیدن به تعادل پیش می‌رود، که این موضوع منجر به افزایش میزان جذب اورانیل توسط جاذب، با افزایش مدت زمان تماس می‌شود. اما در زمان‌های بالاتر، از غلظت اورانیل موجود در محلول کاسته می‌شود و در مدت زمان تماس ۱۵۰ دقیقه سرعت جذب اورانیل توسط ذرات جاذب از محلول با سرعت واجذب آن برابر شده و سیستم به تعادل می‌رسد. به عبارت دیگر در زمان‌های بالاتر تماس، جایگاه فعالی برای انجام فرایند جذب شیمیایی (تشکیل کمپلکس بین کلسیم- فسفات و اورانیل) وجود ندارد و میزان جذب اورانیل توسط جاذب با گذشت زمان ثابت می‌شود. بعد از رسیدن به تعادل با افزایش مدت زمان تماس تغییری در میزان جذب اورانیل توسط جاذب مشاهده نمی‌شود. بنابراین مدت زمان تماس ۱۵۰ دقیقه به عنوان زمان مناسب برای تماس محلول اورانیم با ذرات جاذب Fe_3O_4/HAP انتخاب شده و در مراحل بعدی تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

۳.۳ نتایج بررسی بازیابی جاذب

بازیابی جاذب به معنای قابلیت عملکرد مناسب جاذب برای چندین مرحله در تماس قرار گرفتن با گونه‌ی جذب‌شونده می‌باشد. در این بررسی بازیابی جاذب Fe_3O_4/HAP انجام شد که نتایج بررسی در شکل ۱۰ و جدول ۳ نشان داده شده است.



جدول ۴. ماکزیمم ظرفیت جذب برخی جاذب‌ها نسبت به اورانیل

جاذب	q (mg/g)	مرجع
کیتوسان	۴۹,۰۵	[۳۰]
پلی‌پیرول	۸۷,۷۲	[۳۱]
هماتیت	۳,۳۶	[۳۲]
آلمینا	۷۸	[۳۳]
Fe ₃ O ₄ /SiO ₂	۵۲	[۳۴]
Fe ₃ O ₄ /GO	۶۹,۴۹	[۳۵]
Fe ₃ O ₄ /HAP	۹۹,۸۲	کار حاضر

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای و آزمایشگاه جابرن‌حیان برای فراهم نمودن انجام آزمایشات تجربی این پروژه، تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

1. S. Yusan, S. Akyil, Sorption of uranium (VI) from aqueous solutions by akaganeite, *J. Hazard. Mater.*, **160**, 388-395 (2008).
2. W. Shi, et al., Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite, *J. Hazard. Mater.*, **170**, 1-6 (2009).
3. M.E. Argun, S. Dursun, A new approach to modification of natural adsorbent for heavy metal adsorption, *Bioresource Technol.*, **99**, 2516-2527 (2008).
4. Sh. Wang, Y. Peng, Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment, *Chem. Eng. J.*, **156**, 11-24 (2010).
5. N. Rajic, et al., Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions using the natural clinoptilolite and preparation of nano-NiO on the exhausted clinoptilolite, *Appl. Surf. Sci.*, **257**, 1524-1532 (2010).
6. F.L. Fan, et al. Rapid removal of uranium from aqueous using magnetic Fe₃O₄@SiO₂ composite particles, *J. Environ. Radioact.*, **106**, 40-46 (2012).
7. J.L. Lapka, et al., Extraction of uranium (VI) with diamides of dipicolinic acid from nitric acid solutions, *Radiochim. Acta.*, **97**, 291-296 (2009).
8. A.D. Browski, et al., Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial waste waters by ion-exchange method, *Chemosphere.*, **56**, 91-106 (2004).
9. A. Bhatnagar, A.K. Minocha, Biosorption optimization of nickel removal from water using Punica granatum peel waste, *Colloid. Surface. B.*, **76**, 544-548 (2010).

مجدد قرار داده و سپس مراحل جذب طبق روش قبل انجام گرفت و مشخص شد میزان ۴۵/۵۲ درصد اورانیل جذب جاذب می‌باشد بنابراین از جاذب Fe₃O₄/HAP که با استفاده از محلول ۰/۱ HCl مولار مورد بازیابی قرار گرفت. برای جذب یون‌های اورانیل از محلول ۵۰ ppm اورانیم مراحل جذب انجام گرفت و میزان ۵۹/۸۰ درصد یون اورانیل از محلول جذب شد. در هنگام استفاده از محلول HCl به‌عنوان شویش، به دلیل فرایند الکتروستاتیک بین H⁺ و Cl⁻ موجود در محلول و اورانیل موجود در سطح نمونه جاذب Fe₃O₄/HAP که به کندی اتفاق می‌افتد، یون‌های اورانیل موجود در سطح، تحت تأثیر فرایند بازیابی قرار می‌گیرند. اما هنگامی که از محلول (mol/L) ۰/۱ HCl به‌عنوان محلول شویش استفاده می‌شود، به دلیل تحرک بالای یون‌های H⁺ و Cl⁻ موجود در محلول شویش، این یون‌ها بسیار سریع‌تر و بیش‌تر فرایند الکتروستاتیک را انجام می‌دهند که نتیجه آن افزایش میزان بازیابی برای نمونه Fe₃O₄/HAP هنگام استفاده از محلول ۰/۱ (mol/L) HCl می‌باشد.

ظرفیت جذب جاذب Fe₃O₄/HAP پیشنهادی در کار حاضر با سایر جاذب‌های گزارش شده در متون در جدول ۴ مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است ظرفیت جذب Fe₃O₄/HAP قابل رقابت و در برخی موارد بسیار بالاتر از جاذب‌های گزارش شده می‌باشد و نشان می‌دهد که Fe₃O₄/HAP یک جاذب امیدوارکننده برای پاک‌سازی محیط آبی آلوده به اورانیم می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

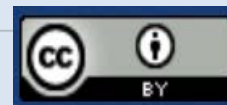
ابتدا نانو ذرات مغناطیسی Fe₃O₄ از روش هم‌رسوبی تشکیل و در ادامه توسط ترسیب لایه‌ای از HAP با نسبت‌های مختلف وزنی (Fe₃O₄/HAP)، (۱:۱)، (۱:۲)، (۱:۳) و (۱:۵) به روش هم‌رسوبی اصلاح شد. نانو ذرات حاصله به روش‌های فیزیکی و شیمیایی نظیر XRD، SEM، TEM، FTIR و VSM مشخصه‌یابی شدند. در بخش بعدی نانو ذرات مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت با نسبت وزنی بهینه (۱:۵) برای جذب اورانیل به مورد استفاده قرار گرفت. آزمایشات نشان داد مقدار ۰/۱۵ گرم از نمونه Fe₃O₄/HAP (۱:۵)، در pH ۷ و در مدت زمان ۱۵۰ دقیقه بیش‌ترین میزان اورانیل را جذب و حذف می‌کند. در نهایت جاذب Fe₃O₄/HAP مورد بازیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد میزان ۵۹/۸۰ درصد یون اورانیل توسط جاذب Fe₃O₄/HAP بازیابی شده، جذب می‌شود.



10. J. Peric, M. Trgo, N.V. Medvidovi, *Removal of zinc, copper and lead by natural zeolite a comparison of adsorption isotherms*, **Water Res.**, **38**, 1893-1899 (2004).
11. V.J. Inglezakis, et al., *Pretreatment of natural clinoptilolite in a laboratory-scale ion exchange packed bed*, **Water Res.**, **35**, 2161-2166 (2001).
12. V.J. Inglezakis, S.G. Pouloupoulos, *Adsorption, Ion Exchange and Catalysis: Design of Operations and Environmental Applications*, (Elsevier, Netherland, 2006).
13. W. Xiong, et al., *Use of X-ray absorption near edge structure (XANES) to identify physisorption and chemisorption of phosphate onto ferrihydrite-modified diatomite*, **J. Colloid Interf. Sci.**, **368**, 528-532 (2012).
14. D. Mehta, et al., *Magnetic adsorbents for the treatment of water/wastewater—a review*, **J. Water Process. Eng.**, **7**, 244–265 (2015).
15. Z. Zhang, et al., *Synthesis of ultralight phosphorylated carbon aerogel for efficient removal of U(VI): batch and fixedbed column studies*, **Chem. Eng. J.**, **370**, 1376-1387 (2019).
16. X. Han, et al., *Adsorptive performance of ship-type nano-cage polyoxometalates for U(VI) in aqueous solution*, **Appl. Surf. Sci.**, **484**, 1035–1040 (2019).
17. E. Skwarek, et al., *Adsorption of uranium ions on nano-hydroxyapatite and modified by Ca and Ag ions*, **Adsorption**, **25**(3), 639–647 (2019).
18. Y. Wu, et al., *Rapid and effective removal of uranium(VI) from aqueous solution by facile synthesized hierarchical hollow hydroxyapatite microspheres*, **J. Hazard. Mater.**, **371**, 397–405 (2019).
19. M. Bagherzadeh, et al., *Electrochemical evaluation and surface study of magnetite/PANI nanocomposite for carbon steel protection in 3.5% NaCl*, **Prog. Org. Coat.**, **101**, 149-160 (2016).
20. M. Bagherzadeh, et al., *Electrochemical detection of Pb and Cu by using DTPA functionalized magnetic nanoparticles*, **Electrochim. Acta.**, **115**, 573-580 (2014).
21. S.A. Milani, *Solid Phase Extraction of Thorium (IV) and Uranium (VI) from Nitrate Medium Using Cyanex 302-Coated Magnetic Nanoparticles*, **J. Nucl. Sci. Tech.**, **78**, 70-76 (2017).
22. S.A. Milani, et al. *Adsorptive removal of heavy metals from Esfahan uranium conversion facility (UCF) wastewater by bagass impregnated with magnetic nanoparticles*, **J. Nucl. Sci. Tech.**, **71**, 33-43 (2015).
23. M. Bagherzadeh, et al. *Decoration of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles on graphene oxide nanosheets*, **RSC Advances**, **5**(128), 105499-105506 (2015).
24. F. Riahi, et al., *Modification of Fe₃O₄ superparamagnetic nanoparticles with zirconium oxide; preparation, characterization and its application toward fluoride removal*, **RSC Advances**, **5**(88), 72058-72068 (2015).
25. D. Zeng, et al., *Magnetic solid-phase extraction of U(VI) in aqueous solution by Fe₃O₄@hydroxyapatite*, **J. Radioanal. Nucl. Chem.**, **324**(3), 1329–1337 (2020).
26. L. Dong, et al., *Removal of lead from aqueous solution by HAP/magnetite composite adsorbent*, **Chem. Engin. J.**, **165**, 827-834 (2010).
27. J.L. Gong, et al., *Copper (II) removal by pectin–iron oxide magnetic nanocomposite adsorbent*, **Chem. Eng. J.**, **185**, 100– 107 (2012).
28. D. Luna-Zaragoza, et al., *Surface and physicochemical characterization of phosphates vivianite, Fe₂(PO₄)₃ and hydroxyapatite Ca₅(PO₄)₃OH*, **J. Min. Mat. Charact. Engin.**, **8**, 591-609 (2009).
29. L. Wu, et al., *Surface complexation of calcium minerals in aqueous solution. 1. Surface protonation of fluorapatite–water interfaces*, **J. Coll. Interface Sci.**, **147**, 178-185 (1991).
30. G.H. Wang, et al., *Adsorption of uranium (VI) from aqueous solution onto cross-linked chitosan*, **J. Hazard. Mater.**, **168**, 1053–1058 (2009).
31. S. Abdi, et al., *Investigation of uranium (VI) adsorption by polypyrrole*, **J. Hazard. Mater.**, **332**, 132-139 (2017).
32. S.B. Xie, et al., *Removal of uranium(VI) from aqueous solution by adsorption of hematite*, **J. Environ. Radioact.**, **100**, 162–166 (2009).
33. E.R. Sylwester, et al., *The structure of uranium (VI) sorption complexes on silica, alumina, and montmorillonite*, **Geochim. Cosmochim. Acta**, **64**, (2000) 2431–2438.
34. F.L. Fan, et al., *Rapid removal of uranium from aqueous solutions using magnetic Fe₃O₄@SiO₂ composite particles*, **J. Environ. Radioact.**, **106**, 40–46 (2012).
35. P.F. Zong, et al., *Synthesis and application of magnetic graphene/iron oxides composite for the removal of U(VI) from aqueous solutions*, **Chem. Eng. J.**, **220**, 45-52 (2013).

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

مجتبی باقرزاده، داوود صابری (۱۴۰۱)، حذف اورانیل به کمک میدان مغناطیسی با استفاده از نانوکامپوزیت مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت، ۱۰۱، ۱۰۳-۱۱۲

DOI: 10.24200/nst.2022.1452

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1452.html

