مقایسهٔ جاذب‌های سریم مولیبدات- پلی اکریلونیتریل و مس هگزاسیانوفرات II- پلی اکریلونیتریل در جداسازی سزیم اکتیو در محیط‌های آبی

رضا صابری*؛ پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران،
علی تخت‌اردشیر؛ امور ایمنی هسته‌ای کشور، تهران

چکیده

پروژهٔ تحقیقاتی حاضر برای دست‌یابی به فناوری‌های نوین در زمینهٔ رفع آلودگی‌های رادیواکتیو انجام شده است. امروزه ساخت و استفاده از رزین‌های مبادله کننده با بازدهی و کارآیی زیاد، به‌عنوان روی‌کردی نوین در تحقیقات و همچنین روشی کاربردی در علوم جداسازی مطرح است. در این پروژه برای رفع آلودگی ماده رادیواکتیو $Cs^{۱۳۷}$ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پاره‌های شکافت هسته‌ای، دو نوع کامپوزیت جدید با عنوان سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل[۱] و مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل[۲] تهیه شد و کارآیی آن‌ها در شرایط پیوسته و ناپیوسته سنجیده شد. برای شناسایی ساختار ترکیب سنتز شده، از تکنیک طیف‌سنجی مادون قرمز استفاده شد. مساحت سطح دانه‌های جاذب و میزان تخلخل آن‌ها اندازه‌گیری شد. در راستای افزایش راندمان این دو کامپوزیت، ترکیب آن‌ها با ماده PAN تهیه شد و پایداری آن‌ها در شرایط مختلف محیطی سنجیده شدند. نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل در شرایط یک‌سان راندمان بیش‌تری نسبت به کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل دارد.

مقدمه

اخیراً تحقیقاتی زیادی در زمینهٔ جداسازی سزیم از محیط‌های آبی با استفاده از مبادله‌گرهای یونی معدنی و آلی انجام شده است [۱]، [۲]، [۳]، [۴]. بر طبق تحقیقات صورت گرفته، استفاده از مبادله‌گرهای یونی آلی، مزایایی نظیر پایداری حرارتی زیاد، پایداری در محیط‌های اسیدی و بازی و همچنین سازگاری مناسب با شکل نهایی پسماند دارند. اخیراً مبادله‌گرهای یونی کامپوزیتی، برای جذب برخی از یون‌های فلزی خاص استفاده می‌شود که باعث افزایش مقاومت مکانیکی و شیمیایی و همچنین میزان حلالیت کم‌تر در جریان‌های آبی و روند بهتر تبادل نسبت به مبدل‌های معدنی خالص می‌گردد [۵].

در این تحقیق دو نوع کامپوزیت جدید برای افزایش راندمان جذب $Cs^{۱۳۷}$ در جریان‌های آبی تهیه و سنتز شد.

واژه‌های کلیدی: جداسازی، کامپوزیت، $Cs^{۱۳۷}$ ، H.C.F.C-PAN، تبادل یونی، CER.M-PAN
دریافت ۹۳/۲/٦ پذیرش ۹۳/۹/۱٦
*نویسنده مسئول Rsaberi@aeoi.org.ir

۱. CER.M-PAN ۲. H.C.F.C-PAN

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

سپس، مادهٔ مبادله‌کنندهٔ یون سزیم با ماده‌ای پیونددهندهٔ آلی ترکیب شده و ذراتی با سایز بزرگ‌تر و استحکام مکانیکی بیش‌تر تهیه شد. انتخاب مادهٔ پیوند دهندهٔ مناسب بسیار با اهمیت است زیرا این ماده باید پایداری شیمیایی زیادی داشته و نیروی نگه‌دارندگی و متراکم کنندگی کافی داشته باشد و در محلول‌های آبی، نسبت به یون $Cs^{۱۳۷}$ دارای نفوذپذیری زیاد و فاقد خواص تبادل یونی باشد [۶]، [۷]. با استفاده از طیف مادون قرمز، مشخصات کامپوزیت سنتز شده، ارزیابی شد و نحوهٔ جذب یون سزیم با ایزوترم‌های جذبی بر اساس روابط لانگمور و فروندلیچ بررسی شد. در ادامه جریان آبی حاوی یون سزیم اکتیو از ستون‌هایی حاوی کامپوزیت تهیه شده، عبور داده شد و عوامل مختلفی در آن‌ها بررسی شد. میزان جذب سزیم در فرآیند ناپیوسته و فرآیند با بستر ثابت بررسی و میزان جذب دینامیکی و راندمان ستون کامپوزیتی مشخص شد.

شرح آزمایش

۱. مواد شیمیایی و دستگاه‌های استفاده شده

مواد شیمیایی استفاده شده از تولیدات کارخانهٔ مرک[۱] شامل آمونیوم سریم نیترات[۲]، آمونیوم هپتامولیبدات[۳]، سریم‌مولیبدات، دی‌متیل‌سولفوکسید[۴]، پلی اکریلونیتریل[۵]، تولید شرکت آلدریچ[۶]، سورفکتانت[۷]، مس (II) نیترات[۸]، و سایر موارد (با درجهٔ خلوص تجزیه‌ای) هستند. دستگاه‌هایی نظیر طیف‌سنج جذب اتمی (پرکین‌المر[۹] ۸۴۳)، طیف‌سنج مادون قرمز (بروکر-وکتور[۱۰] ۲۲)، همزن ترموستاتیک (اینفورز آجی-آکواتورن[۱۱]) و دستگاه BET (فیلیپس آس‌آپی[۱۲] ۲۰۱۰) نیز در این تحقیق استفاده شدند.

۲. تهیهٔ کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل

در ابتدا برای تهیهٔ جاذب سریم‌مولیبدات[۱۳]، ۲۵۰cc از محلول آمونیوم سریم‌نیترات با غلظت ۰/۵ مولار و ۲۵۰cc از محلول آمونیوم هپتامولیبدات با غلظت ۱ مولار را در بالن ۳ دهانه قرار داده و به‌طور متناوب در دمای ۵۰°C و به‌مدت ۴ ساعت هم زده شد. سپس محلول صاف و رسوب حاصل پس از شستشو با آب مقطر در دمای اتاق خشک شده و دانه‌بندی با مش مورد نظر μm (۲۲۴-۴۰۰) تهیه شد. سپس برای تهیهٔ کامپوزیت مذکور ۵ گرم پودر سریم‌مولیبدات و ۱۰cc محلول DMSO در داخل بالن ۳ دهانه و در دمای ۵۰°C و به‌مدت ۳ ساعت هم زده شد. ۴ گرم PAN با ۴۰cc محلول DMSO و چند قطره Tween مخلوط شده و به‌مدت ۴ ساعت هم زده شد و سپس به محلول بالن ۳ دهانه اضافه شد [۸]. محلول حاصل دردمای ۵۰°C و به‌مدت ۴ ساعت هم زده و کامپوزیت شکل گرفت.

۱. Merck ۲. $(NH_4)_2.Ce(NO_3)_6$ ۳. $(NH_4)_6MO_7O_{24}.4H_2O$ ۴. $DMSO-C_2H_6SO$
۵. $PAN-[CH_2-CH(CN)]_n-$ ۶. Aldrich ۷. $Tween-80-C_{64}H_{124}O_{27}$ ۸. $Cu(NO_3)_2.3H_2O$
۹. Perkin Elmer ۱۰. Brucker-Vector ۱۱. Infors AG-Aquatron ۱۲. Philips-ASAP
۱۳. CER.M

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

۳. تهیهٔ کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل

در ابتدا جاذب H.C.F.C با ترکیب $Cu_2Fe(CN)_6$ از طریق مخلوط کردن تدریجی محلول ۰/۲۵ مولار مس هگزاسیانوفرات (II) و محلول ۰/۷۵ مولار مس (II) نیترات با نسبت حجمی ۱:۱ در دمای $۵۰^{\circ}C$ تهیه شد. رسوب قهوه‌ای رنگ حاصل پس از دو روز باقی‌ماندن در محلول مادر، صاف و با آب دوبار تقطیر شده، شستشو داده شد و در داخل آون با دمای $۷۰^{\circ}C$ خشک شد. رسوب تهیه شده را با آسیاب به پودر تبدیل کرده و پس از عبور از الک‌های استاندارد به دانه‌بندی با مش μ m(۲۲۴-۴۰۰) رسانده و نهایتاً آماده برای تبدیل به کامپوزیت شد. برای تهیهٔ کامپوزیت مذکور از رسوب جاذب، باید ابتدا در بالن یک لیتری سه دهانه مجهز به سیستم هم‌زن، ۵ گرم پودر هگزاسیانوفرات مس را در ۲۰cc دی‌متیل‌سولفوکسید (DMSO) حلال پلی‌اکریلونیتریل، در دمای $۵۰^{\circ}C$ به‌مدت دو ساعت به‌طور یک‌نواخت هم زد. سپس ۵ گرم پودر PAN (با نسبت وزنی ۱:۱ با هگزاسیانوفرات مس) در ظرفی جداگانه با ۵۵ cc از محلول DMSO مخلوط کرده و به‌منظور سرعت بخشیدن به انحلال پلیمر، به این مخلوط چند قطره (سورفکتانت[۱]) اضافه شد. مخلوط به‌مدت ۳ ساعت و در دمای $۵۰^{\circ}C$ هم زده شد تا کاملاً یک‌نواخت و شفاف شود. نهایتاً این مخلوط همگن PAN را وارد بالن ۳ دهانه کرده و به‌مدت ۳ ساعت در دمای $۵۰^{\circ}C$ با مخلوط جاذب و DMSO هم زده شد.

بحث و نتیجه‌گیری

۱. طیف مادون قرمز در کامپوزیت‌های سنتز شده

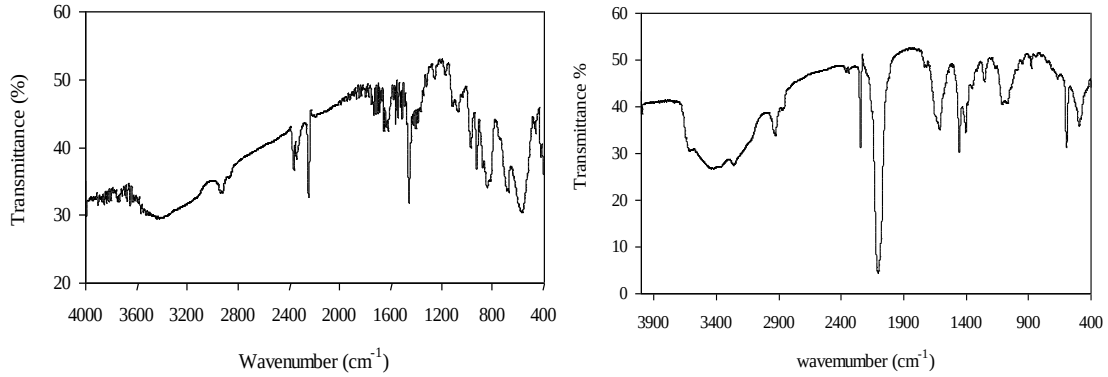
پیک پهن جذبی در ناحیهٔ $۳۰۰۰-۳۶۵۰cm^{-1}$ در کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و $۳۶۵۰-۲۹۰۰cm^{-1}$ در کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل مربوط به ارتعاش کششی مولکول‌های آب درون شبکه‌ای است. همچنین پیک ناحیهٔ $۱۶۲۰cm^{-1}$ هر دو کامپوزیت ناشی از ارتعاش خمشی مولکول‌های آب موجود در ترکیب آن‌ها است. پیک مشاهده شده در ناحیهٔ $۱۱۰۰cm^{-1}$ کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل ناشی از ارتعاش خمشی پیوند Ce-O-H است، در حالی‌که پیک ناحیهٔ $۲۲۵۰cm^{-1}$ کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفرات II- پلی‌اکریلونیتریل نشان‌گر حضور گروه سیانید در ساختمان آن است.

در کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل پیک ناحیهٔ $۱۴۶۵cm^{-1}$ مربوط به ارتعاشات خمشی $-CH_2$، ناحیهٔ $۱۰۸۰-۱۱۰۰cm^{-1}$ به‌علت وجود ارتعاش کششی در پیوند C-O، ناحیهٔ $۸۹۵-۹۳۶\ cm^{-1}$ به‌دلیل حضور یون مولیبدات، پیک‌های ناحیهٔ $۴۰۰-۸۰۰\ cm^{-1}$ به‌دلیل حضور یون $Ce(OH_۲)^{+۲}$ و در ناحیهٔ $۲۲۵۰cm^{-1}$ به‌دلیل حضور گروه نیتریل در ترکیب سنتز شده هستند.

۱. Tween-80

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

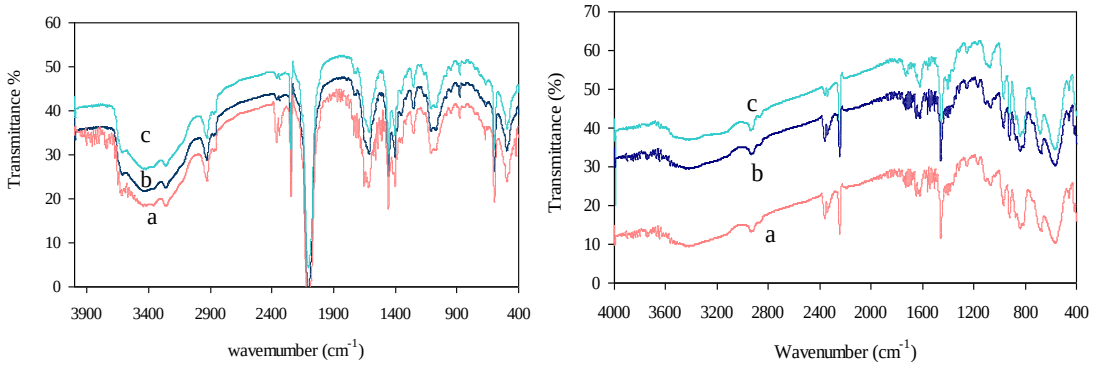
در کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل پیک نواحی $۴۵۰-۶۰۰cm^{-۱}$ به‌دلیل وجود پیوند کربن- فلز، ناحیهٔ $۱۱۰۰cm^{-۱}$ ناشی از ارتعاش کششی C-O، ناحیهٔ $۳۰۰۰cm^{-۱}$ ناشی از ارتعاش کششی CH- و ناحیهٔ $۱۴۶۵\ cm^{-۱}$ مربوط به ارتعاش خمشی گروه $CH_۲$– است [۹].



شکل ۱. طیف IR(سمت راست) برای کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) برای کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل

۲. پایداری در برابر تابش گاما

کامپوزیت‌های سنتز شده تحت تابش‌های ۱۰۰KGy و ۲۰۰KGy قرار گرفتند. هدف سنجش عمل‌کرد گرانول‌های کامپوزیت با شرایط واقعی است. در ادامه نمونه‌های موجود با IR آنالیز شد و هر سه نمودار را یک‌جا رسم کرده تا تغییرات پیک‌های طیف IR دقیقاً بررسی شود. با توجه به شکل۲ می‌توان نتیجه گرفت که هر دو کامپوزیت در برابر تابش‌های شدید مانند تابش ۲۰۰KGy مقاوم است و هیچ‌گونه تغییر محسوسی در طیف IR به‌دست آمده از کامپوزیت‌های سنتز شده، ایجاد نشده است.



شکل۲. مقایسه طیف‌های IR برای سه نوع کامپوزیت (A) تابش ندیده (B) تابش ۱۰۰KGy (C) تابش۲۰۰ KGy برای (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل

۳. اندازه‌گیری سطح مخصوص کامپوزیت‌ها

بر اساس آزمایش BET میزان سطح مخصوص کامپوزیت‌های مذکور در جدول ۱ ذکر شده است:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

جدول۱. سطح مخصوص کامپوزیت‌های سنتز شده

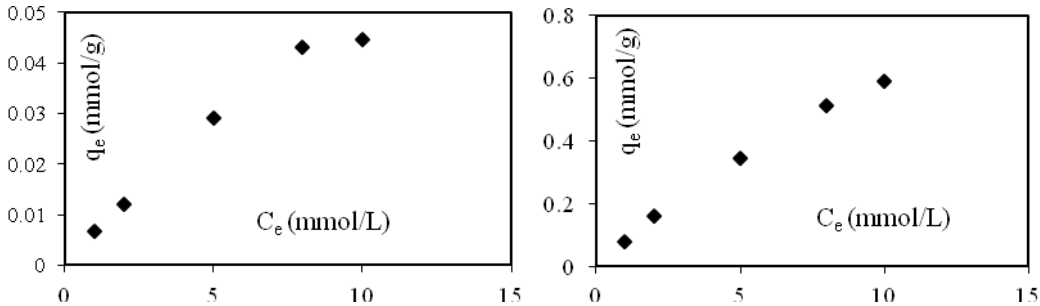
نام جاذب	سطح مخصوص
CER.M-PAN	A*(BET) = ۲۵/۱۸ m^2/g
H.C.F.C-PAN	A*(BET)= ۷۳/۵۸ m^2/g

بر اساس نتایج حاصل مشاهده می‌شود که اختلاف فاحشی در سطح جذب مخصوص این دو کامپوزیت وجود دارد.

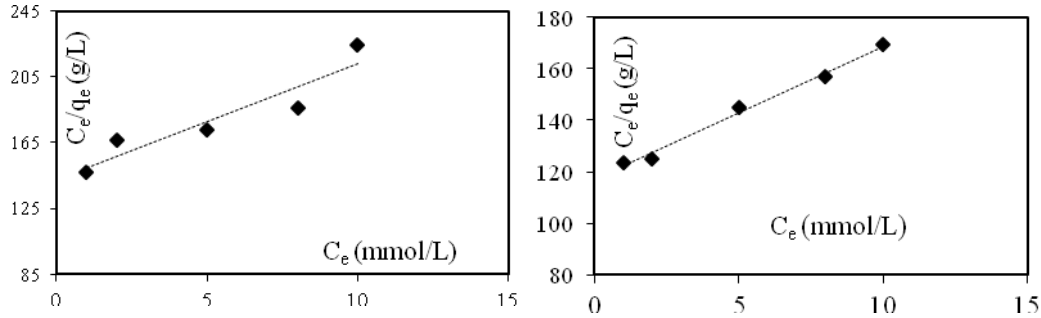
۴. ایزوترم‌های جذبی

روابط زیر به‌ترتیب بیان‌گر روابط لانگمور و فروندلیچ بر اساس فرآیند جذب با استفاده از کربن فعال است [۱۰]، [۱۱]:

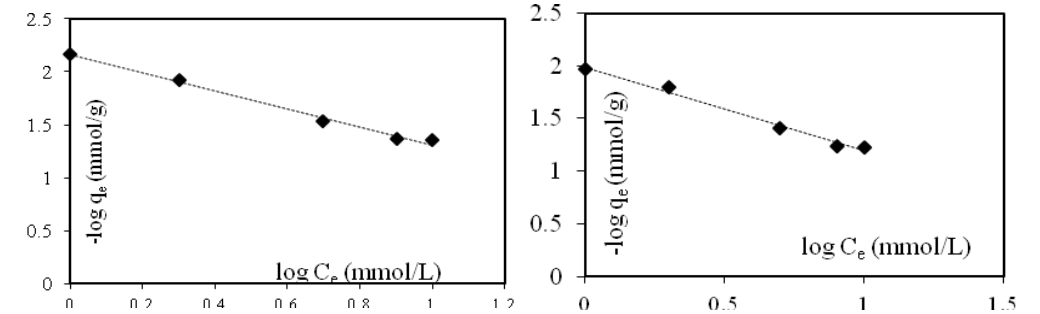
لانگمور $\frac{x}{m} = q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e}$ فروندلیچ $\frac{x}{m} = q_e = K C_e^{1/n}$



شکل۳. نمودار ایزوترم جذبی یون +Cs روی (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل در دمای ۲۹۸K



شکل ۴. نمودار ایزوترم جذبی یون Cs^+ روی (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل بر اساس معادلات لانگمور در دمای ۲۹۸K



شکل ۵. نمودار ایزوترم جذبی یون Cs^+ روی (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل براساس معادلات فروندلیچ در دمای ۲۹۸K

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

در شکل ۳ نمودار ایزوترم جذبی برای کامپوزیت‌ها رسم شده است. شکل‌های ۴ و ۵، این نمودارها را بر اساس روابط و پارامترهای لانگمور و فروندلیچ نشان می‌دهد تا مشخص شود که این جاذب‌ها از کدام رابطه تبعیت می‌کند. جدول ۲ پارامترهای معادلات ایزوترم جذبی لانگمور و فروندلیچ برای کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد [۱۲]، **[۱۳]:**

جدول ۲. پارامترهای معادلات لانگمور و فروندلیچ در ایزوترم جذبی یون Cs^+ در کامپوزیت‌ها در دمای K ۲۹۸

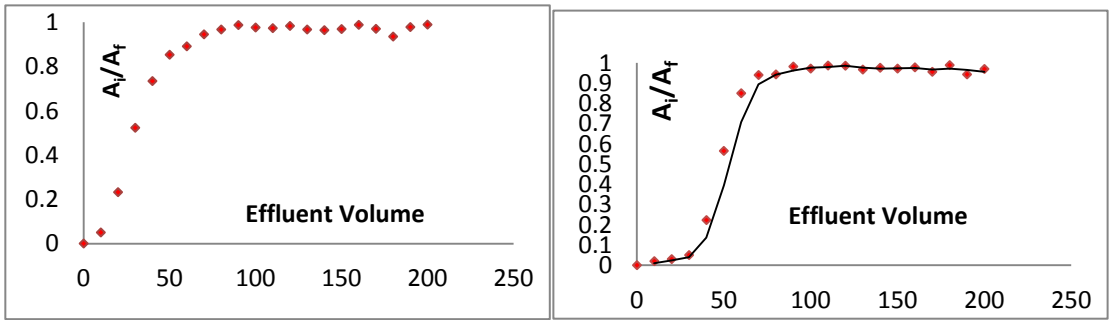
		CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN
Langmuir constants	q_{max} (mmol/g)	۰/۰۳۰	۰/۱۹۲
	b(L/mmol)	۰/۰۵۳	۰/۰٤٤
	R^2	۰/۹٤۲	۰/۹۹۱
Freundlich constants	K (mmol/g)	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰
	1/n	۰/۸٥٤	۰/۷۹٤
	R^2	۰/۹۹۳	۰/۹۸۸

با توجه به مقادیر جدول مذکور مشخص شد که جاذب کامپوزیتی سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل از معادلات فروندلیچ تبعیت کرده و جذب در این نوع کامپوزیت، به‌صورت چند لایه‌ای است. همچنین جاذب کامپوزیتی مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل از معادلات لانگمور تبعیت کرده و جذب در این نوع کامپوزیت سنتز شده، به‌صورت تک لایه‌ای است [۱۴]، [۱۵].

آزمایش محیط پیوسته

در این مرحله مقدار ۰/۲ گرم از هر دو کامپوزیت، وارد ستون‌های شیشه‌ای به قطر ۰/۸CM و طول ۶۰CM گردید. سپس ۲۰۰CC از محلول حاوی کاتیون Cs^+ همراه با ردیاب (با غلظت ۵۰PPM) از ستون عبور داده شد. اکتیویته آزمایشگاهی ردیاب مورد نظر ۹۰۰MCI بود. دبی جریان خروجی با پمپ‌های پریستالتیک در حدود ۰/۶۶ میلی‌لیتر بر دقیقه تنظیم شد. محلول خروجی از ستون در حجم‌های ۱۰ میلی‌لیتری در ظروف پلی‌اتیلنی جمع‌آوری شده و میزان $Cs^{۱۳۷}$ موجود با دستگاه گاماسپکترومتری اندازه‌گیری شد. نهایتاً با رسم نسبت A_I/A_F (اکتیویته ورودی به اکتیویته نهایی) بر حسب حجم مایع خروجی، منحنی‌های جذبی در روش پیوسته تهیه شد [۱۶].

شکل ۷ نمودار جریان پیوسته ()[۱] جذب یون سزیم بر روی کامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل۶. نمودار جریان پیوسته () برای جذب یون Cs^+ روی (سمت راست) کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل و (سمت چپ) کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII- پلی‌اکریلونیتریل

۱. Breakthrough

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

در انتها با استفاده از نرم‌افزارمتلب برنامه‌ای تهیه شد که میزان ظرفیت جذب روی جاذب سنتز شده را در شرایطی که فقط ۰/۰۵درصد جاذب اشباع شده باشد (شرایط عملی) و یا به‌صورت کامل و ۱۰۰ درصد، محاسبه کند [۱۷]، [۱۸]. حجم جاذب وارد شده در داخل ستون $۲/۵CM^۳$ است از این رو، دبی جریان عبوری ۱۵ BV/HR است. در جدول ۳ میزان ظرفیت جذب برای هر دو کامپوزیت سنتز شده در شرایط ۵ درصدی و ۱۰۰ درصدی و همچنین راندمان ستون جاذب، ارائه شده است.

جدول۳. میزان ظرفیت جذب در آزمایش ستونی برای جاذب‌ها

Flowrate,BV/hr		Dynamic capacity at 5% breakthrough(Practical)		Dynamic capacity at 100% breakthrough(Total)		Efficiency of adsorbent column(%)	
CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN	CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN	CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN	CER.M-PAN	H.C.F.C-PAN
۱۵	۱۵	۲/۴۳ mg Cs/g	۷/۳۱ mg Cs/g	۸/۵ mg Cs/g	۱۱/۴۶ mg Cs/g	۲۸/۶۷	۶۳/۷۸

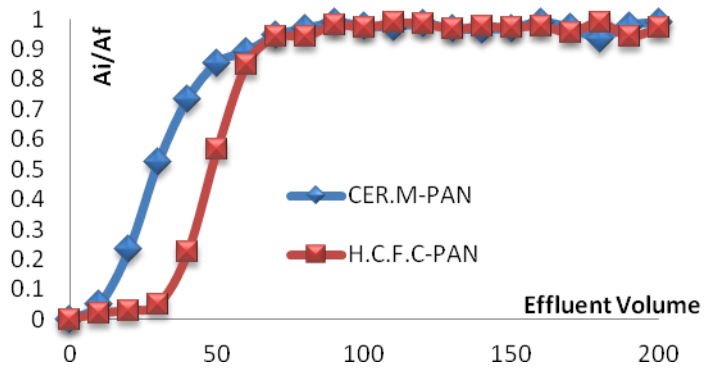
مقایسه کامپوزیت‌ها

کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل: با فرمول مولکولی $Ce(OH)_2(HMo_4)_2$-PAN ساختار کریستالی ندارد و به‌صورت آمورف است. سطح مخصوص گرانول‌های جاذب معادل $۲۵/۱۸/m^۲g$ است که نشان‌گر ساختار نامناسب این کامپوزیت برای تبادل یونی است. پارامترهای ترمودینامیکی گرماگیر بودن فرآیند را نشان می‌دهد. این کامپوزیت از رابطهٔ فروندلیچ تبعیت کرده و ثابت رابطهٔ فروندلیچ (K) آن برابر ۰/۰۰۷ و (1/n) برابر ۰/۸۵۴ و عدد رگراسیون $R^۲$=۰/۹۹۳ است. ظرفیت جذب کل پویا[۱] برابر با ۸/۵۰mg Cs/g و ظرفیت جذب عملی پویا[۲] برابر با ۲/۴۳۱ mgCs/g (حجم بستر $۲/۵ cm^۳$ و دبی جریان ۱۵ BV/h) و راندمان ستون برابر ۲۸/۶۷ درصد شد.

کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفرات‌II-پلی‌اکریلونیتریل: با فرمول مولکولی $Cu_2Fe(CN)_6$-PAN ساختار کریستالی دارد. سطح مخصوص گرانول‌های جاذب معادل $۷۳/۵۸/m^۲g$ بوده که بیان‌گر ساختار مناسب این کامپوزیت برای تبادل یونی است. پارامترهای ترمودینامیکی گرماگیر بودن فرآیند را نشان می‌دهد. بیشینهٔ ظرفیت جذب (q_{max}) از رابطهٔ لانگمور تبعیت کرده و برابر با ۰/۱۹۲mmol/g و ثابت رابطهٔ لانگمور (b) برابر با ۰/۰۴۴ و عدد رگراسیون $R^۲$=۰/۹۹۱ است. ظرفیت جذب کل پویا برابر با ۱۱/۴۶mgCs/g و ظرفیت جذب عملی پویا برابر با ۷/۳۱ mg Cs/g (حجم بستر $۲/۵ cm^۳$ و دبی جریان ۱۵ BV/h) و راندمان ستون برابر ۶۳/۷۸ درصد شد.

۱. DC,Total ۲. DC,Practical

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۷. مقایسهٔ جذب ستونی هر دو کامپوزیت و نمایش اختلاف عمل‌کرد در جذب ۵ درصد

با توجه به شکل ۷ و مقایسهٔ راندمان جذب ستونی جاذب‌ها، مشخص شد که در شرایط محیطی برابر، کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII-پلی‌اکریلونیتریل میزان کاتیون Cs^+ بیش‌تری را نسبت به کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل جذب می‌کند. این امر به‌دلیل خاصیت تخلخلی زیاد کامپوزیت مس‌هگزاسیانوفراتII-پلی-اکریلونیتریل و همچنین آمورف بودن کامپوزیت سریم‌مولیبدات-پلی‌اکریلونیتریل است.

منابع

1. A. Zhang, Q. Hu, "Adsorption of cesium and some typical coexistent elements onto a modified macroporous silica-based supramolecular recognition material", Chemical Engineering Journal, No.159 (2010) 58-66.
2. J. Vejsada, T. D. Hradil, Z. Øanda, E. Jelínek, K. Štulík, "Adsorption of cesium on Czech smectite-rich clays – a comparative study", Applied Clay Science, No. 30 (2005) 53-66.
3. J. Wu, B. Li, J. Liao, Y. Feng, D. Zhang, J. Zhao, W. Wen, Y. Yang, N. Liu, "Behavior and analysis of cesium adsorption on montmorillonite mineral", Journal of Environmental Radioactivity, No.100 (2009) 914-920.
4. Y. Park, Y. C. Lee, W. S. Shin, S. J. Choi, "Removal of cobalt, strontium and cesium from radioactive laundry wastewater by ammonium molybdophosphate–polyacrylonitrile (AMP–PAN)", Chemical Engineering Journal, No.162 (2010) 685-695.
5. A. K. Kaygun, S. Akyil, "Study of the behaviour of thorium adsorption on PAN/zeolite composite adsorbent", Journal of Hazardous Materials, No 147 (2007) 357-362.
6. S. Rengaraj, Y. Kim, C. K. Joo, K. Choi, J. Yi, "Batch adsorptive removal of copper ions in aqueous solutions by ion exchange resins: 1200H and IRN97H", Korean Journal of Chemical Engineering, No. 21 (2004).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

7. Y. Omer, A.Yalcin, G. Fuat, "Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite", Water Research, No. 37 (2003).

8. F. Šebesta, J. John, A. Motl, J. Watson," Development of PAN-based absorbers for treating waste problems at U.S. DOE facilities", 5th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM (1995) 361-370.

9. A. Nilchi, B. Maalek, A. Khanchi, M. Ghanadi Maragheh, A. Bagheri, "Cerium(IV) molybdate cation exchanger: Synthesis, properties and ion separation capabilities", Radiation Physics and Chemistry, No.75 (2) (2006) 301-308.

10. N. Unlu, M. Ersoz, "Adsorption characteristics of heavy metal ions onto a low cost biopolymeric sorbent from aqueous solutions", Journal of Hazardous Materials, No. 136 (2006) 272-280.

11. E. Metwally, T. El-Zakla, R. R. Ayoub, "Thermodynamics study for the sorption of 134Cs and 60Co radionuclides from aqueous solutions", Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, Vol.9, No. 1 (2008) 1-6.

12. H. M. F. Freundlich,"Uber die adsorption in losungen", International Journal of Research in Physical Chemistry and Chemical Physics, Vol.57 (1906) 385-470.

13. S. M.Hasany, M. H. Chaudhary, "Adsorption behavior of microamounts of cesium on manganese dioxide", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 84/2 (1984) 247-256.

14. C. Namasivayam, M. V. Sureshkumar, "Removal of chromium (VI) from water and wastewater using surfactant modified coconut coir pith as a biosorbent", Bioresource Technology, No. 99 (2008) 2218-2225.

15. S. M. Hasany, M. H. Chaudhary, "Adsorption of cadmium from aqueoussolutions on manganese dioxide", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, No.89 (1985) 353-363.

16. A. M. El-Kamash, "Evaluation of zeolite a for the sorptive removal of Cs^{+} and Sr^{2+} ions from aqueous using batch and fixed bed column operations", Journal of Hazardeous Materials, No. 151 (2008) 432-445.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

17. R. Saberi, A. Nilchi, S. RasoliGarmarodi, R. Zarghami, "Adsorption characteristic of 137Cs from aqueous solution using PAN-based sodium titano silicate composite", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, No. 284 (2010) 461-469.

18. T. A.Todd, V. N. Romanovskiy, "A comparison of crystalline silicotitanate and ammonium molybdophosphate-polyacrylonitrile composite sorbent for the separation of cesium from acidic waste", Radiochemistry , Vol. 47 (4) (2005) 398-402.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]