



Short Paper
مقاله کوتاه

جذب رادیونوکلیدهای ^{90}Sr ، ^{140}La و ^{60}Co بر روی مبادله کننده‌های یونی معدنی سنتزی

عبدالرضا نیلچی^{۱*}، محمدرضا حاج محمدی^۲، سمیه رسولی گرمارودی^۱

۱- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۳۶۵، تهران - ایران

۲- دانشکده شیمی، دانشگاه مازندران، صندوق پستی: ۵۴۳، بابلسر - ایران

چکیده: در این پژوهش، سه تبادل گر معدنی پتاسیم روی هگزاسیانوفرات (PZF)، کامپوزیت منیزیم اکسید- پلی اکریلونیتریل (MgO-PAN) و آمونیم مولیبد و فسفات (AMP) تهیه گردید. برای مطالعه‌ی خواص ترکیبات سنتز شده، تکنیک‌هایی مانند طیف‌سنجی مادون قرمز (IR)، پراش پرتو ایکس (XRD) و تجزیه‌ی گرماگرانی‌سنجی (TGA) به کار گرفته شد. هم‌چنین پایداری هر یک از تبادل گرها در برابر حرارت، و اثر جذب تابش گاما تا دز ۱۵۰ کیلوگری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. سپس خواص تبادل یونی هر یک از آنها با محاسبه‌ی ضریب توزیع برای یون‌های $^{90}\text{Sr}^{2+}$ ، $^{140}\text{La}^{3+}$ و $^{60}\text{Co}^{2+}$ به روش ناپیوسته در pHهای مختلف بررسی گردید. نتایج نشان داد که میزان جذب کاتیون‌ها بر روی هر سه مبادله کننده با افزایش pH محلول از ۱ تا ۷ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پتاسیم روی هگزاسیانوفرات، کامپوزیت منیزیم اکسید- پلی اکریلونیتریل، آمونیم مولیبد و فسفات، تبادل گر معدنی

Sorption of ^{90}Sr , ^{140}La and ^{60}Co on Synthesized Inorganic Ion Exchangers

A. Nilchi^{1*}, M.R. Hadjmohammadi², S. Rasouli Garmarodi¹

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

2- Faculty of Chemistry, Mazandaran University, P.O. Box: 543, Babolsar - Iran

Abstract: Three cation exchangers namely potassium zinc hexacyanoferrate (II) (PZF), ammonium molybdophosphate (AMP) and magnesium oxide-polyacrylonitrile composite (MgO-PAN) were synthesized. The physicochemical properties of these ion exchangers were determined using different techniques including infrared spectroscopy (IR), X-ray diffraction (XRD) and thermogravimetric analysis (TGA). Furthermore, the thermal stability and the effect of gamma irradiation up to 150kGy on these ion exchangers were investigated. The distribution coefficients of ^{90}Sr , ^{140}La and ^{60}Co were studied for these ion exchangers by varying the pH conditions and by the use of batch method. The three prepared materials showed an increased trend in the sorption for three radionuclides (^{90}Sr , ^{140}La and ^{60}Co) with the increasing of pH values from 1 to 7.

Keywords: Potassium Zinc Hexacyanoferrate (II), Magnesium Oxide-Polyacrylonitrile Composite, Ammonium Molybdophosphate, Cation Exchanger

*email: anilchi@aeoi.org.ir



جذب اتمی مدل PerkinElmer 843، دستگاه تجزیه‌ی عنصری CHNSO Elementar-Vario ELIII، آشکارساز سوسوزن مایع مدل QuantulusTM 1220 Wallac و طیف‌سنج پرتوگاما مدل GMX-15185-5 Ortec، دستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش بودند.

۲-۲ تهیه‌ی مبادله‌کننده‌های یونی معدنی

۲-۲-۱ پتاسیم روی هگزاآسیانوفرات (II) (PZF)

این مبادله‌کننده از مخلوط کردن تدریجی محلول‌های ۱ مولار پتاسیم هگزاآسیانوفرات (II) و روی سولفات با نسبت حجمی ۱:۴ در دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تهیه شد. رسوب سفید رنگ حاصله پس از هفت روز باقی ماندن در محلول مادر صاف و با آب مقطر شستشو داده شده و در داخل آون با دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک گردید. در نهایت با استفاده از الک‌های استاندارد بخش دانه‌بندی ۱۰۰-۲۰۰ مش برای عملیات بعدی انتخاب شد.

۲-۲-۲ کامپوزیت اکسید منیزیم- پلی‌اکریلونیتریل (MgO-PAN)

ابتدا در بالن یک لیتری سه دهانه‌ی مجهز به سیستم هم‌زن، در دمای ۵۰°C و در مدت دو ساعت ۲ گرم منیزیم اکسید به طور یکنواخت در دی‌متیل سولفو کسید پراکنده شد. سپس پودر پلی‌اکریلونیتریل (با نسبت وزنی ۱:۱ با منیزیم اکسید) و چند قطره از سورفکتانت TWEEN-80 به مخلوط حاصل اضافه گردید. مخلوط به مدت سه ساعت دیگر در دمای ۵۰°C هم‌زده شد تا کاملاً یکنواخت و همگن شود. در ادامه برای تشکیل دانه‌های کامپوزیت از نازل^(۲) استفاده شد [۱۱]. دانه‌ها پس از تشکیل شدن در درون آب، از طریق صافی جدا و با آب مقطر شسته شده و در دمای ۵۰°C به مدت دو روز خشک شدند. این‌جا نیز بخش دانه‌بندی ۱۰۰-۲۰۰ مش انتخاب شد.

۲-۲-۳ آمونیم مولیبد و فسفات (AMP)

برای تهیه‌ی این ترکیب، محلول آمونیم هپتا مولیبدات $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ با محلول آمونیم نترات ۰/۵ مولار و با ۵۰ میلی‌لیتر فسفریک اسید ۲ مولار در دمای اتاق مخلوط شد. با افزودن تدریجی نیتریک اسید ۶ مولار به این محلول رسوب زرد

پسماندهای پرتوزای حاصل از بهره‌برداری از رآکتورهای هسته‌ای و بخش‌های تحقیقاتی حاوی مقادیر قابل ملاحظه‌ای از رادیونوکلیدهای مختلف مانند ^{51}Cr ، ^{54}Mn ، ^{59}Fe ، ^{60}Co ، ^{90}Sr و ^{137}Cs با نیم-عمرهای متفاوت می‌باشند. برای کاهش خطرات ناشی از رادیونوکلیدهای به ویژه دراز-عمر لازم است روش‌های اصولی برای تصفیه‌ی پسماندها در قبل از دفع نهایی آن‌ها به کار گرفته شود. تصفیه‌ی پسماندهای پرتوزا به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به رسوب‌گیری شیمیایی، تبادل یونی، تبخیر و جداسازی غشایی اشاره کرد [۱] تا [۴]. روش تبادل یونی یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای جداسازی گزینشی رادیونوکلیدها است و برای این منظور عمدتاً از مبادله‌کننده‌های یونی معدنی، به دلیل داشتن ویژگی‌های برجسته‌ای چون گزینندگی مطلوب، مقاومت در دماهای بالا و در برابر تابش «پرتوزا» و نیز سازگاری با ماتریس‌هایی چون سیمان و شیشه استفاده می‌شود [۵]. چالشی که در پسمانداری هسته‌ای وجود دارد جداسازی مؤثر و کارآمد رادیونوکلیدهای دراز-عمر از مقادیر بسیار زیاد پسماند است. هم‌چنین این پسماندها ممکن است به شدت اسیدی یا بازی باشند [۶ تا ۱۰]. در چند دهه‌ی اخیر تحقیقات وسیعی در زمینه‌ی سنتز تبادل‌گرهای یونی معدنی یا بهینه‌سازی روش تهیه‌ی آن‌ها صورت گرفته است. در مطالعه‌ی حاضر سنتز سه مبادله‌کننده‌ی یونی معدنی و بررسی قابلیت آن‌ها در جذب رادیونوکلیدهای ^{90}Sr ، ^{140}La و ^{60}Co مدنظر بوده است.

۲- بخش تجربی

۱-۲ مواد و دستگاه‌ها

مواد شیمیایی مورد استفاده شامل پتاسیم هگزاآسیانوفرات (II)، روی سولفات، منیزیم اکسید، دی‌متیل سولفو کسید، آمونیم هپتا مولیبدات، آمونیم نترات، پلی‌اکریلونیتریل، فسفریک اسید، نیتریک اسید، همگی با خلوص تجزیه‌ای و محصول شرکت‌های مرک یا آلد ریچ بودند.

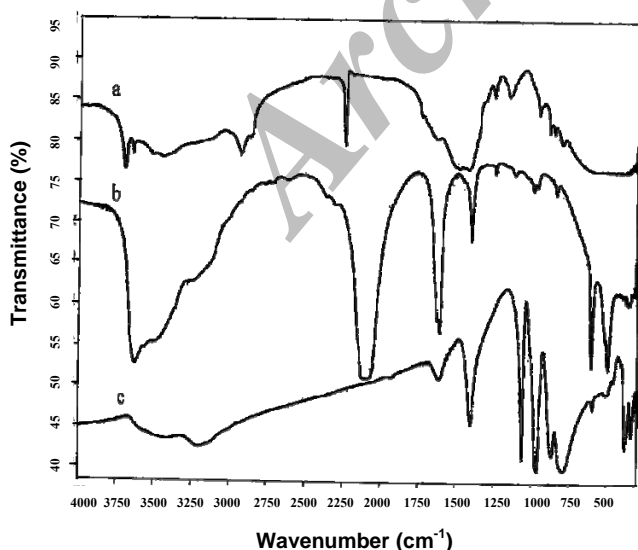
طیف‌سنج مادون قرمز مدل 22 Brucker-Vector، pH متر مدل GC-841، دستگاه گرماگرانی سنج^(۱) مدل Dupont-951، دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Philips 1800PW، طیف‌سنج



که در آن، A_i فعالیت کاتیون در قبل از تماس با مبادله کننده، A_f فعالیت آن پس از حصول تعادل بین دو فاز، V حجم محلول در تماس با مبادله کننده برحسب میلی لیتر و M جرم مبادله کننده برحسب گرم می باشد.

۳- نتایج و بحث

طیف مادون قرمز این مبادله کننده ها در شکل ۱ نشان داده شده است. قله ی جذب پهن در ناحیه ی $2900-3650\text{cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی مولکول های آب درون شبکه ای، قله در 1620cm^{-1} به دلیل ارتعاش خمشی مولکول های آب، و قله ی مشاهده شده در حدود 2200cm^{-1} نشانه ی حضور گروه سیانید می باشد. در طیف مربوط به پتاسیم روی هگزا سیانوفرات، قله های ناحیه ی $600-450\text{cm}^{-1}$ به علت وجود پیوند کربن-فلز، و قله در 1300cm^{-1} مربوط به جذب سطحی گروه سولفات در خلل و فرج ترکیب می باشد. در طیف کامپوزیت، قله های جذب مشاهده شده در 3000cm^{-1} و $1600-1300\text{cm}^{-1}$ به ترتیب، به علت ارتعاش کششی CH - و هم پوشانی قله های مربوط به ارتعاش خمشی گروه CH_2 - و ارتعاش خمشی Mg-O-H می باشد. در طیف IR نمونه ی آمونیم مولیبد و فسفات قله های $970-730\text{cm}^{-1}$ ، 1100cm^{-1} و 1400cm^{-1} مربوط به گروه های MoO_4^{2-} و PO_4^{3-} و ارتعاش خمشی (N-H) است [۱۲].



شکل ۱- طیف مادون قرمز (a) MgO-PAN، (b) PZF و (c) AMP

رنگی حاصل شد. سپس فاز جامد از محلول جدا و پس از چند بار شستشو با آب مقطر در دمای 50°C درجه ی سانتی گراد خشک شد. با استفاده از الک های استاندارد بخش دانه بندی $100-200$ مش انتخاب گردید.

۳-۲ شناسایی مبادله کننده ها و بررسی خواص آن ها

برای شناسایی مبادله کننده های سنتز شده از طیف سنجی مادون قرمز و پراش پرتو ایکس استفاده شد. به منظور بررسی ترکیب شیمیایی کامپوزیت سنتز شده، 25 میلی گرم از نمونه در 25 میلی لیتر سولفوریک اسید $2M$ حل و بعد از رقیق سازی، مقدار منیزیم موجود از طریق طیف سنجی جذب اتمی اندازه گیری شد. برای اندازه گیری عناصر کربن، هیدروژن و نیتروژن موجود در کامپوزیت از دستگاه تجزیه ی عنصری CHNSO استفاده شد.

به منظور بررسی پایداری حرارتی، میزان معینی از هر نمونه تا دمای 800°C درجه ی سانتی گراد با آهنگ گرمایش 1°C min^{-1} و در محیط بی اثر آرگون حرارت داده شده، میزان کاهش وزن به صورت تابعی از دما مورد بررسی قرار گرفت.

برای بررسی میزان پایداری تابشی جاذب ها، 1 گرم از هر نمونه به وسیله ی چشمه ی پرتو زای ^{60}Co با آهنگ 0.38Gy/s تا رسیدن به دزهای 50 و 150kGy پرتو دهی و با استفاده از تکنیک های پراش پرتو ایکس و طیف سنجی مادون قرمز تأثیرات احتمالی تابش یوننده بر روی آن ها بررسی شد.

برای بررسی رفتار تبادل یونی جاذب ها، ضریب توزیع رادیونوکلیدهای $^{90}\text{Sr}^{2+}$ ، $^{60}\text{Co}^{2+}$ و $^{140}\text{La}^{3+}$ بر روی هر سه گروه از مبادله کننده ها محاسبه گردید. 50 میکرو لیتر از محلول 10^{-4} مولار هر یون به 0.1 گرم از مبادله کننده اضافه و pH محلول ها با استفاده از کلریدریک اسید تنظیم گردید (حجم نهایی نمونه ها 20 میلی لیتر بود). سپس نمونه ها به مدت 5 ساعت و در دمای 25°C درجه ی سانتی گراد هم زده شد. به منظور تعیین ضریب توزیع، میزان فعالیت محلول حاوی این کاتیون ها در قبل و در بعد از تماس با مبادله کننده توسط طیف سنج پرتو گاما و یا آشکارساز سوسوزن مایع تعیین گردید. برای محاسبه ی ضریب توزیع از رابطه ی زیر استفاده شد

$$K_d = \frac{A_i - A_f}{A_f} \times \frac{V}{M} \text{ (mL/g)} \quad (1)$$



تا دمای 410°C به علت آزاد شدن مولکول‌های آب درون شبکه-ای و نیز خروج سیانوژن $(\text{CN})_2$ از ساختار مبادله کننده می‌باشد. در محدوده‌ی دمایی 600°C - 410°C وزن مبادله کننده ثابت بوده و در دمای بالاتر از 600°C به دلیل خروج کربن به صورت CO_2 و تشکیل اکسید فلزات آهن و روی وزن ترکیب کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار گرماگرانی سنجی و با استفاده از رابطه‌ی آلبرتی (رابطه‌ی ۲) تعداد مولکول‌های آب خارج از شبکه‌ی این مبادله کننده $n=9$ می‌باشد [۱۴].

$$\frac{18 \times n}{18 \times n + MW} = \frac{\text{Weightloss \%}}{100} \quad (2)$$

که در آن، MW جرم مولکولی ماده‌ی مبادله کننده بدون در نظر گرفتن تعداد مولکول‌های آب آن می‌باشد.

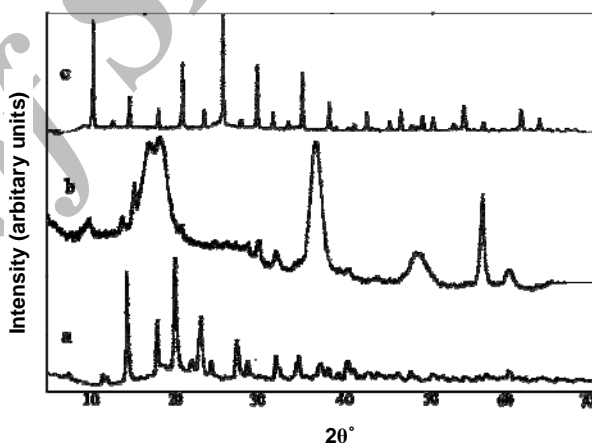
در منحنی گرماگرانی سنجی کامپوزیت، کاهش وزن تا دمای 140°C درجه‌ی سانتی گراد به علت حذف مولکول‌های آب آزاد و پس از آن به دلیل تخریب ساختار پلی‌مر موجود در کامپوزیت می‌باشد [۱۵]. در نمودار گرماگرانی سنجی مربوط به مبادله کننده‌ی AMP، کاهش وزن تا دمای 130°C به دلیل از دست دادن مولکول‌های آب آزاد و از دمای 130°C تا 400°C به علت آزاد شدن مولکول‌های آب درون شبکه‌ای می‌باشد. کاهش در وزن نمونه در دماهای بالاتر به دلیل تجزیه‌ی ساختار مبادله کننده، خروج گاز آمونیاک و تشکیل مولیدن اکسید است. با توجه به نمودار گرماگرانی سنجی، مقدار کاهش وزن نمونه تا دمای 130°C درجه‌ی سانتی گراد 2.9% درصد می‌باشد. به این ترتیب با استفاده از رابطه‌ی آلبرتی تعداد مولکول‌های آب خارج از شبکه‌ی مبادله کننده $n=3$ می‌باشد.

برای بررسی تغییرات احتمالی به وجود آمده در ساختار مبادله کننده‌ها در اثر جذب پرتو گاما، طیف مادون قرمز و الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها در قبل و بعد از پرتو دهی با پرتو گاما مورد مقایسه قرار گرفت. از آنجا که در طیف مادون قرمز و الگوی پراش مربوط به نمونه‌ها در قبل و در بعد از پرتو دهی تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد، می‌توان نتیجه گرفت که هر سه مبادله کننده در برابر تابش گاما تا دز 150 kGy پایدار می‌باشند (شکل ۴ تا ۹).

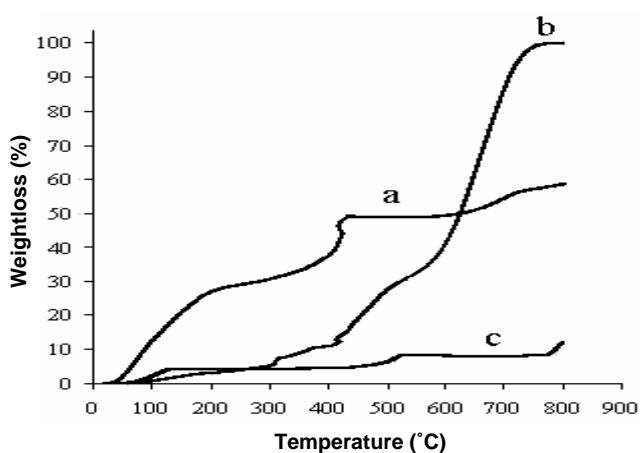
بررسی الگوهای پراش پرتو ایکس نشان داد که هر سه مبادله کننده دارای ساختار بلوری می‌باشند (شکل ۲). از مقایسه‌ی الگوهای پراش پرتو ایکس مبادله کننده‌های AMP و PZF با نمونه‌های استاندارد، در شناسایی و تأیید ساختار این مبادله کننده‌ها استفاده شد [۱۳].

نتایج تجزیه‌ی عنصری کامپوزیت و مطالعات طیف سنجی جذب اتمی آن نشان داد که درصد عناصر کربن، هیدروژن، نیتروژن و منیزیم در آن، به ترتیب، 36.1% ، 4.6% ، 15.4% و 26.4% می‌باشد.

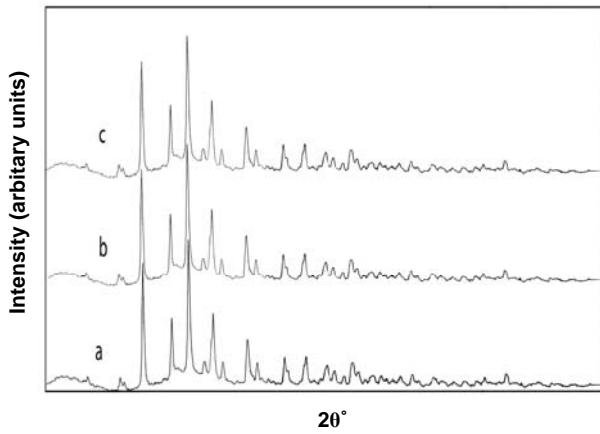
نمودار گرماگرانی سنجی این مبادله کننده‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. در مورد پتاسیم روی هگزا سیانوفرات کاهش وزن تا دمای 150°C به دلیل خروج مولکول‌های آب آزاد و



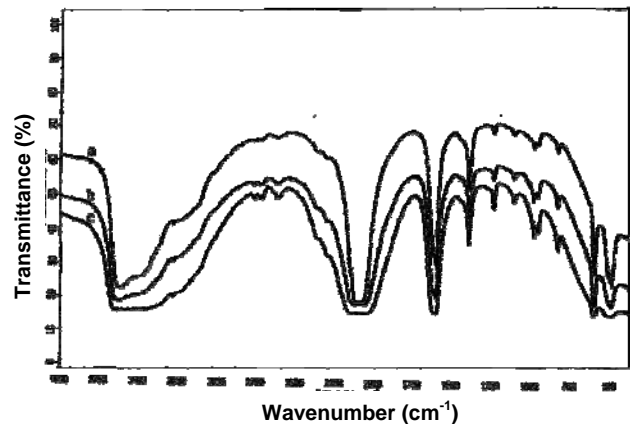
شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس (a) PZF، (b) MgO-PAN و (c) AMP.



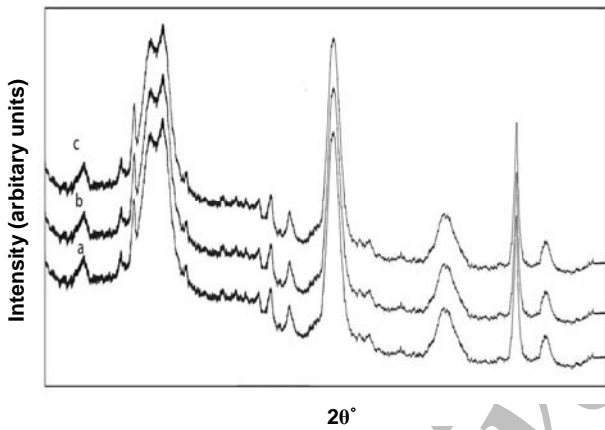
شکل ۳- نمودار گرماگرانی سنجی (a) PZF، (b) MgO-PAN و (c) AMP.



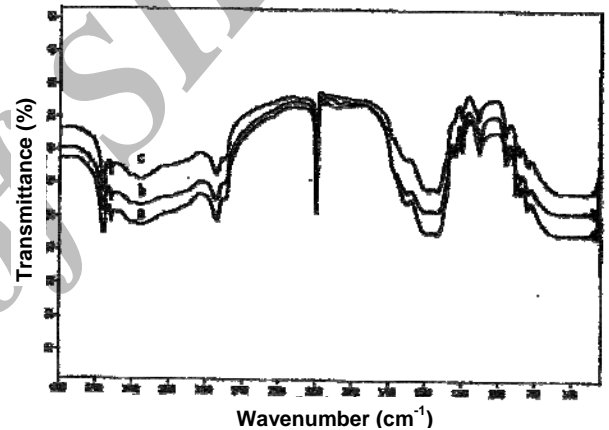
شکل ۷- الگوی پراش پرتو ایکس نمونهی PZF (a) در قبل از پرتودهی با پرتو گاما، (b) بعد از جذب تابش تا دز ۵۰ kGy و (c) بعد از جذب تابش تا دز ۱۵۰ kGy.



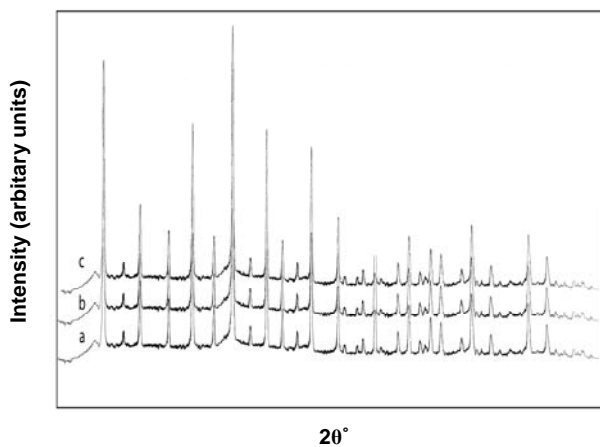
شکل ۴- طیف مادون قرمز نمونهی PZF (a) در قبل از پرتودهی با پرتو گاما، (b) بعد از جذب تابش تا دز ۵۰ kGy و (c) بعد از جذب تابش تا دز ۱۵۰ kGy.



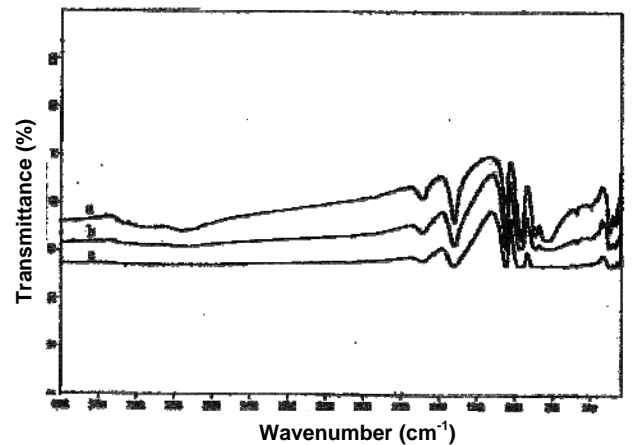
شکل ۸- الگوی پراش پرتو ایکس نمونهی Mgo-PAN (a) در قبل از پرتودهی با پرتو گاما، (b) بعد از جذب تابش تا دز ۵۰ kGy و (c) بعد از جذب تابش تا دز ۱۵۰ kGy.



شکل ۵- طیف مادون قرمز نمونهی Mgo-PAN (a) در قبل از پرتودهی با پرتو گاما، (b) بعد از جذب تابش تا دز ۵۰ kGy و (c) بعد از جذب تابش تا دز ۱۵۰ kGy.



شکل ۹- الگوی پراش پرتو ایکس نمونهی AMP (a) در قبل از جذب پرتو گاما، (b) بعد از جذب تابش تا دز ۵۰ kGy و (c) بعد از جذب تابش تا دز ۱۵۰ kGy.



شکل ۶- طیف مادون قرمز نمونهی AMP (a) در قبل از قرارگیری در معرض پرتو گاما، (b) بعد از جذب تابش تا دز ۵۰ kGy و (c) بعد از جذب تابش تا دز ۱۵۰ kGy.



جدول ۱- اثر pH محلول بر ضریب توزیع کاتیون‌های Sr^{2+} ، Co^{2+} و La^{3+} بر روی PZF

pH یون	pH				
	۷	۵	۳	۲	۱
Sr^{2+}	۱۹۰۰	۱۷۵۸	۱۱۶۰	۵۴۱	۲۱۱
Co^{2+}	۱۷۹۰	۹۲۴	۴۲۰	۱۹۶	۹۱
La^{3+}	۱۸۹۰	۹۲۹	۵۰۱	۷۹	۱۰۰

جدول ۲- اثر pH محلول بر ضریب توزیع یون‌های Sr^{2+} ، La^{3+} ، Co^{2+} بر روی کامپوزیت.

pH یون	pH				
	۷	۵	۳	۲	۱
Sr^{2+}	۱۱۹۴	۹۸	۶۳۵	۲۹۴	۴۶
Co^{2+}	۲۰۰۱	۱۷۶۸	۱۱۳۵	۹۴۵	۱۵۰
La^{3+}	۱۴۹۰	۱۳۲۰	۸۱۲	۳۸۲	۵۲

جدول ۳- اثر pH محلول بر ضریب توزیع یون‌های Sr^{2+} ، La^{3+} ، Co^{2+} بر روی AMP.

pH یون	pH				
	۷	۵	۳	۲	۱
Sr^{2+}	۱۴۷۰	۱۷۵۰	۱۲۵۰	۶۱۴	۲۳۰
Co^{2+}	۱۱۰۹	۱۲۶۷	۷۵۱	۴۷۰	۱۰۳
La^{3+}	۱۵۲۰	۱۶۸۱	۱۴۱۰	۵۳۰	۲۱۳

۴- نتیجه گیری

مطالعات و بررسی‌های انجام یافته نشان داد که هر سه تبادل گر معدنی سنتز شده دارای ساختار بلوری می‌باشند، پایداری تابشی مطلوبی دارند و با جذب پرتو گاما تا دز ۱۵۰ کیلوگری تخریب نمی‌شوند. بررسی خواص تبادل یونی آن‌ها نشان داد که از آن‌ها می‌توان برای جذب رادیونوکلیدهای Sr^{90} ، Co^{60} و La^{140} استفاده کرد.

پی‌نوشت‌ها:

۱- Thermograuimeric Analysis

۲- Nozzle

اثر pH محلول بر میزان جذب یون‌های Sr^{2+} ، Co^{2+} و La^{3+} بر روی پتاسیم روی هگزاسیانوفرات (II) در جدول ۱ نشان داده است. با توجه به مقادیر ضرایب توزیع مشاهده شد که با افزایش pH محلول تا ۷ میزان جذب هر سه یون احتمالاً به دلیل کاهش اثر رقابت H^+ افزایش می‌یابد و در $\text{pH}=7$ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. تحقیقات مشابهی بر روی خواص تبادل یونی پتاسیم روی هگزاسیانوفرات (II) انجام گرفته است که نشان می‌دهد که pH محلول تأثیر به‌سزایی بر میزان جذب یون‌ها دارد. درصد جذب یون سزیم بر روی PZF در محدوده‌ی $\text{pH}=1.9-7.2$ برابر ۹۹٪ بوده ولی با افزایش pH میزان جذب این یون به شدت کاهش یافته است [۱۶]. مطالعات کوپیکا و همکارانش نیز افزایش ضریب توزیع یون‌های Hf و Nb بر روی مبادله‌کننده‌ی PZF با افزایش pH محلول از ۱ تا ۴ را نشان داده است [۱۷].

نتایج به دست آمده از بررسی ضریب توزیع رادیونوکلیدهای Sr^{90} ، La^{140} و Co^{60} بر روی کامپوزیت در pH‌های مختلف (جدول ۲) نشان داد که با افزایش pH محیط تا ۷ ضریب توزیع به تدریج افزایش می‌یابد. دلیل این امر خصلت آمفوتری منیزیم اکسید است، که جزء مبادله‌کننده‌ی یون در کامپوزیت می‌باشد (MgO) و سایر اکسیدهای معدنی آبدار می‌توانند هم به عنوان مبادله‌کننده‌ی کاتیون و هم به عنوان تبادل گر آنیونی عمل کنند و تحت شرایط معینی می‌توانند هر دو خاصیت را هم‌زمان دارا باشند). بررسی جذب یون‌های Na^+ ، Cs^+ و Co^{2+} بر روی کامپوزیت تیتانیم دی‌اکسید- پلی‌اکریلونیتریل در pH‌های مختلف نیز نتایج مشابهی نشان داد: با افزایش pH ضریب توزیع این کاتیون‌ها بر روی کامپوزیت افزایش می‌یابد [۱۸].

مکانیسم جذب یون‌هایی نظیر Zr^{4+} ، Cu^{2+} ، Fe^{3+} ، یون‌های قلبیایی و قلبیایی خاکی بر روی آمونیم مولید و فسفات به تفصیل بررسی شده است [۱۹]. بررسی تغییرات ضریب توزیع کاتیون‌های Sr^{2+} ، La^{3+} ، Co^{2+} بر روی آمونیم مولید و فسفات در pH‌های مختلف نشان داده است که با بالا رفتن pH محلول میزان تبادل یون افزایش یافته و در $\text{pH}=5$ به بیشینه مقدار خود می‌رسد (جدول ۳).



References:

1. IAEA, "Application of ion exchange processes for the treatment of radioactive waste and management of spent ion exchangers," Technical Reports Series No.408, IAEA, Vienna (2002).
2. D.H. Logsdail, A.L. Mills, "Solvent extraction and ion exchange in the nuclear fuel cycle," Ellis Horwood Ltd (1985).
3. G.M. Maragheh, S.W. Husain, A.R. Khanchi, "Selective sorption of radioactive cesium and strontium on stannic molybdophosphate ion exchanger," Appl. Radiat. Isot. 50, 459-465 (1999).
4. A. Mushtaq, "Inorganic ion exchangers: Their role in chromatographic radionuclide generator for the decade 1993-2002," J. Radioanal. Nucl. Chem. 262, 797-810 (2004).
5. "IAEA Immobilization of low and intermediate radioactive wastes with polymers," Technical reports series No. 289, IAEA, Vienna (1988).
6. IAEA, "Operation and control of ion exchange processes for treatment of radioactive wastes," Technical Reports Series No.78, IAEA, Vienna (1967).
7. K. Anil, K. Sen, "Synthetic inorganic ion exchangers," Sep. sci. tech nol 13, 517-540 (1978).
8. C.B. Amphlett, "Inorganic Ion Exchangers," Elsevier, Amsterdam (1964).
9. V. Vesely, V. Pekarek, "Synthetic inorganic ion exchangers (I)," Talanta 19, 219-262 (1972).
10. V. Pekarek, V. Vesely, "Synthetic inorganic ion exchangers (II)," Talanta 19, 1245-1283 (1972).
11. J.K. Moon, K.W. Kim, C.H. Jung, Y.G. Shul, E.H. Lee, "Preparation of organic-inorganic composite adsorbent beads for removal of radionuclides and heavy metal ions," J. Radioanal. Nucl. Chem. 246, 299-307 (2000).
12. J.A. Gadsden, "Infrared spectra of Minerals and related inorganic compounds," Butterworth, London (1975).
13. "Powder Diffraction Files Search Manual (Hanawalt Method) Inorganic," International Center for Diffraction Data, Swarthmor, PA, cards no. 9-412 & 33-1061 (1986).
14. G. Alberti, E. Torocca, A. Conte, "Stoichiometry of ion exchange materials containing zirconium and phosphate," J. Inorg. Nucl. Chem. 28, 607-613 (1966).
15. M.S.A. Rahaman, A.F. Ismail, A. Mustafa, "A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber," Polym. degrad. Stab. 92, 1421-1432 (2007).
16. K. Shakir, M. Sohsah, M. Soliman, "Removal of cesium from aqueous solutions and radioactive waste simulants by coprecipitate flotation," Sep. Purif. Technol. 54, 373-381 (2007).
17. B. Kubica, M. Tuteja-Krysa, H. Godunowa, Z. Szeglowksi, "Adsorption of Hf and Nb on copper and zinc hexacyanoferrate(II) from HCl and H₂SO₄ solutions," J. Radioanal. Nucl. Chem. 247, 535-539 (2001).
18. I.M. Ali, A.A. El-Zahhar, E.S. Zakaria, "Thermal and sorption behavior of polyacrylonitrile supported hydrous titanium dioxide," J. Radioanal. Nucl. Chem. 264, 637-644 (2005).
19. L.K. Neudachina, V.F. Barkovskii, "Sorption mechanism of metal ions on the salts of heteropoly acids," Russ. Chem. Rev. 50, 793-804 (1981).