



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

مقاله پژوهشی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱۱ شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صفحه ۱۳۳-۱۳۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

جداسازی رادیونوکلید درمانی ^{153}Sm از ناخالصی های Eu با استفاده از روش الکتروشیمیایی (ملغمه کردن جیوه)

فاطمه ناصری^۱، نفیسه سالک^{۲*}، امیر چرخ^۲، سارا وثوقی^۳

^۱ دانشکده فنی فومن، دانشگاه تهران، صندوق پستی ۴۳۵۸۱۳۹۱۱۵، فومن، ایران.

^۲ پژوهشکده چرخه سوخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵ تهران- ایران.

^۳ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵ تهران- ایران.

* تهران، تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده چرخه سوخت هسته ای صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵ تهران- ایران.

پست الکترونیکی: nsalek@aeoi.org.ir

چکیده

^{153}Sm به دلیل خواص هسته ای مطلوبش از جمله نیمه عمر ۹۳/۱ روز، انرژی بتای بیشینه ۰/۷۱ MeV و همچنین امکان تولید آن در مقادیر بالا با استفاده از یک راکتور با شار متوسط، رادیونوکلید جذابی در کاربردهای مختلف درمانی است. ^{153}Sm یک گسیلنده بتا و گاما است که به دلیل خواص ایده آل فیزیکی و شیمیایی اش برای درمان درد متاستاز استخوان ها که ناشی از سرطان های مختلف است، استفاده می گردد. در این مطالعه از طریق پرتودهی ^{153}Sm با نوترون حرارتی در راکتور تحقیقاتی تهران با شار $2/5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ، ساماریوم-۱۵۳ تهیه شد. سپس با بهینه سازی فاکتورهای مؤثر بر جداسازی ^{153}Sm از یورویوم با استفاده از یک الکترولیز دو مرحله ای در محیط سترات لیتیوم، مانند ولتاژ اعمال شده (۶ ولت)، تعیین غلظت ماده الکترولیت (۰/۲ مول بر لیتر)، pH (۶) و زمان الکترولیز (۳۰ دقیقه) بهره جداسازی ۸۸/۲۵٪ حاصل گردیده است.

کلیدواژگان: ساماریوم ۱۵۳، یورویوم، متاستاز، الکترولیز، بازده جداسازی.

۱. مقدمه

برای تصویربرداری توزیع رادیو دارو مناسب است. این خواص باعث شده این رادیونوکلید به عنوان یک رادیوداروی درمانی در کاهش درد متاستاز استخوان مورد توجه قرارگیرد. متاستاز استخوانی حدوداً ۵ برابر بیشتر از بافت استخوان سالم ساماریوم را جذب می کند در نتیجه سلول های بدخیم بیشتر در معرض تابش قرار می گیرند. پس از تزریق ویریدی کمتر از ۱٪ در خون به مدت ۵ ساعت و حدود ۶۵٪ مقدار این رادیودارو در اسکلت باقی می ماند و تقریباً پس از ۶ ساعت از طریق ادرار به طور کامل دفع می شود. این رادیونوکلید همراه با کمپلکس اتیلن دیامین

^{153}Sm ، یکی از ایزوتوپ های عنصر ساماریوم با نیمه عمر فیزیکی ۹۳/۱ روز است که با گسیل بتا و پاشی می کند و به عنصر یورویوم (^{153}Eu) تبدیل می شود که پایدار است. این ایزوتوپ سه نوع ذره بتا با انرژی های مختلف گسیل می کند که دارای انرژی بیشینه ۰/۶۴ MeV (۳۰٪)، ۰/۷۱ MeV (۴۹٪) و ۰/۸۱ MeV (۲۰٪) می باشد. برد متوسط آن در بافت نرم ۰/۶ میلی لیتر، در آب ۰/۵ میلی لیتر و بیشینه برد آن در آب ۳ میلی لیتر است [۱-۳]. همچنین این ایزوتوپ پرتوهای گامایی گسیل می کند که مهم ترین آن ها گامایی با انرژی ۱۰۳ KeV است که

مایکل ون^۴ و همکاران ارائه شد [۱۳]. طبق این مطالعه، استخراج در محیط‌های کلرید آبی به دلیل انرژی هیدراسیون بیشتر آنیون کلرید، کارایی کمتری دارد. آن‌ها در پژوهشی دیگر جهت جداسازی از تکنیک کروماتوگرافی استخراج فاز جامد استفاده نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که ۸۵٪ ^{153}Sm از ناخالصی‌های Eu جداسازی شده است [۱۴]. روش الکتروشیمیایی در سال ۲۰۱۸ توسط چاکرواتی^۵ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. این روش به دلیل سهولت در انجام فرایند و عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته می‌تواند برای جداسازی رادیوایزوتوپ‌های مهم پزشکی توسعه یابد. در این مطالعه، هدف تولید رادیونوکلید ^{153}Sm با هدف طبیعی با استفاده از راکتور تحقیقاتی تهران و جداسازی شیمیایی آن از ناخالصی‌های یورانیوم به روش الکتروشیمیایی (ملغمه کردن با جیوه) می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

مواد به کار رفته در این روش شامل اکسید ساماریوم، سدیم هیدروکسید، سترات لیتیم، جیوه، پلاتین از شرکت Aldrich خریداری شده‌اند. به منظور انجام آزمایش‌های اکتیو، ۱ میلی‌گرم نمونه‌ی طبیعی ساماریوم در داخل آمپول کوارتز ریخته شده، و پس از مهر و موم شدن داخل کن‌های آلومینیومی قرار داده شده و سپس به راکتور (قلب راکتور و بهترین موقعیت) برای پرتودهی نوترونی با شار $2/5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ فرستاده شد. نمونه‌ها به مدت دو روز سرد شدند و سپس در محلول HCl ۰/۰۵ مولار حل گردیدند. نمونه پس از انحلال با استفاده از دستگاه اسپکترومتری گاما مجهز به آشکارساز HPGe (کواکسیال نوع P با درجه خلوص بالا همراه با تحلیل‌گر چند

ترامتیلر فسفاتات^۱ (EDTMP) به عنوان رادیو داروی درمانی برای کاهش درد متاستاز استخوان استفاده می‌شود [۵، ۴]. هنگام تولید ^{153}Sm به منظور تهیه رادیوداروی $^{153}\text{Sm-EDTMP}$ جهت تسکین استخوان در بیماران سرطانی ناخالصی‌های یورانیوم تولید می‌گردد. در بین این ناخالصی‌ها، ^{154}Eu مهم‌ترین ناخالصی است که تولید آن اجتناب ناپذیر بوده و با توجه به نیمه عمر بالا (۸/۶ سال) موجب ایجاد محدودیت در زندگی بیماران و مدیریت پسماند ناشی از آلودگی‌های رادیویی طولانی مدت در ضایعاتی شامل سرنگ تزریق، اکتیویته باقی مانده در ویال، تخلیه نمونه ادرار و غیره می‌شود [۶-۹].

نیشونو^۲ و همکاران [۱۰]، فعالیت‌هایی در زمینه خالص سازی Sm از ناخالصی‌های تولید شده در راکتور هسته ای WWR SM با دو سیستم استخراجی TOA-LiNO_3 و EGFK- D_2HCL را انجام دادند. نتایج نشان داد استفاده از سیستم TOA-LiNO_3 دارای مزایایی برای تصفیه ^{153}Sm از ناخالصی رادیونوکلیدی Eu است. مطالعه دیگری در مورد نتایج تجربی تولید و تصفیه ایزوتوپ‌های Sm و Eu با استفاده از دستگاه‌های استخراج مایع D_2EHPA ، TOA و MDOA توسط نیشونو و همکاران ارائه شده است [۱۱]. نتایج حاصل از جداسازی Sm و Eu با استفاده از سیستم‌های استخراج کننده نشان می‌دهد که بیشترین عملکرد جداسازی ^{153}Sm توسط MDOA و سپس سیستم TOA-LiNO_3 در محلول آبی LiNO_3 با غلظت ۷ مول بر لیتر یا بیشتر به دست می‌آید. در مطالعه دیگر اسلامی راد و همکاران در سال ۲۰۱۱ روشی را بر اساس کروماتوگرافی تبادل یونی منتشر کردند [۱۲]. طبق نتایج، ^{154}Eu زودتر از سایر ناخالصی‌ها ستون را ترک می‌کند و ^{154}Eu به عنوان آخرین ناخالصی دفع می‌شود. در سال ۲۰۱۸ جداسازی ^{153}Sm از ناخالصی Eu با استفاده از روش استخراج مایع-مایع توسط

1 Ethylene Diamine Tetramethylere phosphonate

2 Nishonov

3 methyl-n-dioctylamine

4 Michael Van

5 Ckkravarty

۱.۳. پرتودهی نمونه

مقدار ۱ میلی‌گرم ساماریوم در داخل لوله‌ی کوارتزی قرار گرفته و پس از آن، داخل کن‌های آلومینیومی برای پرتودهی به راکتور (قلب راکتور و بهترین موقعیت) برای پرتودهی نوترونی با شار $2/5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ فرستاده شد و به مدت ۱، ۳ و ۶ روز پرتودهی شد و سپس در محلول HCl ۰/۰۵ مولار حل گردید. نمونه پس از انحلال با استفاده از روش‌های مناسب آنالیز و با استفاده از دستگاه اسپکترومتری گاما مجهز به آشکارساز HPGe مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار اکتیویته ^{153}Sm و مقدار اکتیویته ناخالصی Eu در جدول (۱) گزارش شده است.

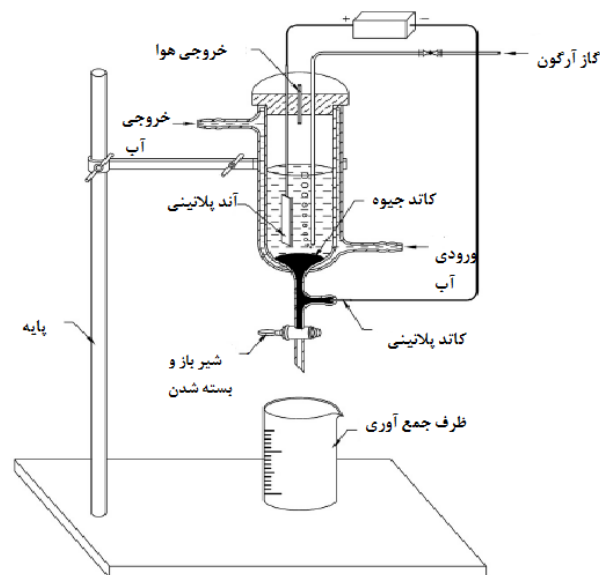
جدول (۱): مقدار اکتیویته ^{153}Sm و مقدار اکتیویته ناخالصی‌های Eu.

زمان پرتودهی (روز)	اکتیویته ^{153}Sm (mCi)	اکتیویته ^{154}Eu (mCi)	اکتیویته ^{156}Eu (mCi)	اکتیویته ^{151}Eu (mCi)
۱	۴۴/۰	$1/4 \times 10^{-6}$	$1/9 \times 10^{-3}$	$8/8 \times 10^{-4}$
۳	۹۶/۱	$3/2 \times 10^{-5}$	$5/9 \times 10^{-3}$	$7/9 \times 10^{-3}$
۶	۱۲۲/۵	$6/5 \times 10^{-4}$	$1/2 \times 10^{-2}$	$3/1 \times 10^{-2}$

۲.۳. جداسازی

مخلوطی از ۱۵ میلی‌لیتر محلول سیترات لیتیوم ۰/۱۵ مولار و ^{153}Sm (مخلوط ساماریوم و یورانیوم) به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌شود. pH محلول با اضافه کردن چند قطره آمونیوم هیدروکسید ۳٪ روی ۷-۶ تنظیم می‌شود. الکترولیز به مدت ۳۰ دقیقه با پتانسیل ۶ ولت انجام می‌شود. بعد از جداسازی، جیوه از ظرف جدا شده و مخلوط الکترولیت که حاوی ساماریوم است با عبور از فیلتر واتمن جدا می‌گردد. برای این که تمامی یورانیوم از مخلوط الکترولیت جدا گردد، جداسازی در یک مرحله دیگر نیز انجام می‌گیرد و از الکترولیز و جیوه تازه برای جداسازی مرحله دوم استفاده می‌گردد. تأثیر غلظت ماده الکترولیت، pH محلول الکترولیت، پتانسیل اعمال شده، زمان الکترولیز و تعداد

کاناله نوع کانبرا TM (مدل GC-1020-7500SL) با بازده نسبی ۸۰٪) مورد ارزیابی قرار گرفت و اکتیویته نمونه ی اولیه به‌دست آمد. سیستم استفاده شده برای جداسازی در شکل (۱) نشان داده شده است. از ۵ سی‌سی جیوه به‌عنوان کاتد و از پلاتین با ابعاد 1×4 سانتی‌متر به‌عنوان آنود استفاده می‌شود. الکترولیت حامل ۱۵ سی‌سی سیترات لیتیوم با غلظت ۰/۱۵ مولار می‌باشد. سلول الکتروشیمیایی از یک ظرف دو جداره تشکیل شده است تا آب به‌وسیله‌ی سیرکولاتور بیرون سلول جریان داشته باشد تا سلول خنک بماند. در انتهای سلول از یک شیر برای جداکردن جیوه حاوی یورانیوم بعد از الکترولیز استفاده می‌شود. کاتد جیوه با یک سیم پلاتینی به قطب منفی وصل می‌گردد. پیش‌بینی لازم برای عبور گاز از طریق یک لوله شیشه‌ای در سلول الکتروشیمی در نظر گرفته شده است. گاز آرگون به‌طور مداوم در طی انجام الکترولیز درون محلول دمیده می‌شود تا اکسیژن محلول حذف شده و بر روی الکترولیز مزاحمت ایجاد ننماید و محلول نیز به هم نخورد.



شکل (۱): جداسازی به روش الکتروشیمیایی.

۳. یافته‌ها و بحث

در یک فرآیند الکتروشیمیایی، احیا محلول الکترولیت و ملغمه شدن یوروپیم همراه با تولید گاز حول آند پلاتینی می‌باشد که باعث غلیان شدید محلول الکترولیت می‌شود که برای جداسازی ملغمه از محلول الکترولیت زمانی نیاز است تا محلول الکترولیت شفاف و زلال شود و انجام جداسازی راحت‌تر باشد که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴) اما بررسی‌ها نشان داد که جدا کردن ملغمه از الکترولیت بلافاصله بعد از قطع شدن منبع تغذیه، بهره جداسازی یوروپیم از مخلوط را افزایش می‌دهد و این موضوع به زمان کوتاه پایداری یوروپیم ملغمه شده در مرحله دوم اکسایش بستگی دارد و در نتیجه اگر به الکترولیت زمان داده شود باعث می‌گردد که Eu^{2+} به حالت پایدارتر Eu^{3+} تبدیل شود و چون Eu^{3+} ملغمه تشکیل نمی‌دهد باعث می‌شود تا به محلول الکترولیت باز گردد.



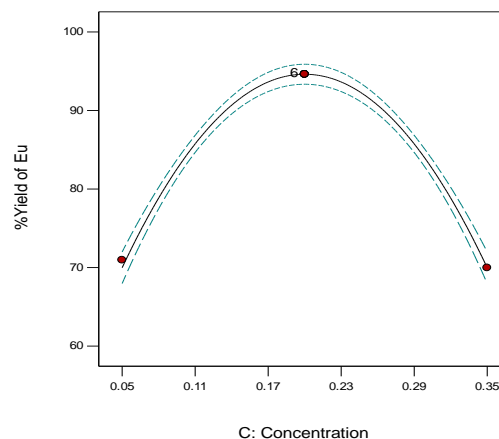
شکل (۴): تأثیر زمان بین ملغمه شدن یوروپیم و زمان جداسازی ملغمه از محلول الکترولیت. دو مرحله جداسازی، زمان ۳۰ دقیقه در هر مرحله،

پتانسیل ۶ ولت و $\text{pH}=6$.

یکی دیگر از فاکتورهای تأثیرگذار و موثر بروی جداسازی یوروپیم، pH محلول الکترولیت می‌باشد. بازده جداسازی یوروپیم به عنوان تابعی از pH محلول الکترولیت در شکل (۵) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است مقدار $\text{pH}=6$ ، بیشترین بازده جداسازی را دارد. نمودار مربوطه به صورت یک سهمی است که ابتدا با افزایش pH افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل مشخص است بیشترین بازده جداسازی Eu در pH برابر با ۶ اتفاق افتاده است. در pH های بالاتر، تشکیل هیدروکسید

مراحل الکترولیز از عوامل مؤثر در جداسازی به روش الکتروشیمیایی می‌باشند.

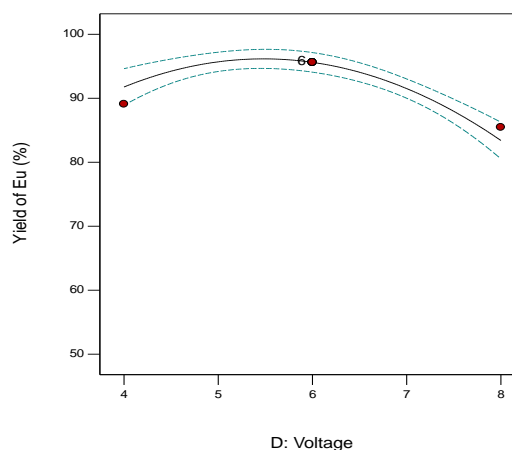
تأثیر غلظت ماده الکترولیت اولیه بر روی بازده ملغمه کردن در بازه‌ی ۰/۰۵ تا ۰/۳۵ مول بر لیتر لیتیوم سترات در شکل (۲) نشان داده شده است، همان‌طور که از نتایج بر می‌آید، بازده جداسازی در غلظت ۰/۲ مول بر لیتر بیشینه است.



شکل (۲): تأثیر غلظت اولیه ماده الکترولیت بر بازده جداسازی، زمان

۳۰ دقیقه، پتانسیل ۶ ولت و $\text{pH}=6$.

بازده جداسازی ساماریوم از مخلوط $^{153}\text{Sm}/\text{Eu}$ به عنوان تابعی از پتانسیل اعمال شده در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که بازده جداسازی در پتانسیل ۴، ۵ و ۶ ولت تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است اما با افزایش بیشتر پتانسیل، بازده جداسازی کاهش می‌یابد.



شکل (۳): تأثیر پتانسیل بر بازده جداسازی، دو مرحله جداسازی، زمان

۳۰ دقیقه در هر مرحله و $\text{pH}=6$.

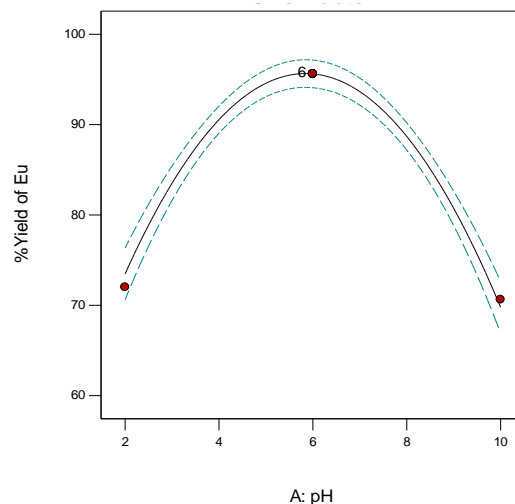
مقایسه بین جداسازی تک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و سه مرحله‌ای جداسازی یورانیوم در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان داد استفاده از الکتروود تازه و اضافه کردن مراحل جداسازی، بازده جداسازی را افزایش می‌دهد در صورتی که بهره ساماریوم را کاهش می‌دهد و منجر به هدر رفتن ساماریوم می‌شود. نتایج مبین آن است که جداسازی در دو مرحله و سه مرحله تفاوت چندانی در ملغمه شدن یورانیوم ندارد و با دو مرحله جداسازی نتیجه مطلوب حاصل می‌گردد.



شکل (۷): تأثیر تعداد مراحل بر روی بهره ملغمه شدن یورانیوم.

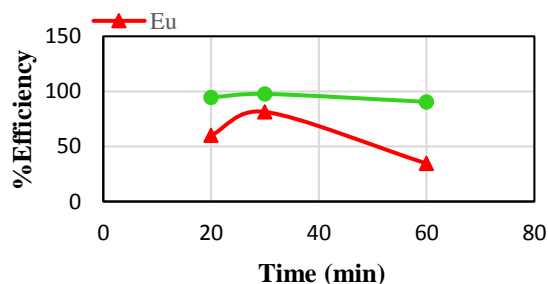
مسئله اساسی در فرآیند بررسی شده، جداسازی مؤثر مقادیر یورانیوم از مخلوط ساماریوم/یورانیوم بدون هدر رفت ساماریوم می‌باشد اگرچه ساماریوم با جیوه ملغمه نمی‌شود اما مقداری از ساماریوم می‌تواند به همراه یورانیوم از الکترولیت دفع شود. به‌طور کلی مقدار ^{153}Sm بعد از هر مرحله ملغمه شدن یورانیوم در جدول (۲) نشان داده شده است. به‌طور میانگین بهره ^{153}Sm بدست آمده بعد از پایان دو مرحله جداسازی برابر با ۸۸/۲۵٪ می‌باشد. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌گردد ناخالصی‌های ^{150}Eu و ^{156}Eu پس از مرحله دوم به‌طور کامل حذف می‌شوند. با تکرار فرآیند جداسازی اگرچه ناخالصی ^{154}Eu حذف می‌گردد اما میزان ^{153}Sm به‌دست آمده کاهش یافته است. بنابراین به منظور جلوگیری از هدر رفتن اکتیویته ^{153}Sm جداسازی در دو مرحله مطلوب به نظر می‌رسد.

یورانیوم از انتقال یورانیوم به ملغمه جلوگیری می‌کند و در pHهای پایین ملغمه شروع به تجزیه شدن می‌کند.



شکل (۵): بهره ملغمه شدن یورانیوم بر حسب pH

زمان جداسازی نیز یک عامل تأثیرگذار بر روی بازده جداسازی یورانیوم است که برای دو مرحله از فرآیند جداسازی در شکل (۶) نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که زمان بهینه برای ملغمه شدن یورانیوم مدت زمانی برابر با ۳۰ دقیقه است در حالی که مدت زمان‌های کمتر و بیشتر از ۳۰ دقیقه بهره جداسازی یورانیوم را کاهش می‌دهد. این مسئله باعث کاهش pH الکترولیت با زمان فرآیند الکتروشیمیایی است که منجر به تجزیه سریع ملغمه می‌شود.



شکل (۶): بهره ملغمه شدن یورانیوم بر حسب زمان.

جدول (۲): فعالیت و بازده جداسازی با روش الکتروشیمیایی طی سه مرحله جداسازی.

رادیونوکلید	فعالیت پس از بازده		فعالیت پس از بازده		فعالیت پس از بازده	
	فعالیت (mCi)	بازده (%)	فعالیت (mCi)	بازده (%)	فعالیت (mCi)	بازده (%)
^{153}Sm	۴۵/۲۱	۸۸/۲۵	۳۹/۹۰	۸۸/۲۵	۹۴/۶۰	۷۸/۹۰
^{154}Eu	$7/0.8 \times 10^{-4}$	۸۹/۷۴	$7/26 \times 10^{-10}$	۸۹/۷۴	۸۵/۵۹	۹۹/۹۹
^{155}Eu	$2/0.6 \times 10^{-10}$	۹۹/۹۹	*	۹۹/۹۹	۹۰/۷۷	-
^{156}Eu	$3/0.3 \times 10^{-10}$	۹۹/۹۹	*	۹۹/۹۹	۹۳/۶۲	-

۴. نتیجه گیری

بزرگترین چالش استفاده از رادیونوکلید ^{153}Sm جداسازی ناخالصی‌های یورانیوم می‌باشد که باید با دقت و مهارت لازم انجام گیرد. همچنین با توجه به نیمه عمر ^{153}Sm (۱/۹۲ روز) زمان انجام جداسازی یکی از پارامترهای بسیار مهم در جداسازی این رادیونوکلید محسوب می‌گردد. روش‌های مختلفی جهت جداسازی این ناخالصی‌ها از ساموریوم-۱۵۳ به کار گرفته شدند که از این میان، روش الکتروشیمیایی به دلیل قابلیت استفاده در مقیاس وسیع و عدم وابستگی به مقدار جاذب یا استخراج‌کننده نسبت به سایرین برتری دارد. استفاده از روش استخراج با حلال موجب حذف جیوه در روش الکتروشیمیایی می‌گردد. اما طولانی بودن زمان رسیدن به جداسازی مطلوب از جمله معایب روش استخراج با حلال محسوب می‌گردد. از دیگر معایب این روش بالا بودن تعداد مراحل آزمایش است که می‌تواند منجر به کاهش فعالیت رادیونوکلید مورد نظر و افزایش پرتوگیری پژوهشگران شود. در این مطالعه، فرآیند الکتروشیمیایی به منظور جداسازی ناخالصی‌های رادیونوکلیدی یورانیوم (Eu) از ساماریوم-۱۵۳ (^{153}Sm)، مورد بررسی قرار گرفته است. در روش جداسازی به روش الکتروشیمیایی، رادیونوکلید ^{153}Sm با بهره جداسازی ۸۸/۲۵٪ از ناخالصی‌های

رادیونوکلیدی یورانیوم جدا گردید. بیشینه بازده جداسازی Eu و Sm در روش جداسازی الکتروشیمیایی در شرایط عملیاتی بهینه pH اولیه برابر با ۶، پتانسیل ۶ ولت در غلظت ۰/۲ مول بر لیتر ماده الکترولیت و در مدت زمان ۳۰ دقیقه به دست آمد. انجام جداسازی در دو مرحله جهت دستیابی به رادیونوکلید ^{153}Sm با اکتیویته مناسب و عاری از هرگونه ناخالصی رادیونوکلیدی برای کاربردهای درمانی مناسب می‌باشد.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان از پرسنل فیزیک بهداشت پژوهشکده چرخه سوخت هسته ای که در این پژوهش کمک شایان توجهی نمودند تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶. مراجع

1. V. J. Lewington. Targeted radionuclide therapy for bone metastases. Eur. J. Nucl. Med. 20 (1993) 66–74.
2. A. Mishra, J. Kumar, T. Singh, P. V. Varde, S. Bhattacharya. Production of radioisotopes ^{153}Sm and ^{177}Lu in Dhruva. Life Cycle Reliability Safety Eng. 6 (2017) 99-108.
3. V. J. Lewington. Targeted radionuclide therapy for bone metastases. Eur. J. Nucl. Med. 20 (1993) 66–74.

4. A. Mishra, J. Kumar, T. Singh, P. V. Varde, S. Bhattacharya. Production of radioisotopes ^{153}Sm and ^{177}Lu in Dhruva. *Life Cycle Reliability Safety Eng.* 6 (2017) 99-108.
5. H. M. Lamb, D. Faulds. Samarium ^{153}Sm lexidronam. *Drugs Aging* 11 (1997) 413-418.
6. P. Anderson, R. Nuñez. Samarium lexidronam (^{153}Sm -EDTMP): skeletal radiation for osteoblastic bone metastases and osteosarcoma. *Expert Rev. Anticancer Ther.* 7 (2007) 1517-1527.
7. Y. Parlak, G. Gumuser, E. Sayit. Samarium-153 therapy for prostate cancer: the evaluation of urine activity, staff exposure and dose rate from patients. *Radiat. Prot. Dosimetry* 163 (2015) 468-472.
8. J. A. Kalef-Ezra, S. T. Valakis, S. Pallada. Samarium-153 EDTMP for metastatic bone pain palliation: the impact of europium impurities. *Phys. Med.* 31 (2015) 104.
9. A. J. van Rensburg, A. S. Alberts, W. K. Louw. Quantifying the radiation dosage to individual skeletal lesions treated with samarium-153-EDTMP. *J. Nucl. Med.* 39 (1998) 2110-2115.
10. K. F. Allan, K. M. El-Azony, A. A. El-Mohty. Separation of ^{153}Sm from other rare-earth radionuclides present in neutron-irradiated samarium oxide target using polymeric resin. *Radiochemistry* 51 (2009) 502.
11. F. Naseri, A. Charkhi, N. Salek, S. Vosoughi. The radio-europium impurities in [^{153}Sm]-EDTMP production: a review of isolation methods. *Nucl. Med. Commun.* 42 (9) (2021) 951-963.
12. S. Khujaev, S. Nishono, E. A. Markelova, Z. O. Usarov, A. Z. Rikhsiev, M. N. Abdukayumov, N. N. Abdusalyamov. Extraction of ^{153}Sm by organic reagents. *The sixth Int. Conf. Modern Problems Nucl. Phys.* 6 (2006) 256-257.
13. S. Z. Nishanov, S. Khuzhaev, N. A. Mirzaeva, G. U. Turdieva, A. M. Abdukayumov, A. Z. Rikhsiev, N. N. Abdusalyamov. ^{153}Sm , ^{166}Ho , ^{177}Lu production in VVR-SM. *Atomic Energy.* 111 (2) (2011) 140-144.
14. S. Z. Islami-Rad, M. Shamsaei, R. Gholipour-Peyvandi, M. Ghannadi-Maragheh. Reactor production and purification of ^{153}Sm radioisotope via nat Sm target irradiation. *Radiochemistry* 53 (6) (2011) 642-645.
15. M. Van de Voorde, K. Van Hecke, K. Binnemans, T. Cardinaels. Separation of samarium and europium by solvent extraction with an undiluted quaternary ammonium ionic liquid: towards high-purity medical samarium-153. *RSC Advances* 8 (36) (2018) 20077-20086.
16. M. Van de Voorde, K. Van Hecke, K. Binnemans, T. Cardinaels. Supported ionic liquid phases for the separation of samarium and europium in nitrate media: Towards purification of medical samarium-153. *Sep. Purification Tech.* 232 (2020) 115939.
17. R. Chakravarty, S. Chakraborty, M. Sahiralam Khan, R. Ram, H. Dev Sarma, A. Dash. An electrochemical approach for removal of radionuclidic contaminants of Eu from ^{153}Sm for effective use in metastatic bone pain palliation. *Nucl. Med. Biol.* 58 (2018) 8-19.