مقاله پژوهشی

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۹، شمارهٔ ٤، پاییز ١٤٠٠، صفحه ۹-١٤

تاریخ دریافت مقاله: ١٤٠٠/٠٦/٢٧، تاریخ پذیرش مقاله: ١٤٠٠/٠٩/٢٥

بررسی و اندازه‌گیری عوامل مؤثر بر پهنای قله (FWHM) در طیف‌سنجی آلفا

حسن رنجبر* و علی یوسفی

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

*تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، کدپستی: ٨٤٨٦-١١٣٦٥

پست‌الکترونیکی: hranjbar@aeoi.org.ir

چکیده

رادیونوکلیدهای آلفازا دارای ذرات تابشی با انرژی مشخص و انرژی گسسته هستند که به‌وسیله آن‌ها می‌توان نوع عناصر گسیلنده تابش آلفا را شناسایی کرد. ویژگی‌های منحصربه‌فرد طیف‌سنجی آلفا درمقایسه با سایر فن‌های رادیومتری مانند اسپکترومتری گاما، تابش زمینه بسیار پایین آن و عدم تغییرات زیاد در بازده آشکارسازی نسبت به انرژی است. هدف از این مطالعه بررسی چگونگی تأثیر عواملی هم‌چون انرژی ذرات آلفا، فاصله نمونه تا آشکارساز، اندازه آشکارساز بر قدرت تفکیک سیستم طیف‌سنجی آلفا می‌باشد. با استفاده از یک طیف‌سنج آلفا چندکاناله از نوع Alphaquattro ساخت شرکت SILENA ، پهنای قله در انرژی‌های مختلف، فواصل متفاوت نمونه تا آشکارساز و اندازه‌های مختلف آشکارساز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان دادند که تفکیک‌پذیری قله با افزایش فاصله نمونه از آشکارساز بهتر شده ولی با تغییر اندازه آشکارساز و انرژی ذرات آلفا تغییر محسوسی پیدا نمی‌کند. ازطرف دیگر با افزایش فاصله چشمه از آشکارساز کارایی و بازدهی آشکارسازی کاهش می‌یابد. برای داشتن بهترین عملکرد بایستی فاصله بهینه را لحاظ کرد و یا این‌که در فواصل زیاد شرایط خلأ بهبود یابد و زمان شمارش بیش‌تر شود.

کلیدواژگان: اسپکترومتری آلفا، رزولوشن طیف، کارایی آشکارسازی، FWHM.

۱. مقدمه

بحث اندازه‌گیری غلظت مواد پرتوزا همیشه یکی از ارکان مهم در بخش‌های مختلف صنایع هسته‌ای می‌باشد. در مراحل مختلف چرخه سوخت هسته‌ای مانند اکتشاف و استخراج مواد اولیه در معدن، فرآوری اورانیم، ساخت سوخت، مصرف سوخت در راکتورهای اتمی و پسمانداری سوخت‌های مصرف شده، اندازه‌گیری هسته‌ای نقش بسزایی دارد. علاوه‌بر مراحل چرخه سوخت هسته‌ای، در فعالیت‌های صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای نظیر تولید رادیوداروها و رادیوایزوتوپ‌های صنعتی، پایش‌های محیطی و حفاظت پرتویی، اندازه‌گیری میزان مواد رادیواکتیو جزئی جدانشدنی از این فعالیت‌ها می‌باشد [۱]. در این راستا طیف‌سنجی آلفا به‌عنوان یکی از روش‌های شناسایی و اندازه‌گیری کمی رادیونوکلیدهای آلفازا همواره مورد توجه

بوده است. این روش به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن برتری آشکاری نسبت به سایر روش‌های آنالیز هسته‌ای دارد. در طیف‌سنجی آلفا بازدهی آشکارسازی بالا، حد آشکارسازی پایین، ولتاژ کاری پایین‌تر درمقایسه با سایر روش‌های آشکارسازی و کوچک بودن حجم آشکارسازها درمقایسه با اغلب روش‌ها مزیت اصلی این روش می‌باشند. مضاف‌بر این آشکارسازی اغلب رادیونوکلیدهای آلفازا به روش‌های دیگر اگر غیرممکن نباشد بسیار گران و سخت و یا با خطای بسیار همراه است [۲]. هم‌چنین این روش در فن‌های اندازه‌گیری هسته‌ای اطلاعات دقیقی از واپاشی رادیواکتیو هسته‌های سنگین و هم‌چنین فیزیک برهم‌کنش ذرات باردار و ماده می‌دهد. اما این روش در مقایسه با سایر روش‌های طیف‌سنجی مانند طیف‌سنجی گاما که کاربردهای زیادی در صنعت هسته‌ای دارد، دارای پیچیدگی‌های بیشتری بوده که به‌علت نوع و ماهیت آشکارسازها (اغلب آشکارسازهای نیم‌رسانای سیلیکون) می‌باشد که به‌طور معمول سیگنال‌های ضعیفی تولید می‌کنند و نیازمند آمپلی‌فایرهای با نویز بسیار کم هستند [۳]. علاوه‌بر این به‌دلیل این‌که ذرات آلفا برد کمی (حتی در هوا) دارند، آماده‌سازی نمونه‌ها باید با دقت زیادی انجام شود و اندازه‌گیری‌های به این روش باید در محیط تحت خلأ انجام پذیرند تا از تضعیف ذرات آلفا جلوگیری گردد. ضخامت و یکنواختی توزیع مواد رادیواکتیو در نمونه‌هایی که به‌وسیله طیف‌سنجی آلفا مورد بررسی قرار می‌گیرند عاملی تعیین‌کننده و بسیار مهم در صحت و دقت نتایج آنالیز می‌باشد [٤].

مزیت آشکارساز نیمه‌رسانای سیلیکونی این است که متوسط انرژی صرف شده توسط تابش یونیزان برای تولید زوج یون- حفره در سیلیکون در حد ۳/٦ الکترون‌ولت می‌باشد. این مقدار تا حدودی بیش از عرض شکاف انرژی در ساختار بلور سیلیکون (۱/۱۲ الکترون‌ولت) و به‌عبارت دیگر انرژی یونش است زیرا تمام انرژی ذره آلفا صرف تولید زوج الکترون–حفره نمی‌شود. این مقدار در حدود یک‌دهم ۳۰ الکترون‌ولت است که انرژی موردنیاز برای تولید جفت الکترون- یون در آشکارسازهای گازی می‌باشد. درنتیجه تعداد حامل‌های بار نسبت به آشکارسازهای گازی در حدود ۱۰ برابر افزایش می‌یابد و نوسانات آماری در تعداد این حامل‌ها کاهش می‌یابد و درنتیجه قدرت تفکیک بهتری حاصل می‌گردد [۵].

فان‌تو و همکارانش با دو روش تجربی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو بازدهی طیف‌سنجی آلفا را با یکدیگر مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که به‌طور میانگین، مقادیر نتایج تجربی کمتر از مقادیر شبیه‌سازی است و با افزایش ولتاژ آشکارساز، توافق در مقایسه بازدهی شمارش برای دو روش بیش‌تر و بهتر می‌شود [٦]. در تحقیق دیگر، کالین و همکارانش به مطالعه و ارزیابی پارامترهای اصلی یک طیف‌سنج هشت–محفظه‌ای پرداختند. آن‌ها علاوه‌بر اندازه‌گیری بازدهی آشکارسازی در فواصل مختلف به مقایسه نتایج به‌دست آمده از تفکیک‌پذیری در محفظه‌های مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که حداکثر اختلاف در تفکیک‌پذیری محفظه‌های مختلف ۱/۳ keV است. آن‌ها هم‌چنین از تکرارپذیری نتایج به این نتیجه رسیدند که روش آن‌ها مورد تأیید می‌باشد [۷]. گاسکن و همکارش پارامترهای مؤثر بر بازدهی طیف‌سنجی آلفا به دو روش عددی (تئوری) و عملی را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. نتایج محاسبات عددی آن‌ها که با استفاده از برنامه‌نویسی فرترن (Fortran) به‌دست آمده بود توسط نتایج عملی و تجربی مورد تأیید قرار گرفت [۸].

حصول نتیجه دقیق و صحیح مستلزم بهینه‌سازی پارامترها و تعیین بهترین شرایط عملکرد طیف‌سنجی آلفا می‌باشد. از آنجایی‌که تجزیه و تحلیل رادیونوکلیدهای آلفازا برمبنای انرژی آلفای ساطع‌شده از آن‌ها است و پهنای قله (هرچه کمتر باشد) توانایی سیستم برای تمایز دو تابش آلفا با انرژی‌های متفاوت ولی نزدیک به یکدیگر است لذا پارامتر پهنای قله و به‌عبارتی

دیگر تمام عرض در نصف ارتفاع بیشینه (FWHM) که نشان‌دهنده قدرت تفکیک قله‌ها از هم می‌باشد، یکی از پارامترهای مهمی است که در تعیین بهترین شرایط عملکرد سیستم بسیار مهم و تعیین‌کننده است.

هدف از این تحقیق بررسی چگونگی تأثیر عواملی هم‌چون انرژی ذرات آلفا، فاصله نمونه تا آشکارساز و اندازه آشکارساز بر قدرت تفکیک سیستم طیف‌سنج آلفا است.

۲. مواد و روش

قبل از شروع کار، کالیبراسیون انرژی توسط چشمه استاندارد صورت می‌پذیرد و پس از آن تفکیک‌پذیری انرژی آشکارسازها با اندازه‌گیری تمام عرض در نصف ارتفاع بیشینه تعیین می‌گردد. تجهیز اصلی به‌کار رفته در این آزمایش یک طیف‌سنج آلفا چندکاناله از نوع آلفاکوآترو[1] ساخت شرکت سایلنا[2] می‌باشد. این دستگاه دارای چهار محفظه شمارش است که هر کدام به‌طور مجزا قابل کنترل توسط نرم‌افزار آنالیز هستند. هم‌چنین امکان ایجاد خلأ به میزان مطلوب توسط پمپ خلأ نیز در هر کدام از محفظه‌ها امکان‌پذیر است. در هر محفظه امکان اتصال آشکارسازهای نیم‌رسانا با اتصال نقطه‌ای[3] وجود دارد که در این پژوهش آشکارسازها از نوع PIPS (مساحت فعال ۴۵۰ و ۶۰۰ میلی‌مترمربع، ولتاژ کاری ۴۰ ولت، جریان نشتی ۳ نانوآمپر، قدرت تفکیک‌پذیری ۱۹ و ۲۲ کیلوالکترون‌ولت و ساخت شرکت EURISYS MESURES) مورد استفاده قرار گرفتند. بخش‌های الکترونیک شامل منبع تغذیه و تحلیل‌گر چندکاناله نیز به‌صورت یک‌پارچه با محفظه‌های شمارش درون دستگاه قرار داشته و توسط نرم‌افزار آنالیز قابل کنترل می‌باشند. آشکارسازهای به‌کار رفته در این پژوهش در بازه انرژی ۱۰-۰ مگاالکترون‌ولت قابلیت پاسخ‌دهی دارند. هم‌چنین ولتاژ بایاس اعمال شده بر روی هر آشکارساز مقدار ۴۰ ولت که توسط سازنده توصیه شده است، تعیین شد. درون هر محفظه یک نگهدارنده چشمه وجود دارد که امکان شمارش نمونه‌هایی با قطر ۵۱-۱۸ میلی‌متر و در فاصله ۴۲-۲ میلی‌متر با گام‌های ۴ میلی‌متر را با استفاده از شیارهایی بر روی دیواره فراهم می‌کند.

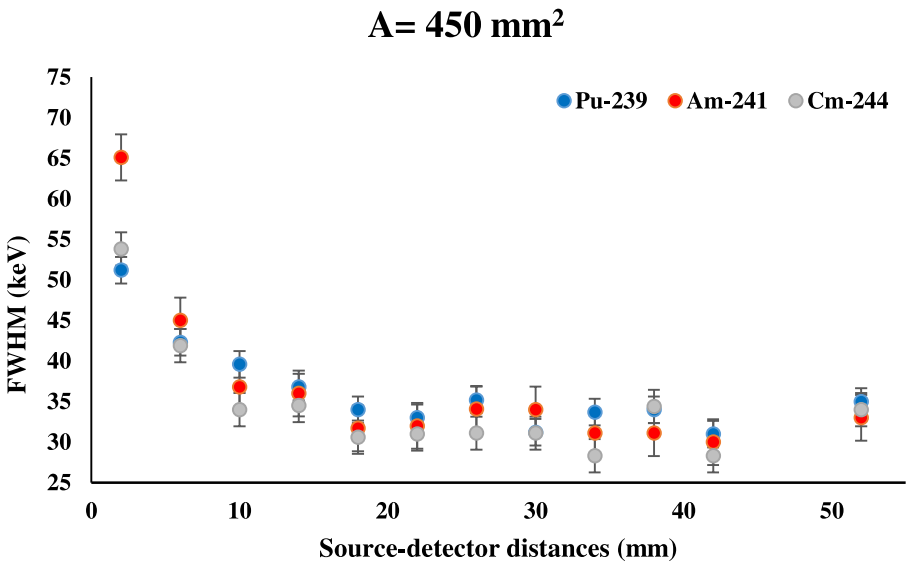
چشمه به‌کار رفته در این آزمایش از نوع استاندارد حاوی رادیونوکلیدهای آمرسیم-۲۴۱، پلوتونیم-۲۳۹ و کوریم-۲۴۴ می‌باشد که روی صفحه دایره‌ای از جنس فولاد ضدزنگ با قطر ۲۵ میلی‌متر، ناحیه اکتیو به قطر ۷ میلی‌متر ازطریق لایه‌نشانی الکتروشیمیایی روی آن ایجاد شده است. عدم قطعیت اکتیویته در این چشمه ٪۳ در سطح اطمینان ٪۹۵ است. سطح اطمینان در واقع بیانگر احتمال قرارگیری نتیجه واقعی اندازه‌گیری در بازه عدم قطعیت گزارش شده، می‌باشد. عدم قطعیت ±۳ در سطح اطمینان ٪۹۵ نشان می‌دهد که نتیجه به احتمال ٪۹۵ در بازهٔ ۳ واحد کمتر و بیشتر از نتیجه گزارش شده، قرار می‌گیرد.

به‌منظور تعیین بازده و قدرت تفکیک قله، چشمه در تمامی فواصل ممکن درون محفظه خلأ (۱۰۰ mbar) قرار گرفت و شمارش در تمامی حالات انجام شد. مقادیر بازده با تقسیم نرخ شمارش خالص حاصل شده بر نرخ گسیل آلفا از چشمه که در برگه گواهی چشمه ارائه شده است، محاسبه گردید. قدرت تفکیک انرژی آشکارسازها با اندازه‌گیری تمام عرض در نصف ارتفاع بیشینه تعیین می‌شود. این کار میزان قابلیت سیستم آشکارسازی برای تفکیک خطوط انرژی نزدیک به هم را نشان می‌دهد. در ادامه به‌صورت دستی پهنای قله برای فاصله‌های متفاوت چشمه تا آشکارساز و هم‌چنین اندازه آشکارساز متفاوت برای طیف ذرات آلفای رادیونوکلیدهای آمرسیم-۲۴۱، پلوتونیم-۲۳۹ و کوریم-۲۴۴ مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار خواهد گرفت.

[1] alphaquattro
[2] SILENA
[3] Dot connection

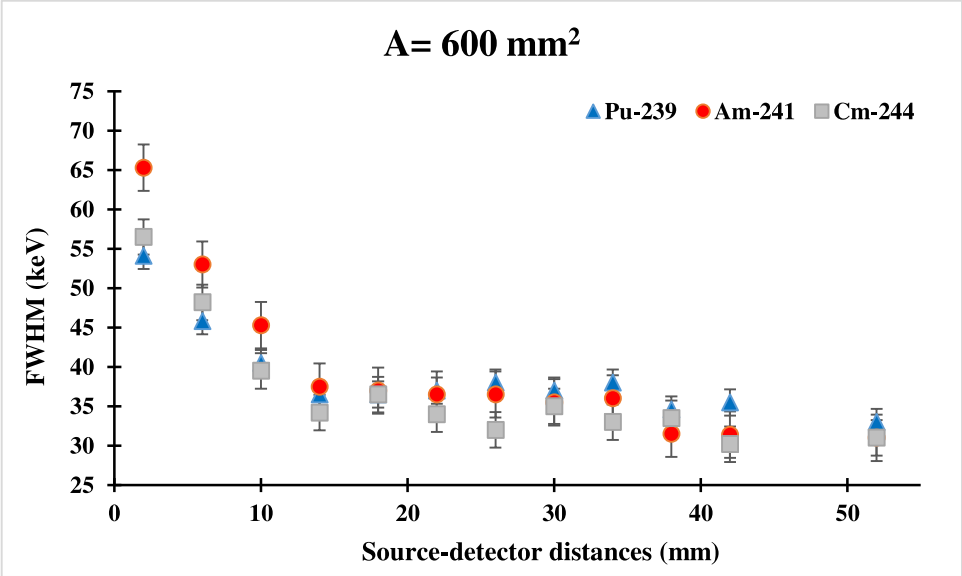
۲. نتایج و بحث

مقادیر پهنای قله آلفای رادیونوکلیدهای آمرسیم-۲۴۱ (انرژی ۵/۴۸۶ MeV با فراوانی ٪۸۴/۸)، پلوتونیم-۲۳۹ (انرژی ۵/۱۵۷ MeV با فراوانی ٪۷۰/۸) و کوریم-۲۴۴ (انرژی ۵/۸۰۵ MeV با فراوانی ٪۷۶/۹) که با آشکارساز با مساحت mm^2 ۴۵۰ اندازه‌گیری شده‌اند، در شکل ۱ نشان داده شده است. این مقادیر برای فواصل مختلف چشمه تا آشکارساز اندازه‌گیری شده است.



شکل (۱): تغییرات پهنای قله نسبت به فاصله چشمه تا آشکارساز با مساحت mm^2 ۴۵۰ برای سه رادیونوکلید آلفازا.

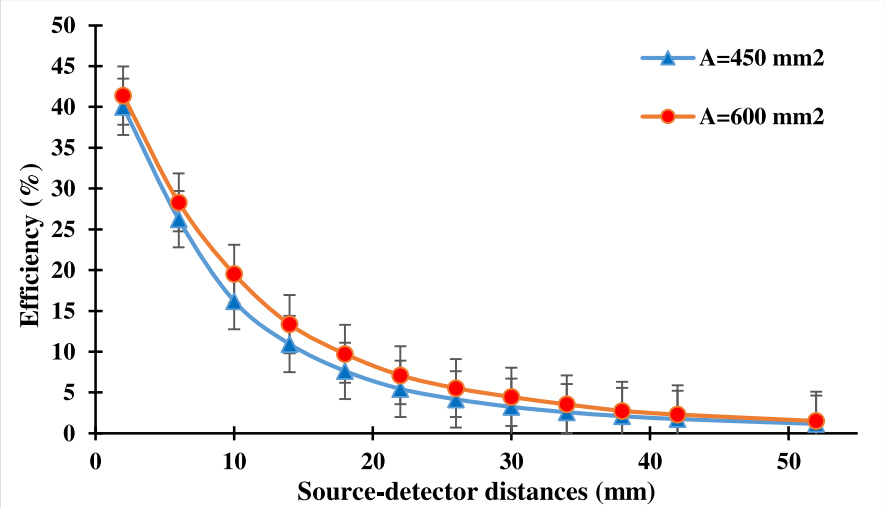
شکل ۲ قدرت تفکیک انرژی اندازه‌گیری‌شده با آشکارساز با مساحت mm^2 ۶۰۰ را برای فواصل مختلف چشمه تا آشکارساز نشان می‌دهد. عدم قطعیت اندازه‌گیری پهنای قله، حاصل عوامل مختلفی ازجمله نوع و ابعاد آشکارساز، هندسه شمارش، کیفیت چشمه (نمونه) و هم‌چنین وجود جاذب‌های بین چشمه و آشکارساز (هوا و پنجره آشکارساز) می‌باشد.



شکل (۲): تغییرات پهنای قله نسبت به فاصله چشمه تا آشکارساز با مساحت mm^2 ۶۰۰ برای سه رادیونوکلید آلفازا.

با توجه به شکل‌ها برای هر سه چشمه آلفا و هم‌چنین برای هر دو آشکارساز مشاهده می‌شود که تغییر قدرت تفکیک با فاصله آشکارساز از چشمه به دو قسمت مجزا تقسیم می‌شود: یک کاهش سریع پهنای قله برای فواصل ۲ تا ۱۴ میلی‌متر و یک کاهش بسیار کم و ناچیز پهنا برای فواصل ۲۰ میلی‌متر به بعد. اثر تفرق انرژی یا استراگلینگ[1] باعث تغییر زیاد قدرت تفکیک در فواصل نزدیک چشمه تا آشکارساز می‌شود. هنگامی‌که چشمه آلفازا به آشکارساز نزدیک شود، به‌دلیل این‌که متوسط زاویه فرودی ذرات آلفا به آشکارساز افزایش می‌یابد، پهن‌شدگی خط انرژی ذره آلفا قابل انتظار خواهد بود که این مسأله به‌نوبه خود باعث افزایش مؤثر بیشینه طول مسیر ذرات در پنجره ورودی و از این‌رو افزایش پدیده تفرق انرژی می‌گردد که سبب پهن‌شدگی قله خواهد شد که در این شرایط، شناسایی و مشخص کردن فوتوقله‌های عناصر آلفازا که انرژی‌های نزدیک به‌هم دارند را دشوار می‌کند.

جهت تعیین بهترین شرایط عملکردی سیستم طیف‌سنج آلفا، علاوه‌بر پارامتر پهنای قله تعیین بازده یا کارایی آشکارسازی لازم و ضروری است. نحوه محاسبه بازده به این صورت است که با دانستن میزان فعالیت چشمه استاندارد که در برگه داده‌های آن ذکر شده و هم‌چنین داشتن سطح زیر منحنی که ازنرم‌افزار آنالیز به‌دست می‌آید و معلوم بودن زمان شمارش (۱۸۰۰ ثانیه)، بازده محاسبه می‌گردد. شکل ۳ بازده آشکارسازی مربوط به چشمه آمرسیم-۲۴۱ برای فواصل مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۳): بازده آشکارسازی نسبت به فاصله چشمه تا آشکارساز برای دو آشکارساز با مساحت مختلف.

با مقایسه پهنای قله رادیونوکلیدهای آلفازا در شکل‌های ۱ و ۲ برای دو آشکارساز با مساحت‌های $450\ mm^2$ و $600\ mm^2$ به‌نظر می‌رسد که قدرت تفکیک وابستگی قابل توجهی به اندازه آشکارساز ندارد، در حالی‌که شدیداً به فاصله نمونه تا آشکارساز بستگی دارد. اما این نتیجه به‌معنای مستقل بودن قدرت تفکیک از اندازه آشکارساز نیست و اختلاف کم شعاع مساحت فعال دو آشکارساز می‌تواند علت آن باشد. زیرا مقدار پهنای قله برای آشکارساز با مساحت فعال $300\ mm^2$ و $1200\ mm^2$ به‌ترتیب ۱۷-۱۹ keV و ۳۰-۳۷ keV گزارش شده است [۵]. علاوه‌بر آن همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، با افزایش فاصله چشمه از آشکارساز بازدهی و کارایی کاهش پیدا می‌کند و به‌همین دلیل برای داشتن بالاترین کارایی لازم است چشمه را تا آن‌جا که ممکن است به آشکارساز نزدیک کرد ولی ازطرف دیگر همان‌طور که دیده شد نزدیک

[1] straggling effect

بودن چشمه به آشکارساز سبب کاهش وضوح و کم‌شدن قدرت تفکیک می‌گردد. بنابراین بایستی با توجه به تعداد، نوع، انرژی و اکتیویته رادیونوکلیدها در نمونه فاصله بهینه تا آشکارساز تعیین و شمارش در آن فاصله انجام شود.

۴. نتیجه‌گیری

در مراحل مختلف چرخه سوخت هسته‌ای از اکتشاف و استخراج تا تبدیل اورانیوم به محصولات میانی مانند کیک زرد و هگزافلوراید اورانیوم و ساخت سوخت و هم‌چنین بحث پسماندار‌ی و مشخصه‌یابی سوخت‌های مصرفی نیاز به اندازه‌گیری رادیونوکلیدهای آلفازا وجود دارد. هم‌چنین در زمینه پایش‌های محیطی ازنظر حفاظت پرتویی مردم و محیط زیست و تعیین خطر پرتوگیری از منابع طبیعی و منابع ساخت دست بشر تعیین میزان رادیونوکلیدهای آلفازا از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این راستا طیف‌سنجی آلفا به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد در شناسایی و اندازه‌گیری کمی رادیونوکلیدهای آلفازا برتری‌هایی نسبت به سایر روش‌های آنالیز هسته‌ای دارد. جهت تعیین بهترین شرایط عملکردی سیستم طیف‌سنج آلفا، هم پارامتر FWHM و هم بازده یا کارایی آشکارسازی مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کنند که در این تحقیق به بررسی آن‌ها و عوامل مؤثر بر آن‌ها پرداخته شد. نتایج این فعالیت مطابق با دفترچه راهنمای آشکارساز نشان دادند قدرت تفکیک خوب زمانی حاصل می‌شود که فاصله بین چشمه و آشکارساز زیادتر از ۱/۵ برابر شعاع آشکارساز باشد. زیرا در این صورت ذرات آلفا لایه مرده روی سطح آشکارساز را تقریباً عمودی و با حداقل اتلاف انرژی طی می‌کنند. با این حال، با افزایش فاصله چشمه از آشکارساز کارایی و بازدهی آشکارسازی کاهش می‌یابد که در این شرایط بایستی فاصله بهینه را لحاظ کرد و یا این‌که در فواصل زیاد شرایط خلأ بهبود یابد و زمان شمارش بیشتر شود.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی صمیمانه خود را از رئیس و پرسنل آزمایشگاه شناسایی و مشخصه‌یابی رادیونوکلیدها (آنالیز هسته‌ای سابق) پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون اعلام نمایند که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری نمودند.

۶. مراجع

[1] E.M. El Afifi, M.A. Hilal and M.F. Attallah. Performance characteristics and validation of alpha particle spectrometers for radiometric analysis of natural and anthropogenic radionuclides of environmental impacts, Applied Radiation and Isotopes, 168 (2021) 109548.

[2] S.K. Aggarwal. Alpha-particle spectrometry for the determination of alpha emitting isotopes in nuclear, environmental and biological samples: past, present and future, Analytical methods, 8(27) (2016) 5353-5371.

[3] J. Ryu, J.Y. Park, H.W. Lee, H. Kim and J.S. Chae. Experimental characterization of alpha spectrometer for optimization of operational parameters affecting energy resolution and detection efficiency, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 329(2) (2021) 959–967.

[4] M.R. Calin, M.A. Saizu and I. Radulescu. Assessments on energy and efficiency calibration of an alpha spectrometry system using standard sources, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 298(1) (2013) 55-60.

[5] M.F. L'Annunziata. In: Handbook of radioactivity analysis, Edition, Academic press, (2012).

[6] T.H.N. Phong, T.N. Van and H. Le Cong. Efficiency response of an aged PIPS detector used in high-resolution alpha-particle spectrometry, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 908 (2018) 128-135.

[7] M.R. Calin, M.A. Saizu and I. Radulescu. STUDIES AND ASSESSMENTS ON THE RESPONSE OF A HIGH-PERFORMANCE SPECTROMETER TO ALPHA RADIATION, Romanian Reports in Physics, 66(2) (2014) 359-369.

[8] J. Gascón and A. Muñoz. Optimization of the parameters affecting the solid state detector efficiency in alpha-spectrometry, Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 257(2) (2003) 371-374.