

محاسبه‌ی بازده آشکارساز HPGe به دو روش تجربی و شبیه‌سازی برای چشمه‌ی حجیم خاکی

محمدرضا صافی*، احمد شیرانی و خالد رحمانی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

پست الکترونیکی: safim61@yahoo.com

چکیده

امروزه در مراکز تحقیقاتی بررسی نمونه‌های محیطی از نظر پرتوایی برای تشخیص میزان سلامت محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. برای تعیین مواد پرتوزا و فعالیت آن‌ها در این نمونه‌ها نیاز به چشمه‌های مرجع است. این چشمه‌ها بسته به نوع نمونه با استانداردهایی تولید می‌شوند. یکی از ابزارهای اساسی و دقیق در تعیین مواد پرتوزا و فعالیت آن‌ها به‌ویژه فعالیت‌های ضعیف در نمونه‌های محیطی، آشکارساز HPGe می‌باشد. برای تعیین این مواد پرتوزا و فعالیت آن‌ها در نمونه‌های محیطی لازم است ابتدا آشکارساز توسط چشمه‌های مرجع و استاندارد که هم‌جنس و هم‌شکل با نمونه‌های محیطی و مجهول می‌باشند، درجه‌بندی شده و بازده آشکارساز در گستره‌ی قابل ملاحظه‌ای از انرژی که مورد نیاز است محاسبه گردد. دقیق‌ترین روش برای تعیین بازده آشکارساز، اندازه‌گیری تجربی با استفاده از چشمه‌های مرجع و استاندارد است. با توجه به زمان‌بر بودن و در بعضی موارد مشکل بودن این روش، استفاده از روش شبیه‌سازی برای تخمین بازده آشکارساز که در زمان کم و با دقت خوب همراه است، ارزشمند است. در قسمت اول این پژوهش بازده آشکارساز برای چشمه‌ی حجیم استاندارد خاکی به دو روش تجربی و شبیه‌سازی برای بازه‌ی انرژی ۱۲۱ keV تا ۱۴۰۸ keV تعیین گردیده است. در محاسبه‌ی بازده به روش شبیه‌سازی از کد مونت‌کارلوی MCNP استفاده شد که نتایج آن سازگاری نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشت. در قسمت دوم با استفاده از این بازده‌ها و خروجی شبیه‌سازی و همچنین داده‌های تجربی، فعالیت یورانیوم و سزیوم چشمه‌ی حجیم که براساس آن‌ها این چشمه استاندارد شده است را توسط چشمه‌ی نقطه‌ای یورانیوم محاسبه و نشان داده شد که می‌توان از یک چشمه‌ی نقطه‌ای نیز برای تعیین فعالیت رادیونوکلئیدهای معلوم با فعالیت نامشخص در نمونه‌های حجیم محیطی، استفاده کرد.

کلیدواژه‌گان: بازده، آشکارساز HPGe، چشمه‌ی حجیم خاکی، روش مونت‌کارلو، کد MCNP، فعالیت چشمه‌ی حجیم.

۱. مقدمه

حاصل از روش تجربی مقایسه گردید. در قسمت دوم پژوهش نیز فعالیت یورانیوم و سزیم چشمه‌ی حجیم با کمک چشمه‌ی نقطه‌ای یورانیوم با فعالیت مشخص محاسبه گردید و نشان داده شد در صورتی که بازده شبیه سازی با بازده تجربی برابر باشد، می‌توان از چشمه‌ی نقطه‌ای نیز برای تعیین فعالیت رادیونوکلیدهای معلوم و شناخته شده در نمونه‌های حجیم محیطی استفاده کرد.

۲. تجهیزات آزمایشگاهی

۱.۲. مشخصات آشکارساز

آشکارساز مورد استفاده در این پژوهش، آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص (HPGe) مدل GMX40P4-76 ساخت شرکت ORTEC می‌باشد. این آشکارساز هم‌محور، ته بسته، گوشه گرد و از نوع n است که مشخصات آن به قرار زیر می‌باشد:

- (۱) بازده نسبی آن ۴۰ درصد در انرژی $1/332 \text{ MeV}$ برای کبالت ۶۰ است.
- (۲) قدرت تفکیک این آشکارساز در انرژی 59 keV برابر 760 eV و در انرژی 1332 keV برابر 2 keV است.
- (۳) قطر کریستال ژرمانیوم فوق خالص آن 60 mm و طول آن $71/1 \text{ mm}$ می‌باشد.
- (۴) قطر حفره‌ی داخلی کریستال 9 mm و طول آن $63/1 \text{ mm}$ است.
- (۵) نوع ماده‌ی پنجره‌ی آشکارساز، برلیوم با ضخامت $0/5 \text{ mm}$ است.
- (۶) لایه‌ی مرده‌ی داخلی با ضخامت $700 \mu\text{m}$ ایجاد شده با لیتیوم است.

امروزه در علوم هسته‌ای طیف‌سنجی پرتوهای گاما دارای اهمیت بسیاری است. یکی از ابزارهای دقیق در طیف‌سنجی گاما برای بررسی عناصر پرتوزای طبیعی و مصنوعی و همچنین تعیین فعالیت آن‌ها در نمونه‌های محیطی حتی به مقدار خیلی کم، آشکارساز HPGe است [۱، ۲]. در مراکز تحقیقاتی برای بررسی این نمونه‌های محیطی از چشمه‌های استاندارد هم‌جنس و هم‌شکل با این نمونه‌ها برای تعیین بازده آشکارساز استفاده می‌شود. بازده آشکارساز HPGe وابستگی شدیدی به انرژی گامای تابشی و هندسه‌ی آشکارساز-چشمه دارد. بی‌تردید بهترین روش برای تعیین دقیق بازده آشکارساز، استفاده از روش تجربی می‌باشد، اما در این روش به علت یک سری از مشکلات مانند وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری و هزینه‌ی بالای تهیه‌ی چشمه‌های استاندارد، استفاده از روشی جایگزین مانند روش شبیه‌سازی مقرون به صرفه است [۳-۷]. با داشتن طیف شبیه‌سازی شده‌ی چشمه‌های استاندارد که در مقایسه با طیف تجربی صحت آن تأیید شده باشد، می‌توان در این هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد.

به‌علاوه با استفاده از طیف شبیه‌سازی شده، می‌توان بازده آشکارساز را در هر انرژی حتی خارج از گستره‌ی انرژی‌های چشمه‌ی استاندارد محاسبه کرد. برای شبیه‌سازی آشکارساز به اطلاعات دقیقی از جمله اندازه و جنس اجزاء مختلف نیاز است که این اطلاعات از کاتالوگ مربوط به شرکت سازنده استخراج شده است [۸، ۹]. در این پژوهش با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX نسخه‌ی ۲/۶، آشکارساز HPGe مدل هم‌محور از نوع n به همراه چشمه‌ی حجیم مرجع خاکی که توسط رادیو نوکلیدهای ^{152}Eu و ^{137}Cs با فعالیت مشخص استاندارد شده است، شبیه‌سازی و از نتایج آن در محاسبه‌ی بازده آشکارساز در گستره‌ی انرژی 121 keV تا 1408 keV بهره گرفته شد. پس از آن نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج

جلوگیری از تأثیر چشمه‌های خارجی در اطراف آشکارساز، از یک حفاظ سربی به ضخامت ۹/۸ cm و در داخل این حفاظ برای کاهش پرتوهای ثانویه‌ی تولید شده از سرب، از یک لایه‌ی مسی به ضخامت ۲ mm استفاده شده است که هر دو ضخامت در برنامه‌ی شبیه‌سازی لحاظ گردید.

(۷) لایه‌ی مرده‌ی خارجی ایجاد شده با بور به ضخامت $0.3 \mu\text{m}$ می‌باشد.

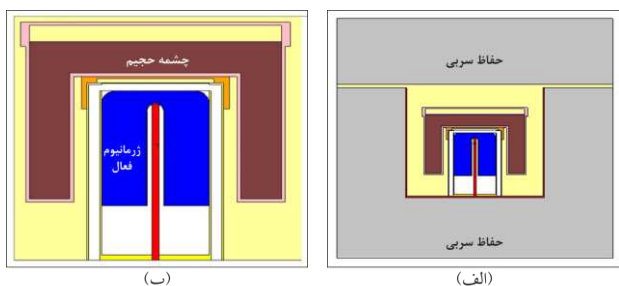
(۸) طول محافظ آلومینیومی داخلی ۱۰۵ mm است.

(۹) بر روی کریستال لایه‌ای به ضخامت ۰/۰۳ mm آلومینیوم و بر روی آن لایه‌ای با همین ضخامت از جنس مایلار می‌باشد. در آزمایشگاه برای کاهش میزان تابش‌های زمینه و

جدول (۱): مشخصات چشمه‌های استفاده شده در این پژوهش.

نوع رادیوایزوتوپ	نیمه‌عمر برحسب سال	تاریخ تولید	فعالیت در زمان تولید برحسب بکرل	تاریخ طیف‌گیری	فعالیت در زمان طیف‌گیری برحسب بکرل
چشمه‌ی حجیم خاکی در ظرف مارینلی	^{137}Cs ۳۰/۰۸	۲۰۱۶/اکتبر/۳۱	2960 ± 37	۲۰۱۸/ژوئن/۲	2854 ± 36
چشمه‌ی شبیه نقطه‌ای	^{152}Eu ۱۳/۵۱۷	۲۰۱۵/ژانویه/۱۵	337000 ± 10110	۲۰۱۸/می/۲۹	283489 ± 8505

است، نیاز به اندازه‌های دقیق و مواد تشکیل‌دهنده آشکارساز و چشمه می‌باشد که در مورد آشکارساز از کاتالوگ شرکت سازنده استفاده شد. اما در مورد چشمه اندازه‌های ظرف از طریق اندازه‌گیری ابعاد یک ظرف مارینلی مشابه و برای معرفی آنالیز خاک (چون اطلاعاتی در مورد آنالیز خاک چشمه در دسترس نیست) در کد از داده‌های مربوط به آزمایشگاه لوس‌آلاموس آمریکا استفاده شد [۱۰]. شکل ۱ تصاویر شبیه‌سازی مربوط به کل فضای مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): تصویر (الف) نشان دهنده‌ی کل فضای مورد بررسی شامل حفاظ‌ها، آشکارساز و چشمه است و تصویر (ب) نشان دهنده‌ی جزئیات آشکارساز و چشمه از نزدیک می‌باشد که شامل ظرف مارینلی، خاک چشمه، درپوش پلی اتیلنی، پنجره برلیومی، حفاظ‌های آلومینیومی خارجی و داخلی، قسمت فعال کریستال ژرمانیوم و لوله‌ی مسی است.

۲.۲. چشمه‌های مورد استفاده در این پژوهش

چشمه‌های مورد استفاده در این تحقیق، یکی چشمه‌ی حجیم مرجع خاکی در ظرفی مارینلی می‌باشد که با سه رادیونوکلیید ^{137}Cs و ^{152}Eu با فعالیت‌های به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۰۲ میکروکوری و به صورت مخلوطی همگن با خاک چشمه استاندارد شده و تاریخ تولید این چشمه ۳۱ اکتبر ۲۰۱۶ است. چشمه‌ی دیگر مورد استفاده در این پژوهش، یک چشمه‌ی شبه‌نقطه‌ای یورانیوم ^{152}Eu می‌باشد که فعالیت آن در زمان تولید ۳۳۷ KBq بوده است. به این علت شبه‌نقطه‌ای بیان شد که این چشمه دارای قطری به اندازه‌ی ۳ mm است. جزئیات مرتبط با این چشمه‌ها در جدول ۱ آمده است.

۳. روش شبیه‌سازی

کد مورد استفاده برای شبیه‌سازی در این پژوهش، کد MCNPX نسخه‌ی ۲/۶ می‌باشد. چون تعیین بازده به شدت وابسته به هندسه و مواد تشکیل‌دهنده فضای مورد بررسی

هستند که به ترتیب برحسب MeV ، $\text{MeV}^{1/2}$ و MeV^{-1} باید تعیین گردند، بر این اساس باید داده‌های ورودی (انرژی‌ها و FWHMها) برای برازش کردن برحسب MeV باشند. مقدار این ضرایب برای طیف چشمه‌ی حجیم برابر است با:

$$\begin{aligned} a &= 1.043 \times 10^{-3} \text{ MeV} \\ b &= 4.984 \times 10^{-4} \text{ MeV}^{1/2} \\ c &= 3.762 \text{ MeV}^{-1} \end{aligned}$$

و برای طیف چشمه‌ی نقطه‌ای در فاصله‌ی 35 cm برابر است با:

$$\begin{aligned} a &= 1.108 \times 10^{-3} \text{ MeV} \\ b &= 5.99 \times 10^{-4} \text{ MeV}^{1/2} \\ c &= 1.602 \text{ MeV}^{-1} \end{aligned}$$

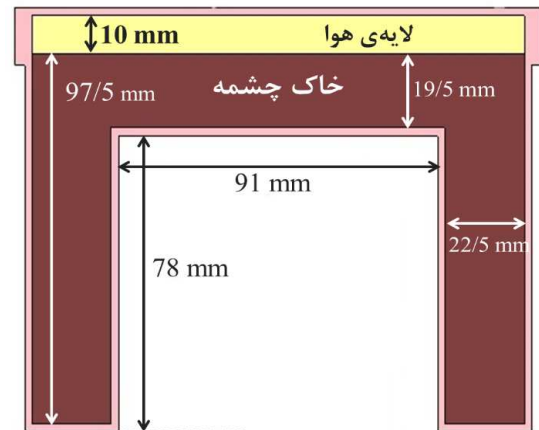
۴. نحوه تعیین بازده

بازده آشکارساز HPGe به شدت به انرژی فوتون و هندسه‌ی سیستم آشکارساز-چشمه وابسته است. در مورد چشمه حجیم صحبت از بازده ذاتی بی‌معنا است و در این پژوهش برای چشمه حجیم و نقطه‌ای فقط بازده مطلق محاسبه شده است که در روش تجربی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱، ۲]:

$$\varepsilon = \frac{N}{AI_T T} \quad (2)$$

در این رابطه ε بازده، N تعداد شمارش خالص زیر قله‌ی فوتویک هر انرژی، A فعالیت چشمه برحسب بکرل، T زمان طیف‌گیری برحسب ثانیه و I_T احتمال گسیل اشعه‌ی گاما و یا به عبارتی درصد انشعاب می‌باشد. در این رابطه، برای مقدار A از فعالیت در زمان طیف‌گیری استفاده شد (جدول ۱). زمان طیف‌گیری نیز به دلیل ضعیف بودن فعالیت‌های چشمه‌ی حجیم، 60000 ثانیه در نظر گرفته شد تا یک طیف با تعداد ذرات مناسب برای بررسی بازده آشکارساز به دست آید. اما در روش شبیه‌سازی پس از اجرای برنامه، کد MCNP نتایج را در یک فایل متنی ارائه می‌دهد که حاوی مطالب گوناگونی

با توجه به شکل ۲ به‌خاطر هندسه‌ی ظرف مارینلی در تعریف چشمه در کد، چشمه به دو قسمت تقسیم شد، یکی پوسته‌ای استوانه‌ای شکل به ارتفاع $9/75 \text{ cm}$ و ضخامتی از شعاع $4/75 \text{ cm}$ تا 7 cm (این شعاع‌ها با در نظر گرفتن ضخامت ظرف و از محور عمودی بر روی مرکز ظرف مارینلی که محور استوانه نیز هست، تعیین می‌شود) و دومین بخش به صورت یک استوانه در وسط سطح مقطع ظرف مارینلی و در بالای آن به ارتفاع $1/95 \text{ cm}$ و به شعاعی از صفر تا $4/75 \text{ cm}$. اما برای اینکه طیف حاصل از شبیه‌سازی برای تطابق بیشتر با طیف تجربی به صورت گاوسی باشد، باید FWHM یا میزان پهن شدگی هر قله در طیف لحاظ شود که این کار به وسیله کارت GEB انجام می‌گیرد.



شکل (۲): ابعاد چشمه‌ی حجیم استاندارد خاکی

کد MCNP از طریق کارت GEB پهنای کامل در نیم‌بیشینه توزیع (FWHM) را از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌کند [۱۱]:

$$\text{FWHM} = a + b\sqrt{E} + cE^2 \quad (1)$$

در کارت GEB باید ضرایب a ، b و c را تعریف کرد. برای تعیین مقدار این ضرایب باید FWHM چند قله‌ی تمام انرژی را بعد از کالیبراسیون طیف تجربی مشخص و بعد نسبت به رابطه‌ی ۱ برای نقاط به‌دست آمده در نمودار FWHM برحسب انرژی برازش‌گیری کرد. a و b و c مقادیر ثابتی

می‌باشد. یکی از مهم‌ترین بخش‌ها، مقدار تالی به ازای هر انرژی است. نکته‌ی مورد توجه در اینجا این است که در این پژوهش از تالی F8 استفاده شده است که در واقع مقدار فراوانی ذرات ثبت شده برای هر انرژی در هر سلول را بیان می‌کند. باید توجه کرد که عدد تالی به ازای هر انرژی، مقدار نسبت N به A را می‌دهد که در آن N تعداد ذره‌ی ثبت شده به ازای انرژی مورد نظر و A به نوعی فعالیت کل یا nps یا تعداد ذراتی است که برنامه برای آن اجرا شده است، در واقع برنامه‌ی MCNP مقدار خروجی برای هر انرژی را به ازای یک ذره به ما می‌دهد یعنی $A=1$ و N همان مقدار تالی است. با معلوم بودن نسبت N به A ، از رابطه‌ی ۳ می‌توان بازده مطلق برای چشمه‌ی خاکی موجود در ظرف مارینلی با مشخصات داده شده را حساب کرد:

$$\varepsilon = \frac{N}{AI_{\gamma}} \quad (3)$$

در این رابطه I_{γ} احتمال گسیل ذره به ازای انرژی مد نظر می‌باشد. در مورد تمام رادیونوکلئیدها و به خصوص رادیونوکلئیدهایی مثل یورانیوم که چندین گاما گسیل می‌کنند، به ازای یک واپاشی مجموع درصدهای انشعاب^۱ بیشتر یا کمتر از یک است و کد MCNP مجموع این احتمال‌ها را در هر دو صورت بهنجار به یک می‌کند. پس در محاسبه‌ی بازده در شبیه‌سازی برای I_{γ} در رابطه‌ی ۳ باید از احتمال بهنجار شده استفاده کرد. برای یورانیوم در سایت‌های مرجع در حدود ۱۷۳ گامای گسیلی ذکر شده بود که مجموع درصدهای انشعاب آن‌ها به ازای یک واپاشی ۱/۵۹۳۳۵ می‌شود و در برنامه از تمام این گاماها استفاده شد. در مورد سزیوم هم برای انرژی ۶۶۱/۶۵۷ keV از احتمال ۰/۸۵۱ استفاده شد. ارزش نتایج شبیه‌سازی به اعتبارسنجی این نتایج با مقدارهای تجربی می‌باشد. نتایج حاصل از این دو روش برای چشمه‌ی حجیم در جدول ۲ و نمودار شکل ۳ و برای چشمه‌ی نقطه‌ای در جدول ۳ و نمودار شکل ۴ قابل ملاحظه است.

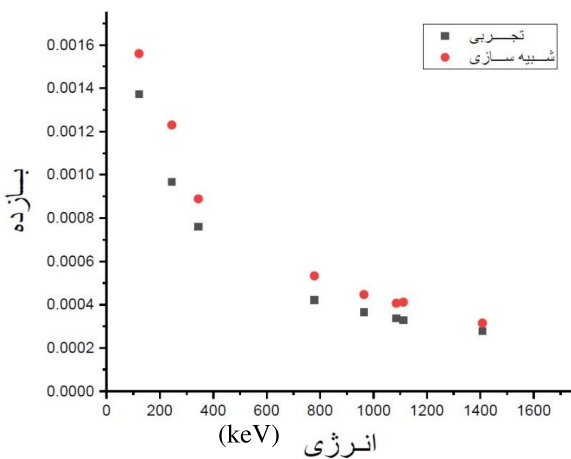
جدول (۲): مقایسه‌ی نتایج بازده تجربی و شبیه‌سازی مربوط به چشمه‌ی استاندارد حجیم.

درصد اختلاف	بازده شبیه‌سازی	بازده تجربی	درصدهای انشعاب	انرژی برحسب keV
۱۲/۶	۰/۰۵۴۸	۰/۰۴۷۹ ± ۰/۰۰۳۶	۰/۲۸۵۳	۱۲۱/۷۸۱
۳۱/۷	۰/۰۴۷۹	۰/۰۳۲۷ ± ۰/۰۰۲۴	۰/۰۷۵۵	۲۴۴/۶۹۷
۴/۶	۰/۰۳۰۲	۰/۰۲۸۸ ± ۰/۰۰۲۶	۰/۲۶۵۹	۳۴۴/۲۷۸
۷/۱	۰/۰۱۹۸	۰/۰۱۸۴ ± ۰/۰۰۰۵	۰/۸۵۱	۶۶۱/۶۵۷
۱۶/۳	۰/۰۱۷۸	۰/۰۱۴۹ ± ۰/۰۰۱۲	۰/۱۲۹۳	۷۷۸/۹۰۴
۱۱/۵	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۳۱ ± ۰/۰۰۰۹	۰/۱۴۵۱	۹۶۴/۰۵۷
۲/۹	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۳۴ ± ۰/۰۰۰۹	۰/۱۰۱۱	۱۰۸۵/۸۳
۱۱/۹	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۱۹ ± ۰/۰۰۰۹	۰/۱۳۶۷	۱۱۱۲/۰۷
۳/۸	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۰۱ ± ۰/۰۰۰۷	۰/۲۰۸۷	۱۴۰۸/۰۱

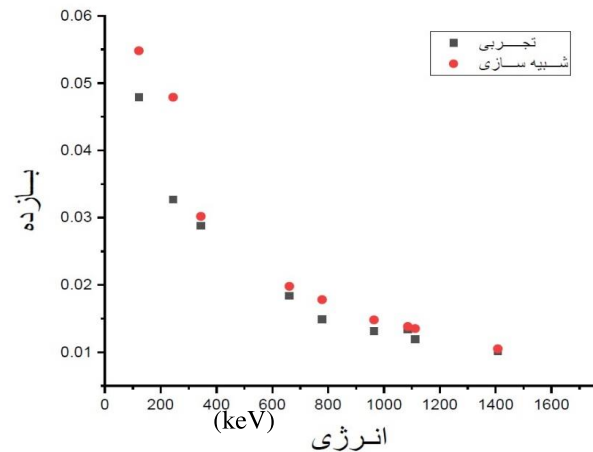
¹ Branching ratio

جدول (۳): مقایسه‌ی نتایج بازده تجربی و شبیه‌سازی مربوط به چشمه‌ی نقطه‌ای یورانیوم در فاصله‌ی ۳۵ سانتی‌متری از آشکارساز.

انرژی برحسب keV	درصدهای انشعاب	بازده تجربی	بازده شبیه‌سازی	درصد اختلاف
۱۲۱/۷۸۱	۰/۲۸۵۳	۰/۰۰۱۳۷۱ ± ۰/۰۰۰۰۸۷۲	۰/۰۰۱۵۶	۱۲/۱
۲۴۴/۶۹۷	۰/۰۷۵۵	۰/۰۰۰۹۶۷ ± ۰/۰۰۰۰۵۹	۰/۰۰۱۲۳	۲۱/۴
۳۴۴/۲۷۸	۰/۲۶۵۹	۰/۰۰۰۷۵۹ ± ۰/۰۰۰۰۶۱۵	۰/۰۰۰۸۸۸	۱۴/۵
۷۷۸/۹۰۴	۰/۱۲۹۳	۰/۰۰۰۴۲۱ ± ۰/۰۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۵۳۳	۲۱/۰
۹۶۴/۰۵۷	۰/۱۴۵۱	۰/۰۰۰۳۶۵ ± ۰/۰۰۰۰۲۰۸	۰/۰۰۰۴۴۷	۱۸/۳
۱۰۸۵/۸۳	۰/۱۰۱۱	۰/۰۰۰۳۳۸ ± ۰/۰۰۰۰۱۹۶	۰/۰۰۰۴۰۶	۱۶/۷
۱۱۱۲/۰۷	۰/۱۳۶۷	۰/۰۰۰۳۲۸ ± ۰/۰۰۰۰۲۱۶	۰/۰۰۰۴۱۱	۲۰/۲
۱۴۰۸/۰۱	۰/۲۰۸۷	۰/۰۰۰۲۷۷ ± ۰/۰۰۰۰۱۴۶	۰/۰۰۰۳۱۵	۱۲/۱



شکل (۴): نمودار مقایسه نقطه‌ای بین بازده تجربی و شبیه‌سازی چشمه‌ی نقطه‌ای (مقدار خطای اندازه‌گیری شده کوچکتر از اندازه نمادهای بکار رفته برای نشان دادن نقاط تجربی است و مقدار خطا زیر ۱ درصد است).



شکل (۳): نمودار مقایسه نقطه‌ای بین بازده تجربی و شبیه‌سازی چشمه‌ی حجیم (مقدار خطای اندازه‌گیری شده کوچکتر از اندازه نمادهای بکار رفته برای نشان دادن نقاط تجربی است و مقدار خطا زیر ۱ درصد است).

۱) شاید مهم‌ترین دلیل وجود اختلاف بین بازده تجربی و شبیه‌سازی وجود قله‌های مجموع در طیف تجربی است.
 ۲) اگر بازه زمانی گسیل بین دو پرتو کمتر از قدرت تفکیک زمانی آشکارساز باشد، آشکارساز نمی‌تواند انرژی دو پرتو را جدا از هم بلکه به صورت یک قله واحد برابر با مجموع انرژی دو پرتو ورودی ثبت می‌کند.

با توجه به این داده‌ها همانطوری که انتظار می‌رفت، با افزایش انرژی پرتوی گسیل شده، بازده کمتر می‌شود. اگرچه سازگاری نسبتاً خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد، لیکن همانطور که در جدول‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی اختلافاتی نیز وجود دارد که دلایل آن‌ها می‌تواند از موارد زیر باشد:

و بازده شبیه‌سازی را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$\varepsilon_{\text{sim}} = \frac{N}{AP}$$

در این رابطه P نشان دهنده‌ی احتمال بهنجار شده در برنامه است. حال اگر مقدار خروجی برنامه که همان مقدار نسبت N به A است با R نشان داده می‌شود پس:

$$\varepsilon_{\text{sim}} = \frac{R}{P}$$

در صورتی که اختلافات بین بازده تجربی و شبیه‌سازی در نظر گرفته نشود و با فرض یکسان بودن بازده تجربی و شبیه‌سازی نتیجه می‌شود:

$$\varepsilon_{\text{sim}} = \varepsilon_{\text{exp}} \Rightarrow \frac{R}{P} = \frac{N}{AI} \Rightarrow$$

$$A = \frac{NP}{RI} \quad (4)$$

برطبق رابطه ۴ می‌توان فعالیت هر چشمه‌ای را با توجه به داده‌های تجربی و شبیه‌سازی مرتبط با آن چشمه محاسبه کرد. حال اگر این رابطه برای چشمه‌ی نقطه‌ای با اندیس صفر مشخص شود، از تقسیم فعالیت چشمه‌ی حجیم به فعالیت چشمه‌ی نقطه‌ای رابطه‌ی ۵ حاصل می‌شود:

$$A = A_0 \frac{N R_0 P I_0}{N_0 R P_0 I} \quad (5)$$

این رابطه برای چشمه‌های با رادیونوکلئیدهای متفاوت و پرتوهای گسیلی با انرژی‌های مختلف قابل استفاده است. در صورتی که رادیونوکلئید هر دو چشمه یکسان باشد، برای انرژی‌های یکسان احتمال‌ها حذف می‌شود و رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$A = A_0 \frac{N R_0}{N_0 R} \quad (6)$$

جدول ۴ نتایج محاسبه‌ی فعالیت سزیم چشمه‌ی حجیم را از طریق فعالیت چشمه‌ی نقطه‌ای یورویوم با استفاده از رابطه‌ی ۵ و جدول ۵ نتایج محاسبه‌ی فعالیت یورویوم چشمه‌ی حجیم

(۳) دومین دلیل مهم البته در مورد چشمه‌ی حجیم نداشتن آنالیز خاک چشمه است که ممکن است در این خاک عنصری وجود داشته باشد که در آزمایشگاه باعث جذب پرتو می‌شود و به دلیل پلمپ بودن چشمه، امکان نمونه‌برداری برای گرفتن یک طیف XRD وجود نداشت، هرچند در صورت امکان نمونه‌برداری، برای حفظ محیط زیست به علت پخش شدن مواد رادیواکتیو در محیط، اجازه قانونی برای این کار وجود نداشت.

(۴) سومین دلیل وجود اطلاعات ناقص در مورد پیکربندی داخلی آشکارساز است که شرکت سازنده این اطلاعات را به صورت محرمانه نگهداری می‌کند و اطلاعات ما در مورد داخل آشکارساز برگرفته از مقاله‌ها و یک سری از اطلاعاتی است که شرکت سازنده منتشر کرده است.

(۵) در شبیه‌سازی هندسه‌ی ظرف مارینلی چشمه‌ی حجیم به صورت دقیق طراحی شده ولی در واقعیت این ظرف در برخی سطوح دارای انحنا و در خم‌ها دارای تغییر ضخامت و چروک می‌باشد.

(۶) کم بودن فعالیت رادیونوکلئیدهای چشمه‌ی حجیم نیز باعث بروز خطا در اندازه‌گیری می‌شود.

(۷) تغییر ضخامت لایه‌های مرده که می‌تواند موجب تغییرات اندکی در حجم فعال آشکارساز شود.

۵. نحوه محاسبه فعالیت چشمه حجیم از طریق

فعالیت چشمه نقطه‌ای

همانطور که بیان شد بازده تجربی را می‌توان از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\varepsilon_{\text{exp}} = \frac{N}{AI}$$

را از طریق فعالیت چشمه‌ی نقطه‌ای یورانیوم با استفاده از طیف‌گیری تفاوت وجود دارد که این اختلاف به علت تفاوت رابطه‌ی ۶ نشان می‌دهند. همانطوری که ملاحظه می‌شود بین فعالیت‌های به دست آمده با فعالیت محاسبه شده در زمان آوردن رابطه‌ی ۵ یکسان بودن این بازده‌ها بود. بین بازده‌های تجربی و شبیه‌سازی است. فرض ما در به دست آوردن رابطه‌ی ۵ یکسان بودن این بازده‌ها بود.

جدول (۴): نتایج محاسبه‌ی فعالیت سزیوم چشمه‌ی حجیم توسط چشمه‌ی نقطه‌ای یورانیوم در فاصله‌ی ۳۵ سانتی‌متر.

سزیوم دارای یک قله‌ی تمام انرژی در ۶۶۱/۶۵۷ keV با درصد انشعاب ۰/۸۵۱ است. شمارش خالص در ثانیه زیر قله‌ی تمام انرژی در طیف تجربی برابر ۴۴/۶۸ می‌باشد. احتمال بهنجار شده برای آن در برنامه‌ی شبیه‌سازی ۱ است.

فعالیت سزیوم چشمه‌ی حجیم بر حسب بکرل	شمارش خالص فوتونیک چشمه‌ی نقطه‌ای یورانیوم در ثانیه	احتمال‌های بهنجار شده در شبیه‌سازی	درصد انشعاب برای پرتوهای گسیلی یورانیوم	انرژی بر حسب keV
۳۰۲۰ ± ۹۱	۱۱۰/۹۱	۰/۱۷۹۱	۰/۲۸۵۳	۱۲۱/۷۸۱
۳۳۸۳ ± ۱۰۲	۲۰/۷	۰/۰۴۷۳۸	۰/۰۷۵۵	۲۴۴/۶۹۷
۳۱۰۴ ± ۹۳	۵۷/۲۵	۰/۱۶۶۹	۰/۲۶۵۹	۳۴۴/۲۷۸
۳۳۶۳ ± ۱۰۱	۱۵/۴۳	۰/۰۸۱۱۵	۰/۱۲۹۳	۷۷۸/۹۰۴
۳۲۴۸ ± ۹۸	۱۵/۰۳	۰/۰۹۱۰۷	۰/۱۴۵۱	۹۶۴/۰۵۷
۳۱۸۳ ± ۹۶	۹/۷	۰/۰۶۳۴۵	۰/۱۰۱۱	۱۰۸۵/۸۳
۳۳۲۷ ± ۱۰۰	۱۲/۷۱	۰/۰۸۵۸	۰/۱۳۶۷	۱۱۱۲/۰۷
۳۰۲۵ ± ۹۱	۱۶/۳۸	۰/۱۳۱	۰/۲۰۸۷	۱۴۰۸/۰۱
فعالیت محاسبه شده سزیوم چشمه‌ی حجیم در زمان طیف‌گیری بر طبق جدول ۱ برابر ۲۸۵۴ بکرل می‌باشد.				میانگین فعالیت: ۳۲۰۶

جدول (۵): نتایج محاسبه‌ی فعالیت یورانیوم چشمه‌ی حجیم توسط چشمه‌ی نقطه‌ای یورانیوم در فاصله‌ی ۳۵ سانتی‌متر.

فعالیت یورانیوم چشمه‌ی حجیم بر حسب بکرل	شمارش خالص فوتونیک چشمه‌ی نقطه‌ای در ثانیه	شمارش خالص فوتونیک چشمه‌ی حجیم در ثانیه	انرژی بر حسب keV
۶۷۷ ± ۲۰	۱۱۰/۹۱	۹/۳۲	۱۲۱/۷۸۱
۵۹۴ ± ۱۸	۲۰/۷	۱/۶۹	۲۴۴/۶۹۷
۷۶۱ ± ۲۳	۵۷/۲۵	۵/۲۳	۳۴۴/۲۷۸
۷۲۵ ± ۲۲	۱۵/۴۳	۱/۳۲	۷۷۸/۹۰۴
۷۳۹ ± ۲۳	۱۵/۰۳	۱/۳	۹۶۴/۰۵۷
۷۹۱ ± ۲۴	۹/۷	۰/۹۲۲	۱۰۸۵/۸۳
۷۵۱ ± ۲۳	۱۲/۷۱	۱/۱۱	۱۱۱۲/۰۷
۷۴۶ ± ۲۳	۱۶/۳۸	۱/۴۳	۱۴۰۸/۰۱
فعالیت محاسبه شده یورانیوم چشمه‌ی حجیم در زمان طیف‌گیری بر طبق جدول ۱ برابر ۶۸۲ بکرل می‌باشد.			میانگین فعالیت: ۷۲۳

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش بازده قله‌های فوتوپیک برای چشمه‌ی حجیم استاندارد خاکی موجود در آزمایشگاه هسته‌ای دانشکده‌ی فیزیک دانشگاه صنعتی اصفهان برای آشکارساز HPGe موجود در همین آزمایشگاه به روش تجربی و شبیه‌سازی تعیین گردید. با توجه به نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی و توافق خوب آن‌ها با نتایج تجربی می‌توان از شبیه‌سازی در زمان کمتر و برای هر انرژی بازده را محاسبه کرد. معمولاً به علت نیمه‌عمر مواد پرتوزا بعد از گذشت مدتی فعالیت چشمه‌ی مورد نظر کاهش یافته و محاسبه‌ی بازده در روش تجربی با خطا روبرو می‌شود در صورتی که در شبیه‌سازی نیازی به فعالیت نیست. از مزایای دیگر شبیه‌سازی این است که می‌توان بازه‌ی انرژی برای هر محدوده‌ای تعیین شود و بعد از کالیبره کردن طیف برحسب انرژی، سایر پیک‌های موجود در طیف نمونه‌های مجهول هم شکل با نمونه‌ی استاندارد را بررسی

کرد. مورد دیگر این که چون تهیه‌ی چشمه‌های استاندارد برای مراکز تحقیقاتی هزینه‌های زیادی دارد، این مراکز می‌توانند از کد شبیه‌سازی برای مقاصد خود استفاده نمایند، البته این مراکز می‌توانند با در اختیار داشتن این چشمه و برای آشکارسازهای خود این مراکز شبیه‌سازی را انجام دهند و بعد چشمه را به آزمایشگاه دانشگاه تحویل دهند.

اما در مورد قسمت دوم این پژوهش که از آن نتایج نسبتاً خوبی به دست آمد، با استفاده از طیف تجربی و شبیه‌سازی می‌توان فعالیت چشمه‌ی حجیم را از چشمه‌ی نقطه‌ای و چشمه‌ی نقطه‌ای را از چشمه‌ی حجیم توسط روابط ۵ و ۶ محاسبه کرد. از این روش می‌توان در تعیین فعالیت رادیونوکلیدهای موجود در نمونه‌های حجیم مجهول محیطی توسط چشمه‌ی نقطه‌ای استفاده کرد.

۷. مراجع

- [1] G.F. Knoll. Radiation detection and Measurement, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc, (2000).
- [2] N. Soulfanidis. Measurement and detection of radition, Hemisphere Publishing Corporation, New York, (1983).
- [3] T. Nakamura and T. Suzuki. Monte Carlo calculation of peak efficiencies of Ge(Li) and pure Ge detectors to voluminal sources and comparison with environmental radioactivity measurement. Nuclear Instruments and Methods. 205 (1983) 211–218.
- [4] I.O.B. Ewa, D. Bodizs, Sz. Czifrus and Zs. Molnar. Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector. Applied Radiation and Isotopes. 55 (2001) 103–108.
- [5] C.S. Park, G.M. Sun and H.D. Choi. Experimental and simulated efficiency of a HPGe detector in the energy range of 0.06–11 MeV. Journal of the Korea Nuclear Society. 3 (2003) 234–242.
- [6] F. Xie, W. Jiang, T. Bai and G. Yu. A study on activity determination of volume sources using point-like standard sources and Monte Caro simulations. Radiation Physics and Chemistry. 103 (2014) 53–56.
- [7] M.R. Zare, M. Kamali, Z. Omid and M. Fallahi Kapourchali. Designing and producing large-volume liquid gamma-ray standard sources for low radioactive pollution measurements of seawater samples by comparison between experimental and simulation results. Measurement. 90 (2016) 412–417.
- [8] S. Gallardo, A. Querol, J. Ortiz, J. Rodenas, G. Verdu and J.F. Villanueva. Uncertainty analysis in environmental radioactivity measurements using the Monte Carlo code MCNP5. Radiation Physics and Chemistry. 116 (2015) 214–218.
- [9] GMX Series Coaxial HPGe Detector Product Configuration Guide, ORTEC.
- [10] Radiation Portal Monitor Project Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling, PIET-43741-TM-963 and PNNL-15870 Rev. 1, Homeland Security (2011).
- [11] G.R. Gilmore. Practical Gamma-ray Spectrometry, 2nd Edition, John Wiley & Sons (2008).