

تعیین لایه مرده و بازده قله تمام - انرژی آشکارساز HPGe با استفاده از کد MCNP و نتایج تجربی

مسعود معینی فر، احمد شیرانی و خالد رحمانی

گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: m.moeinifar@ph.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۴/۲۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۳/۲۷)

چکیده

یکی از پارامترهای مهم در استفاده از آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص (HPGe) بازده آشکارساز است که به هندسه و عوامل جذبی بستگی دارد، به طوری که با تغییر پیکربندی در هندسه چشمه-آشکارساز، نیاز به اندازه‌گیری مجدد بازده آشکارساز است. دقیق‌ترین راه برای تعیین بازده آشکارساز، اندازه‌گیری تجربی و استفاده از چشمه‌های استاندارد است. با توجه به مشکل دسترسی به چشمه‌های استاندارد و در عین حال زمان‌بر بودن این روش، استفاده از روش شبیه‌سازی برای تخمین بازده آشکارساز که در زمان کم و با دقت خوب همراه است، ارزشمند است. در این پژوهش، شبیه‌سازی مونت-کارلو برای به دست آوردن ضخامت لایه مرده و بازدهی قله تمام-انرژی آشکارساز HPGe با استفاده از کد کامپیوتری MCNPX انجام شد. برای این کار چشمه‌های مختلف را در فاصله‌های مشخص از آشکارساز قرار داده و طیف‌های تجربی به دست آمده ذخیره شدند. سپس طیف حاصل از چشمه‌ها مطابق با وضعیت و شرایط آزمایشگاه، با استفاده از کد شبیه‌سازی شدند. در اجرای اولیه، کل حجم بلور ژرمانیوم به عنوان حجم فعال آشکارساز در نظر گرفته شد و با این فرض طیف به دست آمده از محاسبات انجام شده با طیف تجربی مقایسه گردید. مقایسه طیف محاسبه شده با طیف حاصل از آزمایش اختلاف قابل توجهی را نشان می‌داد. پس از آن، سعی شد با ایجاد تغییرات اندک در ضخامت لایه مرده آشکارساز (در حدود چندین صدم میلی‌متر) در برنامه شبیه‌سازی و برازش منحنی شبیه‌سازی شده با منحنی تجربی، حجم فعال بلور مشخص شود که به این ترتیب یک لایه مرده به ضخامت ۰.۵۷ mm برای لایه مرده آشکارساز به دست آمد. سپس با لحاظ کردن این ضخامت لایه مرده در برنامه شبیه‌سازی بازده قله تمام-انرژی برای انرژی‌های مختلف و فاصله‌های مختلف چشمه تا آشکارساز به هر دو روش تجربی و شبیه‌سازی تعیین شدند که مطابقت خوبی داشتند. بنابراین می‌توان گفت با استفاده از کد MCNP و لحاظ کردن مشخصات دقیق سیستم اندازه‌گیری در برنامه ورودی کد می‌توان بازده یک آشکارساز HPGe را در شرایط مختلف هندسه نمونه-آشکارساز با دقت خوبی بدون نیاز به انجام آزمایش محاسبه کرد.

واژه‌های کلیدی: آشکارساز HPGe، لایه مرده، کد مونت‌کارلو MCNP، بازده قله تمام-انرژی

۱. مقدمه

منحصر به فرد و به ویژه قدرت تفکیک بسیار خوب آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص (HPGe)، طیف‌سنجی پرتوهای گاما، به ویژه در انرژی‌های پایین پرتو گاما، عموماً

امروزه طیف‌سنجی پرتوهای گاما کاربردهای فزاینده‌ای در علوم و صنایع هسته‌ای پیدا کرده است. به دلیل ویژگی‌های

چشمه قرار می‌گیرد) و سطوح اطراف بلور ژرمانیوم تامین می‌شود، و اتصال p^+ (با ضخامتی حدود 0.3 میکرومتر) از طریق کاشت یون‌های پذیرنده بور (B) روی سطح (حفره) درونی بلور ژرمانیوم تامین می‌شود، در حالی که در آشکارسازهای HPGe نوع n وضعیت بر عکس می‌باشد، به طوری که سطح بیرونی (و سطوح اطراف) بلور اتصال p^+ و سطح (حفره) درونی بلور اتصال n^+ را تشکیل می‌دهد [۱، ۲ و ۱۱]. به طور کلی در آشکارسازهای HPGe، لایه‌های n^+ و p^+ به عنوان لایه‌های مرده یا در واقع غیر فعال محسوب می‌شوند، چون یون‌های ایجاد شده در این لایه‌ها نمی‌توانند جمع‌آوری شوند و در ایجاد علامت الکتریکی مشارکت کنند. یکی از نکات مهمی که در مورد این لایه‌ها مطرح می‌باشد این است که ضخامت لایه n^+ می‌تواند به مرور زمان (در اثر پخش اتم‌های لیتیوم در بلور ژرمانیوم) افزایش یافته و موجب کاهش بازده آشکارساز شود. این اثر به ویژه در آشکارسازهای HPGe نوع p که اتصال n^+ در سطح بیرونی آنها قرار دارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چون با بزرگ شدن ضخامت این لایه هم حجم فعال بلور کاهش می‌یابد و هم مانعی بر سر راه ورود پرتوها (به ویژه پرتوهای کم انرژی) به داخل بلور ایجاد می‌شود، و به این ترتیب این اثر می‌تواند روی بازده آشکارساز در سر تا سر گستره انرژی تأثیر بگذارد. به همین دلیل در آشکارسازهای نوع p ضخامت لایه n^+ هم به طریق تجربی [۴ و ۱۲] و هم به طریق شبیه‌سازی در مطالعات متعدد [۱۳-۱۶] تعیین و اثر آن روی بازده این نوع آشکارسازها مورد بررسی قرار گرفته است. لیکن در آشکارسازهای نوع n به دلیل اینکه اتصال n^+ در سطح (حفره) درونی بلور قرار دارد این اثر کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجا که ضخیم شدن لایه n^+ (حتی در سطح حفره درونی بلور) می‌تواند موجب کاهش حجم حساس بلور و در نتیجه کاهش بازده آشکارساز به ویژه در انرژی‌های بالای پرتو گاما (انرژی‌های حدود 1 MeV و بالاتر که قابلیت نفوذ زیادی در بلور ژرمانیوم دارند) بشود، در این تحقیق اثر تغییرات ضخامت لایه مرده درونی n^+ در یک آشکارساز HPGe هم محور نوع n بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای

توسط این نوع آشکارساز انجام می‌شود [۱، ۲، ۳]. یکی از پارامترهای مهم در استفاده از آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص بازده این نوع آشکارسازها می‌باشد که عمدتاً به نوع چشمه، هندسه چشمه- آشکارساز و انرژی پرتو گاما بستگی دارد و باید در هر آزمایش با توجه به شرایط آزمایش تعیین شود. یکی از روش‌های تعیین بازده آشکارساز اندازه‌گیری تجربی این کمیت با استفاده از چشمه‌های استاندارد مناسب می‌باشد. چشمه‌های استاندارد اغلب گران قیمت بوده و حتی در برخی موارد تهیه آنها به راحتی امکان‌پذیر نیست و به علاوه فرایند اندازه‌گیری باید برای انواع چشمه‌های پرتوزا و در شرایط مختلف تکرار شود. در سال‌های اخیر برای ساده‌تر شدن فرایند تعیین بازده و همچنین کاهش زمان عملیات آزمایشگاهی، استفاده از روش شبیه‌سازی و محاسبه بازده با به کارگیری کدهای کامپیوتری به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است [۴-۱۰]. در روش شبیه‌سازی سیستم آشکارسازی، لازم است ابعاد دقیق و همچنین جنس اجزاء مختلف آشکارساز، نوع چشمه و فاصله دقیق چشمه تا سطح آشکارساز در برنامه ورودی کد محاسباتی تعریف شوند. در مورد ابعاد و جنس اجزاء مختلف آشکارساز، این اطلاعات را معمولاً از کاتالوگ دستگاه (که توسط شرکت سازنده تهیه شده) استخراج و در کد محاسباتی وارد می‌کنند و در مواردی هم که این اطلاعات یا وجود ندارند و یا به طور کامل در اختیار نیستند جنس و ابعاد اجزاء مختلف سیستم را از طریق تصویر برداری با پرتو ایکس یا گاما اندازه‌گیری و در محاسبات لحاظ می‌کنند [۴ و ۵]. اگر چه عدم یقین در ابعاد و جنس اجزاء مختلف آشکارساز می‌تواند موجب بروز اختلافات قابل توجهی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی شود، لیکن در این میان یکی از پارامترهای مهمی که می‌تواند نقش اساسی در تعیین بازده داشته باشد حجم فعال بلور آشکارساز است که در واقع به صورت ناحیه بین اتصال‌های n^+ و p^+ تعریف می‌شود. در آشکارسازهای HPGe هم محور نوع p، معمولاً اتصال n^+ (با ضخامتی حدود 0.5 میلی‌متر) از طریق پخش اتم‌های بخشنده لیتیوم (Li) روی سطح جلویی یا بیرونی (سطحی که در مقابل

جدول ۱. مشخصات آشکارساز GMX-۴۰P۴ از شرکت ORTEC.

نوع و مدل آشکارساز	ماده‌ی بلور	ضخامت پنجره	بازدهی نسبی	قدرت تفکیک انرژی	قدرت تفکیک انرژی
GMX_۴۰P۴	ژرمانیوم فوق خالص n	۰٫۵۱mm	فوتوپیک ٪۴۰	در ۵٫۹ keV	در ۱۳۳۲ keV
				۲ keV	۷۶۰eV

جدول ۲. مشخصات چشمه‌های نقطه‌ای مورد استفاده در آزمایشگاه.

چشمه	فعالیت اولیه (میکروکوری)	فعالیت در زمان طیف‌گیری (میکروکوری)
^{60}Co	۵ ± ۰٫۵	۰٫۰۹۰ ± ۰٫۰۰۱
^{137}Cs	۵ ± ۰٫۵	۲٫۴۳۰ ± ۰٫۰۰۴
^{226}Ra	۰٫۰۹۰ ± ۰٫۰۰۱	۰٫۰۸۸ ± ۰٫۰۰۱
^{65}Zn	۳۰ ± ۰٫۳	۰٫۰۴۲۰ ± ۰٫۰۰۰۴

۳. شبیه‌سازی آشکارساز و حفاظ آن

این شبیه‌سازی با استفاده از کد MCNPX نسخه ۲٫۶٫۰ انجام شد [۱۷]. برای این شبیه‌سازی به اندازه‌های دقیق و همچنین جنس اجزاء مختلف آشکارساز در طیف‌سنجی تجربی احتیاج بود که بر اساس کاتالوگ مربوط به شرکت سازنده آشکارساز در کد تعریف شدند. حفاظ اطراف آشکارساز مطابق با مشخصات ذکر شده در بخش قبل، نیز لحاظ گردید. همچنین شبیه‌سازی چشمه‌ها نیز منطبق با شرایط به کار رفته در آزمایشگاه به برنامه ورودی افزوده شدند.

در شکل ۱ (الف) نمای کلی آشکارساز شبیه‌سازی شده و حفاظ‌های سربی و مسی اطراف آن نشان داده شده است. شکل ۱ (ب) حجم فعال آشکارساز، لایه آلومینیومی اطراف آن و لوله مسی خنک‌کننده که انتهای لوله به لایه مرده درونی ختم شده را نشان می‌دهد و همچنین در این شکل درپوش پلی‌اتیلنی و پنجره بریلیومی و لایه مرده درونی آشکارساز با رنگ‌های مختلف مشخص شده است.

۴. تعریف گاوسی قله‌ها

پهنای کامل در نیم بیشینه (FWHM) معیاری از میزان پهن‌شدگی هر قله در طیف به دست آمده می‌باشد. به منظور تطابق بیشتر بین طیف شبیه‌سازی و طیف اندازه‌گیری شده لازم است ضرایب پهن‌شدگی طیف برای کد MCNP تعریف شوند.

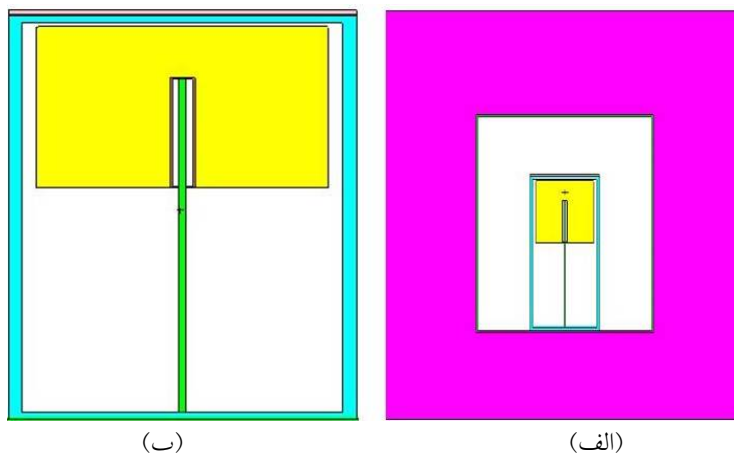
این کار، به روش شبیه‌سازی مونت کارلو، طیف حاصل از این نوع آشکارساز را (برای یک چشمه کبالت ۶۰) به ازای مقادیر مختلف برای ضخامت لایه مرده به دست آورده و پس از تعیین بهینه ضخامت برای این لایه مرده (ضخامتی که به ازای آن طیف شبیه‌سازی شده بیشترین تطابق را با طیف تجربی داشت) و لحاظ کردن آن در برنامه شبیه‌سازی، بازده آشکارساز را در چند حالت چشمه-آشکارساز و در چند انرژی مختلف تابش گاما حساب کرده و با نتایج تجربی مقایسه کرده ایم

۲. تجهیزات آزمایشگاهی

آشکارساز استفاده شده در این پژوهش، آشکارساز HPGe هم محور نوع n، مدل GMX_۴۰P۴ می‌باشد که مشخصات کامل آن در جدول ۱ ارائه شده است.

برای کاهش میزان پرتوهای گامای زمینیه و جلوگیری از تاثیر چشمه‌های خارجی در اطراف آشکارساز، از یک حفاظ سربی به ضخامت ۱۲ cm استفاده شده است و در داخل این حفاظ برای کاهش پرتوهای ثانویه تولید شده از سرب، از یک لایه مسی به ضخامت ۲ mm نیز استفاده شده است که هر دو ضخامت ذکر شده، در برنامه شبیه‌سازی لحاظ شدند.

برای بررسی سازگاری نتایج تجربی و محاسباتی، نیاز به طیف چشمه‌های نقطه‌ای در فواصل و شرایط معینی داشتیم. مشخصات چشمه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) هندسه واقعی تعریف شده در کد. در شکل‌های بالا رنگ بنفش مربوط به لایه ضخیم سربی اطراف آشکارساز، رنگ سبز مربوط به لوله مسی خنک کننده آشکارساز و همچنین پوشش داخلی لایه سربی اطراف آشکارساز، رنگ صورتی مربوط به درپوش پلی اتیلنی آشکارساز، رنگ قرمز مربوط به پنجره برلیومی آشکارساز، رنگ آبی روشن مربوط به لایه آلومینیومی اطراف کریستال ژرمانیوم، رنگ قهوه‌ای مربوط به لایه مرده درونی آشکارساز از جنس لیتیوم و رنگ زرد مربوط به حجم فعال آشکارساز که از جنس ژرمانیوم فوق خالص است. (ب) بزرگ شده قسمت داخلی شکل الف را نشان می‌دهد.

جدول ۳. FWHM در انرژی‌های مختلف برای آشکارساز مورد نظر.

انرژی (MeV)	۱,۳۳۲	۱,۱۷۳	۰,۶۶۱۶	۰,۱۸۶۱۸	۰,۲۹۵	۰,۶۰۹
پهنای کامل نیم بیشینه (keV)	۲,۵۱	۲,۴۲	۲,۱۱	۱,۸۰	۱,۸۵	۲,۰۹

بودن مقدار دقیق حجم فعال بلور در محاسبات شبیه‌سازی از اهمیت خاصی برخوردار است، به تعیین حجم فعال آشکارساز می‌پردازیم. به این منظور، طیف تجربی یک چشمه نقطه‌ای کبالت-۶۰ در فاصله ۴ cm از پنجره آشکارساز و دقیقاً روی محور آن، برای زمان زنده حدود ۱۲ ساعت اندازه‌گیری شد. سپس طیف حاصل از این چشمه را مطابق با وضعیت و شرایط آزمایشگاه به طریق شبیه‌سازی نیز به دست آوردیم. در اجرای اولیه، ضخامت لایه مرده لیتیومی صفر و کل حجم بلور ژرمانیوم به عنوان حجم فعال آشکارساز در نظر گرفته شد و با این فرض طیف به دست آمده از محاسبات با داده‌های تجربی مقایسه گردید. طیف محاسبه شده با طیف حاصل از آزمایش اختلاف قابل توجهی را نشان می‌داد، لذا برای بررسی اثر ضخامت لایه مرده بر روی طیف شبیه‌سازی شده به افزایش ضخامت لایه مرده تعریف شده در برنامه پرداختیم و بعد از هر بار افزایش، نتایج کد با نتایج تجربی مقایسه گردید تا جایی که خروجی MCNP منطبق‌ترین نتایج را با نتایج آزمایشگاهی

برای این منظور ضرایب a ، b و c که در رابطه (۱) صدق می‌کنند باید تعیین شوند [۱۷]:

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

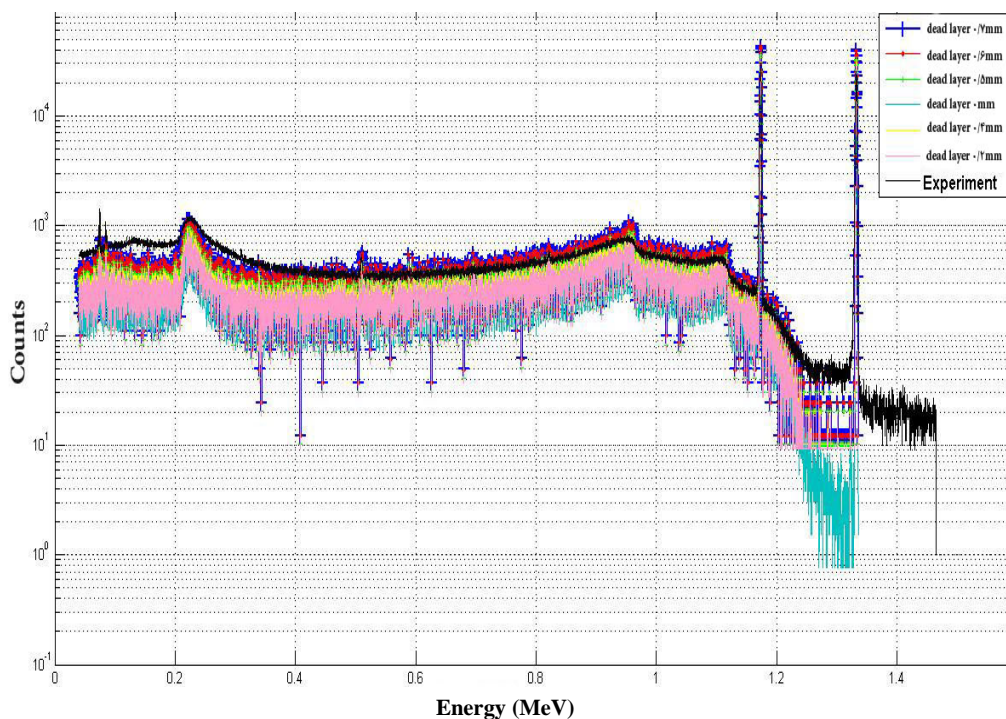
برای تعیین ضرایب فوق، ابتدا پهنای کامل در نیم بیشینه برای چند انرژی مختلف اندازه‌گیری شد و سپس با برازش رابطه (۱) بر روی این نقاط ضرایب مورد نظر محاسبه شدند. قدرت تفکیک آشکارساز در انرژی پرتوهای گامای کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷ و رادیوم-۲۲۶ در جدول ۳ آورده شده‌اند.

ضرایب پهن شدگی طیف با برازش مقادیر تجربی فوق در رابطه (۱) به صورت زیر به دست آمدند. شاخص کیفیت R^2 برای این برازش ۰,۹۹۹ به دست آمد.

$$a = 2,09 \times 10^{-3}, \quad b = 0,15 \times 10^{-3}, \quad c = 0,009$$

۵. تعیین حجم فعال بلور و لایه مرده آشکارساز

بعد از تعیین ضرایب پهن شدگی گاوسی، نظر به اینکه مشخص



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه طیف‌های محاسبه شده به ازای ضخامت‌های مختلف لایه مرده با طیف تجربی کبالت-۶۰.

جمله‌ای بر روی نتایج حاصل از خروجی کد MCNP به دست آورده و سپس در قله‌ها به طیف تجربی بهنجار می‌شد و سپس شبیه‌ترین طیف‌های شبیه‌سازی شده به طیف تجربی، با نرم‌افزار Aptec مقایسه می‌شد. در این نرم‌افزار با استفاده از قسمت Analysis و بخش Compare طیف تجربی و شبیه‌سازی بر روی هم انداخته و مقایسه می‌شد. سپس شمارش‌های زیر قله شمرده می‌شد و طیف شبیه‌سازی شده‌ای که خطای نسبی شمارش در قله‌های آن کمترین خطا (کمتر از یک درصد) را داشت به عنوان منطبق‌ترین طیف معرفی می‌شد. مقایسه نتایج حاکی از لایه مرده‌ای به ضخامت بین ۰/۵۵ تا ۰/۶۰ میلی‌متر بود. سپس منحنی‌های خروجی MCNP با ضخامت لایه مرده ۰/۵۵، ۰/۵۶، ۰/۵۷، ۰/۵۸، ۰/۵۹ و ۰/۶۰ میلی‌متر را با منحنی تجربی در یک نمودار رسم کردیم، به این ترتیب منطبق‌ترین منحنی خروجی MCNP با تجربی به ازای لایه مرده‌ای به ضخامت ۰/۵۷ میلی‌متر به دست آمد، که می‌توان آن را به عنوان ضخامت بهینه برای لایه مرده این آشکارساز در محاسبات لحاظ کرد. باید اشاره شود مقدار ضخامت لایه مرده به دست آمده

داشته باشد. برای این کار ابتدا ضخامت‌های ۰، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ میلی‌متر را به لایه مرده نسبت دادیم و هر بار برنامه را اجرا کردیم که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود ضخامت لایه مرده درونی آشکارساز بر پاسخ آن اثر قابل توجهی دارد به گونه‌ای که با اندک تغییر در ضخامت این لایه اختلاف قابل توجهی بین طیف شبیه‌سازی شده و طیف تجربی به وجود می‌آید.

مقایسه نتایج حاصل از کد با نتایج تجربی بیانگر این مطلب بود که ضخامت لایه مرده باید در گستره از ۰/۴ تا ۰/۶ میلی‌متر باشد. به این منظور برنامه را برای حالت‌های ۰/۴۵، ۰/۵۰، ۰/۵۵ و ۰/۶۰ میلی‌متر ضخامت لایه مرده اجرا کردیم و بعد از هر بار تغییر ضخامت لایه مرده، طیف محاسبه شده با طیف تجربی معادل مقایسه شد. مقایسه طیف‌های تجربی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Aptec انجام شد [۱۸]. به این ترتیب که برای هر ضخامت لایه مرده با نرم‌افزار Matlab [۱۹]، ابتدا طیف‌های شبیه‌سازی شده را با برازش کردن یک منحنی چند

جدول ۴. مقایسه نتایج به دست آمده از تجربه و شبیه سازی برای بازده قله تمام-انرژی.

انرژی (keV)	فاصله چشمه تا آشکارساز (cm)	بازدهی قلهی تمام-انرژی تجربی (%)	بازدهی قلهی تمام-انرژی شبیه سازی (%)
۱۸۶،۱۸۷	۱	18.94 ± 0.12	۱۸،۸۰
۶۶۱،۶	۴	0.2300 ± 0.0002	۰،۱۹
۱۱۱۵،۵	۰،۷	8.4100 ± 0.0054	۸،۳۵
۱۳۳۲	۳،۸	0.250 ± 0.001	۰،۲۲

۶. محاسبه بازده قله تمام-انرژی آشکارساز HPGe

به روش تجربی و شبیه سازی

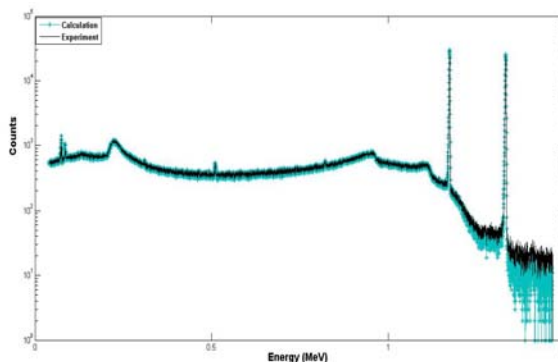
برای محاسبه بازده قله تمام-انرژی (ϵ_p)، به روش تجربی از رابطه زیر استفاده شد [۲].

$$\epsilon_p = \frac{N_p}{AtF} = \frac{N_p}{At\Omega I_\gamma} \quad (2)$$

که در آن N_p شمارش های زیر قله تمام-انرژی مورد نظر، Ω زاویه فضایی $\left(\Omega = 0.5 \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}} \right) \right)$ ، d فاصله چشمه تا آشکارساز و R شعاع پنجره آشکارساز، t زمان زنده طیف گیری و I_γ کسر پرتو گامای گسیل شده در انرژی مورد نظر و A فعالیت چشمه در زمان طیف گیری است که مقادیر آن در جدول ۲ ذکر شده است.

در کد MCNP برای محاسبه بازده آشکارساز از تالی FA استفاده شد و چشمه تعریف شده در کد یک چشمه نقطه ای در نظر گرفته شد و با اجرای برنامه برای ۵۰ میلیون ذره، بازده قله تمام-انرژی برای انرژی های مختلف محاسبه گردید. در جدول ۴ مقادیر محاسبه شده برای بازده قله تمام-انرژی به روش تجربی و شبیه سازی برای چند انرژی مختلف آورده شده است.

همان طور که جدول ۴ نشان می دهد نتایج تجربی و شبیه سازی سازگاری نسبتاً خوبی را نشان می دهند بنابراین می توان با استفاده از برنامه نوشته شده، بازده آشکارساز را در هر فاصله و هر انرژی حساب کرده و مورد استفاده قرار داد. قابل ذکر است که مقادیر به دست آمده در این کار (جدول ۴)، با مقادیر بازده به دست آمده در کارهای مشابه [۲۰، ۲۱ و ۲۲] سازگاری خوبی دارند که درستی نتایج این مطالعه را تایید می کند. با توجه به اینکه بازده قله تمام-انرژی به انرژی پرتو



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه طیف کبالت -۶۰ حاصل از شبیه سازی با طیف تجربی معادل آن به ازای لایه مرده ای به ضخامت ۰،۵۷ mm.

برای این آشکارساز با مقدار تقریبی ذکر شده برای آشکارساز مشابه با این آشکارساز در مرجع [۲۰] که ۰،۷۰ میلی متر ذکر شده، سازگاری نسبتاً خوبی دارد. البته ضخامت لایه مرده به زمان ساخت و مدت زمانی که با آن کار شده بستگی دارد. شکل ۳ تطبیق نهایی طیف تجربی و طیف محاسبه شده را به ازای ۰،۵۷ میلی متر برای ضخامت لایه مرده نشان می دهد.

همان گونه که مشاهده می شود توافق بسیار خوبی بین طیف محاسباتی و طیف تجربی وجود دارد، به گونه ای که خطای نسبی شمارش در قلهی ۱۳۳۲ keV کبالت -۶۰، برابر ۰،۸۳ درصد می باشد. عدم تطابق کامل بین دو طیف را در انرژی های پایین می توان ناشی از تابش های زمینه متعدد موجود در آزمایشگاه دانست که در محاسبات شبیه سازی لحاظ نشده اند. البته در یک برنامه شبیه سازی جامع تر می توان با تغییر ابعاد اجزاء دیگر آشکارساز تطابق بهتری بین نتایج تجربی و شبیه سازی به دست آورد که می تواند موضوع یک مطالعه بعدی باشد.

جدول ۵. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی برای بازده قله تمام- انرژی برای فاصله ۲ cm چشمه تا آشکارساز.

انرژی (keV)	فاصله چشمه تا آشکارساز (cm)	بازده قله تمام- انرژی شبیه‌سازی (%)
۱۸۶,۱۸۷	۲	۱۲,۶۸
۶۶۱,۶	۲	۶,۰۳
۱۱۱۵,۵	۲	۴,۶۰
۱۳۳۲	۲	۲,۲۳

محور مدل GMX-۴۰P۴ نوع n ساخت شرکت ORTEC به روش مقایسه طیف تجربی با طیف شبیه‌سازی شده با دقت نسبتاً بالایی محاسبه شد و این ضخامت در محاسبات شبیه‌سازی لحاظ شد. با وارد کردن این ضخامت در محاسبات شبیه‌سازی و اجرای برنامه با تعداد زیادی ذره (بیش از پنجاه میلیون)، بازده قله تمام- انرژی برای انرژی‌های مختلف محاسبه و با مقادیر تجربی مقایسه شد. با توجه به سازگاری نتایج تجربی و شبیه‌سازی به دست آمده می‌توان بازده آشکارساز را با استفاده از کد در هر انرژی و در هر فاصله از آشکارساز بدون نیاز به انجام آزمایش حساب کرد.

گاما و فاصله چشمه تا آشکارساز بستگی دارد با استفاده از کد MCNP مقادیر بازده قله تمام- انرژی را برای چشمه‌های با انرژی‌های مختلف در فاصله معین ۲ cm حساب کردیم که مقادیر آن در جدول ۵ آورده شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که در یک فاصله مشخص از آشکارساز، همان گونه که انتظار می‌رود، با افزایش انرژی پرتو گاما، بازده قله تمام- انرژی کاهش می‌یابد.

۷. نتیجه‌گیری

در این کار، ضخامت لایه مرده درونی آشکارساز HPGe هم

مراجع

1. G F Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., (2000).
2. N Tsoufanidis, "Measurement and Detection of Radiation", Second Edition, Taylor & Francis, (1995).
3. P Sangsingkeow, "Recent developments in HPGe material and detectors for gamma-ray spectroscopy", EG&G ORTEC, Oak Ridge tn.37830 U.S.A, (2000).
4. P Dryak and P Kovar, *Applied Radiation and Isotopes*, **64** (2006) 1346.
5. J Boson, G Agren, and L Johansson, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: **587**, (2008) 304.
6. J L Gutierrez-Villanueva, A Martin-Martin, and V Peña, MP Iniguez, B de Celis, *Environmental Radioactivity*, **99**, (2008) 1520.
7. C M Salgado, H B Conti, C Paulo, and C Becker; *Applied Radiation and Isotopes*, **64**, (2006) 700.
8. P Nogueira, L Silva, P Teles, J Bento, and P Vaz, *Applied Radiation and Isotopes*, **68**, (2010) 184.
9. R Berndt and P Mortreau, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: **694**, (2012) 341.
10. M Yasser, A Hector, M Carlos, L Jose, and G Aniel, *Applied Radiation and Isotopes*, **97**, (2015) 59.
11. http://www.slac.stanford.edu/econf/c0805263/posters/johnson_r.pdf.
12. D Budjas, M Heisel, W Maneschg, and H Simgen, *Applied Radiation and Isotopes*, **67**, (2009) 706.
13. E Chham, G F Pinero, T El Bardouni, M Angeles, M Azahra, K Benaalilou, M Krikiz, H Elyyakoubi, J El Bakkali, and M Kaddour, *Applied Radiation and Isotopes*, **95**, (2015) 30.
14. N QuangHuy, D Quang and V Binh, *Xuan An Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: **573** (2007) 384.
15. A Elanique, O Marzocchi, and D Leone, *Applied Radiation and Isotopes*, **70**, (2012) 538.
16. N QuangHuy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **621**, (2010) 390.
17. B Denise and Pelowitz, editor, MCNPX USER' S MANUAL, version 2.6.0, (April 2008).
18. <http://www.aptec-nrc.com>.
19. J Wiley & Sons, MATLAB, "An Introduction with Applications", 2nd Edition, Gilat, Amos (2004).
20. D Karamanis, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: **487.3** (2002): 477.
21. I O B Ewa, D Bodizs, S. Czifrus and Z. Molnar, *Applied Radiation and Isotopes* **55.1** (2001): 103.
22. V L Bui, *VNU Journal of Science, Mathematics - Physics* **25** (2009): 231.