

## مدلسازی تغییرات ضخامت لایه مرده در شبیه‌سازی MCNP آشکارساز HPGe جهت بهینه‌سازی محاسبه بازده شمارش نمونه‌های داخل ظرف مارینلی

سید محمد مدرسی\* و سید فرهاد مسعودی

گروه هسته‌ای کاربردی، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

\*تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای کاربردی، کد پستی: ۱۵۴۱۸-۴۹۶۱۱

پست الکترونیکی: Smmodarresi@mail.kntu.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش روشی برای در نظر گرفتن تغییرات ضخامت مرده در سطوح اطراف و بالای آشکار ساز ژرمانیوم فوق‌خالص HPGe جهت شبیه‌سازی دقیق‌تر آن به خصوص برای نمونه‌های با هندسه مارینلی ارائه شده‌است. با توجه به اینکه در نظر گرفتن جزئیات تغییرات ضخامت لایه مرده در تمام نقاط سطح آشکار ساز امکان‌پذیر نیست، در این مقاله در تقریب مناسبی تغییرات ضخامت لایه مرده در ۱۲ قطاع سطح جانبی آشکار ساز و ۲۵ نقطه در سطح بالای آن بررسی شده‌است. برای این منظور بازده شمارش چشمه نقطه‌ای استاندارد Am-241 در هریک از نقاط مورد نظر در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و با توجه به نتایج شبیه‌سازی MCNP مناسب‌ترین ضخامت لایه مرده برای هر نقطه انتخاب گردید. سپس روشی برای شبیه‌سازی آشکار ساز با ضخامت لایه مرده متوسط سطح جانبی و ضخامت متوسطی برای سطح بالایی آن ارائه شد. برای بررسی این روش، نتایج شبیه‌سازی بازده شمارش محلول رادیواکتیو استاندارد در ظرف مارینلی با نتایج آزمایشگاهی شمارش، مقایسه شده و همخوانی مناسبی بین نتایج مشاهده شد.

کلیدواژگان: طیف‌نگاری گاما، بازده شمارش، آشکار ساز HPGe، ضخامت لایه مرده، شبیه‌سازی MCNP، ظرف مارینلی.

### ۱. مقدمه

نمونه از نسبت سطح زیر پیک به بازده دستگاه حاصل می‌شود، اطلاع از مقدار دقیق بازده در انرژی‌های مختلف پرتوی گاما برای تعیین اکتیویته مواد بسیار پراهمیت است. از طرفی بازده آشکار ساز به پارامترهای مختلفی همچون هندسه نمونه و محل قرارگیری آن نسبت به آشکار ساز، جنس و چگالی نمونه، انرژی پرتوی فرودی، مشخصات هندسی آشکار ساز و مواد ساختاری اطراف آن وابسته است. یک روش متداول برای

طیف‌نگاری گاما با استفاده از آشکار ساز ژرمانیوم فوق‌خالص<sup>۱</sup> HPGe روشی است که برای تشخیص نوع مواد رادیواکتیو موجود در نمونه‌های مختلف و همچنین تعیین مقدار یا اکتیویته آن‌ها، در آزمایشگاه‌هایی همچون آزمایشگاه‌های پرتوسنجی محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که مقدار اکتیویته ماده رادیواکتیو تشخیص داده شده در

<sup>1</sup>High Purity Germanium (HPGe)

می‌شود، ولی بخش فعال آشکارسازی نبوده و در عمل همانند حفاظ پرتوی در اطراف آشکارساز رفتار می‌کند. بنابراین ضخامت دقیق این لایه در فعل و انفعالات صورت گرفته در آشکارساز و بازده دستگاه تاثیرگذار است. مقالات بسیاری نشان می‌دهند که ضخامت لایه مرده ارائه شده از طرف سازنده‌های آشکارسازهای مختلف دقیق نیستند. اختلاف بین ضخامت واقعی لایه مرده و مقادیر ارائه شده از طرف سازنده به دلیل عدم قطعیت در فرآیند ساخت کریستال و مهم‌تر از آن، نفوذ تدریجی لیتیوم به داخل ژرمانیوم در دمای اتاق و افزایش ضخامت در طول زمان است [۵-۹].

تحقیقات زیادی برای تعیین دقیق ضخامت لایه مرده به منظور دستیابی به پاسخ‌های مناسب شبیه‌سازی صورت گرفته است [۵-۸]. در این تحقیقات با تغییر ضخامت لایه مرده در شبیه‌سازی و مقایسه پاسخ‌ها با نتایج تجربی حاصل شده از چشمه‌های استاندارد نقطه‌ای، بهترین ضخامت برای لایه مرده انتخاب شده است. اما در آزمایشگاه‌های سنجش پرتوی محیطی معمولاً از طرف‌هایی به نام مارینلی که قابلیت پوشش اطراف و بالای آشکارساز را دارند استفاده می‌گردد. پرتوی خروجی از نمونه‌های محیطی که داخل اینگونه ظرف‌ها قرار می‌گیرند از اطراف و از بالا به آشکارساز وارد شده و با توجه به اینکه زاویه فضایی بزرگی را می‌پوشانند، بازده بالاتری نسبت به هندسه طرف‌های دیگر دارند. در این شرایط ضخامت لایه مرده در نقاط مختلف لایه جانبی و بالای آشکارساز اهمیت خواهد داشت. برخی از کارهای تحقیقاتی ضخامت لایه مرده مناسب جهت شبیه‌سازی دستگاه در حالتی که نمونه مورد شمارش در هندسه مارینلی قرار دارد را با استفاده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی چشمه‌های محلول استاندارد تعیین کرده‌اند [۹-۱۱].

با توجه به کاتوره‌ای بودن پدیده پخش لیتیوم در داخل کریستال ژرمانیوم، ضخامت لایه مرده در نقاط مختلف اطراف آشکارساز متفاوت خواهد بود. در سال‌های اخیر نتایج برخی

تعیین بازده پیک تمام انرژی<sup>۱</sup> FEPE آشکارساز در انرژی‌های مختلف که از گذشته انجام می‌شود، استفاده از نمونه‌هایی حاوی چشمه‌های رادیواکتیو استاندارد با اکتیویته مشخص با شرایط فیزیکی و هندسی کاملاً یکسان با نمونه مورد آزمایش است. با توجه به گستردگی نمونه‌های محیطی که شامل عناصر مختلف محیط زیست نظیر آب، خاک، گیاهان، میوه‌جات، غلات، لبنیات و ... می‌باشند، تهیه نمونه‌های استاندارد با شرایط دقیقاً یکسان با نمونه مورد نظر بسیار مشکل، پرهزینه و گاهی عملاً غیرممکن است. این مشکل به خصوص در کشور ما با محدودیت‌هایی که در تامین چشمه‌های استاندارد رادیواکتیو وجود دارد، بیش از پیش نمایان می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های تعیین بازده FEPE آشکارساز در انرژی‌های مختلف پرتو، شبیه‌سازی آشکارساز و نمونه است. روش مونت کارلو برای این شبیه‌سازی و تعیین بازده دستگاه مناسب بوده و مقالات متعددی با استفاده از کدهای مختلف مونت کارلو اقدام به تعیین بازده دستگاه‌های آشکارسازی نموده‌اند [۴-۱].

برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان و دقیق از شبیه‌سازی، اطلاعات دقیق هندسی و مواد تشکیل دهنده دستگاه و نمونه مورد نیاز هستند. بسیاری از اطلاعات ابعادی و جنس مواد دستگاه به طور معمول توسط کارخانه سازنده ارائه می‌گردند، اما به دلایل مختلفی اطلاعات ارائه شده دقیق نیستند. یکی از مشخصات بسیار مهم در بازده دستگاه و شبیه‌سازی آن، ضخامت لایه مرده<sup>۲</sup> آشکارساز است.

لایه مرده در آشکارسازهای HPGe نوع p، اتصالی از جنس ژرمانیوم با ناخالصی نوع n (معمولاً لیتیوم) است که در فرآیند ساخت آشکارساز از طریق نفوذ لیتیوم در لایه نازک بیرونی اطراف و بالای آشکارساز ایجاد می‌شود. این لایه به منظور ایجاد ناحیه تهی مناسب در آشکارساز نیمه‌رسانا ساخته

<sup>۱</sup> Full Energy Peak Efficiency (FEPE)

<sup>۲</sup> Dead Layer (DL)

کارهای تحقیقاتی نشان داده است که ضخامت لایه مرده در سرتاسر لایه بیرونی کریستال یکسان نیست [۱۵-۱۲]. در مدل-های شبیه‌سازی ارائه شده در این کارهای تحقیقاتی، ضخامت لایه مرده در شعاع‌های مختلف سطح بالایی آشکارساز و همچنین در ارتفاع‌های مختلف سطح جانبی آن به صورت جداگانه و متفاوت از یکدیگر قرار داده شده است.

در پژوهش حاضر ضخامت لایه مرده در سطح جانبی و بالای آشکارساز به صورت ناهمگن در نظر گرفته شده تا مقدار دقیق‌تری برای این ضخامت در شبیه‌سازی حاصل گردد. برای این منظور یک چیدمان آزمایشگاهی برای تعیین وابستگی بازده دستگاه به زاویه جانبی محل قرارگیری چشمه نقطه‌ای و همچنین چیدمان آزمایشگاهی دیگری برای تعیین بازده دستگاه هنگامی که چشمه نقطه‌ای در بالای آشکارساز، در شعاع‌های مختلف نسبت به مرکز آشکارساز و همچنین در زوایای مختلفی قرار می‌گیرد ساخته شده است. نتایج تجربی بازده در موقعیت‌های مختلف قرارگیری چشمه استاندارد در زوایای مختلف جانبی و بالای آشکارساز با نتایج شبیه‌سازی با کد کامپیوتری MCNP-X مقایسه گردیده و ضخامت‌های مختلفی برای لایه مرده حاصل شده است. در نهایت با متوسط‌گیری از ضخامت‌های حاصل شده بر روی سطح جانبی و سطح بالایی آشکارساز، روشی برای شبیه‌سازی آشکارساز با ضخامت لایه مرده جانبی و سطح بالایی در کد MCNP جهت شبیه‌سازی بازده دستگاه برای شمارش یک محلول استاندارد حاوی رادیونوکلئیدهای مختلف داخل ظرف مارینلی طراحی شده و نتایج آن با آزمایش مقایسه گردید.

## ۲. تئوری

از آنجا که نمونه‌های طیف‌نگاری گاما که در ظرف مارینلی قرار می‌گیرند، دور تا دور و بالای سطح آشکارساز را می‌پوشانند، ضخامت لایه مرده در نقاط مختلف سطح جانبی و سطح بالایی آشکارساز برای شبیه‌سازی بازده دستگاه اهمیت

دارند. برخی پژوهش‌ها نظیر مرجع شماره [۱۶] از چشمه‌های رادیواکتیو حجمی با شکل‌های مختلف برای تعیین ضخامت لایه مرده مناسب برای شبیه‌سازی هندسه ظرف مارینلی در طیف‌نگاری گاما استفاده کرده‌اند. در پژوهش ذکر شده از یک چشمه حجمی برای تعیین ضخامت لایه مرده برای سطح بالایی آشکارساز و از چشمه حجمی دیگری برای تعیین این ضخامت در سطح جانبی آشکارساز استفاده شده است.

ضخامت لایه مرده در طول زمان و با توجه به شرایط محیطی آشکارساز نظیر دمای محیط، به دلیل نفوذ لیتیوم در کریستال ژرمانیوم فوق‌خالص به صورت نامنظم تغییر خواهد کرد. به این معنا که ضخامت لایه مرده در برخی نقاط از سطح آشکارساز بیشتر یا کمتر از نقاط دیگر خواهد شد. در پژوهش حاضر از جزئیات تغییرات ضخامت در مکان‌های مختلف صرف‌نظر شده و با اندازه‌گیری بازده در چندین نقطه مختلف اطراف آشکارساز و متوسط‌گیری از ضخامت لایه مرده معادل برای این نقاط، روش تقریبی برای در نظر گرفتن تغییرات ضخامت لایه مرده آشکارساز در نقاط مختلف پیشنهاد شده است.

در این پژوهش از نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی بازده شمارش چشمه استاندارد نقطه‌ای در ۱۲ نقطه در زوایای مختلف در اطراف (گرداگرد سطح جانبی و در ارتفاع وسط آشکارساز) به همراه ۲۵ نقطه در ارتفاع ۲/۲ سانتی‌متر بالای آشکارساز (شامل یک نقطه در مرکز آشکارساز و ۲۴ نقطه در فاصله‌های ۲،۳ و ۴ سانتی‌متری از آن، هر یک ۸ نقطه) ابتدا ضخامت معادل لایه مرده برای هر یک از این نقاط به کمک شبیه‌سازی MCNP تعیین شده و سپس متوسط ضخامت‌ها برای شبیه‌سازی نهایی اطراف و بالای آشکارساز استفاده شده است. از این روش برای شبیه‌سازی بازده دستگاه برای چشمه ترکیبی از مواد رادیواکتیو به شکل محلول که در ظرف مارینلی قرار داده شده است، استفاده گردید.

لایه مرده در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده و نتایج هر یک جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

بازده آزمایشگاهی برای هر موقعیت مکانی با بازده‌های شبیه‌سازی با لایه مرده مختلف مقایسه شده و نزدیک‌ترین نتیجه به عنوان ضخامت لایه مرده در چیدمان موردنظر انتخاب شده است. در مرحله اول ضخامت کل سطح خارجی آشکارساز ثابت در نظر گرفته شده و موقعیت مکانی چشمه نقطه‌ای با انرژی  $59/5 \text{ keV}$  (مربوط به Am-241) دقیقاً برابر با موقعیت آزمایش در چیدمان‌های آزمایشگاهی در فاصله  $5/9$  سانتی‌متر از مرکز آشکارساز و در ارتفاع وسط آشکارساز در چیدمان اول و همچنین ارتفاع  $2/2$  سانتی‌متر بالای آشکارساز و در مرکز و فاصله‌های  $2,3$  و  $4$  سانتی‌متر از مرکز مشابه چیدمان دوم، در نظر گرفته شده است.

بازده برای ضخامت‌های لایه مرده از  $1/3$  تا  $1/51$  میلی‌متر به فاصله  $0/01$  میلی‌متر در هریک از چیدمان‌ها محاسبه گردید. از مقایسه بازده‌های محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی مناسب‌ترین ضخامت لایه مرده برای هر یک از  $12$  قطاع سطح جانبی آشکارساز و  $25$  نقطه بالایی آن انتخاب شد.

شکل نهایی آشکارساز در شبیه‌سازی با یک ضخامت لایه مرده متوسط برای سطح جانبی و یک ضخامت لایه مرده متوسط برای سطح بالایی ساخته شده و بازده دستگاه برای انرژی‌های مختلف مربوط به چشمه محلول در ظرف مارینلی با این روش محاسبه شده است. در شبیه‌سازی ظرف مارینلی، جنس ظرف پلی پروپیلن<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده و ضخامت هر یک از دیواره‌های ظرف در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و سپس در شبیه‌سازی قید شده است. در شکل ۱ تصویر شبیه‌سازی MCNP در حالت چشمه محلول در ظرف مارینلی مشاهده می‌شود.

از چشمه Am-241 برای تعیین بازده آزمایشگاهی در نقاط مختلف اطراف و بالای آشکارساز استفاده گردید. Am-241 با تابش گامای انرژی  $59/5 \text{ keV}$  چشمه مناسبی برای تعیین ضخامت لایه مرده روی سطحی از آشکارساز است که به چشمه نزدیک باشد. گامای تابیده از Am-241 چندان به عمق آشکارساز نفوذ نکرده و عملاً تنها سطح نزدیک به چشمه را خواهد دید.

پس از تعیین ضخامت متوسط لایه مرده در اطراف و بالای آشکارساز، روش شبیه‌سازی ارائه شده برای محاسبه بازده شمارش محلول رادیواکتیو در ظرف مارینلی استفاده شده است.

## ۱.۲ مدل MCNP

در این پژوهش از کد مونت‌کارلو MCNP X 2.6.1 برای شبیه‌سازی آشکارساز استفاده شده است. بازده آشکارساز با ضخامت‌های مختلف لایه مرده و چیدمان‌های مختلف چشمه با استفاده از تالی F8 (ارتفاع پالس)<sup>۱</sup> در شبیه‌سازی‌ها محاسبه شد. خروجی تالی F8 در حالتی که چشمه تک انرژی بوده یا ذرات با انرژی‌های مختلف و احتمال یکسان را تابش کند با در نظر گرفتن کسر فوتون‌های برهم‌کنش‌کننده با آشکارساز برابر با بازده آشکارساز است. تعداد ذرات در شبیه‌سازی به گونه‌ای انتخاب شدند که خطای نسبی MCNP کمتر از یک درصد باشد.

ضخامت، ابعاد و نوع مواد ساختاری اطراف آشکارساز، ابعاد کریستال آشکارساز، شعاع خم‌شدگی لبه‌های کریستال و ابعاد حفره مرکزی و بخش کروی بالای آن، از گواهی کنترل کیفی کارخانه سازنده استخراج شده و در شبیه‌سازی استفاده شد. اما جهت تعیین مناسب‌ترین ضخامت در هریک از چیدمان‌های چشمه-آشکارساز، ضخامت‌های مختلفی برای

<sup>۱</sup> Pulse height tally

<sup>۲</sup> Polypropylene

بر روی هر یک از زوایای مورد نظر چسبیده و سپس لوله هم مرکز با پوشش آلومینیومی آشکارساز داخل شیلد سربی قرار داده شد و میزان پرتوزایی آن توسط دستگاه اندازه‌گیری گردیده و بازده شمارش تعیین شد. شکل ۲ چیدمان اول آزمایش را نشان می‌دهد.

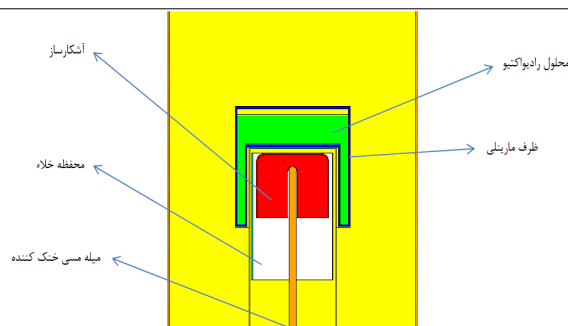


شکل (۲): چیدمان آزمایشگاهی برای تعیین بازده شمارش چشمه

نقطه‌ای در ۱۲ زاویه اطراف آشکارساز.

دومین چیدمان شامل یک صفحه دایره از جنس پلکسی گلاس بود که ۸ زاویه مساوی بر روی آن علامت‌گذاری گردید. روی هر زاویه شعاع‌های ۲.۳ و ۴ سانتی‌متری از مرکز علامت‌گذاری شد و در هر مرحله چشمه در نقطه مد نظر به زیر صفحه پلکسی گلاس چسبانده شد. کل صفحه به همراه چشمه بر روی لوله PVC با قطر ۸ سانتی‌متر در ارتفاع ۲۲/۵ سانتی‌متر از کف دستگاه که معادل ۲/۲ سانتی‌متر بالای آشکارساز است قرار داده شد. شکل ۳ چیدمان دوم آزمایش را نشان می‌دهد.

یک چشمه استاندارد نقطه‌ای Am-241 با اکتیویته ۲۱۹/۱۵ بکرل (۳٪ انحراف استاندارد اکتیویته) برای اندازه‌گیری بازده در نقاط مختلف ذکر شده، استفاده شده است. زمان شمارش در هریک از نقاط با توجه به اکتیویته چشمه نقطه‌ای برابر ۵ دقیقه در نظر گرفته شد. با توجه به فاصله اندک چشمه تا



شکل (۱): تصویری از شبیه‌سازی MCNP دستگاه آشکارساز همراه با ظرف مارینلی حاوی محلول استاندارد رادیواکتیو.

### ۳. روش‌های تجربی

دستگاه طیف‌نگاری گامایی که در این پژوهش از آن استفاده شده و شبیه‌سازی آن نیز صورت گرفت شامل یک آشکارساز ژرمانیوم فوق‌خالص نوع p هم‌محور<sup>۱</sup> مدل GEM80P4-95 ساخت کارخانه ORTEC با بازده نسبی ۸۸٪ در انرژی ۱/۳۳ MeV رادیونوکلئید Co-60 است. این آشکارساز داخل خلاء با پوشش‌هایی از جنس مایلار و آلومینیوم بوده و کل مجموعه در یک حفاظ پرتوی از جنس سرب و با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر که جهت کاهش پرتو زمینه طراحی شده، قرار می‌گیرند. مطابق مشخصات ارائه شده توسط سازنده دستگاه، قطر آشکارساز ۷/۹۷ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۶/۳۲ سانتی‌متر و ضخامت لایه مرده در سطح بیرونی آشکارساز ۰/۷ میلی‌متر است. تفکیک‌پذیری<sup>۲</sup> دستگاه برابر ۱/۹ keV در ۱/۳۳ MeV و ۸۵۰ eV در ۵۹/۵ keV است.

از دو چیدمان آزمایشگاهی مختلف برای تعیین ضخامت لایه مرده بر روی سطح جانبی و سطح بالایی آشکارساز استفاده گردید. چیدمان اول که برای تعیین ضخامت لایه مرده در زوایای مختلف سطح جانبی آشکارساز استفاده شد، یک لوله PVC به شعاع داخلی ۵/۹ سانتی‌متر بود که ۱۲ زاویه مساوی مختلف بر روی آن علامت‌گذاری شد. چشمه نقطه‌ای

<sup>۱</sup>Coaxial P-type HPGe detector

<sup>۲</sup>resolution

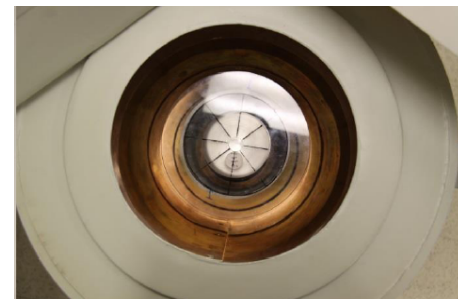
نیز با استفاده از نرم افزار EFFTRAN که نرم افزار معتبری جهت تعیین این تصحیح درهندسه مارینلی است [۱۷-۱۸]، استفاده گردید.

#### ۴. نتایج و تحلیل و بررسی

بازده های آزمایشگاهی اندازه گیری شده برای چشمه استاندارد نقطه ای Am-241 در ۲۵ نقطه بالای آشکارساز به همراه عدم قطعیت اندازه گیری ها ناشی از اکتیویته چشمه و عدم قطعیت شمارش دستگاه، در شکل ۴ ارائه شده اند. کارخانه سازنده چشمه استاندارد، اکتیویته چشمه را با سه درصد عدم قطعیت اعلام کرده است. تعیین سطح زیر پیک تمامی آزمایش ها با استفاده از نرم افزار Gamma Vision 32 انجام شده است. این نرم افزار با تقریبی پیک را در طیف شمارش تعیین نموده و سطح زیر آن را محاسبه می نماید. به همین دلیل عدم قطعیتی نیز در تعیین سطح زیر پیک جذب وجود دارد که نرم افزار آن را تعیین نموده و به همراه سطح زیر پیک اعلام می نماید. عدم قطعیت نهایی که در نتایج آزمایشگاهی در این تحقیق اعلام شده است، از رابطه  $\varepsilon = E \cdot (0.03 + \frac{E}{n})$  محاسبه می گردد که در آن رابطه  $\varepsilon$  عدم قطعیت نهایی، E راندمان،  $E$  عدم قطعیت محاسبه سطح زیر پیک توسط نرم افزار و n سطح زیر پیک است.

چنانکه در شکل ۴ دیده می شود، با افزایش فاصله از محور آشکارساز، بازده کم می شود. اگرچه این کاهش به واسطه کاهش زاویه فضایی بدیهی به نظر می رسد، اما یکسان نبودن این کاهش در زوایای مختلف نشان می دهد که این کاهش صرفاً به واسطه کاهش زاویه فضایی نیست. با توجه به مشخص بودن فواصل نقاط از آشکارساز و محور آن محاسبه زاویه فضایی امکان پذیر است. محاسبات نشان می دهد که زاویه فضایی برای نقطه روی محور و در فاصله ۲/۲ سانتی متری از سطح آشکارساز و سه نقطه دیگر با فواصل ۲،۳ و ۴

آشکارساز در چیدمان دوم، زمان مرده<sup>۱</sup> شمارش در برخی نقاط بالاتر از ۱۰ درصد بوده و به همین دلیل پدیده جمع شدگی تصادفی<sup>۲</sup> در سطح زیر پیک چشمه ایجاد شده که نیاز به تصحیح شمارش دارد. تصحیح مربوط به این پدیده با توجه به زمان مرده هر شمارش در حدود یک تا دو درصد بر روی سطح زیر پیک در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): چیدمان آزمایشگاهی برای تعیین بازده شمارش چشمه نقطه ای در ۲۵ نقطه بالای سطح آشکارساز.

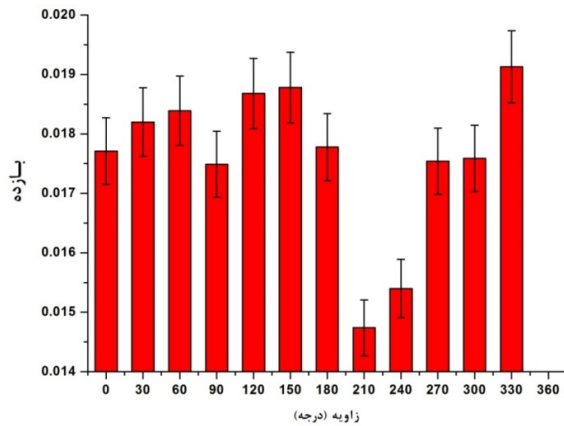
در مرحله آخر، با رقیق سازی محلول حاوی رادیونوکلئیدهای استاندارد، نمونه آب حاوی مقادیر مشخصی از رادیونوکلئیدهای مختلف ساخته شده و در داخل ظرف مارینلی به وسیله دستگاه شمارش گردید. سطح زیر پیک و بازده شمارش هر یک از انرژی های موجود در محلول ثبت و جهت اعتبار سنجی شبیه سازی استفاده شدند. شمارش چشمه محلول با توجه به اکتیویته کم رادیونوکلئیدها برای زمان ۲۴ ساعت صورت گرفت. با توجه به پدیده جمع شدگی تصادفی واقعی<sup>۳</sup> در برخی از رادیونوکلئیدهای موجود در محلول نظیر Ba-133 و Co-60 تصحیح مربوط به این پدیده

<sup>1</sup>Dead time

<sup>2</sup>Random coincidence summing

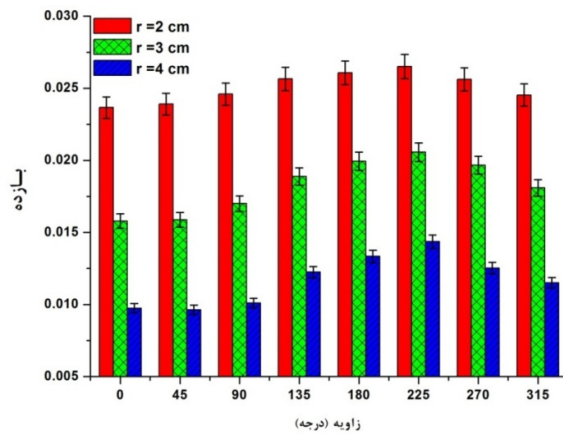
<sup>3</sup>True coincidence summing

برای بررسی این حقیقت در سطح جانبی آشکارساز بازده‌های اندازه‌گیری شده برای دوازده زاویه مختلف اطراف آشکارساز به همراه عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها در شکل ۵ گزارش شده‌اند. حال با استفاده از شبیه‌سازی صورت گرفته در کد MCNP، برای هر یک از نقاط مشخص شده در بالای سطح آشکارساز و دورتادور سطح جانبی آن، بهترین ضخامت DL به گونه‌ای محاسبه می‌شود که برای هر یک از موقعیت‌های آزمایشگاهی، کمترین اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود داشته باشد. نتایج محاسبات شبیه‌سازی برای بهترین ضخامت‌های به دست آمده به همراه بازده شمارش چشمه و اختلاف نتایج شبیه‌سازی و آزمایش در جدول‌های شماره ۱ و ۲ ارائه شده‌است.



شکل (۵): نتایج تجربی بازده دستگاه برای شمارش چشمه Am-241 در ۱۲ زاویه مختلف در دورتادور سطح جانبی آشکارساز.

سانتی‌متری از محور به ترتیب برابر است با ۲/۷۷۵، ۲/۲۴۳، ۱/۶۱۹ و ۰/۹۸۷ استرادیان است.



شکل (۴): نتایج تجربی به همراه عدم قطعیت اندازه‌گیری بازده دستگاه برای شمارش چشمه Am-241 در نقاط مختلف در بالای آشکارساز. نقاط با فاصله از محور آشکارساز (r) و زاویه سمتی با فواصل ۴۵ درجه مشخص شده‌اند. بازده در روی محور و در فاصله ۲/۲ cm بالای آشکارساز ۰/۰۲۹۰ با عدم قطعیت  $\pm 0.00887 \times 10^{-2}$  است.

بنابراین کاهش بازده به واسطه زاویه فضایی در سه شعاع بکار رفته نسبت به نقطه روی محور به ترتیب ۸۰/۸۲، ۵۸/۳۴ و ۳۵/۵۷ درصد خواهد بود. این در حالی است که به عنوان مثال برای فاصله ۲ سانتی‌متری از محور، میزان کاهش بین بیشینه ۹۰ درصد در زاویه ۲۲۵ درجه تا ۸۱ درصد در زاویه صفر متغیر است. این تفاوت نشان می‌دهد که ضخامت لایه مرده در نقاط مختلف در سطح بالایی آشکارساز متغیر است.

جدول (۱): نتایج ضخامت لایه مرده محاسبه شده بوسیله کد MCNP برای ۱۲ قطاع مساوی در گرداگرد آشکارساز به گونه‌ای که محاسبات بازده به دو روش تجربی و شبیه‌سازی کمترین تفاوت را داشته باشند.

زاویه دورتادور آشکارساز	۰	۳۰	۶۰	۹۰	۱۲۰	۱۵۰	۱۸۰	۲۱۰	۲۴۰	۲۷۰	۳۰۰	۳۳۰
بهترین ضخامت (میلی‌متر)	۱/۳۷	۱/۳۵	۱/۳۴	۱/۳۸	۱/۳۳	۱/۳۲	۱/۳۶	۱/۵۰	۱/۴۷	۱/۳۷	۱/۳۷	۱/۳۱
بازده محاسباتی $\times 10^{-2}$	۱/۷۶۲	۱/۸۱۳	۱/۸۳۸	۱/۷۳۸	۱/۸۶۲	۱/۸۸۷	۱/۷۸۶	۱/۴۸۲	۱/۵۴۶	۱/۷۶۲	۱/۷۶۲	۱/۹۱۱
درصد اختلاف نسبی با آزمایش	۰/۵۱	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۶۳	۰/۳۲	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۵۴	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۱۷	۰/۱۰

جدول (۲): ضخامت لایه مرده محاسبه شده به وسیله کد MCNP برای ۲۵ نقطه بالای آشکارساز در فواصل ۲.۳ و ۴ سانتی متری از محور. نتیجه بازده با استفاده از ضخامت محاسبه شده و اختلاف نسبی با آزمایش نیز قید شده است. ضخامت لایه مرده روی محور برابر ۱/۳۷ میلی متر با بازده ۰/۲۹۱ است.

زاویه دورتادور آشکارساز	۰	۴۵	۹۰	۱۳۵	۱۸۰	۲۲۵	۲۷۰	۳۱۵
مناسب ترین ضخامت لایه مرده (میلی متر)	۱/۳۹	۱/۳۸	۱/۳۶	۱/۳۳	۱/۳۱	۱/۳۰	۱/۳۳	۱/۳۶
بازده محاسباتی $\times 10^{-2}$	۲/۳۵۲	۲/۳۸۶	۲/۴۵۰	۲/۵۵۱	۲/۶۱۸	۲/۶۵۲	۲/۵۵۱	۲/۴۵۰
درصد اختلاف نسبی با آزمایش	۰/۶	۰/۲	۰/۴	۰/۶	-۰/۴	۰/۰	۰/۴	۰/۱
مناسب ترین ضخامت لایه مرده (میلی متر)	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۴۱	۱/۳۴	۱/۲۹	۱/۲۷	۱/۳۱	۱/۳۷
بازده محاسباتی $\times 10^{-2}$	۱/۵۸۸	۱/۵۸۸	۱/۷۰۳	۱/۸۷۵	۲/۰۰۶	۲/۰۵۳	۱/۹۵۴	۱/۷۹۸
درصد اختلاف نسبی با آزمایش	-۰/۵	۰/۰	-۰/۲	۰/۷	-۰/۶	۰/۲	۰/۶	۰/۶
مناسب ترین ضخامت لایه مرده (میلی متر)	۱/۴۹	۱/۴۷	۱/۴۶	۱/۳۳	۱/۲۷	۱/۲۲	۱/۳۱	۱/۳۷
بازده محاسباتی $\times 10^{-2}$	۰/۹۷۷	۱/۰۰۴	۱/۰۱۶	۱/۲۲۸	۱/۳۳۵	۱/۴۳۷	۱/۲۵۳	۱/۱۵۸
درصد اختلاف نسبی با آزمایش	-۰/۳	-۰/۷	-۰/۵	-۰/۳	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۱	-۰/۶

می گردد. جهت اعتبارسنجی روش نهایی ارائه شده، محلول استاندارد با اکتیویته مشخص از رادیونوکلئیدهای گوناگون تهیه شده و بازده شمارش این رادیونوکلئیدها (با انرژی های مختلف بین ۵۹/۵ keV تا ۱۳۳۲/۴ keV) در حالی که داخل ظرف مارینلی قرار می گیرند، اندازه گیری شد. نوع و اکتیویته چشمه محلول استاندارد و نتایج اندازه گیری بازده آزمایشگاهی در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

برای تعیین روش نهایی شبیه سازی که قابلیت مناسبی برای هندسه مارینلی داشته باشد، ضخامت لایه مرده سطح جانبی آشکارساز برابر متوسط ضخامت هایی که در جدول ۱ ارائه شده اند در نظر گرفته شد. به این ترتیب ضخامت لایه مرده سطح جانبی برابر ۱/۳۷ میلی متر انتخاب می شود. ضخامت لایه مرده سطح بالایی آشکارساز نیز برابر متوسط ضخامت های ارائه شده در جدول شماره ۲ که ۱/۳۶ میلی متر است انتخاب

جدول (۳): نوع، انرژی، اکتیویته و بازده شمارش محلول رادیونوکلئیدها در داخل مارینلی

رادیونوکلئید	انرژی (keV)	اکتیویته (بکرل)	عدم قطعیت اکتیویته (%)	بازده آزمایشگاهی $\times 10^{-2}$	تصحیح جمع شدگی تصادفی	خطای بازده $\times 10^{-3}$
Am-241	۵۹/۵	۴۵۵/۰۸	۰/۶۳	۱/۱۹۸	۱/۱۹۸	۰/۱۲۲
	۸۱			۲/۹۳۴	۳/۴۹۲	۱/۴۴۳
	۲۷۶/۴			۵/۰۸۵	۵/۳۵۴	۳/۰۶۴
Ba-133	۳۰۲/۸	۵۱/۸	۳/۱	۴/۹۸۳	۵/۱۰۲	۲/۱۵۷
	۳۵۶			۴/۶۸۰	۴/۷۸۳	۱/۷۰۸
	۳۸۳/۸			۴/۶۰۷	۴/۴۶۰	۲/۳۶۹
Cs-137	۶۶۱/۶	۷۱/۷	۰/۹۴	۳/۲۳۱	۳/۲۳۱	۴/۳۰۱
	۱۱۷۳/۲			۲/۰۳۳	۲/۳۰۳	۰/۲۵۰
Co-60	۱۳۳۲/۴	۴۴۰/۳	۰/۹۱	۱/۸۷۰	۲/۱۲۹	۰/۲۳۲

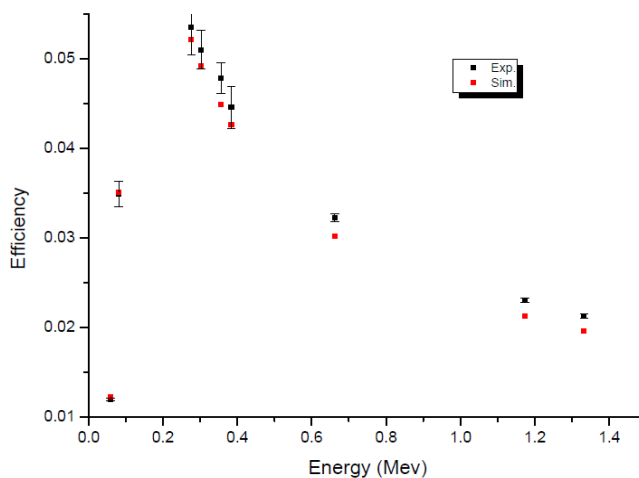


حاصل شده در آزمایشگاه و شبیه‌سازی در کنار یکدیگر نمایش داده شده‌اند، که نشان‌دهنده همخوانی مناسبی بین نتایج آزمایش و شبیه‌سازی می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی MCNP بازده شمارش مارینلی حاوی محلول رادیونوکلئید به همراه اختلاف نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی در جدول شماره ۴ ارائه شده است. در شکل شماره ۶ نمودار بازده برای ظرف مارینلی

جدول (۴): بازده محاسبه شده در شبیه‌سازی مارینلی و اختلاف نسبی آن با نتایج تجربی برای رادیونوکلئیدهای مختلف

رادیونوکلئید	انرژی (KeV)	بازده محاسباتی $\times 10^{-3}$	درصد اختلاف نسبی با آزمایش
Am-141	۵۹/۵	۱/۲۳	-۲/۴۲
	۸۱	۳/۵۱	-۰/۴۶
Ba-133	۲۷۶/۴	۵/۲۱	۲/۶۲
	۳۰۲/۸	۴/۹۲	۳/۵۴
	۳۵۶	۴/۴۹	۶/۰۴
	۳۸۳/۸	۴/۲۷	۴/۳۰
Cs-137	۶۶۱/۶	۳/۰۲	۶/۶۱
Co-60	۱۱۷۳/۲	۲/۱۲	۷/۷۷
	۱۳۳۲/۴	۱/۹۶	۷/۷۲



شکل (۶): نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی بازده شمارش محلول رادیواکتیو در مارینلی در انرژی‌های مختلف.

کمک نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته به سطح مقابل هریک از نقاط نسبت داده شد. اختلاف بازده‌ها در نقاط مختلف به دلیل پخش کاتوره‌ای اتم‌های لیتیم در داخل کریستال ژرمانیوم فوق‌خالص به خصوص در دمای محیط و تغییر اتفاقی ضخامت لایه مرده در نقاط مختلف اطراف و بالای آشکارساز است. برای دستیابی به روش دقیق‌تری برای شبیه‌سازی آشکارساز جهت بررسی طیف‌نگاری نمونه‌هایی

## ۵. نتیجه‌گیری

روشی برای شبیه‌سازی آشکارساز HPGe به کمک کد MCNP جهت محاسبه بازده شمارش مواد رادیواکتیو در ظرف‌هایی همچون مارینلی ارائه گردید. بازده‌های مختلف شمارش چشمه نقطه‌ای Am-241 در نقاط مختلف اطراف و بالای آشکارساز به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. با توجه به تفاوت بازده‌ها در نقاط مختلف، ضخامت لایه مرده متفاوتی با

نشان‌دهنده همخوانی مناسبی بین شبیه‌سازی و آزمایش بوده و اختلاف نسبی بین آنها در انرژی‌های  $keV$  ۰۹/۵۴، ۵۹/۵۴، ۸۱، ۲۷۶/۴، ۳۰۲/۸، ۳۵۶، ۳۸۳/۸، ۱۱۷۳/۲ و ۱۳۳۲/۴ به ترتیب برابر ۰/۷۷، ۶/۶۱، ۴/۳۰، ۶/۰۴، ۳/۵۴، ۲/۶۲، ۰/۴۶، ۲/۴۲ است.

همانند نمونه‌های محیطی که به صورت کپه ای داخل ظرف مارینلی قرار داده می‌شوند، از متوسط ضخامت لایه مرده محاسبه شده در اطراف آشکارساز و همچنین متوسط این ضخامت در سطح بالایی آشکارساز در روش نهایی استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته با این روش با نتایج بازه تجربی حاصل شده در آزمایشگاه مقایسه شد. نتایج

## ۶. مراجع

- [1] M. Korun, A. Likar, T. Vidmar. Monte-Carlo calculation of the spatial dependence of the coaxial HPGe detector efficiency for point sources. Nucl. Instr. And Meth. A. 390 (1997) 203-208.
- [2] S. Ashrafi, A. Likar, T. Vidmar. Precise Modelling of a coaxial HPGe detector. Nucl. Instr. And Meth. A. 438 (1999) 421-428.
- [3] I.O.B Ewa, D. Bodizs, S. Czifrus, Z. Molnar. Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector. Appl. Radiat. Isot. 55 (2001) 103-108.
- [4] N.L. Maidana, V.R. Vanin, J.A. García-Alvarez, M. Hermida-López. Experimental HPGe coaxial detector response and efficiency compared to Monte Carlo simulations. Appl. Radiat. Isot. 108 (2016) 64-74.
- [5] N.Q. Huy, D.Q. Binh, V.X. Ana. Study on the increase of inactive germanium layer in a high-purity germanium detector after a long time operation applying MCNP code. Nucl. Instr. and Meth. A. 573 (2007) 384-388.
- [6] D. Budjas, M. Heisel, W. Maneschg, H. Simgen. Optimisation of the MC-model of a p-type Ge spectrometer for the purpose of efficiency determination. Appl. Radiat. Isot. 67 (2009) 706-710.
- [7] J. Bosona, G. agren, L. Johansson. A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations. Nucl. Instr. and Meth. A. 587 (2008) 304-314.
- [8] N. Quang Huy. Dead-layer thickness effect for gamma spectra measured in an HPGe p-type detector. Nucl. Instr. and Meth. A. 641 (2011) 101-104.
- [9] J. Rodenas, A. Pascual, I. Zarza, V. Serradell, J. Ortiz, L. Ballesteros. Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method. Nucl. Instr. and Meth. A. 496 (2003) 390-399.
- [10] A. Azbouche, M. Belgaid, H. Mazrou. Monte Carlo calculations of the HPGe detector efficiency for radioactivity measurement of large volume environmental samples. J. Environ. Radioact. 146 (2015) 119-124.
- [11] M.R. Zarea, M. Kamali, Z. Omid, 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 (2016).
- [12] N.L. Maidana, V.R. Vanin, V. Jahnke, J. Fernández-Varea, J.M. Martins. Efficiency calibration of x-ray HPGe detectors for photons with energies above the Ge K binding energy. Nucl. Instrum. Methods A. 729 (2013) 371-380.
- [13] E. Andreotti, M. Hult, G. Marissens, G. Lutter, A. Garfagnini, S. Hemmer, K. VonSturm. Determination of dead-layer variation in HPGe detectors, Appl. Radiat. Isot. 87 (2014) 331-335.
- [14] T. Azli, Z. Chaoui. Performance reevaluation of a N-type coaxial HPGe detector with front edges crystal using MCNPX. Appl. Radiat. Isot. 97 (2015) 106-112.
- [15] M.T. Haj-Heidari, M.J. Safari, H. Afarideh, H. Rouhi. Method for developing HPGe detector model in Monte Carlo simulation codes, Rad. Meas. 88 (2016) 1-6.
- [16] E. Chham, F. Piñero García, T.El Bardouni, M. Angeles Ferro-García, M. Azahra, K. Benaaliloua, M. Krikiz, H. Elyaakoubi, J. El Bakkali, M. Kaddour. Monte Carlo analysis of the influence of germanium DL thickness on the HPGe gamma detector experimental efficiency measured by use of extended sources. Appl. Radiat. Isot. 95 (2015) 30-35.
- [17] T. Vidmar. EFFTRAN- A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry. Nucl. Instr. And Meth. A. 550 (2005) 603-608.
- [18] T. Vidmar, G. Kanisch, G. Vidmar. Calculation of true coincidence summing corrections for extended sources with EFFTRAN. Appl. Radiat. Isot. 69 (2011) 908-911.