



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸، شماره ۴، ویژه‌نامه پرتوهای یون‌ساز، ۱۳۹۹، صفحه ۱۶۳-۱۷۰

پنجمین کنفرانس ملی سنجش و ایمنی پرتوهای یون‌ساز و غیر یون‌ساز (مهرماه ۱۳۹۷)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱



طراحی آشکارساز آلفا/بتا/گاما هم‌زمان برای اندازه‌گیری آلودگی سطحی

فرناز آرایش‌نیا* و فریدون عباسی دوانی

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۱۹۸۳۹-۶۹۴۱۱

پست الکترونیکی: f.arayeshnia@mail.sbu.ac.ir

چکیده

اندازه‌گیری آلودگی‌های سطحی پرتوزا امری لازم و ضروری در تاسیسات هسته‌ای است. پایش آلودگی‌های سطح پایین آلفا و بتا با استفاده از آشکارسازهای سبک، دارای سطح بزرگ و با راندمان بالا امکان‌پذیر می‌باشد. با توجه به این‌که بسیاری از آشکارسازها به طور هم‌زمان قادر به جداسازی پرتوهای آلفا، بتا و گاما نیستند؛ از میان روش‌های موجود، استفاده از آشکارساز فوزویچ به منظور آشکارسازی هم‌زمان آلفا/بتا/گاما انتخاب شد. با این روش می‌توان تنها با یک آشکارساز ترکیبی که شامل سه لایه از سوسوزن‌های مختلف است، به طور هم‌زمان چشمه‌های آلودگی آلفا/بتا/گاما را بررسی نمود. در این‌جا طراحی با استفاده از مواد سوسوزنی $BC400$ ، $ZnS(Ag)$ و $NaI(Tl)$ به ترتیب به عنوان لایه‌های اول تا سوم با ضخامت‌های $۰/۰۲۵$ ، ۱ و ۳ سانتی‌متر، حساس به اندرکنش با ذرات آلفا، بتا و گاما صورت گرفت. بازدهی مطلق برای هر یک از لایه‌ها با شرط تعادل بین بازدهی و شمارش‌های پس‌زمینه ناشی از تابش‌های تداخلی چشمه در هر لایه صورت گرفت. بدین ترتیب در انرژی $MeV ۰/۱$ ، حداکثر بازدهی مطلق برای ذرات بتا با مقدار ۲۴% و در انرژی $MeV ۲-۱$ به حداکثر بازدهی مطلق پرتوهای گاما با مقدار تقریباً ۱۶% دست یافتیم.

کلیدواژگان: آشکارسازی، آلفا، بتا، گاما، فوزویچ، MCNP، GEANT4.

۱. مقدمه

آلودگی‌های هسته‌ای در محیط باعث آلودگی محیط زیست شده و برای تمامی موجودات زنده صدمات جبران‌ناپذیری را در پی خواهد داشت. از جمله مواد تولید شده در این فرآیندها آکتینیدها می‌باشند، این گروه از عناصر، شامل پانزده عنصر فلزی واقع در گروه هفتم جدول تناوبی بوده و اغلب گسیلنده آلفا و گاما هستند. باید توجه داشت که آلودگی‌ها می‌توانند به صورت گاز یا ذرات معلق در هوا باشند و از طریق تنفس یا بلع وارد بدن شوند، که در این صورت بسیار خطرناک خواهند

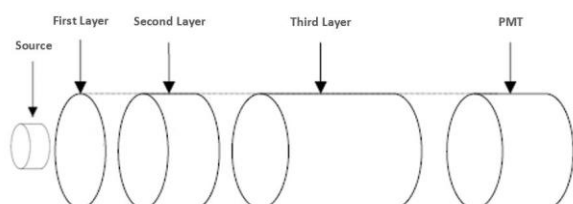
برخورد با حوادث هسته‌ای عملاً یکی از موضوعات مورد بحث از زمان ساخت اولین راکتور در سال ۱۹۵۴ بوده و همچنین یکی از فاکتورهای مهم نگرانی عمومی در مورد تاسیسات هسته‌ای است. استفاده از تکنیک‌های اندازه‌گیری مناسب، تاثیر بسزایی در کاهش احتمال وقوع حوادث هسته‌ای و انتشار مواد رادیواکتیو در محیط دارد. علی‌رغم استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مناسب، خطای انسانی عامل ایجاد بسیاری از حوادث است. انتشار خواسته یا ناخواسته

بود [۱،۲].

می‌شود که آن را با عنوان آشکارساز فوزویچ می‌نامند.

با استفاده از تکنولوژی فوزویچ، بسیاری از محققان فعال در توسعه سیستم‌های تشخیصی، به توانایی تشخیص نوع تابش‌ها دست یافتند [۴-۱۲]. در یک آشکارساز فوزویچ، دو یا سه لایه سوسوزنی به صورت نوری با یک تک‌تکثیرکننده جفت شده‌اند و با تحلیل شکل پالس آند می‌توان تعیین کرد که در کدام لایه، اندرکنش تابش رخ داده است.

از جمله محققان قدیمی در این زمینه آوسودا و همکاران او از سال ۱۹۹۲ طی یک دوره هشت ساله موفق به طراحی آشکارسازی با توانایی تشخیص همزمان تابش‌های آلفا، بتا، گاما، نوترون‌های گرمایی و سریع شدند [۴]. البته کار آن‌ها با مشکلاتی نیز همراه بود که از جمله آن‌ها می‌توان به مشکل تداخل اندرکنش‌های بتا/گاما اشاره کرد. پس از این افراد بسیاری به منظور رفع این مشکل به تحقیق پرداختند که از جمله آن‌ها می‌توان به هسو در سال ۱۹۹۸، وایت و میلر در سال ۱۹۹۹ [۵]، چایلدرس در سال ۲۰۰۲ [۶]، الی و همکاران در



شکل (۱): طرحی از ساختار آشکارساز طراحی شده.

۲۰۰۵ [۷]، هنینگ در سال ۲۰۰۶ [۸]، فارسونی طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ [۹،۱۰]، یاماماتو در سال ۲۰۱۱ [۱۱]، ایفرگان در سال ۲۰۱۵ [۱۲،۱۳] و... نام برد. تمامی این افراد در تلاش بودند تا با استفاده از مواد، ابزارها و نرم‌افزارهای جدید مشکلات پیش رو را رفع و کاربردهای این آشکارسازها را بهبود ببخشند. ما نیز در این تحقیق با استفاده از تجربیات محققان پیشین و با تکیه بر توانایی‌های نرم‌افزار Geant4 و MCNP که براساس روش‌های مونت‌کارلو استوار هستند، به دنبال یافتن ساختاری مناسب به منظور آشکارسازی همزمان

از بین روش‌های مختلف آشکارسازی هسته‌ای تحلیل نمونه می‌تواند اطلاعات باارزشی را در حین فعالیت و مدت‌ها بعد از آن داشته باشد و نمونه مورد بررسی، اطلاعات لازم در مورد فعالیتی که موجب این آلودگی شده را بدست می‌دهد. از طرفی چون میزان آلودگی در محیط بسیار کم است؛ آشکارسازی نیازمند استفاده از روش‌های بسیار دقیق، وقت‌گیر و پرهزینه است. در هنگام وقوع سوانح و آلودگی‌های هسته‌ای، "زمان" اصل مهمی است و روش‌های شیمیایی کارآیی ندارند و محققان به دنبال روش‌های غیرمخرب، سریع و برخط هستند. به‌طورکلی، از دو روش تحلیل رادیومتری و جرمی برای آنالیز عناصر فوق سنگین استفاده می‌شود. با افزایش حساسیت سیستم‌های آشکارسازی هسته‌ای می‌توان به حساسیتی مشابه سیستم‌های جرمی دست یافت. از طرفی مزیت روش رادیومتری که از واپاشی هسته‌ای رادیویزوتوپ‌ها استفاده می‌کند، غیرمخرب بودن و عدم تاثیر این روش بر روی نمونه است [۲،۳].

یکی از روش‌های شناسایی اکتینیدها، آشکارسازی هم‌زمان تابش‌ها با استفاده از آشکارسازهای سوسوزنی است. سوسوزن‌ها برای آشکارسازی فوتون‌ها یا ذرات استفاده می‌شوند. در سوسوزن‌ها انرژی تابش فرودی به نورمرئی تبدیل شده و این نور توسط لامپ تکثیرگر فوتون یا فوتودیودها به سیگنال الکتریکی قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌شود. شدت نور تولید شده در سوسوزن‌ها متناسب با انرژی برجا مانده در آن‌هاست. روش‌هایی مختلف برای آشکارسازی تابش‌های هم‌زمان توسط سوسوزن‌ها وجود دارد. یکی از آن‌ها استفاده از سوسوزن‌هایی با زمان واپاشی مختلف است تا به تابش‌های مختلف پاسخی متفاوت بدهد. با استفاده از چند سوسوزن و گریس سیلیکونی برای تطابق اپتیکی آن‌ها با هم و اتصال این مجموعه به یک لامپ تکثیرگر فوتونی ساختاری طراحی

آلودگی های آلفا/بتا/گاما هستیم.

۲. مواد و روش ها

در ابتدا با توجه به هدف این تحقیق که ساخت آشکارسازی مطابق با آشکارساز LB124 ساخت شرکت Berthold است، سطح مقطع موثر آشکارساز مذکور تقریباً برابر 170 cm^2 تعیین شد [۱۴]. به منظور سهولت و شکل دهی بهتر، سوسوزن ها به شکل استوانه ای مورد استفاده قرار می گیرند [۶،۵]. با توجه به آنچه ذکر شد، باید لایه های ما به صورت استوانه هایی به شعاع $7/35$ سانتی متر باشند.

لایه اول تا سوم به ترتیب برای آشکارسازی ذرات آلفا، بتا و پرتوهای گاما در نظر گرفته شده است (شکل ۱). تفاوت در زمان واپاشی این لایه ها در سیستم های الکترونیکی دلیل تفاوت در شکل پالس آن ها خواهد بود. شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزارهای Geant4 و MCNPX2.6 صورت گرفت. ابزار Geant4 که نتیجه همکاری و کار مهندسان نرم افزار و فیزیکدانان سراسر جهان است، مبتنی بر برنامه نویسی ++C، از روش های بسیار پیشرفته مهندسی نرم افزار و ویژگی - شیء گرای استفاده می کند. در این ابزار مشکلات سایر کدهای قبلی نظیر ناتوانی و پیچیدگی در توسعه کد یا افزودن فرآیندهای فیزیکی جدید و گوناگون مطابق خواسته کاربر با استفاده از مفهوم شیء گرای مرتفع گردیده است.

با استفاده از مفهوم شیء گرای، عملکرد مدل های مختلف به راحتی قابل تشخیص و تغییر بوده و افزودن مدل جدید به راحتی امکان پذیر می باشد. این نرم افزار توانایی شبیه سازی منابع تابش، فرآیندهای فیزیکی، مسیر ذرات در ماده و به طور کلی ابزارهای آشکارساز با دقت بالا برخوردار است و حتی به واسطه آن می توان از امکان تعریف فیزیک نوری و PMT نیز برخوردار شد. هسته Geant4 شامل مجموعه ای از چندین مدل فیزیکی با گستره انرژی وسیع به منظور کنترل برهم کنش ذرات با ماده می باشد. فرآیندهای فیزیکی ارائه شده در این

ابزار محدوده وسیعی شامل فرآیندهای الکترومغناطیسی، هادرونیک و نوری را پوشش می دهد. این ابزار در کاربردهای زیادی مانند فیزیک ذرات، فیزیک هسته ای، طراحی شتاب دهنده ها، مهندسی هوافضا و فیزیک پزشکی استفاده می شود [۱۵]. در این نرم افزار فرآیندهای فیزیکی که چگونگی واپاشی و تعامل ذرات با ماده در انرژی های مختلف را نشان می دهد، تحت کلاس فیزیک تعریف شده و شامل موارد زیر هستند:

- ترابرد و اندرکنش های ذرات آلفا
- G4IonPhysics
- ترابرد و اندرکنش های ذرات بتا
- G4eMultipleScattering
- G4eIonisation
- G4eBremsstrahlung
- ترابرد و اندرکنش های پرتوهای گاما
- G4PhotoElectricEffect
- G4ComptonScattering
- G4GammaConversion

ضخامت بهینه لایه اول و دوم با استفاده از کدهای SRIM، MCNPX و Geant4 محاسبه شد (جدول ۱). با مقایسه این نتایج مقدار ضخامت لایه اول و دوم به ترتیب با استفاده از جدول (۱): نتایج مربوط به تعیین ضخامت بهینه لایه اول و دوم آشکارساز.

ماده سوسوزنی	Geant4	MCNPX	SRIM
ZnS(Ag)	$26 \pm 1 \mu\text{m}$	$26 \mu\text{m}$
BC400	$1 \pm 0,1 \text{ cm}$	$1,1 \pm 0,1 \text{ cm}$

مواد سوسوزنی ZnS(Ag) و BC400، $0,0025$ و 1 سانتی متر تعیین شد. ضخامت لایه سوم نیز با توجه به مقالات مقدار 3 سانتی متر از ماده سوسوزنی NaI(Tl) در نظر گرفته شد [۵،۶]. شرحی مختصر از ویژگی های فیزیکی مواد مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ جمع آوری شده است.

چشمه های مورد استفاده برای تعیین ضخامت ها در این

PMT استفاده می‌شود و با اتصال آن به ماژول PSD وجود ذرات آلفا، بتا و یا پرتوهای گاما را با استفاده از زمان واپاشی متفاوت لایه‌های به کار برده شده در آشکارساز، تشخیص داده و آن‌ها را از هم تفکیک می‌کنیم. به منظور بررسی بخش انرژی، داینود PMT را به ماژول‌های Amp, PreAmp و در نهایت MCA متصل کرده و به تحلیل پالس‌ها می‌پردازیم.

۳. بحث و نتایج

محاسبه بازدهی با حذف تابش‌های تداخلی در هر سه لایه با استفاده از نرم‌افزار Geant4 و تعریف الگوریتم مناسب، صورت گرفته و تلاش شده تا میزان دخالت این اثرات در مقادیر بازدهی حذف شود.

برای حذف اندرکنش‌های تداخلی (اندرکنش‌های ناشی از پرتوهای گاما در لایه اول و دوم و ناشی از ذرات بتا در لایه سوم)، مولفه‌ای به عنوان انرژی آستانه تعریف می‌شود. با این روش همواره تعدادی از اندرکنش‌های اصلی نیز که دارای انرژی برابر با این اندرکنش‌ها هستند، از آمار حذف خواهند شد. مقدار انرژی آستانه برای هر ماده بسته به ضخامت آن متفاوت خواهد بود. در هر یک از لایه‌ها مقدار بازدهی مطابق با روال یاد شده، براساس الگوریتم‌های مشخص (شکل ۳) محاسبه شده است.

در محاسبه بازدهی ذرات آلفا، فاصله کم بین چشمه تا آشکارساز موجب محاسبه بازدهی ذرات آلفا در حداکثر مقدار

مرحله نقطه‌ای، همسان‌گرد و گسیلنده ذرات آلفا و بتا، به ترتیب با انرژی ۶,۴۸۶ و ۲,۳ مگاالکترون ولت به فاصله دو سانتی‌متر از لایه اول در نظر گرفته شد.

به هنگام محاسبه بازدهی مطلق لایه دوم و سوم چشمه‌هایی جداگانه به ترتیب گسیلنده ذرات بتا و گاما با انرژی ۰,۵ مگاالکترون ولت با قطر ۱۳ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میکرومتر در فاصله یک میکرومتری از لایه اول مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]. تعداد ذرات مورد استفاده در این شبیه‌سازی یک میلیون ذره بود.

این کار تنها یک طراحی مفهومی بوده اما به منظور ساخت چنین آشکارسازی لازم است تا از یک غلاف به منظور محافظت در برابر نورهای محیطی که عامل ایجاد خطا در پاسخ آشکارساز است (مخصوصاً به منظور محافظت از لایه سوم (NaI(Tl) در برابر رطوبت و گرد و خاک)، استفاده شود.

اما استفاده از غلاف پیرامون لایه اول موجب کاهش چشمگیر عبور ذرات آلفا شده و مانع از عملکرد درست آشکارساز می‌شود. برای رفع این مشکل، باید غلاف پنجره ورودی آشکارساز حذف شده و آشکارساز مستقیماً با محیط در تماس باشد. به منظور محافظت نوری می‌توان لایه‌ای به ضخامت یک میکرومتر از رنگ مخصوص روی لایه اول استفاده کرد.

در انتها؛ به منظور تحلیل بخش زمانی پالس‌ها، از آند

جدول (۲): ویژگی‌های فیزیکی مواد مورد استفاده در ساختار آشکارساز طراحی شده [۱۶،۱۷].

سوسوزن	ترکیبات (%)	چگالی (g/cm ³)	بیشینه طول موج گسیلی (nm)	ضریب شکست	ثابت واپاشی (ns)	بازده نوری مطلق (photon/MeV)
ZnS(Ag)	Zn(۴۹,۸) S(۴۹,۸) Ag(۰,۴)	۴,۰۹	۴۵۰	۲,۳۶	۲۰۰	۵۰۰۰۰
BC400	C(۴۷,۶۲) H(۵۲,۳۸)	۱,۰۳۲	۴۲۳	۱,۵۸	۲,۴	~ ۱۰۰۰۰
NaI(Tl)	Na(۴۹,۸) I(۴۹,۸) Tl(۰,۴)	۳,۶۷	۴۱۵	۱,۸۵	۲۳۰	۳۸۰۰۰

محاسبه شده بررسی شد و در نهایت با تعیین ضرایب ۱,۵ و ۴ به ترتیب برای لایه های دوم و سوم بازدهی به مقادیر تعیین شده در مقاله رسید. مقدار انرژی آستانه تعیین شده در هر لایه بسته به جنس ماده سوسوزنی به کار رفته در آن و انرژی تابش فرودی متفاوت خواهد بود.

در لایه اول و دوم انرژی آستانه با محاسبه متوسط انرژی ناشی از اندرکنش های پرتوهای گامای گسیلی از چشمه و در لایه سوم این مقدار با تعیین میانگین انرژی ناشی از اندرکنش های ذرات آلفا یا بتای گسیلی بسته به نوع چشمه به منظور تعیین انرژی تابش های ترمزی که به عنوان داده های خطا در محاسبه بازدهی مطرح خواهند بود، محاسبه خواهد شد.

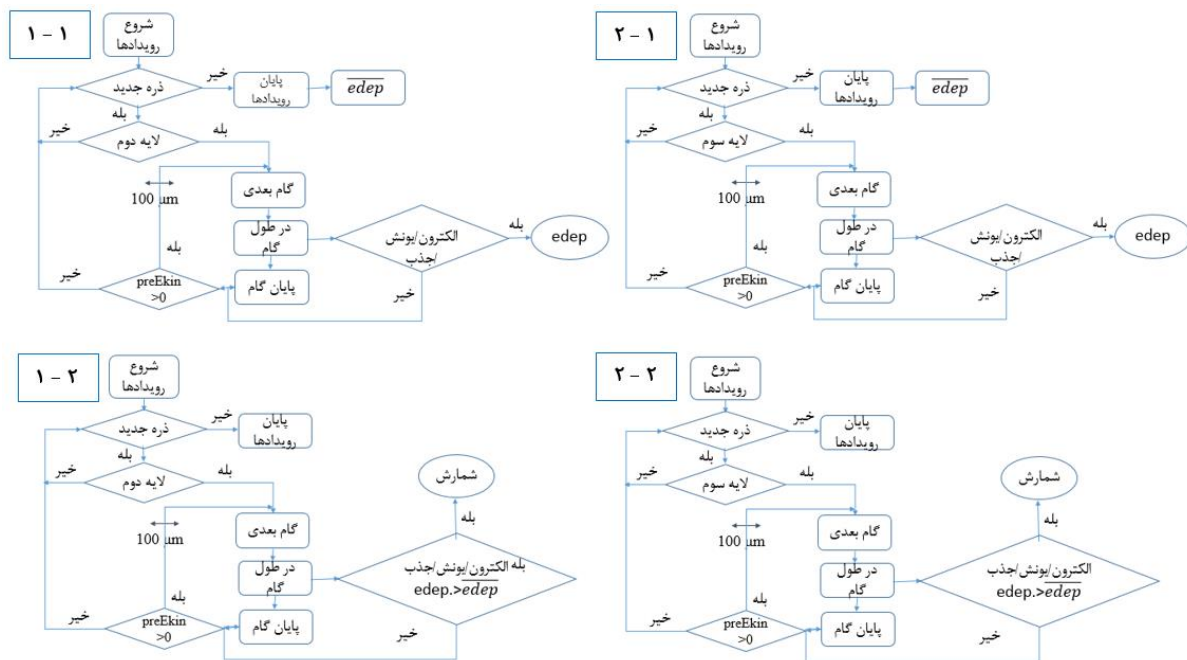
در شکل ۴ مقدار بازدهی مطلق این آشکارساز در انرژی های مختلف برای ذرات بتا و گاما قابل مشاهده است. در همین شکل بازدهی همزمان بتا/گاما نمایش داده شده است. این نمودار مربوط به رویدادهای همزمان است.

هر چه مقدار آستانه انرژی را برای الکترون های جذب شده افزایش دهیم، تعداد بیشتری از الکترون های ناشی از اندرکنش های متداخل حذف و متناسب با آن تعداد اندرکنش های ناشی

واقعیت این گونه نیست و با بیشتر شدن فاصله آشکارساز از چشمه یا در نظر گرفتن خود جذبی چشمه، به دلیل برد کم ذرات آلفا، بازدهی به مقدار چشمگیری کاهش پیدا خواهد کرد.

به منظور تعیین مقدار انرژی آستانه لایه دوم و محاسبه بازدهی ذرات بتا، متوسط انرژی های بجامانده در اثر اندرکنش های پرتوهای گامای گسیلی از چشمه در لایه دوم محاسبه شد. اما با انتخاب این مقدار به عنوان انرژی آستانه مقدار زیادی از ذرات اضافی شمارش خواهند شد، پس بهتر است تا ضربی از آن را به عنوان انرژی آستانه در نظر گرفت. برای محاسبه این ضرایب مقاله ای با ساختار مشابه شناسایی شد [۶] و با پیاده سازی هندسه، تعریف چشمه نقطه ای با انرژی ۲,۰ مگا الکترون ولت برای چشمه ذرات بتا و همچنین پرتوهای گاما، اعمال تابش جهت دار به سمت آشکارساز و در کل انجام شبیه سازی هایی کاملاً مشابه با آنچه در مقالات آورده شده، مقدار متوسط انرژی برای لایه دوم و سوم محاسبه شد.

هدف رسیدن به بازدهی مشابه با نتایج مقاله با در نظر گرفتن اندرکنش هایی بود که انرژی به جامانده آنها بیشتر از مقدار انرژی آستانه باشد. ضرایب مختلفی از متوسط انرژی

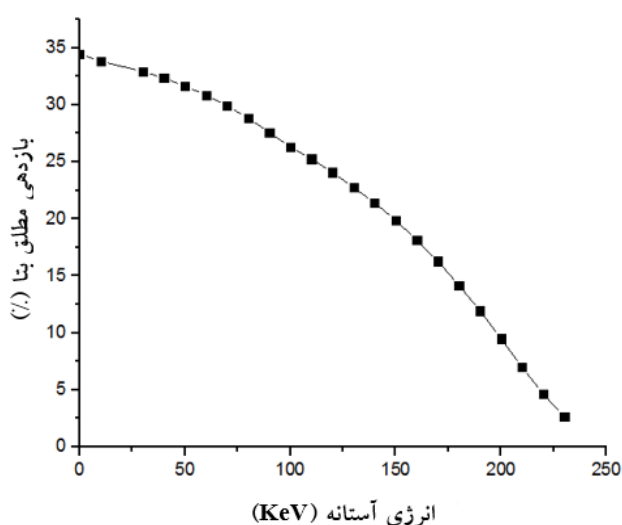


شکل (۳): (۱) محاسبه مقدار انرژی متوسط به جا گذاشته شده توسط پرتوهای گاما در لایه دوم (۱-۱) و حذف این پرتوها در محاسبه بازدهی (۱-۲).

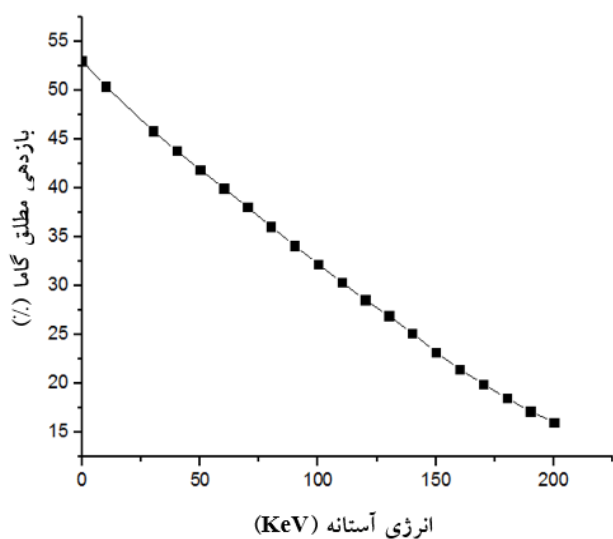
(۲) محاسبه مقدار انرژی متوسط به جا گذاشته شده توسط ذرات بتا در لایه سوم (۲-۱) و حذف این ذرات در محاسبه بازدهی (۲-۲).

با آلودگی‌های رادیواکتیو با استفاده از نرم افزار Geant4 طراحی و مورد استفاده قرار گرفت.

یکی از جمله مزیت‌های این آشکارساز استفاده از یک آشکارساز به جای استفاده از سه آشکارساز جداگانه به منظور تشخیص این ذرات است که از نظر اقتصادی نیز به صرفه خواهد بود. این ساختار با استفاده از مواد سوسوزنی $ZnS(Ag)$ ، $BC400$ و $NaI(Tl)$ به ترتیب به عنوان لایه‌های اول تا سوم با ضخامت‌های $۰,۰۰۲۵$ ، ۱ و ۳ سانتیمتر طراحی شد که ضخامت بهینه و انتخاب مواد به منظور دستیابی به



شکل (۵): نمودار تغییرات بازدهی مطلق پرتوهای بتا با تغییر در میزان آستانه انرژی.



شکل (۶): نمودار تغییرات بازدهی مطلق ذرات گاما با تغییر در میزان آستانه انرژی.

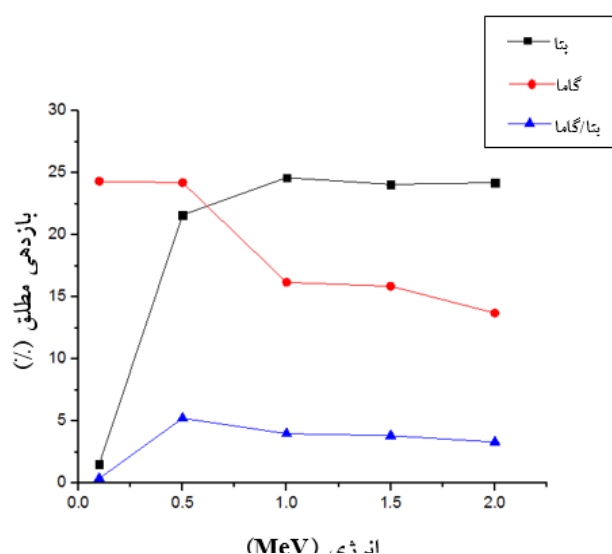
از تابش اصلی نیز حذف خواهند شد و باید انرژی آستانه را به گونه‌ای انتخاب نمود که بین این دو عامل تعادل برقرار باشد (شکل ۵ و ۶).

شکل ۷ بازدهی مطلق پرتوهای گاما را با تغییر ضخامت لایه سوم نشان می‌دهد. ضخامت لایه سوم را می‌توان براساس میزان بازدهی دلخواه تعیین کرد. خطای محاسبات در این مرحله به طور متوسط ۴ درصد پیش بینی شد.

مقدار بازدهی مطلق با استفاده از این آشکارساز در رویدادهای همزمان آلفا/گاما و بتا/گاما محاسبه شد و با مقادیر گزارش شده در برگه مشخصات آشکارساز LB124 مقایسه شد (جدول ۳). مقدار بازدهی بتا (گاما) بدون حذف گاماها پس زمینه در حضور چشمه ^{137}Cs با اختلاف ۸٪ محاسبه شد. دلیل اختلاف بالای بازدهی آلفا در حضور چشمه ^{241}Am ناشی از شرایط ایده آلی است که در هنگام محاسبه بازدهی آلفا فرض شد. در واقعیت عوامل زیادی از جمله خود جذبی چشمه و اتلاف انرژی ذرات آلفا در محیط موجب تغییرات عمده در بازدهی ذرات آلفا خواهد شد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک آشکارساز سه لایه فوزویچ کریستالی موثر در آشکارسازی همزمان تابش‌های آلفا/بتا/گاما در مواجهه



شکل (۴): بازدهی مطلق ذرات بتا، گاما و بتا/گاما همزمان.

لایه سوم برای پرتوهای گاما در انرژی ۱-۲ MeV بدست آمد.

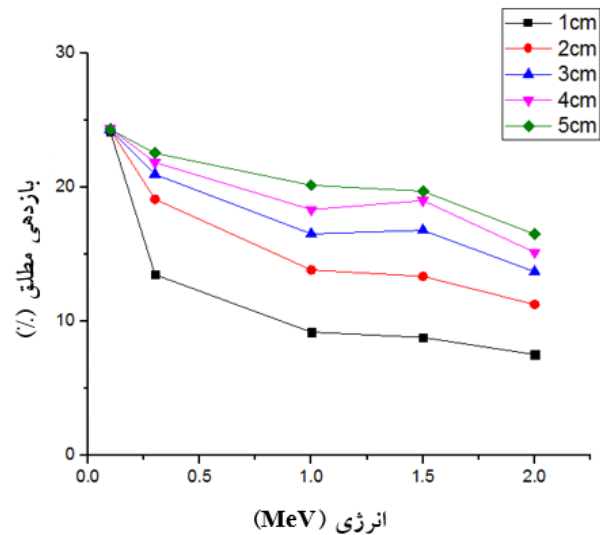
بازدهی مطلق پرتوهای گاما با تغییر در ضخامت لایه سوم نیز محاسبه شد تا به کاربر این امکان را بدهد که بسته به میزان بازدهی مطلوب خود ضخامت لایه سوم را تعیین کند که این امر موجب صرفه جویی در هزینه ها نیز خواهد بود.

ضمناً باید یادآوری کرد که خواص اپتیکی مواد سوسوزنی در شبیه سازی های انجام شده در نظر گرفته نشده و فرض

جدول (۳): مقایسه بازدهی آشکارساز شبیه سازی شده و نسخه تجاری

چشمه	بازدهی بتا (گاما)	بازدهی آلفا	LB124
Cs-۱۳۷	۳۴,۸±۵,۵	۴۳
Am-۲۴۱	۴۹,۷±۵	۲۱

شده که تمامی فوتون های تولید شده به آشکارساز خواهند رسید. از خود جذبی چشمه ها نیز صرفه نظر شده است. واضح است که با در نظر گرفتن هر یکی از این موارد میزان مقادیر بازدهی محاسبه شده کاهش خواهند داشت.



شکل (۷): بازدهی مطلق گاما برای ضخامت های مختلف NaI(Tl).

مقدار بازدهی بهتر با استفاده از نرم افزار Geant4 و MCNPX انجام شد.

با رعایت شرط تعادل بین بازدهی و شمارش های پس زمینه ناشی از تابش های تداخلی چشمه در هر لایه و انتخاب مقدار انرژی آستانه مناسب مقدار بازدهی مطلق هر یک از لایه ها در انرژی های مختلف مورد محاسبه قرار گرفت. حداکثر بازدهی مطلق در لایه دوم برای ذرات بتا در انرژی ۰,۱ MeV و در

۵. مراجع

- [1] Yablokov, Alexey, Nesterenko, Vassil. Chernobyl: consequences of the catastrophe for people and the environment. New York, Academy of Sciences, (2009).
- [2] Pilviö, Riitta. Method for the determination of low level actinide concentrations and their behavior in the aquatic environment. Helsinki, University of Helsinki, (1998).
- [۳] رجیبی مقدم، سحر. طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی آشکارساز فوزویج. تهران، دانشگاه شهید بهشتی، (۱۳۹۵).
- [4] Usuda, Shigekazu. Sakurai, Satoshi. Phoswich detector for simultaneous counting of α , $\beta(\gamma)$ -rays and neutrons. Nuclear Instrument and Material in Physics Research A. 388 (1997) 193-198.
- [5] White, Travis. Miller, William. A triple crystal Phoswich detector with digital pulse shape discrimination for alpha/beta/gamma spectroscopy. Nuclear Instrument and Material in Physics Research A. 422 (1999) 144-147.
- [6] Childress, Nathan. Miller, William. MCNP analysis and optimization of a triple crystal Phoswich detector. Nuclear Instrument and Material in Physics Research A. 490 (2002) 263-270.
- [7] Ely, J.H. Aalseth, C.E. Novel beta-gamma coincidence measurements using phoswich detectors. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 263(1) (2005) 245-250.
- [8] Hennig, W. Tan, H. Single channel beta-gamma coincidence detection of radioactive xenon using digital pulse shape analysis of phoswich detector signals. IEEE Transactions on Nuclear Science, 53 (2006) 620.
- [9] Farsoni, A.T. Hamby, D.M. MCNP analysis of a multilayer phoswich detector for β -particle dosimetry and spectroscopy. Nuclear Instrument and Material in Physics Research A. 555 (2005) 225-230.
- [10] Farsoni, A.T. Hamby, D.M. A system for simultaneous beta and gamma spectroscopy. Nuclear Instrument and Material in Physics Research A. 578 (2007) 528-536.
- [11] Yamamoto, Seiichi. Hatazawa, Jun. Development of an alpha/beta/gamma detector for radiation monitoring. Review of Scientific Instruments. 82(11) (2011).
- [12] Ifergan, Y. Dadon, S. Development of a thin, double-sided alpha/beta detector for surface-contamination measurement. IEEE Transactions on Nuclear Science
- [13] Ifergan, Y. Dadon, S. utilization of wavelength-shifting fibers coupled to ZnS(Ag) and plastic scintillator for simultaneous detection of alpha/beta particles. Nuclear Instrument and Material in Physics Research A, 784 (2015) 93-96.
- [14] T.G. BERTHOLD technologies. [Online]. Available: <https://www.berthold.com/en/rp/lb-124-scint-contamination-monitor>.
- [15] Agostinelliae, S. Allisonas, K. Geant4-a simulation toolkit. Nuclear Instrument and Material in Physics Research A, 506 (2003) 250-303.
- [16] Knoll, G. Radiation detection and measurement. New York, Wiley, (2000).
- [17] SAINT-GOBLAIN. [Online]. Available: <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/radiation-detection>