مقاله پژوهشی

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱۵، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۵، صفحه ۱۰۹-۱۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

بهبود شمارش الکترون در آشکارساز گایگرمولر جدارهٔ شیشه‌ای با استفاده از یک روش اعتبارسنجی شده مونت‌کارلو

محمدامین اسدی[۱]، مریم حسنوند[۱]، جواد مختاری[۲*]، محمدحسین چوپان دستجردی[۲] و ابراهیم تیموری[۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

[۲]پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، اصفهان، ایران.

*اصفهان، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کد پستی: ۸۱۶۶۱۸۷۳۰۱.

پست الکترونیکی: jvmokhtari@aeoi.org.ir

چکیده

در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف و مؤثر بر عملکرد آشکارساز گایگر-مولر از قبیل نوع گاز اصلی، نوع گاز فرونشان، شعاع تیوب گازی، و ضخامت جدارهٔ شیشه‌ای بر تعداد الکترون‌های تولیدشده در حجم گازی شمارنده گایگر-مولر، با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت‌کارلو[۲] (MCNPX) بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند که برای هر انرژی خاص از چشمه گاما، یک ضخامت خاص از جدارهٔ آشکارساز جهت بیشینه بودن تعداد الکترون‌ها درون حجم گازی، مورد نیاز است. گازهای هلیوم، نئون و آرگون به‌عنوان گاز اصلی و گازهای فلوئور و کلر به‌عنوان گاز فرونشان برای فوتون‌هایی با انرژی ۰/۵، ۱ و ۲ مگا الکترون‌ولت و شعاع‌های ۱ تا ۲/۵ میلی‌متر از تیوب گازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد گازهای آرگون و کلر به‌ترتیب برای گاز اصلی و گاز فرونشان عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. شعاع بهینه برای هر نوع آشکارساز نیز تعیین شد. نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات موجود در یک مرجع با انحراف کمتر از ۱/۵ درصد نیز اعتبارسنجی گردید. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند برای طراحی و ساخت آشکارساز گایگر-مولر به کار گرفته شود.

کلیدواژگان: آشکارساز گایگر-مولر، کد شبیه‌سازی مونت‌کارلو، شمارش الکترون، گاز اصلی و فرونشان، چشمه گاما.

۱. مقدمه

نوع گاز اصلی و گاز فرونشان تأثیر به سزایی بر تعداد الکترون‌های تولید شده در حجم گازی آشکارسازهای گازی دارند [۵-۱]. اگر از هوا، هیدروژن، اکسیژن و دیگر گازهایی که الکترونگاتیویته بالایی دارند استفاده شود، فرایند آشکارسازی مختل می‌گردد به دلیل این‌که الکترون‌های یونیزه شده توسط اتم‌های این نوع از گازها جذب و تعداد الکترون‌ها به‌شدت کاهش خواهد یافت [۶]. به همین دلیل از گازهای نجیب همانند آرگون به‌عنوان گاز اصلی در این نوع از آشکارساز استفاده می‌شود [۷]. پیش از این از الکل

[2] Monte Carlo

و دیگر گازهای چنداتمی به‌عنوان گاز فرونشان استفاده شده است؛ ولی اکنون از هالوژن‌ها نظیر کلر به دلایل مختلف اعم از افزایش طول عمر و کاهش ولتاژ کار، استفاده می‌شود [۱،۷]. افزودن هوا به داخل گاز باعث افزایش شیب فلات[1] آشکارساز گایگر–مولر خواهد شد که این امر مطلوب نیست؛ زیرا هرچه شیب فلات آشکارساز کمتر باشد، عملکرد آشکارساز بهتر خواهد بود [۸]. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه استفاده از انواع مختلف گازهای اصلی و فرونشان، جنس و ضخامت آند و کاتد، و همچنین شکل هندسی آشکارساز برای دستیابی به بهترین عملکرد آشکارساز گایگر–مولر انجام شده است.

به‌عنوان مثال، کرن و همکاران در سال ۱۹۳۹ تحقیقاتی بر روی تفاوت تأثیر گاز پرکننده انجام دادند و نتایج نشان داد گازهایی که مخلوطی از هیدروژن و الکل باشند موجب افزایش شدید شیب فلات می‌شوند [۸]. در سال ۱۹۴۲، میناکاوا و همکاران یک آشکارساز گایگر–مولر ساختند که دیواره کاتدی از جنس کروم و به شعاع داخلی ۸ میلی‌متر، پوسته دیواره کاتدی از جنس آلومینیوم، آند از جنس فولاد، پلاتین و تنگستن به شعاع ۰/۰۵ میلی‌متر و از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹ درصد به همراه بخار الکل در فشار بین ۱۰ تا ۸۰ میلی‌متر جیوه بود [۹]. در سال ۱۹۵۶ پژوهشی دربارهٔ تأثیر گاز فرونشان توسط گرامیت و همکاران انجام شد که نتیجهٔ این پژوهش بر این استوار بود که درصورتی‌که میزان گاز فرونشان کمتر از میزان مورد نیاز باشد، بخشی از پالس‌های کاذب نیز شمارش خواهند شد؛ بنابراین ناحیه فلات گایگر–مولر دچار مشکل خواهد شد [۱۰]. در سال ۱۹۶۶ پژوهشی در زمینه میزان تأثیر ولتاژ، دما و پیری[2] بر میزان زمان مرگ آشکارساز گایگر– مولر توسط پیوا و همکاران انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که هرچه اختلاف پتانسیل بین دو الکترود بیشتر باشد، هرچه دما کمتر باشد و هرچه میزان پیری کمتر باشد، میزان زمان مرگ کمتر خواهد بود [۱۱]. در سال ۱۹۹۹، گولواتیوک و همکاران به بررسی گذار بین آشکارساز تناسبی و گایگر–مولر پرداختند. طی این پژوهش آن‌ها متوجه شدند که انتقال از حالت تناسبی به گایگر–مولر زمانی صورت می‌گیرد که غلظت گاز فرونشان کم باشد. در این حالت، تقویت گاز به‌عنوان تابعی از ولتاژ بالا، با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد و می‌تواند به‌راحتی از مرز بین ناحیه تناسبی و گایگر–مولر عبور کند. خلوص گاز مورد استفاده در این پژوهش شامل ۹۹/۹۹۹ درصد هلیوم و ۹۹/۹ درصد ایزو بوتان است. همچنین در نتایج عملی، شکل پالس مبنی بر زمان سپری شده و ولتاژ دامنهٔ پالس به دست آمد [۱۲]. عمدهٔ این تحقیقات بر مبنای ساخت نمونه اولیه آشکارساز و ارزیابی عملکرد آن بوده است. تقریباً از سال ۲۰۱۱ تاکنون نیز با بهره‌گیری از کدهای محاسباتی و شبیه‌سازی، پیش از ساخت مدل آزمایشگاهی، اثر پارامترهای مختلف ذکر شده بر روی عملکرد این نوع آشکارسازها بررسی شده است. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۱۱ پژوهشی در زمینه میزان تأثیر موقعیت شعاعی چشمه بر روی بازده آشکارساز توسط مریک و همکاران با استفاده از کد مونت‌کارلو انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که حضور چشمه در فاصلهٔ شعاعی ۶ میلی‌متری از مرکز تیوب، بهترین عملکرد را دارد [۱۳]. در سال ۲۰۱۳ پژوهشی در زمینه افزایش بازده به وسیلهٔ تعیین ضخامت بهینهٔ کاتد و دیواره ثانویهٔ کاتدی و همچنین موقعیت‌محوری چشمه از آشکارساز گایگر–مولر با کد مونت‌کارلو توسط آقای شاهین احمدی انجام گرفت. نتایج حاکی از آن بود که برای حالتی که چشمه در مرکز موقعیت‌محوری آشکارساز است میزان بازده از سایر نقاط بیشتر خواهد بود و همچنین بین عناصر آلومینیوم، آهن، کروم و نیکل، بهترین گزینه آلومینیوم است و برای آشکارسازی با مشخصات آشکارساز SBM۲۰ مقدار ضخامت آلومینیوم بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ میلی‌متر به‌دست آمد [۱۴].

[1] Plateau

[2] Aging

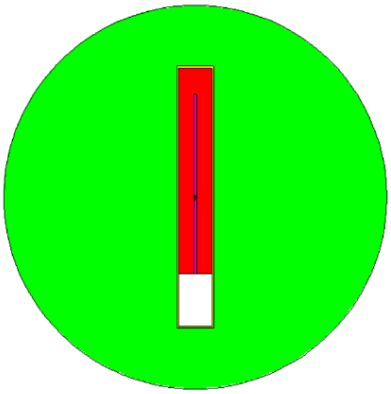
همچنین آربوتینا و واسیک میلووانویک در سال ۲۰۲۰ تحقیقی بر روی تأثیر شعاع کاتد و آند بر بازدهی آشکارساز گایگر–مولر انجام دادند، شعاع کاتد بین ۰/۰۲ تا ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و شعاع بهینه ۰/۰۴ میلی‌متر به‌دست آمد [۱۵]. همچنین اشرفی و احمدی در سال ۲۰۱۷ بر روی تأثیر فاصلهٔ چشمه از آشکارساز تحقیقاتی انجام دادند که نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که هرچه چشمه به مرکز سطح جانبی تیوب آشکارساز نزدیک‌تر باشد، بازدهی آشکارساز نیز بیشتر خواهد شد [۱۶].

در تحقیقاتی که بر مبنای استفاده از کدهای محاسباتی برای تعیین پارامترهای مؤثر بر عملکرد این نوع آشکارسازها انجام شده است، برخی صرفاً به تأثیر عوامل هندسی و برخی صرفاً به تأثیر جنس مواد کاتد یا آند بوده است. آشکارسازهای گایگر–مولر در انواع مختلفی بنا به هدف آزمایش، هزینه و شرایط بهره‌برداری طراحی و ساخته می‌شوند. یک مدل از این نوع آشکارساز دارای جدارهٔ شیشه‌ای با کاتد فنری شکل است که در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل نوع گاز اصلی، نوع گاز فرونشان، شعاع تیوب گازی و انرژی فوتون بر ضخامت جدارهٔ شیشه‌ای و تعداد الکترون‌های تولیدشده در حجم گازی آشکارساز گایگر–مولر، با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت‌کارلو بررسی شده است. از این طریق، علاوه بر بررسی اثر عوامل تأثیرگذار بر عملکرد آشکارساز، می‌توان به‌عنوان رهیافتی برای طراحی و ساخت آشکارساز بهره‌مند شد. هدف اصلی این پژوهش، کسب نتایج شبیه‌سازی یک شمارنده گایگر–مولر شیشه‌ای برای ساخت آن است. پس از کسب اطلاعات کافی از کدهای شبیه‌سازی MCNP، GEANT۴ و نرم‌افزار COMSOL موفق به ساخت یک شمارنده گایگر–مولر شیشه‌ای شده که عملکرد مطلوبی نیز دارد و آزمایش‌های ابتدایی آن در حال انجام است. شبیه‌سازی شمارنده گایگر–مولر با جدارهٔ شیشه‌ای مزیت‌های خاص خود را دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: امکان پینچ شدن قسمت انتهایی تیوب شیشه‌ای، هزینه کمتر، بررسی وضعیت داخلی تیوب (شکستگی‌ها، تغییر رنگ گاز)، عایق‌بندی ساده‌تر، حساسیت کمتر به میدان مغناطیسی، شیشه نقش کاتد را ایفا نمی‌کند و صرفاً دیواره است (فنر نقش کاتد را ایفا می‌کند) و این امر از خوردگی دیواره جلوگیری می‌کند و عمر شمارنده را افزایش می‌دهد و درنهایت، توانایی تنظیم گام و ضخامت فنر. در بسیاری از تحقیقات پیشین برخی از این آزمایش‌های انجام شده است و تنها تفاوتی که با یکدیگر دارند در دیواره شمارنده است که در این پژوهش از جنس شیش (کوارتز) بررسی شد. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش به‌صورت مؤثر در اندازه شمارنده ساخته شده و جنس قطعات آن مورد استفاده واقع شد. همان‌طور که گفته شد، پارامترهای بسیار زیادی از قبیل ضخامت، طول، شعاع و جنس کاتد و آند، فشار و نوع گاز اصلی و فرونشان، انرژی، نوع و فاصله چشمه رادیواکتیو تا شمارنده، میدان الکتریکی و... در شبیه‌سازی و ساخت این شمارنده مؤثر هستند که بخشی با کد MCNP، بخشی با کد GEANT۴ و بخش‌هایی نیز با نرم‌افزار COMSOL بررسی شدند. یکی از دلایل استفاده از کد GEANT۴ و نرم‌افزار COMSOL در شبیه‌سازی‌ها امکان تنظیم میدان الکتریکی درون شمارنده است. در نمونهٔ ساخته شده، آند توانایی جابه‌جایی و تعویض را به‌راحتی دارد، امکان تغییر گام، نوع و شعاع نفر به‌سهولت فراهم است، شیشه از جنس کوارتز در برابر ضربه، دما و مهم‌تر از همه فشار بسیار مقاوم است.

۲. مواد و روش‌ها

در آشکارسازهای با جداره شیشه‌ای، نقش این جداره ایجاد برهم‌کنش فوتون با آن و ایجاد فوتوالکترون به داخل تیوب گازی است. فوتوالکترون‌ها از طریق سه برهم‌کنش فوتون با ماده (فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج) تولید می‌شوند. در پدیدهٔ فوتوالکتریک، انرژی فوتون توسط الکترون لایه‌های داخلی به طور کامل جذب شده و الکترون به بیرون پرتاب می‌شود در حین

این اتفاق نیز پرتوهای ایکس مشخصه از آن به داخل تیوب گازی گسیل می‌شوند. در پدیده کامپتون، فوتون بخشی از انرژی خود را به الکترون لایه بیرونی داده و فوتون با انرژی کمتری به همراه فوتوالکترونی با انرژی کمتر از حالت قبلی به داخل تیوب گازی گسیل می‌شود. پدیدهٔ تولید زوج تنها برای حالتی است که انرژی فوتون ورودی بیش از ۱/۰۲۲ مگا الکترون‌ولت باشد. لازم به ذکر است که پرتوهای ایکس مشخصه در هر سه پدیده حضور دارند [۱،۱۷]. بعد از برخورد فوتون به جدارهٔ شیشه‌ای و گاز درون تیوب آشکارساز، فوتوالکترون‌ها با مکانیسم‌های مختلفی تولید می‌شوند و هر فوتوالکترون نیز الکترون‌های ثانویه متعددی تولید خواهد کرد. در اثر فرایندهای مذکور درون تیوب پر شده از گاز (به‌عنوان مثال گاز آرگون)، الکترون و یون مثبت ایجاد می‌شود و به دلیل وجود میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اعمال شده به کاتد و آند، یون‌های مثبت به سمت کاتد حرکت می‌کنند و در مسیر خود با جذب الکترون از اتم‌های هالوژن به یون خنثی تبدیل می‌شوند و این یون‌های مثبت هالوژن هستند که به سمت کاتد حرکت می‌کنند [۱،۷]. برای انجام شبیه‌سازی‌های مربوط به تولید و ترابرد الکترون‌های حاصل از فرایندهای داخل تیوب آشکارساز، از کد مونت‌کارلو (MCNPX) استفاده شد. ابتدا جهت اعتبارسنجی، یکی از آزمایش‌های انجام شده گایگر–مولر با کد مونت‌کارلو شبیه‌سازی شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد [۱۴، ۲۰-۱۵]. برای این امر یک آشکارساز گایگر–مولر به شعاع ۱۰ و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر، همچنین آند به شعاع ۰/۵ میلی‌متر از جنس تنگستن و پوسته کاتدی از جنس آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. به‌عنوان چشمه گاما، یک چشمه سزیم ۱۳۷ با انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون‌ولت در فاصلهٔ مشخص از تیوب به‌صورت عمود بر سطح بالای تیوب در نظر گرفته شد. با استفاده از تالی f۸، و تعداد ذرهٔ $۱۰^{۶}$ فوتون خروجی از چشمهٔ گاما، مقدار شمارش الکترون در ضخامت‌های مختلف پوستهٔ کاتدی محاسبه شد (شکل ۱).



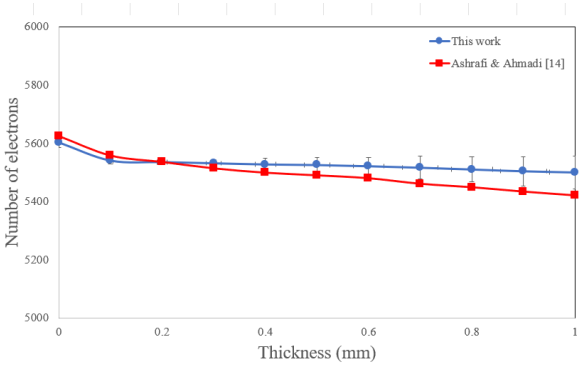
شکل (۱): شکل آشکارساز گایگر–مولر شبیه‌سازی شده با استفاده از کد مونت‌کارلو.

در شبیه‌سازی‌های بعدی، از یک تیوب استوانه‌ای‌شکل به ارتفاع ۱۰۶ میلی‌متر و شعاع‌های مختلف استفاده شد. گازهای آرگون، نئون و هلیوم به‌عنوان گاز اصلی و گازهای کلر، فلوئور و نیتروژن به‌عنوان گاز فرونشان، جهت تعیین گاز اصلی و فرونشان بهینه استفاده شد. همچنین در شبیه‌سازی از چشمهٔ گاما به شعاع ۲ میلی‌متر با انرژی‌های ۰/۵، ۱ و ۲ مگا الکترون‌ولت استفاده شد که به‌صورت عمودی نسبت به سطح جانبی تیوب قرار داده شد تا تأثیر آن بر میزان ضخامت بهینهٔ دیواره، شار حجمی الکترون درون تیوب آشکارساز در این پژوهش بررسی شود.

۳. بحث و نتایج

شکل (۲)، تأثیر ضخامت کاتد بر روی میزان الکترون‌های تولید شده در آشکارساز معرفی شده در مرجع [۱۴]، که به‌عنوان مدل اعتبارسنجی در این پژوهش در نظر گرفته شده است، را در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی این پژوهش نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، برای اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی و روش محاسباتی در این پژوهش، ابتدا یکی از آزمایش‌های انجام شده با آشکارساز گایگر–مولر معرفی شده در یکی از فعالیت‌های پژوهشی پیشین، مرجع [۱۴]، توسط کد مونت‌کارلو شبیه‌سازی و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل شده هم‌خوانی بسیار خوبی،هم در روند تغییرات و هم در

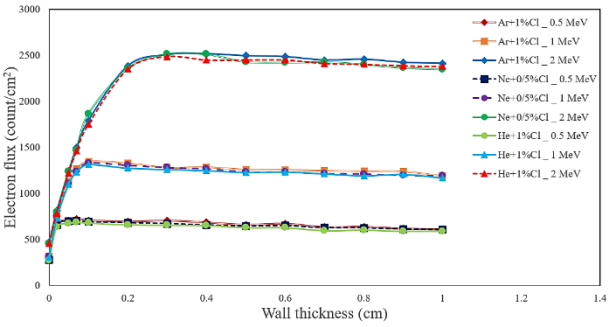
مقدار کمی تغییرات، دارند و بیشترین میزان درصد خطا در حدود ۱/۵ درصد است که حاکی از تعریف صحیح مدل شبیه‌سازی برای انجام محاسبات در گام‌های بعدی است.



شکل (۲): تأثیر ضخامت کاتد بر روی تعداد الکترون درون آشکارساز گایگر-مولر بر اساس مرجع [۱۴] و کار حاضر.

تغییرات شار الکترون درون آشکارساز گایگر-مولر برحسب انرژی‌های مختلف چشمه و ضخامت‌های مختلف جداره شیشه‌ای درون گازهای Ar+ ۱ %Cl، Ne+ ۰/۵ %Cl، He+۱%Cl در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در ضخامت‌های بسیار کم از جدارهٔ شیشه‌ای، مقدار الکترون‌های تولیدشده به‌شدت افت می‌کند به این دلیل که احتمال رخ‌دادن پدیده‌های فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج (برای انرژی‌های بیشتر از ۱/۰۲۲ مگا الکترون‌ولت) در این ضخامت از شیشه بسیار اندک است و بیشتر فوتون‌ها بدون برهم‌کنش عبور می‌کنند. در ضخامت‌هایی در حدود ۲ میلی‌متر، تغییر انرژی فوتون تأثیر ناچیزی بر شار الکترون‌های تولیدی در حجم گازی می‌گذارد. یکی از دلایل این است که فوتون‌ها در انرژی بالا فرصت برهم‌کنش با محیط اطراف را نخواهند داشت. طبق نمودارها، متناسب با هر انرژی، یک ضخامت بهینه وجود دارد که شار الکترون در این آزمایش، در بیشترین حالت خود قرار می‌گیرد و مجدداً با افزایش بیشتر ضخامت، کاهش شار الکترون درون حجم گازی آشکارساز گایگر-مولر مشاهده می‌شود، دلیل رخ داد این اتفاق این است که ممکن است فوتوالکترون‌های تولید شده در یک ضخامت خاص از جداره، انرژی کافی جهت خروج از جداره و واردشدن به محفظهٔ گازی نداشته باشند و یا ممکن است به‌محض ورود به محفظهٔ گازی، انرژی لازم جهت یونیزاسیون‌های متعدد را نداشته باشد.

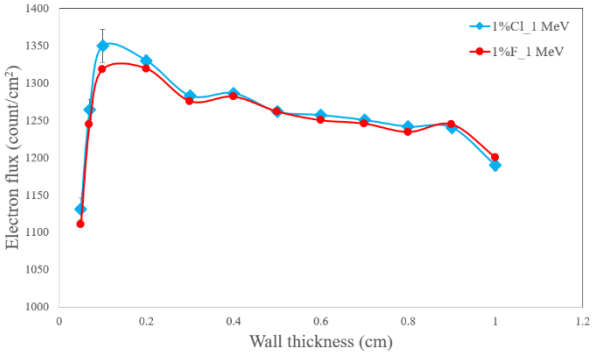
همان‌طور که مشاهده می‌شود، گاز آرگون عملکرد بهتری در مقایسه با گاز نئون و هلیوم از خود نشان داد، همچنین گاز نئون نیز عملکرد بهتری نسبت به گاز هلیم در میزان تولید الکترون در حجم گازی دارد. دلیل آن نیز بالاتر بودن عدد اتمی و کم بودن الکترونگاتیویته گاز آرگون نسبت به گاز نئون و هلیوم است. همچنین گاز آرگون به انرژی کمتری برای یونیزه شدن اتم‌هایش نیاز دارد؛ بنابراین فوتوالکترون تولیدی با صرف یک انرژی مشخص برای غلبه بر سد پتانسیل الکترون لایه ظرفیت آرگون، بخش بیشتری از انرژی به انرژی جنبشی تبدیل خواهد شد، لذا الکترون‌های ثانویهٔ تولید شده نیز این شانس را دارند تا آن‌ها نیز یک بهمن جدید را آغاز نمایند.



شکل (۳): تغییرات شار الکترون درون آشکارساز گایگر-مولر برحسب انرژی‌های مختلف چشمه و ضخامت‌های مختلف جداره شیشه‌ای درون گازهای اصلی آرگون، نئون و هلیوم و گاز فرونشان کلر.

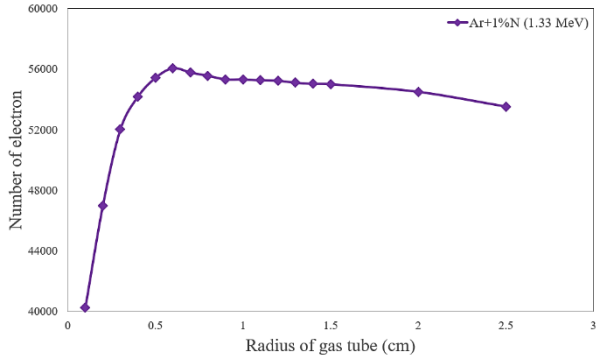
در شکل (۴) تغییرات شار الکترون برحسب ضخامت دیواره برای گاز فرونشان فلوئور و کلر با غلظت یک درصد با یکدیگر مقایسه شده‌اند. طبق نمودار، گاز کلر عملکرد بهتری در مقایسه با گاز فلوئور از خود نشان داده است. یکی از عوامل مؤثر بر این امر، میزان الکترونگاتیویته هر یک از این دو گاز فرونشان است. دلیل افت شدید شار الکترون طبق نمودارهای قبلی به علت ضخامت بسیار اندک دیواره در قسمت ابتدایی این نمودار است

که احتمال برهم‌کنش‌های فوتون با دیواره را کاهش می‌دهد. مطابق شکل در ضخامت‌های بالا در حدود ۱۰ میلی‌متر، ممکن است برد فوتوالکترون تولید شده کمتر از ضخامت دیواره باشد و مانع رسیدن برخی از فوتوالکترون‌ها به حجم گازی شود. البته این امر هم وابسته به این موضوع است که در چه ناحیه‌ای از دیواره، هر یک از فوتوالکترون‌ها تولید شوند.



شکل (۴): تغییرات شار الکترون درون آشکارساز گایگر-مولر برحسب استفاده از گاز فلوئور یا کلر به‌عنوان گاز فرونشان در انرژی چشمه ۱ مگا الکترون‌ولت.

شکل (۵) میزان شعاع بهینهٔ تیوب گازی برای آشکارساز گایگر-مولر با گاز Ar+۱%N و انرژی چشمهٔ ۱/۳۳ مگا الکترون‌ولت به همراه جدارهٔ شیشه‌ای به ضخامت ۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این مدل از آشکارساز گایگر-مولر، شعاع داخلی ۶ میلی‌متر، شعاع بهینه‌ای است. دلیل رخ‌دادن این امر در این مدل این است که در شعاع‌های کمتر از ۶ میلی‌متر میزان یونیزاسیون به‌مقدار کافی نرسیده است در نتیجه الکترون‌های کمتری تولید شده‌اند؛ اما در شعاع‌های بیشتر از ۶ میلی‌متر، میزان الکترون‌های تولیدشدهٔ کمتری به نسبت شعاع افزایش‌یافته خواهیم داشت.



شکل (۵): تغییرات تعداد الکترون درون آشکارساز گایگر-مولر برحسب تغییرات شعاع تیوب گازی برای گاز Ar+۱%N در انرژی ۱/۳۳ مگا الکترون‌ولت.

۴. نتیجه گیری

برای اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی و روش محاسباتی در این پژوهش، یکی از آزمایش‌های انجام شده با یک آشکارساز گایگر-مولر توسط کد مونت‌کارلو شبیه‌سازی شد و نتایج با خطای در حدود ۱/۵ درصد همخوانی داشتند که تأیید کنندهٔ تعریف صحیح مدل شبیه‌سازی برای انجام محاسبات در گام‌های بعدی بود. مدل‌های مختلف آشکارساز با انتخاب ترکیب مختلف گازهای اصلی پرکننده و فرونشان در ابعاد آشکارساز با انرژی‌های مختلف چشمه گاما توسط کد اعتبارسنجی شده طراحی و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد گاز آرگون نسبت به دیگر گازهای نجیب عملکرد بهتری را به‌عنوان گاز اصلی در آشکارساز گایگر-مولر دارد. همچنین میزان انرژی فوتون خروجی از چشمه تأثیر مستقیم بر شمار الکترون‌ها و تأثیر مهمی در انتخاب شعاع بهینه دارد، به‌گونه‌ای که در حالتی که گاز داخل آشکارساز از ۹۹ درصد آرگون و ۱ درصد کلر و از دیوارهٔ شیشه‌ای استفاده شده باشد، در انرژی فوتون ۰/۵، ۱ و ۲ مگا الکترون‌ولت به ترتیب بهینهٔ ضخامت جداره، ۰/۷ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر به دست آمده است. همچنین گاز کلر نسبت به گاز فلوئور عملکرد بهتری در میزان تولید الکترون درون حجم گازی داشته و شعاع داخلی بهینه برای آشکارساز گایگر-مولر با گاز Ar+۱%N و انرژی

چشمهٔ ۱/۳۳ مگا الکترون‌ولت به همراه جدارهٔ شیشه‌ای به ضخامت ۳ میلی‌متر، در حدود ۶ میلی‌متر به‌دست آمد. نتایج بسیار دیگری از شبیه‌سازی این شمارنده گایگر–مولر با جدارهٔ شیشه‌ای ساخته شده، آماده است که صرفاً بخشی از این نتایج که مرتبط با کد MCNP بود در این مقاله ذکر شده است، نتایج مربوط به کد GEANT۴ و نرم‌افزار COMSOL در مقاله‌ای دیگر برای کنفرانس بین‌المللی هسته‌ای فرستاده شده است و مورد پذیرش واقع گردیده است.

۵. مراجع

1. G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA (2010).
2. I. Meric, G. A. Johansen, M. B. Holstad, A. F. Calderon, R. P. Gardner. Enhancement of the intrinsic gamma-ray stopping efficiency of Geiger–Müller counters. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 696 (2012) 46–54.
3. V. Sivasailanathan, P. Kumar, S. Sagadevan. Calibration and estimation of efficiency of Geiger Muller counter using a standard radioactive source. *Int. J. Phys. Sci.* 12 (1) (2017) 8–12.
4. N. M. Remon, C. M. T. Hassan, M. S. Hassan, M. G. Zakir. Build very simple design and cost effective Geiger-Muller counter. *J. Recent Adv. Appl. Sci.* 39 (1) (2024).
5. W. L. Dunn, R. P. Gardner. The determination of intrinsic gamma-ray detection efficiencies for cylindrical Geiger-Müller tubes by Monte Carlo methods. *Nucl. Instrum. Methods* 103 (2) (1972) 373–384.
6. O. Minakawa. Discharge process in Geiger-Müller counters. III. *Proc. Imp. Acad.* 19 (1) (1943) 19–25.
7. N. Tsoulfanidis. *Measurement and Detection of Radiation*, Taylor & Francis, Washington, DC, USA (1995).
8. S. C. Curran, V. Petržílka. Methods of construction of Geiger-Mueller counters and their use in coincidence experiments. *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* 35 (2) (1939) 309–321.
9. O. Minakawa. Construction of Geiger–Müller counters with useful characteristics. *Proc. Imp. Acad.* (1942).
10. W. E. Grummitt, R. M. Brown, A. J. Cruikshank, I. L. Fowler. Recent developments in low background Geiger–Müller counters. *Can. J. Chem.* 34 (3) (1956) 206–213.
11. A. Peeva, D. Guleva. Dead time and fatigue in self-quenching G.M. counters at different temperatures. *Nucl. Instrum. Methods* 44 (1966) 314–316.
12. V. Golovatyuk, F. Grancagnolo. Observation of transition between proportional and Geiger–Müller modes in helium-isobutane gas mixtures. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 428 (1999) 367–371.
13. I. Meric, G. A. Johansen, M. B. Holstad, K. O. Lee. A single scatter electron Monte Carlo approach for simulating gamma-ray stopping efficiencies of Geiger-Müller counters. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 654 (1) (2011) 279–287.
14. ش. احمدی. مطالعه‌ی تأثیر جنس و ضخامت پوسته‌ی دیواره‌ی کاتدی بر روی بازده آشکارسازی اشعه‌ی گاما توسط آشکارساز گایگر مولر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (۱۳۹۲).
15. D. Arbutina, A. Vasić-Milovanović. Improving the Geiger Muller counter characteristics by optimizing the anode and cathode radius dimensions. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 67 (10) (2020) 2231–2237.
16. S. Ashrafi, S. Ahmadi. Calculation of the low-energy gamma ray detection efficiency for a GM tube. *J. Instrum.* 12 (6) (2017) P06005.
17. K. S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, New York, USA (1991).
18. Y. Fylonych, V. Zaporozhan, O. Balashevskyi. Validation of the Geiger-Muller counter model of BDMG-04-02 using the Monte-Carlo technique. *Probl. At. Sci. Technol.* 6 (136) (2021) 149–154.
19. F. Li, S. Lv, S. Qi, P. Cheng, G.-Q. Zeng, M. Xiao, J. Sempau. Optimization of energy compensation layered structure of Geiger-Müller counters. *Nucl. Eng. Technol.* 57 (4) (2025) 103300.
20. S. Assadi, M. Hosseini Panah, M. Arkani, S. Mohammadi. Active Quenching of Geiger Muller Detectors based on FPGA. *J. Nuc. Res. App*. 4 (3) (2024) 42-50.