



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۶، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۷

بررسی استفاده از آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی در طراحی یک سیستم رادیوگرافی میون با استفاده از کد Geant4

محمد مهدی سعادت یار و احمد پیروزمند*

بخش مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران.

* فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۷۱۳۴۸-۵۱۳۵۴

پست الکترونیکی: pirouzm@shirazu.ac.ir

چکیده

تصویربرداری و شناسایی مواد با عدد اتمی و چگالی بالا به‌ویژه مواد رادیواکتیو یکی از مسائلی است که در سال‌های اخیر مورد ارزیابی و توجه ویژه قرار گرفته و از آنجایی که روش‌های مرسوم و قدیمی تصویربرداری نیز دارای محدودیت‌هایی هستند، یافتن روش جایگزین برای این روش‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. میون‌های کیهانی با توجه به چشمه نامحدود، یکی از منابعی هستند که اخیراً برای تصویربرداری از اجسام سنگین مورد توجه قرار گرفته‌اند و عمده تلاش‌ها در این زمینه معطوف به افزایش دقت و کارایی سیستم‌های رادیوگرافی میون می‌باشد. در این بین استفاده از سوسوزن‌های پلاستیکی به‌صورت تأثیرگذاری باعث افزایش دقت و کاهش هزینه روش‌های رادیوگرافی میون شده و در دهه اخیر روش‌های مختلفی جهت استفاده از این سوسوزن‌ها برای رادیوگرافی با استفاده از میون ارائه شده است. از آنجایی که اساس کار سیستم‌های رادیوگرافی میون بر دقت مکانی آشکارساز میون استوار است، هر پژوهشی که بتواند دقت یک سیستم آشکارسازی میون را افزایش دهد، در نهایت به بهبود کیفیت رادیوگرافی میون منجر خواهد شد. در این پژوهش نیز با استفاده از یک پیکربندی خاص از سوسوزن‌های پلاستیکی و لامپ‌های تکثیرگر فوتون، دقت شناسایی مکان فرود میون بر روی صفحه آشکارساز بهینه شده است. پس از انجام شبیه‌سازی به‌وسیله کد Geant4 برای حالات مختلف مشخص گردید که دقت نهایی صفحات آشکارساز پیشنهادی حدود یک سانتی‌متر است و از نظر دقت آشکارسازی بهترین سوسوزن قابل استفاده برای سیستم، سوسوزن BC-408 می‌باشد. در میان چیدمان‌های بررسی شده لامپ‌های تکثیرگر فوتون نیز دقیق‌ترین پیکربندی مربوط به چیدمان مربعی با فواصل یکنواخت است. بهترین زاویه قرارگیری صفحات سوسوزن نسبت به سمت الرأس نیز حدوداً ۱۰ درجه می‌باشد.

کلیدواژه‌گان: میون‌های کیهانی، آشکارساز میون، سوسوزن پلاستیکی، رادیوگرافی، پراکندگی چندگانه کولنی، کد Geant4

۱. مقدمه

با توجه به نیاز روز افزون استفاده از سیستم‌های تصویربرداری، کاربرد رادیوگرافی با استفاده از میون‌های کیهانی با دقت مناسب و با بکارگیری سوسوزن‌های پلاستیکی در بخش‌های امنیتی، حفاظتی و نیز تصویربرداری از محفظه‌های بزرگ صنعتی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و در برخی موارد به بهره‌برداری رسیده است [۱-۳]. پژوهش‌های بسیاری برای استفاده هرچه بیشتر از قدرت نفوذ میون‌های کیهانی انجام شده که از جمله آن‌ها می‌توان به تصویربرداری و توموگرافی ساختارهای با ابعاد بسیار بزرگ مانند معادن و آتشفشان‌ها اشاره نمود [۴-۵].

روش‌های متعددی به‌عنوان روش‌های مرسوم رادیوگرافی شناخته می‌شوند که یکی از پرکاربردترین آن‌ها، اندازه‌گیری تضعیف و پراکندگی کامپتون تابش‌های گاما و ایکس پرنرژی است. این روش اطلاعاتی راجع به عدد اتمی، چگالی و شکل جسم مورد تصویربرداری به ما می‌دهد اما می‌توان یادآور شد که تابش ایکس و گاما توان کافی جهت نفوذ در مواد ضخیم و با چگالی بالا را ندارند و از این‌رو دچار محدودیت هستند در حالی که تابش‌های ایکس و گاما بیش‌تر در مواد با عدد اتمی بالا جذب می‌شوند، نوترون‌های سریع غالباً در مواد با عدد اتمی پایین مانند هیدروکربن‌ها و پلاستیک‌ها جذب می‌گردند.

در رابطه با ذرات باردار نیز این نکته را می‌توان یادآور شد که عمق نفوذ خالص ذرات باردار سبک مانند الکترون در ماده در هر جهتی کم است [۶] و ذرات باردار سنگین مانند پروتون‌ها نیز اگرچه برای تصویربرداری از اجسام بزرگ مناسب هستند، اما تولید آن‌ها نیازمند تجهیزات ثابت، عظیم و گران‌قیمتی است که فقط برای تصویربرداری از اجسام کوچک و قابل حمل کاربرد دارند و از نظر دقت در تصویر حاصل دارای محدودیت می‌باشند [۱].

علاوه بر محدودیت‌هایی که ذکر شد، مشکل اصلی دیگر، خطرات تابش برای سلامتی است که همیشه به‌عنوان یک مسأله مهم باید آن را در نظر داشت. بنابراین جایگزینی روش‌های رادیوگرافی مرسوم با روش‌های بهتر و مناسب‌تر و با خطر تابشی کم‌تر، بخصوص برای تصویربرداری از اجسام بزرگ یک نیاز قطعی است. البته هزینه انجام روش‌های جایگزین نیز پارامتر مهمی است که در هر پژوهشی باید مورد توجه قرار گیرد. اگرچه استفاده از میون‌های کیهانی در رادیوگرافی از اجسام بزرگ می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های مرسوم از نظر خطرات تابش برای سلامتی مطرح گردد، اما استفاده از این تابش با توجه به شار پایین آن در سطح زمین و تجهیزات آشکارسازی پرهزینه کمی دور از ذهن به نظر می‌رسد. از این‌رو در صورتی که بتوان آشکارسازی این تابش را با روش‌هایی با هزینه اندک و دقت مناسب به انجام رساند، گام مؤثری در جهت استفاده از این روش در بخش‌های مختلف تصویربرداری برداشته شده است.

آنچه در این پژوهش مدنظر است، به صورت کلی بهبود و توسعه کاربرد روش رادیوگرافی میون با استفاده از سوسوزن‌های پلاستیکی در عرصه تصویربرداری از اجسام با عدد اتمی و چگالی بالاست. در این زمینه عوامل و پارامترهای مختلفی از قبیل ضخامت، عدد اتمی و چگالی ماده مورد تصویربرداری، ساختار و پیکربندی سیستم آشکارسازی و تصویربرداری، زاویه رأس در تابش میون‌ها و زمان تصویربرداری تأثیرگذار و حائز اهمیت می‌باشند و برای رسیدن به دقت مطلوب در تصویربرداری باید از این عوامل به بهترین نحو استفاده گردد. کاربرد سوسوزن‌های پلاستیکی نیز یکی از عوامل تأثیرگذار در توسعه و بهبود آشکارسازی و رادیوگرافی میون می‌باشد [۷-۸]. در این پژوهش با توجه به تمام پارامترهای مهم در آشکارسازی و رادیوگرافی میون، با استفاده از پیکربندی ارائه شده برای آشکارسازی میون، سعی شده تا

تصویربرداری از اجسام بزرگ و چگال، بدون محدودیت‌های ذکر شده برای روش‌های رادیوگرافی مرسوم، به کار برد. علاوه بر این وجود میون‌های کیهانی در پرتوهای زمینه طبیعی و امکان استفاده از آن‌ها به‌جای تابش‌های معمول، نیاز به چشمه‌های رادیواکتیو صنعتی را برطرف کرده است. بنابراین از این جهت خطرات احتمالی تابش برای سلامتی انسان نیز در کاربرد میون‌ها بر طرف خواهد شد [۴].

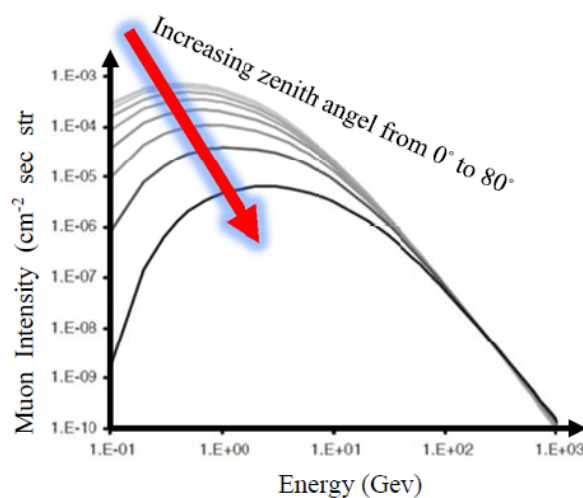
همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، میون از نظر جرم ۲۰۷ مرتبه سنگین‌تر از الکترون است و به‌طور طبیعی برهمکنش آن با ماده بیش‌تر مانند ذرات باردار سنگین می‌باشد. میزان پراکندگی کولنی که در اثر عبور یک ذره میون از یک جسم رخ می‌دهد، می‌تواند معیار و نشانه‌ای از عدد اتمی آن جسم باشد [۱۱-۱۲].

با بررسی مقالات مشابهی که اخیراً در این زمینه ارائه شده، ملاحظه می‌گردد که در بررسی و آشکارسازی میون کیهانی، اشاره‌ای به سایر تابش‌های زمینه نشده و در شبیه‌سازی‌های انجام شده میون به‌عنوان تنها تابش فرودی در نظر گرفته شده است [۱-۳ و ۹-۱۲]. می‌دانیم که میون کیهانی فرودی در سطح زمین بطور متوسط حدود ۳-۴ گیگاالکترون‌ولت انرژی دارد و انرژی سایر ذرات کیهانی در مقابل این انرژی و به‌ویژه انرژی به‌جا گذاشته شده توسط میون در صفحه آشکارساز بسیار ناچیز است، بعلاوه جنس سوسوزن‌های مورد استفاده نیز به‌گونه‌ای است که بیش‌تر برای آشکارسازی ذرات باردار و به‌ویژه میون‌های کیهانی و در شرایط خلاء مناسب هستند. در کنار این موارد در شبیه‌سازی انجام شده سیستم آشکارسازی در یک محفظه مناسب جهت کاهش تابش‌های زمینه طراحی شده و با توجه به محدوده انرژی تقریباً مشخص به‌جا گذاشته شده توسط میون‌های کیهانی در داخل صفحه آشکارساز و تعداد فوتون‌های نوری تولید شده، ارتفاع پیک‌های حاصل از

یک سیستم آشکارساز میون با استفاده از سوسوزن‌های پلاستیکی و با دقت مکانی مطلوب شبیه‌سازی و نتایج به‌صورت بهینه ارائه گردد.

۲. میون‌های کیهانی

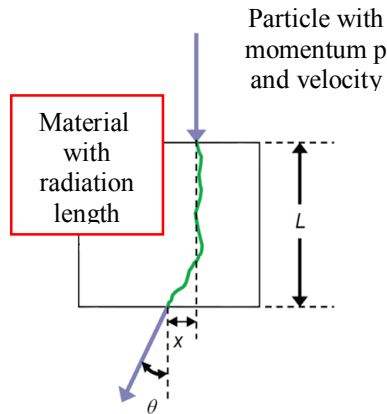
میون‌ها ذراتی بسیار پرانرژی هستند و می‌توان آن‌ها را در زمره ذرات باردار با جرمی حدود ۲۰۷ برابر جرم الکترون و دارای عمق نفوذ زیاد در نظر گرفت که این ویژگی‌ها آن‌ها را قادر به عبور از اجسام با ابعاد بسیار بزرگ می‌نماید. میون‌ها با یک دامنه وسیع از انرژی قابل مشاهده هستند و مطابق شکل ۱ محتمل‌ترین انرژی آن‌ها در محدوده ۱ تا ۱۰ گیگاالکترون‌ولت می‌باشد [۱].



شکل (۱): شدت میون‌های کیهانی در بازه توزیع انرژی آن‌ها.

شار میون‌ها در سطح دریا در حدود ۱۰۰۰۰ میون در هر مترمربع در دقیقه یا به عبارتی یک میون در هر سانتی متر مربع در دقیقه می‌باشد و تقریباً از تعداد یکسانی میون‌های با بار مثبت و منفی تشکیل شده است. میون‌های کیهانی با انرژی متوسط ۳ تا ۴ گیگاالکترون‌ولت در سطح دریا ظاهر می‌شوند و از آن‌جایی که بسیار نافذ هستند، می‌توان آن‌ها را برای

حاصل می شود [۹]. پهنای این توزیع گاوسی به عدد اتمی ماده ای که میون از آن عبور می کند وابسته بوده و از این طریق می توان جسم را شناسایی نمود.



شکل (۲): پراکندگی میون در عبور از یک ماده با طول تابش L_{rad} .

۳.۲. آشکارسازهای لامپ تکثیرگر فوتون

ساده ترین آشکارساز میون از یک سوسوزن و لامپ تکثیرگر فوتون ساخته شده است. برای آشکارسازی میون از تعداد محدودی از سوسوزن های پلاستیکی استفاده می گردد. زمانی که مولکول ها در سوسوزن پلاستیکی مورد تابش قرار می گیرند، برانگیخته شده و نور ساطع خواهند کرد. برای تسخیر نور در سوسوزن جهت آشکارسازی ذره تابشی، سوسوزن را در پوششی مناسب قرار داده و در نهایت به لامپ تکثیرگر فوتون متصل می نمایند و در نهایت نور تولید شده به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود. در ورودی لامپ تکثیرگر فوتون یک فوتوکاتد قرار دارد که در اثر برخورد فوتون های نوری با آن، در اثر پدیده فوتوالکتریک، الکترون تولید خواهد شد. فوتوکاتد به ولتاژ بالای منفی متصل شده که باعث شتاب الکترون در طول یک سری از الکترودها خواهد شد. این الکترودها دایند نام دارند و الکترون های ثانویه ای را منتشر خواهند کرد که در آندی که در انتهای لامپ تکثیرگر فوتون قرار دارد جمع آوری و به مدار خارجی اعمال می شوند [۱۴].

این تابش در نقاط مختلف صفحه آشکارساز تقریباً مشخص است. بنابراین می توان اثر سایر تابش های زمینه را نادیده گرفت.

۱.۲. کاهش انرژی

مکانیزم های اصلی کاهش انرژی میون، یونیزاسیون و فرآیندهای تابشی است. فرآیند غالب فیزیکی کاهش انرژی به وسیله انرژی بحرانی مشخص می شود. وقتی که اندازه حرکت میون ها در انرژی بحرانی قرار دارد، مقدار افت انرژی میون در تعادل بین یونیزاسیون و فرآیندهای تابشی است. برای بیش تر مواد، انرژی بحرانی بیش از چند صد گیگا الکترون ولت می باشد و از آنجایی که انرژی متوسط طیف میون ها حدود ۳ تا ۴ گیگا الکترون ولت است، بنابراین یونیزاسیون مکانیزم اصلی افت انرژی برای اکثر میون های کیهانی خواهد بود.

زمانی که افت انرژی ناشی از یونیزاسیون غالب می شود، ذره به عنوان یوننده کمینه شناخته می شود و میزان افت انرژی کلی تقریباً $2/2 MeVg^{-1}cm^2$ است. یونیزاسیون کمینه برای اکثر مواد و ذرات باردار یکسان و مشابه است. از این رو نتیجه می شود که تأثیر تغییر انرژی میون در انرژی به جا گذاشته شده در سوسوزن های پلاستیکی بسیار ناچیز است و این بدین معناست که می توان فرآیند ارزیابی و بهینه سازی صفحات آشکارساز را در انرژی متوسط میون در سطح زمین یعنی انرژی ۴ گیگا الکترون ولت اجرا نمود [۱۳].

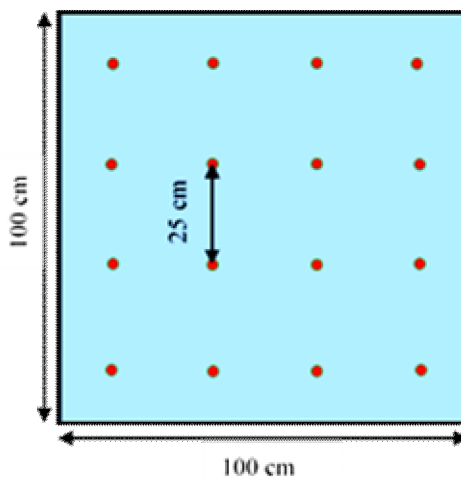
۲.۲. پراکندگی چندگانه کولنی

زمانی که میون از یک ماده عبور می کند، با تعداد زیادی زاویه کوچک پراکندگی از هسته پراکنده می شود. مطابق شکل ۲ میون های کیهانی یک مسیر تصادفی را درون ماده طی می کنند و یک توزیع زاویه ای گاوسی مترام برای خروج آن ها

۳. طراحی صفحات آشکارسازی میون

در این مرحله هدف ما یافتن یک پیکربندی بهینه برای صفحات سوسوزن پلاستیکی است تا با دقت مطلوبی مکان فرود میون را تعیین نماید. طراحی اولیه این صفحات بر اساس پژوهش‌هایی که در گذشته در این زمینه صورت گرفته انجام می‌شود [۱۰]. برخی از پارامترهای این صفحات از قبیل ضخامت صفحه سوسوزن پلاستیکی، قطر لامپ‌های تکثیرگر فوتون، زبری صفحه، ضریب شکست قسمت‌های مختلف و ضریب بازتابندگی لایه‌های بازتابنده که در شبیه‌سازی اولیه در نظر گرفته شد، در گذشته بهینه‌سازی شده است و تنها به بررسی سایر پارامترهای تاثیرگذار در طراحی نهایی یک سیستم رادیوگرافی میون پرداخته می‌شود.

جدول ۱ برخی از این مشخصات را به صورت خلاصه مورد اشاره قرار می‌دهد و در شکل ۳ نمایی شماتیک از این صفحات به نمایش در آمده است.



شکل (۳): نمای شماتیک از صفحه آشکارساز میون با چیدمان مربعی و با فاصله یکنواخت لامپ‌های تکثیرگر فوتون بر روی آن.

جدول (۱): مشخصات طراحی اولیه صفحات آشکارساز میون.

اجزای سیستم آشکارسازی	ابعاد و اندازه‌ها (cm)	پارامترهای نوری
صفحه سوسوزن از جنس BC-408	۱۰۰*۱۰۰*۱/۲۷	بهره نوری: ۱۰۰۰۰ فوتون به ازای هر MeV طول تضعیف نور: ۳۸۰ سانتی متر ضریب شکست: ۱/۵۸
سطوح بالا و پایین: ۱۰۰*۱۰۰	سطوح سیاه جانی: ۱۰۰*۱/۲۷	زبری: ۳ ضریب بازتابش سیاه: ۰/۰۷۵
لایه‌های بازتابنده: ۱۰۰*۱۰۰*۳	فاصله هوایی با صفحه سوسوزن: ۰/۰۱	ضریب بازتابش: ۰/۹۸
چیدمان: مربعی	قطر لامپ‌ها: ۲/۵۴	ضریب شکست: ۱/۵۵
لامپ‌های تکثیرگر فوتون	فاصله لامپ‌ها: ۲۵	بهره تولید فوتوالکترون: ۲۵٪
ضخامت لایه تطابق نوری: ۰/۰۲	تطابق نوری: ۰/۰۲	ضریب شکست لایه تطابق نوری: ۱/۵۲

با توجه به اینکه کد محاسباتی Geant4 در چند بخش مختلف ورودی شبیه‌سازی را دریافت می‌نماید، در ادامه چشمه، هندسه، مواد تشکیل دهنده و فیزیک شبیه‌سازی به صورت مجزا برای طراحی اولیه ارائه می‌شود.

۱.۳. چشمه

با توجه به سیستم اولیه پیشنهادی مکانیزم تعیین مکان فرود میون بر روی صفحه آشکارساز به صورت میانگین هندسی لامپ‌های تکثیرگر فوتون با توجه به شمارش تعداد فوتون‌های نوری در هر لامپ می‌باشد. به عبارت دیگر مجموع حاصل ضرب مختصات هر لامپ در تعداد فوتون‌های نوری شمارش شده در آن، تقسیم بر تعداد کل فوتون‌های نوری شمارش شده در همه لامپ‌ها، مختصات مکان فرود میون را برای ما مشخص می‌نماید.

بنابراین تعیین مکان فرود میون در سیستم پیشنهادی بر شمارش در هریک از لامپ‌های تکثیرگر فوتون استوار است که این خود وابسته به تعداد فوتون نوری تولید شده در صفحه سوسوزن می‌باشد و این تعداد نیز تقریباً مستقل از زاویه و انرژی میون فرودی است.

از آنجایی که در شبیه‌سازی اولیه هدف محاسبه دقت مکان فرود میون است، بنابراین در طراحی و ارزیابی دقت اولیه، علاوه بر انرژی، زاویه فرود میون نیز ثابت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین چشمه مورد استفاده در شبیه‌سازی، یک چشمه صفحه‌ای با توزیع زاویه‌ای یکنواخت است که میون را در جهت عمود بر صفحات سوسوزن و با انرژی ثابت ۴ گیگا الکترون‌ولت که معادل انرژی متوسط میون در سطح دریاست، تولید می‌نماید.

با توجه به اینکه ابعاد صفحات سوسوزن یک متر مربع است، سطح چشمه نیز به مساحت یک مترمربع در نظر گرفته شد. در توضیح علت استفاده از چشمه صفحه‌ای این نکته را باید اضافه نمود که اولاً از آنجا که منشأ تولید میون‌های ثانویه کیهانی در ۱۵ کیلومتری سطح زمین و در جو می‌باشد، پس لایه کروی جو زمین برای نقاط متناظر روی کره زمین به مثابه یک صفحه مسطح است و ثانیاً اینکه صفحه‌ای، کروی، پوسته‌ای و یا

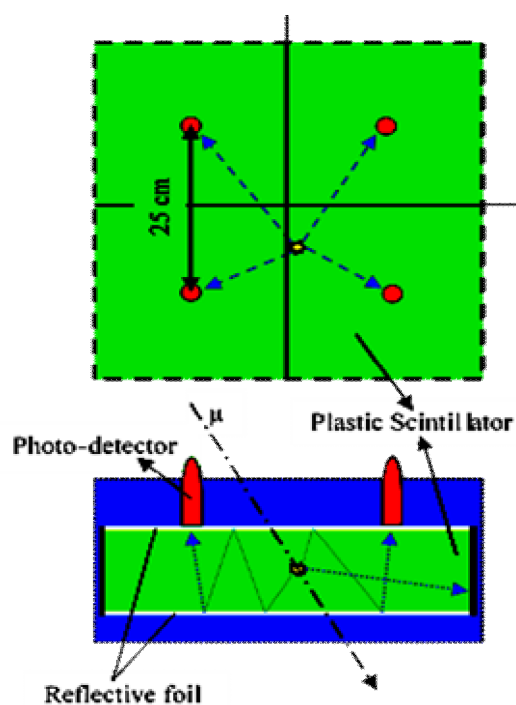
نقطه‌ای بودن چشمه تأثیری در اعمال توزیع زاویه‌ای و انرژی نخواهد داشت چرا که مقصود ما از چشمه، فضایی است که میون‌ها با توزیع زاویه‌ای و انرژی مشخص از آن خارج شده و به سمت صفحات و جسم مورد نظر حرکت می‌کنند.

۲.۳. هندسه

مطابق شکل ۳ در طراحی اولیه، صفحات آشکارساز میون به شکل مربع به مساحت یک مترمربع شامل سه لایه بازتابنده ورودی، صفحه سوسوزن پلاستیکی میون و بازتابنده خروجی در نظر گرفته شده به طوری که ۱۶ عدد لامپ تکثیرگر فوتون بر روی آن تعبیه گردیده است. بین صفحه سوسوزن پلاستیکی و دو صفحه بازتابنده یک لایه هوایی به ضخامت ۰/۱ میلی-متر تعبیه شده است. لامپ‌های تکثیرگر فوتون به صورت یکنواخت و مربعی و با فاصله مرکز تا مرکز ۲۵ سانتی‌متر بر روی صفحه سوسوزن قرار گرفته‌اند. فاصله مرکز لامپ‌های تکثیرگر کناری از لبه صفحه ۱۲/۵ سانتی‌متر است. قطر لوله لامپ‌های تکثیرگر فوتون برابر با ۲/۵۴ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. برای ایجاد تطابق نوری بهتر بین هر لامپ تکثیرگر فوتون و صفحه سوسوزن پلاستیکی، یک لایه ژل به ضخامت ۰/۲ میلی‌متر و با ضریب شکست ۱/۵۲ قرار داده شده است. ضخامت صفحات سوسوزن برابر با ۱/۲۷ سانتی‌متر و ضخامت لایه بازتابنده ورودی میون فرودی بر صفحه که لامپ‌های تکثیرگر نیز در این سمت قرار می‌گیرند برابر با ۶ سانتی‌متر و نیز ضخامت لایه خروجی میون برابر با ۳ سانتی‌متر می‌باشد.

صفحات جانبی ورقه‌های سوسوزن به صورت صفحات زیر پوشیده شده با مواد سیاه می‌باشد. علت استفاده از این لایه‌های زیر سیاه، جذب و جلوگیری از بازتابش مجدد فوتون‌های نوری در هنگام برخورد به لبه‌های انتهایی سوسوزن است. در صورتی که فوتون به لبه‌های جانبی برخورد نموده و

حاکم بر آن استخراج می‌شود. بنابراین با داشتن تابع حاکم بر اختلاف محل فرود میون و نیز میزان انحراف معیار آماری در هر نقطه، می‌توان محل فرود واقعی میون را شناسایی نمود. شکل ۴ بصورت جزئی نمای بخشی از صفحات آشکارساز میون را نمایش می‌دهد.



شکل (۴): نمای شماتیک قسمت مرکزی صفحه آشکارساز میون و لایه‌های مختلف این صفحه.

۳.۳. مواد تشکیل دهنده

مهم‌ترین ماده مورد استفاده در طراحی و شبیه‌سازی صفحات آشکارساز میون، ماده به‌کار رفته در سوسوزن‌های پلاستیکی است. آنچه به‌عنوان ماده سوسوزن در شبیه‌سازی اولیه این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، ماده سوسوزن BC-408 با بهره نوری حدود ۱۰۰۰۰ فوتون به ازای هر مگاالکترون‌ولت می‌باشد که در رابطه با مشخصات و ویژگی‌های آن در جدول ۱ توضیحاتی ارائه شده است.

مجدداً به داخل صفحه آشکارساز بازگردد و در یکی از لامپ‌های تکثیرگر فوتون مورد شناسایی قرار گیرد، معادل این است که یک فوتون نوری از صفحه جانبی وارد آشکارساز شده است، در صورتی که محل تولید این فوتون در نقطه فرود میون است، از این رو با جلوگیری از بازگشت فوتون‌های نوری از لبه‌های جانبی، دقت شناسایی مکان تولید فوتون افزایش می‌یابد. البته جذب بخشی از فوتون‌های نوری در لبه‌های صفحات آشکارساز باعث کاهش دقت شناسایی مکان فرود میون و الگوریتم مورد استفاده در این سیستم می‌گردد، اما این کاهش دقت ناچیز بوده و با توجه به نکته ذکر شده، در نظر گرفتن سطوح سیاه جانبی برای جلوگیری از بازگشت میون‌های کیهانی امری اجتناب‌ناپذیر است. صفحات سوسوزن دارای سطوح زبری هستند که میزان این زبری برابر با ۳ می‌باشد. با توجه به هندسه سیستم آشکارسازی، در شناسایی محل دقیق فرود میون علاوه بر انحراف معیار ناشی از خاصیت آماری تولید میون، هرچه محل برخورد میون با صفحه آشکارساز از مرکز مختصات فاصله بگیرد یک اختلاف در شناسایی محل فرود میون وجود دارد که ناشی از الگوریتم مرکزگرای مورد استفاده و خطای آن در شناسایی محل فرود میون است. برای کاهش این اختلاف در محل دقیق فرود میون نسبت به نقطه شناسایی شده توسط کد، لازم است که این اختلاف به صورت تجربی در نقاط مختلف به‌دست آمده و معادله حاکم بر آن استخراج گردد.

از آنجا که این مرحله از شبیه‌سازی به صورت اولیه انجام شده و پارامترهای آن در ادامه بهینه خواهند شد، تنها برای دستیابی به یک اطلاع کلی از میزان و پراکندگی این اختلاف، با تاباندن میون در فواصل مختلف در بازه‌های ۵ سانتی‌متری، این میزان اختلاف را در نقاط تابش میون بدست آورده و معادله

یونیزاسیون مکانیزم اصلی افت انرژی میون‌های کیهانی است، بنابراین برهمکنش‌های محدودی در هنگام عبور میون از ماده رخ می‌دهد. با این وجود جهت افزایش دقت کار از تمامی کلاس‌های موجود در مرجع FTFP_BERT کد محاسباتی Geant4 برای شبیه‌سازی برهمکنش‌های میون استفاده شده است. این کلاس‌ها شامل پراکندگی چندگانه کولنی، یونیزاسیون، تابش ترمزی میون، تولید زوج، تابش چرنکوف، تولید فوتون نوری در سوسوزن، جذب فوتون نوری، بازتابش و برهمکنش میون و فوتون با هسته اتم می‌باشد.

۴. دقت آماری شبیه‌سازی انجام شده در Geant4

در هر کد مونت کارلو، تعداد ذرات و یا تعداد برهمکنش‌های ردیابی شده توسط کد، در دقت نتیجه حاصل تأثیرگذار است. از این رو پیش از هرگونه استفاده از نتایج شبیه‌سازی انجام شده، باید دقت داده‌های حاصل توسط کد را با افزایش تعداد ذرات ردیابی شده به مقدار پایداری رسانده و تعداد ذره نهایی جهت ردیابی برای کلیه مراحل شبیه‌سازی را بدست آورد.

برای این کار انحراف معیار شناسایی مکان فرود میون در راستای x و y را برای 10000 ، 100000 ، 500000 و 1000000 میون فرودی در نقطه $(0,0)$ در سه اجرای مختلف از طریق شبیه‌سازی اولیه انجام شده به دست آورده و با مقایسه این مقادیر مشخص گردید که با ردیابی بیش از 1000000 ذره میون در سیستم شبیه‌سازی شده یک دقت مطلوب از طریق روش مونت کارلوی مورد استفاده حاصل می‌شود (جدول ۲).

بنابراین از این پس تمامی اجراهای شبیه‌سازی انجام شده جهت بهینه‌سازی صفحات آشکارساز را با ردیابی 1000000 ذره میون انجام می‌دهیم.

در مراحل بعدی تحقیق از مواد سوسوزن دیگر مناسب برای آشکارسازی میون مانند BC-412 و BC-416 استفاده خواهد شد.

دو لایه بازتابنده از جنس 3M Vikuiti ESR با ضریب بازتابش $0/98$ جهت بازگرداندن فوتون‌های نوری به محیط سوسوزن پلاستیکی و جلوگیری از خروج آن‌ها، در دو سمت ورودی و خروجی صفحات سوسوزن بکار رفته است. ضریب بازتابش پوشش سیاه به کار رفته در سطوح جانبی صفحات سوسوزن برابر با $0/075$ می‌باشد که کاربرد آن جذب فوتون‌های نوری رسیده به این سطوح است.

ماده مورد استفاده در لامپ‌های تکثیرگر فوتون ماده‌ای شفاف است بطوریکه به راحتی فوتون‌های نوری از آن عبور می‌کنند. در شبیه‌سازی انجام شده تعداد فوتون‌های اولیه که وارد هر لامپ تکثیرگر فوتون می‌گردد مورد شمارش قرار می‌گیرد و عملاً از بهره تولید فوتوالکترون توسط این لامپ‌ها استفاده نمی‌شود. البته می‌توان یادآور شد که فوتون‌های ورودی به محیط لامپ‌های تکثیرگر فوتون، با احتمال 25 درصد به فوتوالکترون تبدیل می‌گردند.

ضریب شکست مواد سوسوزن مناسب برای آشکارسازی میون برابر $1/58$ و ضریب شکست لامپ‌های تکثیرگر فوتون برابر $1/55$ می‌باشد. ضریب شکست ماده مورد استفاده جهت ایجاد تطابق نوری بین صفحات سوسوزن و لامپ‌های تکثیرگر فوتون برای افزایش احتمال عبور فوتون رسیده به سطح لامپ برابر $1/62$ می‌باشد. فضای داخل حجم جهان نیز از هوا پر شده است.

۴.۳. برهمکنش‌های میون درون سیستم آشکارسازی

اساس این پژوهش استفاده از پراکندگی چندگانه میون در عبور از اجسام با عدد اتمی بالا می‌باشد. از طرف دیگر

عبور از جسم مورد تصویربرداری در سیستم رادیوگرافی نهایی، از مسیر اولیه خود منحرف شده و با زاویه متفاوتی به صفحه آشکارساز پس از جسم وارد می‌شود، بررسی دقت صفحات آشکارسازی در زوایای مختلف دارای اهمیت است.

در این راستا تنها زوایای فرود کم‌تر از مقدار ۴۵ درجه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ارزیابی دقت در زوایای ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه صورت گرفته بدین صورت است که میزان انحراف معیار هر آشکارسازی با زاویه متفاوت را در نقطه (۰،۰) به دست آورده و بهترین زاویه آشکارسازی صفحات نسبت به سطح افق انتخاب نمود. در این مرحله از شبیه‌سازی توزیع زاویه‌ای میون اعمال می‌شود تا نتایج با دقت بالاتری مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳.۵. چیدمان و پیکربندی لامپ‌های تکثیرگر فوتون

پس از بررسی نوع ماده سوسوزن پلاستیکی، چیدمان‌های مختلف لامپ‌های تکثیرگر فوتون جهت آشکارسازی میون بررسی می‌شوند و برای حالتی که این لامپ‌ها به صورت مربعی یکنواخت، هشت ضلعی منتظم و مربع با مرکز لوزی بر روی صفحه قرار گرفته باشند، میزان دقت شناسایی مکان فرود میون در سه نقطه (۰،۰)، (۱۲،۰) و (۰،۱۸) و یک نقطه مهم دلخواه روی هر چیدمان بررسی و مقایسه می‌گردد. لازم به ذکر است که در انتخاب چیدمان لامپ‌های تکثیرگر فوتون سه عامل تقارن مرکزی، افقی و عمودی، ثابت بودن تعداد لامپ‌ها و نیز ثابت بودن هندسه مربعی صفحات سوسوزن به مساحت یک مترمربع باید لحاظ گردد. علت بررسی چیدمان‌های مطرح شده نیز رعایت این دو نکته بوده است.

شکل‌های ۵ و ۶ نمای شماتیک از چیدمان مربع با مرکز لوزی و چیدمان هشت ضلعی منتظم را نمایش می‌دهد.

جدول (۲): نتایج حاصل از بررسی دقت روش مونت کارلو مورد استفاده در شمارش‌های مختلف.

انحراف معیار مقادیر (cm)	تعداد میون ردیابی شده
۰/۱۰۰۸	۱۰۰۰
۰/۰۳۹۲	۱۰۰۰۰
۰/۰۱۹۷	۵۰۰۰۰
۰/۰۰۱۳۶	۱۰۰۰۰۰
۰/۰۰۱۳۱	۱۵۰۰۰۰
۰/۰۰۱۱۴	۲۰۰۰۰۰

۵. بهینه‌سازی پارامترهای صفحه آشکارسازی میون

با توجه به پارامترهای مؤثر در تغییر دقت صفحات آشکارسازی میون، برخی از پارامترهای مهم که در مقالات قبلی به آن‌ها پرداخته نشده است مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱.۵. ماده سوسوزن مورد استفاده در آشکارساز

همان‌طور که گفته شد تنها از سه ماده سوسوزن BC-408، BC-412 و BC-416 می‌توان برای آشکارسازی میون استفاده نمود. بنابراین در طراحی اولیه، ماده سوسوزن تعریف شده را با دو نمونه دیگر جایگزین نموده و میزان انحراف معیار یا دقت در سه نقطه (۰،۰)، (۱۲،۰) و (۰،۱۸) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و با مقایسه نتایج حاصل بهترین ماده را برای آشکارسازی میون با دقت مکانی مناسب انتخاب می‌شود. البته توجه به هزینه و قیمت استفاده از هر یک از این سوسوزن‌ها قطعاً می‌تواند در تصمیم نهایی تأثیرگذار باشد.

۲.۵. تأثیر زاویه قرارگیری صفحه در دقت آشکارسازی

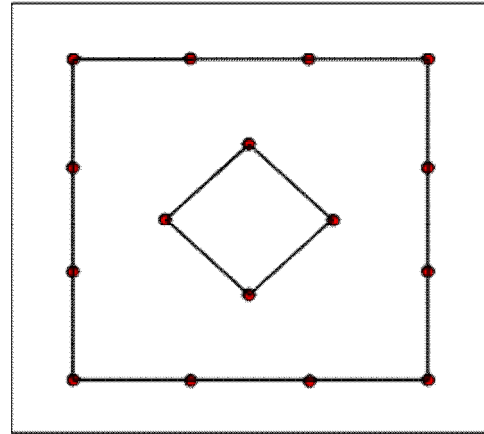
با توجه به اینکه میون فرودی به سطح زمین، دارای توزیع زاویه‌ای مشخصی است و نیز از این جهت که میون در اثر

پس از مشخص شدن بهترین چیدمان با توجه به محدودیت های ذکر شده، قدری محل قرارگیری لامپ های تکثیرگر فوتون با توجه به نتیجه حاصل از بررسی انحراف معیار در فواصل ۵ سانتی متری تغییر داده و از مرکز دور می شود تا شاید دقت بهتری حاصل شود. در این چیدمان نیز در سه نقطه $(0,0)$ ، $(0,18)$ و $(12,0)$ میزان انحراف معیار را محاسبه نموده و با انحراف معیار چیدمان مربعی یکنواخت در همان نقاط مقایسه می شود. حال جهت افزایش دقت تشخیص مکان فرود میون، مجدداً دقت فرود میون در نقاط مختلف صفحه نهایی را با فرود میون در فواصل یک سانتی متری بر روی آن ارزیابی نموده و تابع حاکم بر اختلاف شناسایی مکان فرود میون و مکان واقعی فرود آن به دست می آید. با انجام این کار می توان مکان فرود میون را با دقت حدود یک سانتی متر در هر نقطه ای از آشکارساز به جز محل قرارگیری لامپ های تکثیرگر فوتون به دست آورد.

۶. نتایج

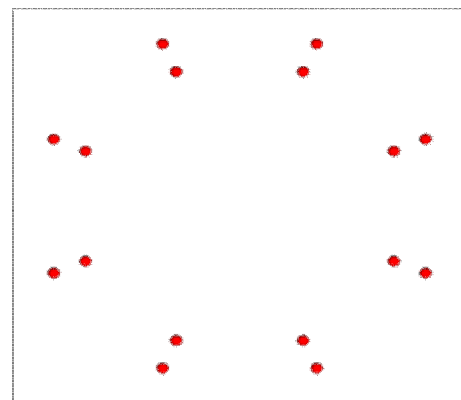
۱.۶. نتایج حاصل از شبیه سازی اولیه

با تابش میون در سه نقطه مشخص از صفحه آشکارساز اولیه با مشخصاتی که در بخش قبل و در جدول ۱ به آن اشاره شد، بر اساس پارامترهای تعریف شده برای کد، نتایجی به دست می آید که برای ارزیابی دقت شناسایی مکان فرود میون در صفحه آشکارساز به عنوان خروجی شبیه سازی تعریف شده اند. از جمله این پارامترها میزان پراکندگی در محل شناسایی فرود میون و تفاوت نقطه شناسایی فرود با محل دقیق و واقعی فرود میون است. برخی از این پارامترها را در شبیه سازی اولیه استخراج نموده و در جدول ۳ به آن اشاره شده است. همچنین در ادامه نمودار توزیع پراکندگی نقاط حاصل از آشکارسازی و شناسایی مکان فرود میون های کیهانی



شکل (۵): چیدمان مربع با مرکز لوزی لامپ های تکثیرگر فوتون.

برای ارزیابی و مقایسه بهتر هر یک از پیکربندی ها میزان انحراف معیار را مجدداً در فواصل ۵ سانتی متری بدست آورده و سپس میانگین این انحراف معیارها در نقاط مختلف به عنوان ملاک ارزیابی و مقایسه چیدمان ها در نظر گرفته می شود، چرا که هر پیکربندی که مقدار میانگین انحراف معیار شناسایی مکان فرود میون در آن کم تر باشد، از یکنواختی و دقت بالاتری برخوردار است. البته پیکربندی های دیگری نیز می توان برای چیدمان لامپ های تکثیرگر فوتون مطرح نمود، اما نتایج پیکربندی های بررسی شده نشان می دهد که برای ایجاد یکنواختی در دقت سیستم آشکارسازی در تمام نقاط، باید لامپ های تکثیرگر فوتون به صورت یکنواخت بر روی صفحه سوسوزن قرار گیرند و در بین تمامی چیدمان ها، چیدمان مربعی یکنواخت ترین شکل هندسی را دارد.



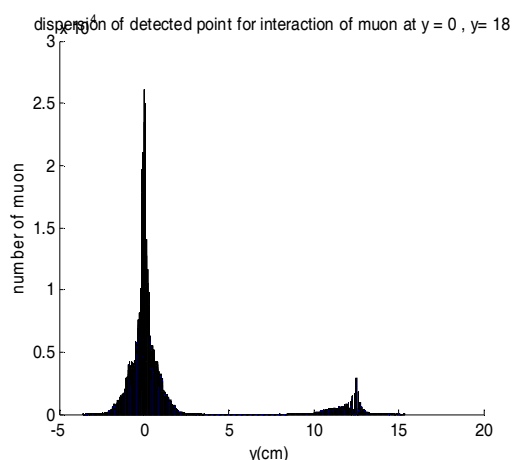
شکل (۶): چیدمان هشت ضلعی لامپ های تکثیرگر فوتون.

جدول (۳): تابش میون در نقاط مشخص از صفحه آشکارسازی اولیه.

پارامتر اندازه‌گیری شده			مقادیر پارامتر (cm)		
نقطه فرود میون‌ها			(۰،۰)	(۱۲،۰)	(۰،۱۸)
متوسط نقاط حاصل از آشکارساز در راستای X			-۰/۰۰۳۳	۸/۷۷۰۰	۰/۰۰۵۵
متوسط نقاط حاصل از آشکارساز در راستای Y			۰/۰۰۰۳	-۰/۰۰۲۵	۱۱/۶۰۰۰
اختلاف متوسط نقاط حاصل از آشکارسازی با نقطه واقعی فرود میون					
در راستای X			۰/۰۰۳۳	۳/۲۲۹۰	۰/۰۰۵۵
اختلاف متوسط نقاط حاصل از آشکارسازی با نقطه واقعی فرود میون					
در راستای Y			۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۲۵	۳/۳۹۱۰
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط در راستای X					
X			۰/۸۱۳۹	۰/۸۷۵۹	۰/۸۵۱۵
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط در راستای Y					
Y			۰/۸۱۸۸	۰/۸۶۷۷	۰/۸۷۵۳
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط بر اساس مدل گاوسی					
در راستای X			۱/۳۷۱۰	۱/۳۲۰۰	۱/۴۲۹۰
و رابطه انتشار خطا در راستای X					
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط بر اساس مدل گاوسی					
در راستای Y			۱/۳۷۱۰	۱/۳۹۱۰	۱/۳۹۲۰
و رابطه انتشار خطا در راستای Y					

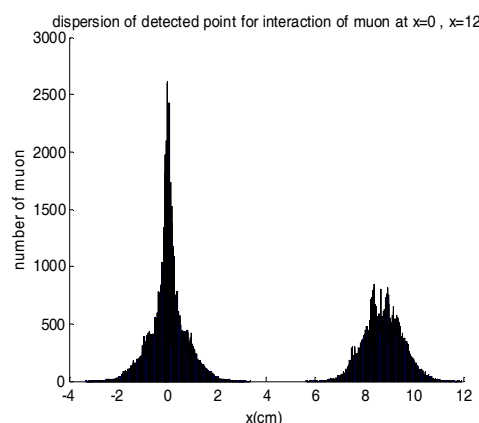
در هریک از سه نقطه تابش مذکور مشاهده می‌گردد. آنچه از تصویر قابل مشاهده است، میزان پراکندگی نقاط شناسایی شده از مقدار متوسط و نیز اختلاف محل فرود واقعی از محل شناسایی شده توسط سیستم آشکارساز است. مشاهده می‌گردد که هرچه محل تابش میون از مرکز مختصات فاصله بگیرد، میزان اختلاف شناسایی مکان فرود میون‌ها از مکان واقعی تابش و پراکندگی در نقطه مورد نظر افزایش می‌یابد.

با توجه به داده‌های حاصل از شبیه‌سازی اولیه در جدول ۳ و نیز شکل‌های ۷ و ۸، مشاهده می‌گردد که در اثر تابش میون در مرکز مختصات، سیستم آشکارسازی شبیه‌سازی شده نیز خروجی حاصل را در این نقطه نشان می‌دهد و با فاصله گرفتن از مرکز مختصات، نمودار مربوط به محل تابش میون پراکندگی بیش‌تری داشته و نسبت به نقطه واقعی تابش، به سمت مرکز مختصات متمایل است که این نیز با توجه به الگوریتم مرکز‌گرایی مورد استفاده و میانگین‌گیری روی فوتون‌های شمارش شده در همه لامپ‌های تکثیرگر فوتون و نیز فوتون‌های جذب شده در لبه‌های کناری صفحات آشکارساز میون طبیعی به نظر می‌رسد. از این‌رو می‌توان شبیه‌سازی اولیه انجام شده را مورد تأیید قرار داد. بعلاوه با مقایسه داده‌های اولیه با نتایج حاصل از سایر مقالات نیز صحت شبیه‌سازی اولیه صفحات آشکارسازی میون مشخص می‌گردد.



شکل (۸): مقایسه توزیع پراکندگی حاصل از تابش میون در دو نقطه

$$. y = 18 \text{ و } y = 0$$



شکل (۷): مقایسه توزیع پراکندگی حاصل از تابش میون در دو نقطه

$$. x = 12 \text{ و } x = 0$$

۲.۶. ماده سوسوزن مورد استفاده

میون به دست آمد و دلیل آن تمرکز بالای شار میون در اطراف زاویه سمت رأس می باشد.

البته اختلاف در دقت بسیار ناچیز است به نحوی که می توان از تغییر زاویه صفحات آشکارسازی صرف نظر نمود. لازم بذکر است در صورتی که چشمه به صورت واقعی شبیه سازی شده باشد، تغییر زاویه سمت رأس نسبت به زاویه قطبی که عمود بر آن، تغییر زاویه اتفاق می افتد، دارای اهمیت خواهد بود. نتایج حاصل از این بخش از پژوهش در جدول ۵ ارائه شده است.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می گردد، آشکارسازی میون به وسیله سوسوزن پلاستیکی BC-408 در هر دو راستای X و Y با دقت بیشتری صورت می پذیرد اما نکته حائز اهمیت این است که اختلاف مقادیر در سه سوسوزن مختلف به حدی است که اگر جنبه اقتصادی انجام پروژه درجه اهمیت بالایی داشته باشد، حتی می توان از سوسوزن BC-416 هم استفاده نمود، چرا که این سوسوزن از نظر اقتصادی به صرفه تر و از نظر دقت هم اختلاف چشم گیری با دو سوسوزن دیگر ندارد.

جدول (۵): تابش میون در نقطه مبدأ مختصات با زاویه صفحه آشکارساز مشخص.

مقادیر پارامتر (cm)				
نقطه فرود میون ها: (۰،۰)				
زاویه فرود میون ها (درجه)				
۵	۱۰	۱۵	۳۰	۴۵
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط در راستای X				
۰/۸۰۸۶	۰/۷۷۴۰	۰/۸۰۰۱	۰/۸۲۰۴	۰/۹۸۰۵
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط در راستای Y				
۰/۸۰۲۴	۰/۷۷۵۷	۰/۸۰۳۶	۰/۸۲۴۶	۰/۹۹۶۶

جدول (۴): مقایسه دقت آشکارسازی مکان فرود میون برای سوسوزن های مختلف.

مقادیر پارامتر	مقادیر پارامتر	مقادیر پارامتر	
(cm)	(cm)	(cm)	
(۰،۰)	(۱۲،۰)	(۰،۱۸)	نقطه فرود میون ها
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط در راستای X			
۰/۸۱۳۹	۰/۸۳۵۹	۰/۸۳۱۵	BC-408
۰/۸۵۳۶	۰/۸۶۸۵	۰/۸۶۸۱	BC-412
۰/۸۶۴۵	۰/۸۷۹۰	۰/۸۶۴۵	BC-416
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط در راستای Y			
۰/۸۱۸۸	۰/۸۳۷۷	۰/۸۹۵۳	BC-408
۰/۸۵۱۰	۰/۸۶۲۰	۰/۹۰۳۱	BC-412
۰/۸۶۳۱	۰/۸۷۴۹	۰/۹۲۲۸	BC-416

۴.۶. چیدمان لامپ های تکثیر گر فوتون

طبق جدول های ۶ و ۷ می توان گفت که بهترین و یکنواخت ترین چیدمان لامپ های تکثیر گر فوتون، چیدمان مربعی با فواصل یکنواخت است که به طور میانگین نسبت به سایر چیدمان های بررسی شده پاسخ دقیق تری برای مکان فرود میون می دهد.

۳.۶. تأثیر زاویه قرار گیری صفحه در دقت آشکارسازی

با مقایسه دقت آشکارسازی صفحات در مبدأ مختصات، در زوایای ۴۵، ۳۰، ۱۵، ۱۰، ۵ و زاویه صفر درجه، مشاهده شد که دقت با تغییر زاویه قرار گیری صفحه تغییر یا کاهش محسوسی ندارد و حتی در مواردی افزایش می یابد. بهترین دقت بصورت نسبی در زاویه ۱۰ درجه صفحه آشکارسازی

جدول (۶): تأثیر چیدمان لامپ‌های تکثیرگر فوتون در دقت

آشکارسازی مکان فرود میون.

مقادیر	مقادیر	مقادیر	مقادیر	
پارامتر	پارامتر	پارامتر	پارامتر	
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	
نقطه	(۰،۰)	(۱۲،۰)	(۰،۱۸)	نقطه فرود میون‌ها
دلخواه				
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط در راستای X				
۱/۳۳۴	۱/۳۲۵	۱/۲۳۹	۱/۶۷۱	هشت ضلعی منتظم
۰/۸۱۸۸	۰/۵۲۰۱	۰/۲۹۰۷	۰/۹۸۷۱	مربع با مرکز لوزی
۱/۱۱۸	۰/۹۹۲۱	۰/۹۹۰۶	***	مربع غیر یکنواخت
۰/۸۱۳۹	۰/۸۷۵۹	۰/۸۵۱۵	***	مربع یکنواخت
انحراف معیار نقاط آشکارسازی شده از مقدار متوسط در راستای Y				
۱/۳۳۲	۱/۳۹۱	۱/۲۵۸	۱/۶۷۲	هشت ضلعی منتظم
۰/۸۱۸۹	۰/۴۶۷۴	۰/۳۱۰۲	۰/۹۸۸۲	مربع با مرکز لوزی
۱/۱۱۹	۱/۰۲۲	۰/۹۸۷۳	***	مربع غیر یکنواخت
۰/۸۱۸۸	۰/۸۶۷۷	۰/۸۷۵۳	***	مربع یکنواخت

جدول (۷): مقایسه مقادیر میانگین انحراف معیار در نقاط مختلف

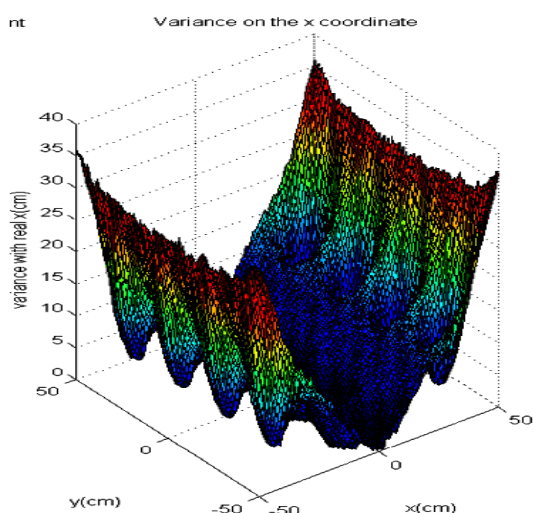
صفحات آشکارسازی در چیدمان‌های مختلف.

چیدمان مورد استفاده	میانگین انحراف معیار در راستای X	میانگین انحراف معیار در راستای Y
هشت ضلعی منتظم	۰/۹۹۰۶۶	۰/۹۹۳۱۵
مربع با مرکز لوزی	۰/۹۰۸۱۶	۰/۹۰۴۳۰
مربع یکنواخت	۰/۹۰۵۲۸	۰/۹۰۲۴۹
مربع غیر یکنواخت	۰/۹۴۵۲۳	۰/۹۶۲۱۵

۵.۶. معادله حاکم بر اختلاف مکان واقعی فرود میون و

مکان شناسایی شده

با تابش میون در فواصل یک سانتی متری صفحه آشکارساز سوسوزن پلاستیکی BC-408 با چیدمان مربعی یکنواخت لامپ‌های تکثیرگر فوتون، رویه‌ای سه‌بعدی مانند شکل ۷ حاصل می‌گردد که معادله حاکم بر میزان اختلاف محل فرود واقعی میون و محل فرود شناسایی شده توسط سیستم آشکارسازی پیشنهادی طبق رابطه ۱ از آن استخراج می‌گردد. از این رابطه می‌توان در سیستم رادیوگرافی میون جهت استخراج محل فرود واقعی از روی محل فرود شناسایی شده استفاده کرد.



شکل (۷): نمودار میزان انحراف معیار در نقاط مختلف صفحه

آشکارساز میون حاصل از تابش در فواصل یک سانتی متری از صفحه آشکارساز با چیدمان مربعی یکنواخت.

$$\begin{aligned}
 f(x, y) = & 11280 - 0.0153x + 0.0242y + 9.8160x^2 \\
 & - 0.0257xy - 1.5630y^2 - 0.0098x^2y \\
 & + 0.0074xy^2 - 0.0078y^3 + 0.7023x^2y^2 \\
 & + 0.019lx^3 + 0.8152y^4
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

۷. بحث در نتایج

آنچه در این پژوهش انجام گرفت، مقدمه‌ای بود برای استفاده از صفحات آشکارسازی میون در یک سیستم رادیوگرافی میون و هریک از مراحل انجام کار به این دلیل صورت پذیرفت که نشان داده شود می‌توان از پیکربندی ارائه شده برای صفحات، برای آشکارسازی میون با دقت مکانی مطلوب استفاده نمود. از آنجایی که رادیوگرافی و ساخت تصویر یک جسم در سیستم رادیوگرافی به دقت تشخیص مکان فرود میون در هر آشکارساز بستگی دارد، ابتدا با بررسی حالات مختلف برخی از پارامترهای مؤثر در این دقت، بهترین حالت را برای پارامترهای مورد بررسی انتخاب شد. حال می‌توان این صفحات آشکارسازی را به شیوه معمول سیستم‌های رادیوگرافی میون مورد استفاده قرار داد.

همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد، برخی از پارامترهای صفحات آشکارسازی در کارهای قبلی و برخی نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند و با گذراندن این مرحله پیکربندی ساده این صفحات به صورت کمی و کیفی به بهترین شکل تعیین گردید. نوع سوسوزن مورد استفاده و چیدمان لامپ‌های تکثیرگر فوتون بر روی این سوسوزن‌ها از مهم‌ترین مواردی بود که مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که سوسوزن BC-408 دقیق‌ترین پاسخ و پیکربندی لامپ‌های تکثیرگر فوتون به صورت مربعی و با فاصله یکسان حتی بهتر

از پیکربندی هگزاگونال، یکنواخت‌ترین و کم‌خطاترین پاسخ را نقاط مختلف صفحه به ما می‌دهد. در ادامه کار نیز با بررسی و شبیه‌سازی آشکارسازی میون در نقاط مختلف صفحات، توانستیم دقت آشکارسازی مکان فرود میون در کل صفحه را به حدود یک سانتی‌متر برسانیم و این بدان معناست که می‌توان از این سیستم آشکارسازی در رادیوگرافی و تصویرسازی نیز استفاده نمود.

نکته قابل توجه در این سیستم سادگی و هزینه پایین ساخت آن می‌باشد که در مقایسه با سیستم‌های جدید رادیوگرافی میون، آن را برتری می‌بخشد. البته در کارهایی که دقت بسیار زیاد تصویر رادیوگرافی حاصل از میون ضروریست، استفاده از این سیستم پاسخگو نخواهد بود. اما در امور معمول که شناسایی و اطلاع از وجود ماده مورد تصویربرداری دارای اهمیت است، بسیار کارا و البته از نظر اقتصادی به صرفه خواهد بود. همانطور که در طول روش انجام کار نیز اشاره شد، می‌توان با به‌کارگیری ماده سوسوزن BC-416 بجای BC-408، قدری از دقت سیستم کاست و از نظر اقتصادی صرفه‌جویی نمود.

به‌عنوان پیشنهادی برای کارهای بیش‌تر در این زمینه می‌توان امکان استفاده از این صفحات آشکارسازی را در یک سیستم رادیوگرافی میون بررسی و ساخت تصویری از یک جسم مورد تصویربرداری را ارزیابی نمود.

۸. مراجع

- [1] P. Jenneson. "Large vessel imaging using cosmic-ray muons," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 525 (2004) 346–351.
- [2] K.N. Borozdin, G.E. Hogan, C. Morris, W.C. Priedhorsky, A. Saunders, L.J. Schultz and M.E. Teasdale, "Radiographic Imaging with Cosmic Ray Muons," *Nature* 422 (2003) 277–278.
- [3] S. Pesente, S. Vanini, M. Benettoni, G. Bonomi, P. Calvini, P. Checchia, E. Conti, F. Gonella, G. Nebbia, S. Squarcia, G. Viesti, A. Zenoni and G. Zumerle. "First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 604 (2009) 738–746.
- [4] H. Tanaka, K. Nagamine, S. Nakamura and K. Ishida, "Radiographic measurements of the internal structure of Mt. West Iwate with near-horizontal cosmic-ray muons and future developments," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 555 (2005) 164–172.
- [5] H. Tanaka, K. Nagamine, N. Kwamura, S.N. Nakamura, K. Ishida and K. Shimomura. Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano," *Nucl. Instr. and Meth. A*, 507 (2003) 657–669.
- [6] L. Miramonti, "A plastic scintillator detector for beta particles," *Radiation measurements*, 35 (2002) 347–354.
- [7] M. Hohlmann, P. Ford, K. Gnanvo, J. Helsby, D. Pena, R. Hoch and D. Mitra "GEANT4 simulation of a cosmic ray muon tomography system with micropattern gas detectors for the detection of High-Z materials," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 56 (2009) 1356–1363.
- [8] S. Riggi, P. LaRocca, E. Leonora, D. LoPresti, G.S. Pappalardo, F. Riggi and G.V. Russo, "Geant4 simulation of plastic scintillator strips with embedded optical fibers for a prototype of tomographic system," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 624 (2010) 583–590
- [9] L. J. Schultz, K. N. Borozdin, J. J. Gomez, G. E. Hogan, J. McGill, C. Morris, W.C. Priedhorsky, A. Saunders and M.E. Teasdale. "Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 519 (2004) 687–694.
- [10] P. Aguiar, E. Casarejos, J. Silva-Rodriguez, J. Vilan and A. Iglesias, "Geant4-GATE simulation of a large plastic scintillator for muon radiography," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 62 (2015) 1233–1238.
- [11] W.J. Jo, H.-I. Kim, S.J. An, C.Y. Lee, C.-H. Baek and Y.H. Chung, "Design of a muon tomography system with a plastic scintillator and wavelength-shifting fiber arrays," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 732 (2013) 568–572.
- [12] C. Morris, K. Borozdin, J. Bacon, E. Chen, Z. Lukić, E. Milner, H. Miyadera, J. Perry, D. Schwellenbach, D. Aberle and W. Dreesen. "Obtaining material identification with cosmic ray radiography," *AIP Advances*, 2 (2012) 042128.
- [13] D.E. Groom, M. Aguillar-Benitez and C. Amsler, "Review of particle physics. Particle data group," (2000).
- [14] G.F. Knoll, *Radiation detection and measurement: John Wiley & Sons*, (2010).

