

بررسی رفتار آشکارساز سوسوزن آرایه رصدخانه البرز با روش شبیه‌سازی مونت کارلو در بستر نرم‌افزاری جیانت ۴

مهدی عباسیان مطلق^۱، داود پورمحمد^۱ و یوسف پزشکیان^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۰/۱۱)

چکیده

در رصدخانه البرز از آشکارسازهای سوسوزن به دلیل تفکیک زمانی مناسب استفاده می‌شود. در این پژوهش با کمک کد شبیه‌سازی جیانت ۴، رفتار سوسوزنی این آشکارسازها در قبال عبور الکترونی با انرژی و جهت‌های مختلف بررسی شد. شکل تپ نوری ناشی از فوتون‌های سوسوزنی و مشخصه‌هایی چون تعداد کل فوتون‌ها، زمان صعود و زمان فروافت تپ نوری برای عبور الکترون‌هایی با انرژی‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ مگا الکترون ولت تعیین شدند. تأثیر زاویه فرود و محل برخورد الکترون‌ها با سوسوزن بر مشخصه‌های تپ نوری نیز بررسی شدند.

واژه‌های کلیدی: پرتو کیهانی، آشکارساز سوسوزن، کد جیانت ۴، سوسوزن پلاستیکی

۱. مقدمه

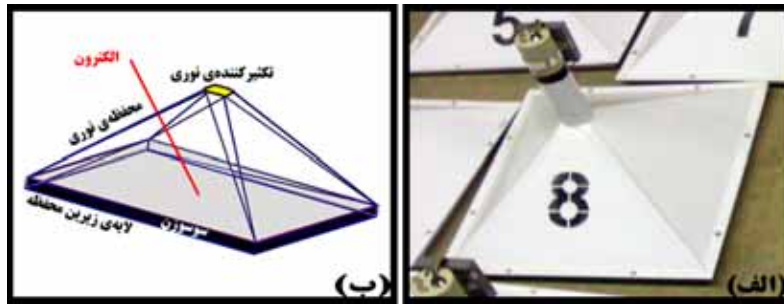
اجرام نجومی مثل ستاره‌ها و ابرنواخترها علاوه بر تابش نور، ذرات باردار پرنانرژی نیز گسیل می‌کنند. ذراتی که در اثر برهم‌کنش‌های هسته‌ای درون این اجرام تولید و به فضای کیهان پرتاب می‌شوند، پرتوهای کیهانی^۱ نامیده می‌شوند. طیف انرژی این ذرات بسیار گسترده است و تا انرژی‌های بالاتر از 10^{20} eV نیز می‌رسد.

از مجموعه ذرات پرنانرژی نامبرده می‌توان به پروتون، هلیوم

و هسته‌های سنگین‌تر مانند کربن و بور تا آهن و ... اشاره کرد. پرتوهای کیهانی کم انرژی، قبل از رسیدن به زمین و در طی عبور از جو، انرژی خود را از دست می‌دهند و به سطح زمین نمی‌رسند، در نتیجه تنها با استفاده از ماهواره‌ها و بالنها قابل آشکارسازی هستند. با افزایش انرژی ذرات، شار آنها کاهش می‌یابد به نحوی که امکان آشکارسازی آنها در بیرون از جو به روش مستقیم از بین می‌رود. در این انرژی‌ها روش‌های غیرمستقیم جایگزین آشکارسازی مستقیم ذرات می‌شود.

ذرات پرنانرژی با مولکول‌های جو برهم‌کنش می‌کنند و انرژی‌شان تلف می‌شود. مهم‌ترین برهم‌کنش‌های این ذرات در

۱. Cosmic Rays (CR)



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) نمونه‌ای از آشکارساز به کار رفته در آرایه رصدخانه البرز، (ب) نمای گرافیکی آشکارساز.

۱ میلی‌متر و لوله تکثیرکننده نوری (پی.ام.تی)^۷ در بالای آشکارساز تشکیل شده است [۵]. آشکارساز به شکل هرم است و در بالای آن پی.ام.تی و در زیر آن سوسوزن مکعب مستطیلی با ارتفاع ۲ سانتی‌متر و عرض و طول ۵۰ سانتی‌متر قرار دارد.

اساس کار این آشکارسازها به این صورت است که با برخورد ذرات بهمن‌های گسترده هوایی به سوسوزن قرار گرفته در زیر محفظه، تعداد بسیار زیادی فوتون تولید می‌شود [۶]. تعدادی از فوتون‌های تولید شده یا به طور مستقیم و یا پس از چندین برخورد با دیواره‌ها به تکثیرکننده نوری موجود در بالای محفظه برخورد می‌کنند و این تکثیرکننده پس از تبدیل فوتون‌ها به الکترون و تکثیر تعداد الکترون‌ها، تپ الکتریکی قابل مشاهده‌ای در خروجی، مثلاً اسیلوسکوپ، تحویل می‌دهد.

بررسی رفتار این آشکارساز در قبال عبور یک ذره باردار، به ویژه الکترون، دارای اهمیت است. به دلایلی که در ادامه ارائه می‌شود، نمی‌توان به سادگی این بررسی را در آزمایشگاه انجام داد. پرتوهای الکترونی ناشی از مولدهایی مانند شتابگرها حاوی تعداد زیادی ذره باردار هستند و لذا نمی‌توانند یک تک ذره به سمت هدف که در اینجا آشکارساز سوسوزن است، شلیک کنند. در این شتابگرها انرژی ذرات در محدوده خاصی است. از طرفی قرار دادن آشکارساز در معرض پرتوهای مذکور در وضعیت‌های مختلف، مشکل و پرهزینه است. لذا با توجه به مشکلات مذکور شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از بهترین راه‌های بررسی رفتار آشکارساز در برابر عبور ذرات در وضعیت‌های مختلف است. جهت بهینه‌سازی ابعاد آشکارساز،

جو را می‌توان اتلاف انرژی در اثر یونش^۱، تابش چرنکوف^۲، تابش ترمزی^۳، و تولید زوج الکترون-پوزیترون^۴ دانست. در نتیجه این برهم‌کنش‌ها بهمنی از ذرات ثانویه تولید می‌شود که بهمن گسترده هوایی^۵ نام دارد. با مطالعه ذرات ثانویه در سطح زمین، می‌توان اطلاعاتی از ذره اولیه ایجادکننده آنها به دست آورد [۱]. با توجه به انرژی ذره اولیه برخی از سازوکارها غالب است و می‌توان از سازوکارهای دیگر چشم پوشید. ذرات ثانویه در سطح زمین به طور عمده فوتون، الکترون، پوزیترون و میون‌ها هستند.

هدف از استفاده از آرایه‌های آشکارساز زمینی، به دست آوردن اطلاعات درباره ذره اولیه، یعنی انرژی، نوع و جهت فرود پرتو کیهانی، است. از آرایه‌های معروف دنیا می‌توان به رصدخانه پیراوزه در آرژانتین و آرایه کاسکاده‌گرانده [۲] در آلمان اشاره کرد. در دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف نیز چند آرایه آشکارساز پرتوهای کیهانی مورد استفاده قرار گرفته است [۳ و ۴]. هم‌اکنون آرایه‌ای شامل ۲۰ آشکارساز که هر یک حاوی صفحات سوسوزن پلاستیکی^۶ به ابعاد ۲×۵۰×۵۰ سانتی‌متر مکعب است، در حال راه اندازی است.

در شکل ۱ تصویر نمونه‌ای از آشکارساز به کار رفته در رصدخانه البرز نمایش داده شده است که از صفحه سوسوزن پلاستیکی، محفظه‌های نوری از جنس ورقه فولادی به ضخامت

۱. ionization loss

۲. Cherenkov radiation

۳. Bremsstrahlung

۴. electron-positron pair

۵. Extensive Air Showers (EAS)

۶. NE102a

۷. Photo Multiplier Tube (PMT)

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی، منطبق بر آشکارسازهای مورد استفاده در آرایه رصدخانه البرز.

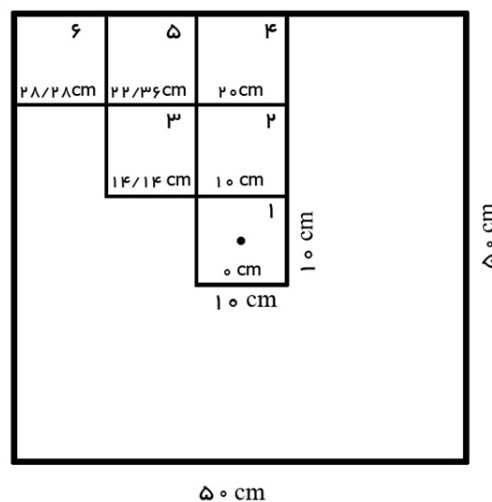
نوع ذره فرودی	الکترون
انرژی ذره	۱۰۰ keV، ۱ MeV، ۱۰ MeV، ۱۰۰ MeV، ۱ GeV
محل برخورد با سوسوزن	در مرکز خانه‌های ترسیم شده در شکل ۲
جهت ذره	زاویه سرسویی θ : ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ زاویه سمتی ϕ : ۰، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰
ابعاد سوسوزن	۲ cm × ۵۰ cm × ۵۰ cm
ارتفاع محفظه	۲۰ cm
نوع سوسوزن	پلاستیکی NE102a-
مشخصات دیواره	جنس: استیل - رنگ: سفید براق

چندین ساله داشته و توسط گروهی از فیزیکدانان هسته‌ای و ذرات بنیادی تهیه شده است، استفاده کردیم. در این مقاله نتایج شبیه‌سازی رفتار آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی مورد استفاده در آرایه ۲۰ تایی دانشگاه صنعتی شریف، با کمک بستر نرم افزاری جیانت ۴ ارائه می‌شود.

۲. شبیه‌سازی آشکارساز سوسوزن

بنابر آنچه گفته شد بستر نرم‌افزاری جیانت ۴ برای شبیه‌سازی آشکارساز سوسوزن پرتوهای کیهانی مورد استفاده قرار گرفت. اساس عملکرد جیانت ۴ در شبیه‌سازی عبور ذره از ماده است [۱۰]. عمده ذرات تشکیل‌دهنده بهمن الکترون‌ها هستند. به همین دلیل الکترون به عنوان ذره فرودی به آشکارساز انتخاب شده است.

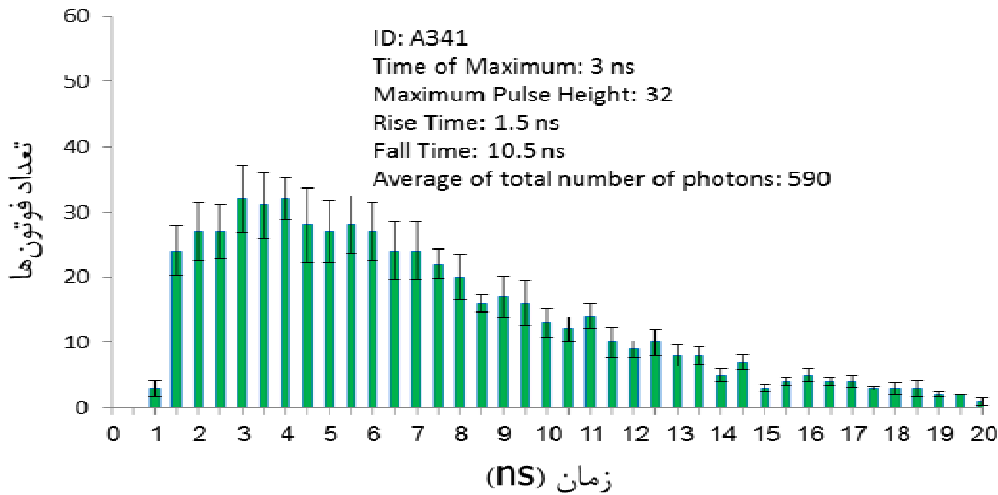
با توجه به جدول ۱، در ۵ انرژی مختلف، در هر انرژی برای ۶ فاصله مختلف نسبت به مرکز سوسوزن، در هر فاصله برای ۷ زاویه سرسویی مختلف و در هر زاویه سرسویی برای ۴ زاویه سمتی مختلف، در کل ۸۴۰ بار، کد شبیه‌سازی به اجرا در آمد. همچنین برای هر یک از ۸۴۰ اجرا با شرایط اولیه متفاوت، ۱۰ بار تکرار و میانگین‌گیری انجام گرفت. در شکل ۱ (ب) تابش الکترون با زاویه سرسویی $\theta=40^\circ$ درجه و زاویه سمتی $\phi=180^\circ$ درجه به مرکز سوسوزن (فاصله صفر سانتی‌متر) نشان داده شده است. در شکل ۲، ۶ فاصله محل برخورد الکترون‌ها نسبت به مرکز نشان داده شده است که به ترتیب



شکل ۲. مناطق مورد بررسی در سوسوزن در شبیه‌سازی‌ها: الکترون‌ها از مرکز هر خانه نشان داده عبور می‌کنند. فاصله مرکز هر خانه با مرکز سوسوزن در هر خانه نوشته شده است.

در آزمایشگاه پرتوهای کیهانی دانشگاه صنعتی شریف سلسله آزمایش‌هایی انجام شد [۷]. همچنین با نوشتن برنامه‌هایی برای شبیه‌سازی رفتار آشکارسازهای چرنکوف آبی [۸] و آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی [۹] اقدام شده است. این برنامه‌ها به زبان‌های برنامه‌نویسی C++ و متلب^۱ و با اعمال تقریب‌ها و ساده‌سازی‌هایی نوشته شده‌اند. لازم بود نتایج حاصل از آنها با نتایج برنامه‌های مستقل و حرفه‌ای دیگر مقایسه شوند. برای این منظور از کد شبیه‌سازی جیانت ۴ که سابقه

۱. MATLAB



شکل ۳. شکل تپ نوری برای انرژی ۱ GeV، $\theta=40^\circ$ ، $\varphi=0^\circ$ ، خانه سوم (فاصله ۱۴،۱۴ cm).

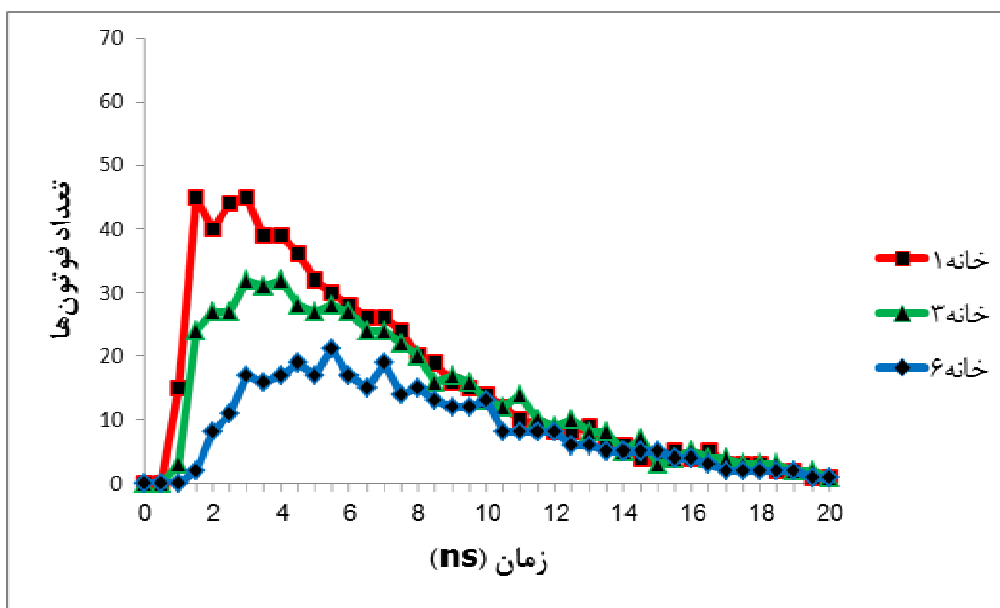
(حداکثر ۵ فوتون) بود. در نتیجه برای این انرژی‌ها هیچ تپ قابل ملاحظه‌ای وجود نخواهد داشت. عدم وجود هیچ فوتونی در یک نانو ثانیه اول نشان دهنده تاخیر زمانی رسیدن اولین فوتون‌ها به تکثیرکننده است. در مقایسه با زوایا و فاصله‌های دیگر در می‌یابیم که تنها عامل این تاخیر، فاصله زمانی رسیدن فوتون‌ها به تکثیرکننده است. مقادیر ثبت شده در شکل ۳ به ترتیب عبارت هستند از زمان بیشینه تپ، تعداد فوتون‌ها در کانال بیشینه تپ، زمان صعود، زمان فروافت، و میانگین تعداد کل فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده نوری. زمان صعود مدت زمانی است که طول می‌کشد ارتفاع تپ از ۱۰٪ به ۹۰٪ مقدار بیشینه آن برسد. همچنین زمان فروافت زمانی است که ارتفاع تپ از ۹۰٪ به ۱۰٪ مقدار بیشینه برسد.

در شکل ۴، تپ‌های مربوط به برخورد الکترون ۱ گیگاالکترونولتی به ۳ ناحیه از سوسوزن برای مقایسه در کنار هم رسم شده است. در این نمودار با افزایش فاصله محل برخورد الکترون از مرکز سوسوزن، تفاوت‌های قابل مشاهده عبارتند از افزایش تاخیر زمانی ابتدای تپ، افزایش زمان صعود، افزایش زمان بیشینه تپ، کاهش ارتفاع تپ، کاهش تعداد کل فوتون‌ها (مساحت زیر هر منحنی) و عدم تغییر محسوس زمان فروافت.

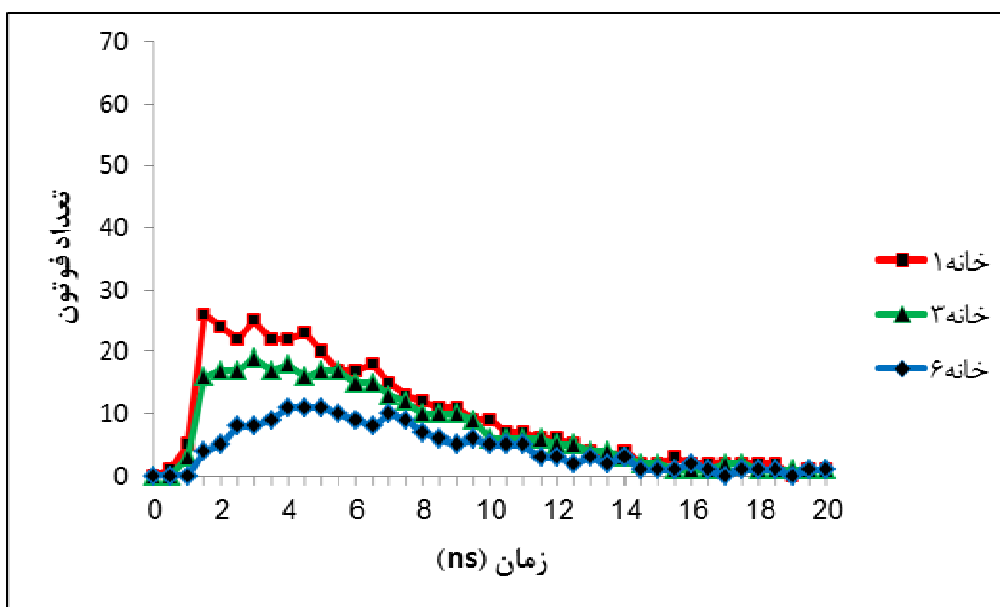
فاصله عبارتند از ۰، ۱۰، ۱۴، ۲۰، ۲۲، ۳۶ و ۲۸، ۲۸ سانتی‌متر در هر یک از اجراها پس از برخورد الکترون با سوسوزن فوتون‌های تولید شده در آن در زمان‌های متفاوتی به تکثیرکننده می‌رسند. این تفاوت زمانی در رسیدن به تکثیرکننده را می‌توان در قالب نمودار تعداد فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده بر حسب زمان رسم کرد و با توجه به آن، مشخصه‌هایی چون، بیشینه تپ، زمان بیشینه تپ، زمان صعود، زمان فروافت، و تعداد کل فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده نوری، را به دست آورد. برای تحلیل خروجی حاصل از شبیه‌سازی جیانت ۴، پنج مشخصه نامبرده برای هر یک از ۸۴۰ شرایط اولیه متفاوت به دست آمد.

۳. یافته‌ها و بحث

در شکل ۳ نمونه‌ای از شکل تپ به دست آمده از شبیه‌سازی ارائه شده است که مربوط به پیکربندی «انرژی ۱ GeV، خانه سوم، $\varphi=0^\circ$ ، $\theta=40^\circ$ » است. در این شکل تعداد فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده بر حسب زمان رسم شده است. میله‌های خطا مربوط به میانگین‌گیری بر روی ۱۰ بار تکرار برای پیکربندی نامبرده است. برای الکترون با انرژی‌های ۱۰۰ keV و ۱ MeV نموداری ارائه نشده است چرا که تعداد فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده صفر و یا بسیار اندک



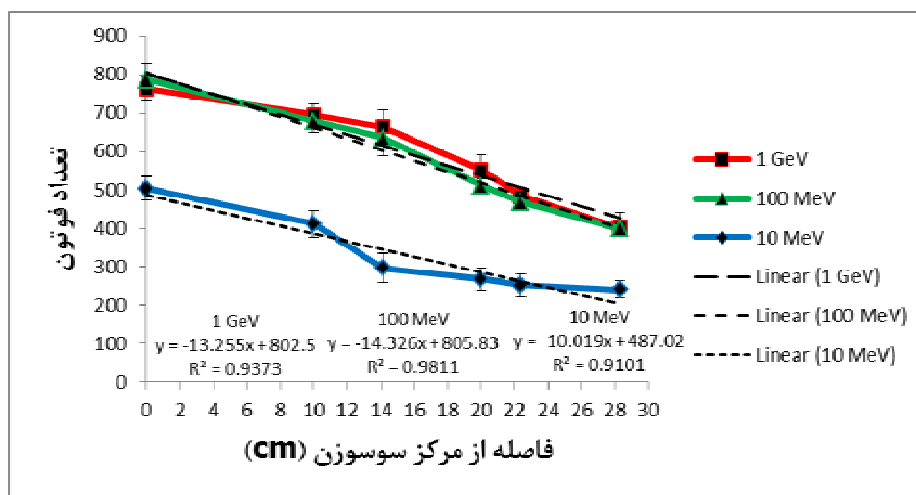
شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه شکل تپ برای خروجی انرژی ۱ GeV، $\theta = 40^\circ$ ، $\varphi = 0^\circ$ ، برای خانه‌های اول، سوم و ششم.



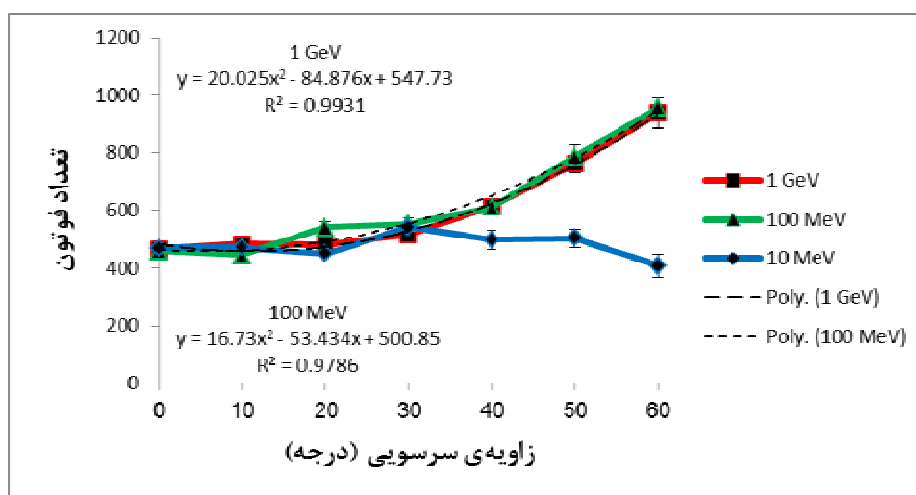
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه شکل تپ برای خروجی انرژی ۱۰ MeV، $\theta = 40^\circ$ ، $\varphi = 0^\circ$ ، برای خانه‌های اول، سوم و ششم.

به دلیل اثر ناچیز تغییرات زاویه سمتی بر روی مؤلفه‌های مورد مطالعه، منحنی‌ها و نتایج آنها در این مقاله ارائه نشده است. تغییرات زاویه سمتی، اثر معناداری در کمیت‌های مورد مطالعه نداشته و از طرف دیگر به خاطر کم بودن تعداد زوایا (چهار زاویه سمتی) و نیز کم بودن تعداد تکرارها (۱۰ بار)، افت و خیزها قابل ملاحظه بود و اعلام نظر قطعی به داده‌های بیشتر نیاز دارد. از این رو، تکرارهای مربوط به زوایای سمتی مختلف

مقایسه‌هایی مشابه مقایسه شکل ۴ برای انرژی‌های ۱۰ MeV و ۱۰۰ MeV انجام شد. در مورد مقایسه مربوط به انرژی ۱۰۰ MeV باید گفت که تفاوت چندانی با شکل ۴ ندارد اما به دلیل کم بودن تعداد فوتون‌های رسیده به پی‌ام‌تی در انرژی ۱۰ MeV منحنی‌های مربوط به این انرژی ارتفاع کمتر و پهنای بیشتری دارند (شکل ۵) و همین موضوع عاملی بر عدم دقت در محاسبه برخی از مشخصه‌های مورد مطالعه برای این انرژی است.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات تعداد کل فوتون‌های رسیده به پی.ام.تی نسبت به افزایش فاصله از مرکز سوسوزن برای زاویه سرسویی ۵۰ درجه.



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات تعداد فوتون‌های رسیده به پی.ام.تی نسبت به تغییرات زاویه سرسویی در خانه اول (مرکز سوسوزن).

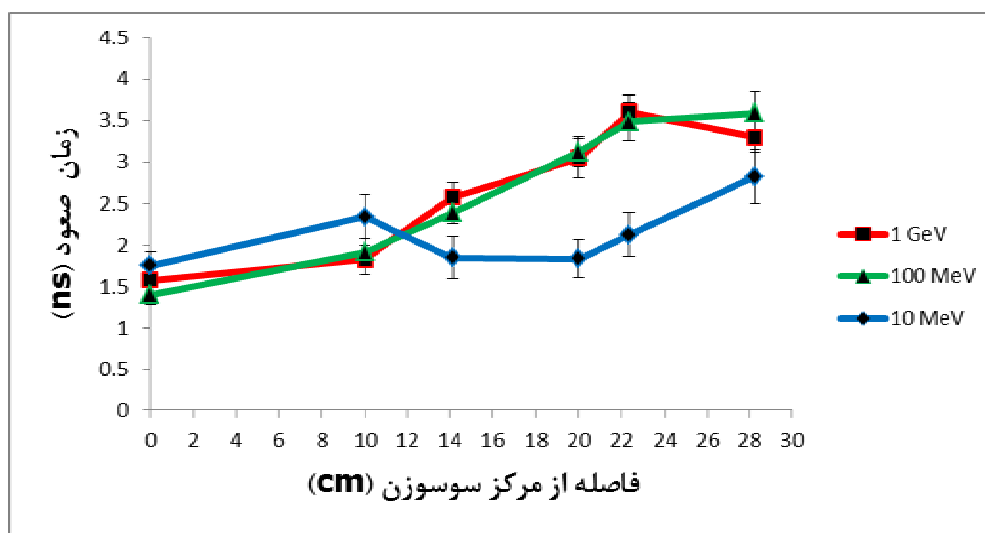
شده‌اند. در بررسی تغییرات پارامترها نسبت به تغییرات فاصله محل برخورد با مرکز سوسوزن در زوایا و انرژی‌های دیگر نیز رفتار مشابهی را مشاهده می‌کنیم.

در نمودار شکل ۷ منحنی‌های مربوط به تغییرات تعداد فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده نسبت به تغییرات زاویه سرسویی را مشاهده می‌کنیم. در شکل ۷ تنها مرکز سوسوزن بررسی شده است. قابل ذکر است که در بررسی تغییرات پارامترها نسبت به تغییرات زاویه سرسویی، در فواصل و انرژی‌های دیگر نیز رفتار مشابهی را مشاهده می‌کنیم.

نکته قابل توجه دیگر در نمودارهای شکل‌های ۶ و ۷،

هر زاویه سرسویی، که مجموعاً ۴۰ تکرار می‌شود، به عنوان تکرارهایی یکسان برای آن زاویه سرسویی در نظر گرفته شد.

در شکل ۶ نمودارهای تغییرات تعداد میانگین فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده نوری نسبت به افزایش فاصله محل برخورد الکترون از مرکز سوسوزن، در زاویه سرسویی ۵۰ درجه، برای انرژی‌های متفاوت رسم شده است. میله‌های خطا مربوط به میانگین‌گیری ۴۰ بار تکرار برای زاویه سرسویی مورد نظر است. این موضوع در مورد میله‌های خطای تمامی نمودارهای بعدی نیز برقرار است. منحنی‌ها تقریباً نشان از خطی بودن تغییرات دارند. در نمودارها پارامترهای برازش ارائه



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) میانگین زمان صعود به ازای فاصله از مرکز سوسوزن برای زاویه سروسویی 50° درجه.

محاسبه زمان صعود به کار رفته است. نکته مهم در مورد الکترون‌های با انرژی 10 MeV ، این است که انرژی این الکترون‌ها آن اندازه زیاد نیست که بتوانند به طور کامل از پهنای سوسوزن عبور کنند و تقریباً تمام انرژی خود را در طول مسیر از دست می‌دهند. همین امر باعث می‌شود تعداد فوتون‌هایی که در سوسوزن تولید می‌شود کمتر از تعداد فوتون‌های تولید شده در انرژی‌های 100 MeV و 1 GeV باشد. کم شدن تعداد فوتون‌ها به نوبه خود منجر به پهن‌تر شدن تپ مربوط به این انرژی می‌شود.

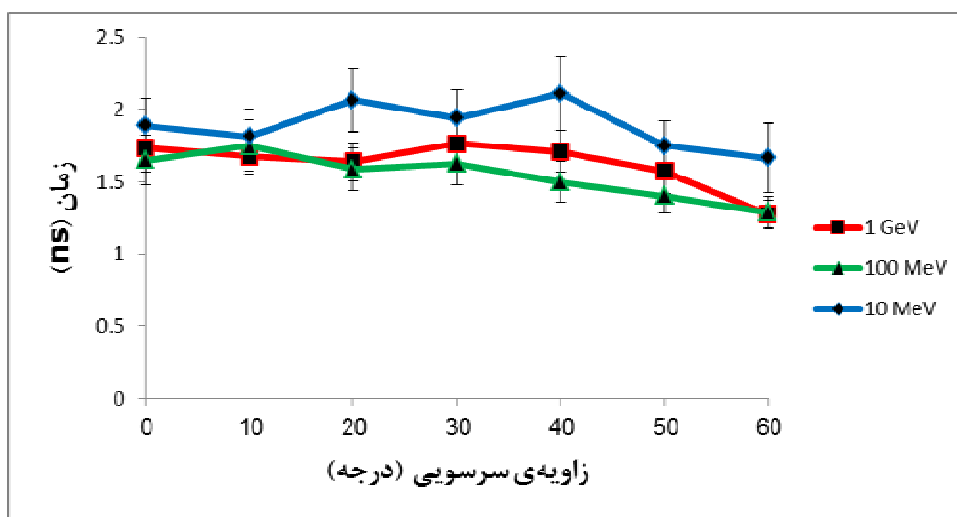
در شکل ۹ عدم تغییر زمان صعود نسبت به تغییرات زاویه سروسویی را شاهد هستیم. نتیجه‌ای که از این پدیده می‌توان گرفت این است که با افزایش زاویه طول مسیری که الکترون در سوسوزن طی می‌کند افزایش می‌یابد، اما همان طور که انتظار می‌رود تغییری در زمان صعود ایجاد نخواهد شد.

چنان که در نمودار شکل ۱۰ می‌بینیم، بیشینه تپ با افزایش فاصله محل برخورد الکترون از مرکز سوسوزن به طور خطی کاهش می‌یابد. همچنین، تغییرات بیشینه تپ نسبت به افزایش زاویه سروسویی در خانه اول مشابه تغییرات تعداد فوتون‌های رسیده به پی‌ام‌تی نسبت به تغییرات زاویه سروسویی در خانه اول است که این موضوع با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۷ حاصل می‌شود.

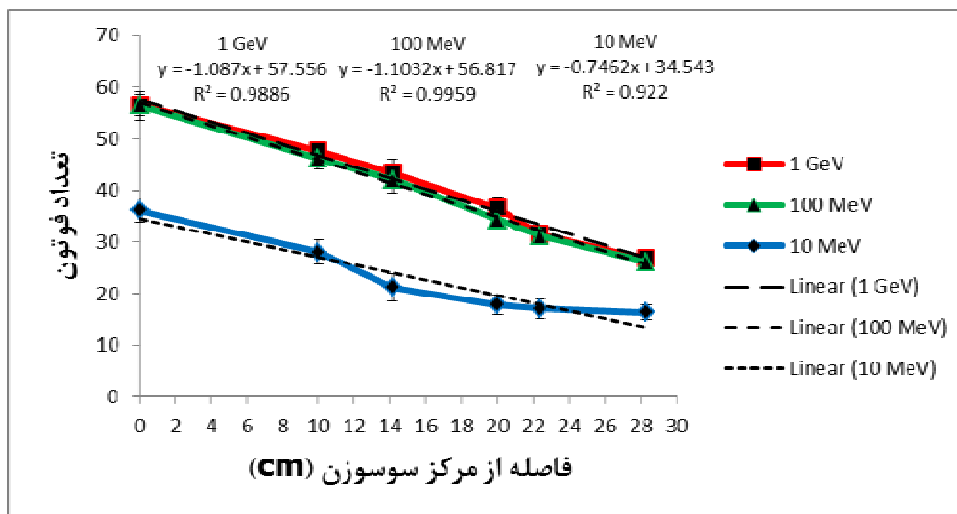
تفاوت موجود در تعداد فوتون‌های تولید شده توسط الکترون‌هایی به انرژی 10 MeV نسبت به انرژی‌های 100 MeV و 1 GeV است. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود تغییرات مربوط به انرژی 10 MeV قابل چشم‌پوشی است. این مشاهده نمایانگر آن است که انرژی 10 MeV در محدوده‌ای قرار دارد که الکترون در آن محدوده نمی‌تواند بیش از پهنای 2 سانتی‌متری سوسوزن NE102a را ببیند، پس با افزایش زاویه و در نتیجه افزایش پهنای پیش روی الکترون باز هم مسیر طی شده افزایش نیافته و سوسوزنی تغییر نمی‌کند.

در همه انرژی‌ها و در همه فواصل محل برخورد و نیز در همه زوایا تغییر قابل توجهی در زمان فروافت مشاهده نشد که البته نوعاً در شکل‌های ۴ و ۵ آشکار است.

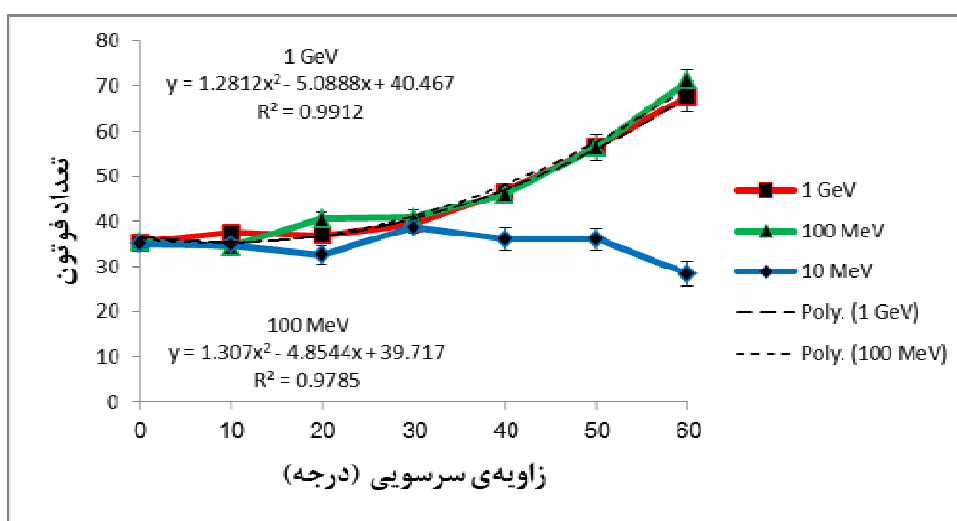
منحنی‌های شکل ۸ تغییرات زمان صعود با افزایش فاصله محل برخورد از مرکز سوسوزن را نشان می‌دهند. انتظار داریم که با افزایش فاصله محل برخورد، زمان صعود افزایش یابد، که این رفتار را در انرژی‌های 100 MeV و 1 GeV قابل مشاهده است. در انرژی 10 MeV این رفتار مشاهده نمی‌شود که ممکن است علت آن پهن‌شدگی بیشتر تپ‌های این انرژی باشد. پهن‌شدگی بیشتر باعث می‌شود زمان بیشینه تپ با خطای بیشتری محاسبه شود. یک عامل که ممکن است منجر به چنین خطای سیستماتیکی شود، الگوریتمی است که برای



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات زمان صعود به ازای تغییر زاویه سروسویی در خانه اول (مرکز سوسوزن).



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات بیشینه تپ، به ازای افزایش فاصله از مرکز سوسوزن برای زاویه سروسویی ۵۰ درجه.



شکل ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات بیشینه تپ نسبت به افزایش زاویه سروسویی در خانه اول.

۴. نتیجه‌گیری

شکل‌های تپ به دست آمده اطلاعات مفیدی از عملکرد آشکارساز به دست می‌دهد. زمان‌های صعود و فروافت که همگی از مرتبه نانو ثانیه هستند، مشخصه‌های مناسبی برای تخمین دقت زمانی آشکارسازند. تعداد کل فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده، یکی دیگر از کمیت‌های مهم است. تغییر زاویه فرود الکترون باعث می‌شود الکترون مسیر طولانی‌تری را در سوسوزن طی کند و در نتیجه تعداد فوتون‌های بیشتری تولید شود. الکترون با انرژی 10 MeV تمام انرژی خود را در سوسوزن به جا می‌گذارد و بنابراین تعداد کل فوتون‌های تولید شده توسط آن در سوسوزن مستقل از زاویه فرود خواهد بود. در انرژی‌های 100 MeV و بالاتر الکترون‌ها از سوسوزن عبور می‌کنند و در نتیجه اثر زاویه قابل ملاحظه می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر رفتار سوسوزن در مقابل الکترون‌هایی با انرژی‌های مختلف لازم است اجرای برنامه برای انرژی‌هایی در ناحیه 10 تا 100 مگا الکترون‌ولت تکرار شود.

اساساً زمان صعود باید مستقل از انرژی الکترون‌ها و زاویه فرود باشد ولی مشاهده می‌شود که زمان صعود الکترون‌های 10 مگا الکترون‌ولتی اختلاف قابل ملاحظه‌ای با زمان صعود مربوط به الکترون‌های پرانرژی‌تر دارند که البته با توجه به پهن‌شدگی شکل‌های تپ مربوط به این انرژی قابل توجیه است. زمان صعود با فاصله‌ای که فوتون‌ها از سوسوزن تا تکثیرکننده طی می‌کنند، متناسب است. بنابراین هرچه از مرکز سوسوزن دورتر می‌شویم زمان صعود بیشتر می‌شود ولی تغییر زاویه فرود الکترون (زاویه سرسویی) تأثیری در زمان صعود ندارد. فاصله گرفتن از مرکز سوسوزن علاوه بر تغییر دادن زمان صعود، تعداد فوتون‌های رسیده به تکثیرکننده و بیشینه تپ را نیز کاهش می‌دهد.

خروجی آشکارساز به صورت تپ الکتریکی حاصل از لوله تکثیرکننده نوری است. باید این نکته را در نظر داشت که پاسخ نهایی آشکارساز، متأثر از پاسخ سوسوزن در تولید فوتون‌ها، بازده محفظه نوری در رساندن فوتون‌ها به تکثیرکننده و پاسخ تکثیرکننده نوری در تبدیل فوتون‌ها به تپ

الکتریکی است. به دلیل محدودیت‌های فنی در کد شبیه‌سازی نتوانستیم رفتار تکثیرکننده نوری را در شبیه‌سازی خود وارد کنیم. براساس اطلاعات ارائه شده توسط سازنده [۱۱] می‌دانیم که تپ الکتریکی حاصل از لوله تکثیرکننده نوری در وضعیت مورد استفاده در آرایه البرز با تعداد فوتون‌های وارده به آن متناسب است و تأخیر تپ الکتریکی نسبت به ورودی اپتیکی آن (زمان صعود پی ام تی)، و پهنای پاسخ آن تقریباً مستقل از شدت نور ورودی است و از مرتبه نانو ثانیه است. لذا انتظار داریم مشخصه‌های زمانی آشکارساز تفاوت زیادی با مشخصه‌های زمانی بخش نوری آن، شامل سوسوزن و محفظه نوری، که در این پژوهش به دست آمده نداشته باشند. همچنین وجود سایبان‌های سیمانی که به عنوان محافظ آشکارسازها در آرایه استفاده خواهند شد در خروجی نهایی مؤثر هستند. به دلیل نیاز به زمانی فراتر از زمان پیش‌بینی شده توسط گروه، افزودن این دو قسمت در قالب یک تحقیق تکمیلی قابل ارائه است.

در آرایه رصدخانه البرز، جهت بهمن‌های هوایی با استفاده از تفاوت زمان رسیدن ذرات جبهه بهمن به آشکارسازهای مختلف آرایه تعیین می‌شود. لذا هرچه زمان صعود تپ در آشکارساز، نسبت به لحظه ورود ذره توزیع آماری باریک‌تری داشته باشد، جهت ذره فرودی با دقت بیشتری به دست می‌آید. در نتیجه دانستن زمان صعود و توزیع آماری آن برای حالت‌های مختلف برخورد ذره به سوسوزن از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه زمان‌های صعود گزارش شده در این مقاله و نیز مقایسه آنها با زمان‌های صعود به دست آمده از شبیه‌سازی‌های پیشین [۹]، که از هماهنگی خوبی برخوردارند، دقت مناسبی در اندازه‌گیری جهت ذره فرودی با استفاده از آشکارسازهای آرایه البرز مورد انتظار است. لازم به ذکر است در پژوهش‌های مرجع اخیر، که از میان مؤلفه‌های مورد بررسی بیشتر به زمان صعود پرداخته است، مقادیر $1/7$ ، $2/5$ و $3/4$ نانو ثانیه برای به ترتیب فواصل برخورد 0 ، $14/14$ و $28/28$ سانتی‌متر نسبت به مرکز سوسوزن گزارش شده است. همچنین در هر دو گزارش در همه فواصل محل برخورد تغییر قابل توجهی در زمان فروافت

قدردانی

بر خود لازم می‌دانیم از آقای محسن اکبری که تجربیات خود در به کار بستن ابزار جیانت ۴ را در اختیار گروه قرار دادند تشکر نماییم.

مشاهده نشده است. در این شبیه‌سازی علاوه بر فواصل مختلف برخوردار، عدم تغییر در زمان فروافت برای زوایای مختلف هم مشاهده شده است.

مراجع

1. C Grupen, "Astroparticle Physics", Springer-Verlag (2005).
2. A Haungs *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A* **662** (2012) S150.
3. F Sheidaei, M Bahmanabadi, A Keivani, and J Samimi, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **36** (2009) 115201.
4. M Khakian Ghomi *et al.*, "Study of EASs inclination due to geomagnetic field by 50 TeV to 5 PeV CORSIKA simulated events", Proc. 31st ICRC, Łódź, Poland (2009) 574.
5. M Bahmanabadi, A Anvari, G Rastegarzadeh, J Samimi, and M Lamehi Rachti, *Experimental Astronomy* **8** (1998) 211.
6. G F Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons, Inc. **219** (2000).
7. Y Pezeshkian, S Mortazavi Moghaddam, H Hedayati, M Bahmanabadi, and P Khalaj, "Optimization of the size of scintillation detectors in order to use in an array of 20 detectors which is going to be placed in the Sharif University of Technology", 32nd ICRC, Beijing **3** (2011) **40**.
8. S Mortazavi Moghaddam *et. al.*, *Astropart. Phys.* **35** (2012) 792.
9. م رضایی، "شبیه‌سازی پرتوهای کیهانی از سمت خورشید ON و جهت‌های دیگر OFF و محفظه نوری تلسکوپ پرتوهای کیهانی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی (۱۳۹۱).
10. Geant4 Collaboration, "Introduction to Geant4", <http://geant4.cern.ch/support/userdocuments.shtml> (2011).
11. T Hakamata, "Photomultiplier Tubes", Hamamatsu Photonics (2006).