

پیاده‌سازی طرح مفهومی آشکارساز ردیاب GEM در کد مونت کارلو پانداروت و بررسی عملکرد آن

نازیلا دیوانی ویس^{۱،۲}، محمدمهدی فیروزآبادی^۱ و تاکهیکو سایتو^{۲،۳}

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲. مرکز شتاب‌دهنده یون‌های سنگین GSI، دارمشتات، آلمان

۳. موسسه هلمهولتز ماینس HIM، ماینس، آلمان

پست الکترونیکی: n_divani@birjand.ac.ir, n.divani@gsi.de

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۰۴/۲۷)

چکیده

آزمایش PANDA یکی از پروژه‌های کلیدی در فراهم کردن امکانات تحقیقاتی آینده برای پادپروتون‌ها و تحقیقات یونی (FAIR) است که در حال حاضر، در دست ساخت در مرکز شتاب‌دهنده GSI، در کشور آلمان است. این آزمایش با داشتن پتانسیل فیزیکی فوق‌العاده، ناشی از در دسترس بودن باریکه‌های سرد پادپروتونی با شدت بالا، قادر به سازوکار برهم‌کنش قوی و پدیده نابودی پروتون-پادپروتون است. این آزمایش به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند ذرات حاصله را با دقت و قدرت تفکیک بالا در زوایای بسته و رو به جلو به خوبی ردیابی کند و دستگاه‌های آشکارسازی متنوعی را شامل می‌شود. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های چیدمان این آزمایش، دستگاه‌های ردیابی ذرات بر مبنای آشکارسازهای تکثیر کننده الکترون گازی GEM خواهد بود که در دست مطالعه هستند. در این مقاله، شبیه‌سازی این آشکارساز و چگونگی عملکرد آن با استفاده از روش محاسباتی مونت کارلو و کد شبیه‌سازی جیانت ۴ بر پایه بسته نرم‌افزاری پانداروت و بر مبنای طراحی مفهومی آن ارائه شده است. کمیت‌هایی مانند بازده، قدرت تفکیک تکانه، طول تابش و کیفیت بازسازی جرم (برای مزون $J/\Psi(1S)$) برای آن اندازه‌گیری و بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: آزمایش PANDA، آشکارسازهای GEM، بازده و قدرت تفکیک تکانه، طول تابش جزئی، بازسازی جرم

۱. مقدمه

روت با استفاده از زبان برنامه‌نویسی شیء گرای C تحت لینوکس و با قابلیت استفاده از کدهای محاسباتی تراپرد ذرات مختلف مانند Geant^۳ و Geant^۴ نگارش و آماده شده است. کلیه معیارهای طراحی، فرایند بهینه‌سازی، راه حل‌های فنی و نتایج حاصل از این فرایند از مطالعات گسترده فیزیک مونت کارلو و با استفاده از این کد به دست می‌آیند. کلیه

۱.۱. معرفی کد مونت کارلوی پانداروت

به طور کلی، این بسته نرم‌افزاری جهت آزمایش PANDA^۱ برای پروژه FAIR^۲ بر مبنای محاسبات مونت کارلو و نرم‌افزار

۱. Anti Proton ANnihilation at DArmstadt

۲. The Future Facility for Antiproton and Ion Research

نابودی پادپروتون- پروتون و واکنش پادپروتون‌ها با هسته‌های سنگین را انجام دهد و شامل مجموعه‌ای از دستگاه‌هایی است که اطراف یک هدف ثابت داخلی را احاطه کرده‌اند. پرتوهای پادپروتونی با تکانه‌ای در گستره ۱/۵ تا ۱۵ GeV/c گسیل شده توسط حلقه انبارش انرژی بالا (HESR)، به خاطر کیفیت و شدت بی‌سابقه، اندازه‌گیری‌های دقیقی درباره برهم‌کنش قوی و ساختار هادرونی به خصوص در ناحیه کوارک افسون را امکان‌پذیر خواهند کرد. نتایج حاصله می‌تواند ابزار منحصر به فردی برای بهبود آمار رویدادها، بالا بردن دقت داده‌های موجود و بررسی‌های بیشتر در مورد فیزیک آن باشد. این مجموعه شامل دو قسمت است: طیف‌سنج هدف، پیرامون ناحیه برهم‌کنش و در یک میدان مغناطیسی سلونوئیدی ابررسانا (۲ تسلا)، و طیف‌سنج روبه‌جلو، برای تشخیص ذرات گسیل شده در ناحیه روبه‌جلو در یک میدان مغناطیسی دوقطبی (۱ تسلا) [۱]. برخی از دستگاه‌های آشکارسازی متنوع مورد استفاده در پروژه PANDA عبارتند از: آشکارسازهای ردیابی (MVD، STT، GEM)، کالریمترهای الکترومغناطیسی (EMC)، دستگاه‌های میونی، آشکارسازهای چرنکوف (DIRC و RICH) و دستگاه‌های زمان- پرواز (TOF). این چیدمان قادر است آشکارسازی ذرات گسیل شده در کلیه زوایای فضایی بزرگ و کوچک و در بازه انرژی گسترده، و همچنین ردیابی کامل حالات نهایی با پذیرش فضایی 4π ، جهت دستیابی به اهداف فیزیکی مورد نظر را به خوبی انجام دهد [۲].

۱.۳. ردیاب تکثیر کننده الکترون گازی GEM در

آزمایش PANDA

از قسمت‌های مهم پروژه PANDA دستگاه‌های ردیابی داخلی هستند که در ناحیه طیف‌سنج هدف قادرند ذرات باردار گسیل شده ناشی از برهم‌کنش پروتون- پادپروتون را در زوایای رو به جلو و با دقت، بازده و قدرت تفکیک تکانه خوبی ردیابی کنند. آشکارساز ردیاب GEM که بعد از ردیاب مرکزی قرار می‌گیرد، قادر است زوایای گسیلی بین ۲ تا ۲۰ درجه را به خوبی پوشش دهد و ذرات باردار گسیل شده در این ناحیه را

قسمت‌های شبیه‌سازی، محاسباتی، ردیابی، آشکارسازی و شناسایی ذرات، و همچنین تحلیل داده‌ها و مطالعات برهم‌کنش‌های فیزیکی مختلف توسط این بسته نرم‌افزاری قابل اجرا است [۱]. ابتدا در این کد هندسه واقعی آشکارسازها و کلیه قسمت‌های چیدمان آزمایش PANDA به طور کامل تعریف می‌شوند، سپس با استفاده از مولدهای مختلف رویدادهای فیزیکی مورد نظر شبیه‌سازی می‌شوند. از جمله مهم‌ترین این مولدها می‌توان به EvtGen [۲]، DPM [۳] و UrQMD [۴] اشاره کرد. با توجه به اهداف شبیه‌سازی و آشکارسازهای مورد استفاده، بازسازی جرم و تحلیل رویدادهای مختلف از طریق الگوریتم‌های مورد نظر صورت می‌پذیرد. چیدمان آزمایش PANDA متشکل از دو بخش مغناطیسی دوقطبی و سلونوئیدی است و اهدافی که از ردیابی مسیر ذرات دنبال می‌شوند نظیر تشخیص نوع و بار ذره، اندازه‌گیری تکانه و نیمه عمر ذره، و مکان آن به کمک میدان‌های مغناطیسی قابلیت اندازه‌گیری دارند. برای ردیابی ذرات حرکت ذرات باردار در میدان‌های مغناطیسی با رابطه نیروی لورنتس

$$F = \frac{dp}{dt} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

مغناطیسی انرژی ذرات را تغییر نمی‌دهد، با توجه به رابطه نیروی لورنتس داریم:

$$m_0\gamma \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B} \rightarrow m_0\gamma \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = e \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \mathbf{B},$$

حال با استفاده از طول مسیر ذره s به جای زمان داریم

$$ds = vdt \rightarrow m_0\gamma v \frac{d^2\mathbf{r}}{ds^2} = e \frac{d\mathbf{r}}{ds} \times \mathbf{B} \rightarrow \frac{d^2\mathbf{r}}{ds^2} = \frac{e}{p} \frac{d\mathbf{r}}{ds} \times \mathbf{B}$$

بنابراین در یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت $\mathbf{B}(s)$ مسیر ذره $r(s)$ از حل معادله دیفرانسیلی فوق به دست می‌آید. فرض اساسی برای تشخیص الگوی ردیابی در ناحیه‌ای که میدان مغناطیسی ثابت و یکنواخت است بر مبنای ردیابی مسیرهای مارپیچی ذرات باردار از معادلات هلیکس [۵] محاسبه می‌شود.

۱.۲. آزمایش PANDA

آزمایش PANDA به عنوان یکی از قسمت‌های مهم پروژه FAIR به گونه‌ای طراحی شده است تا مطالعات دقیقی از

آشکارسازی کند. در این مقاله، چگونگی پیاده‌سازی و شبیه‌سازی طراحی مفهومی این آشکارساز و نحوه عملکرد آن در ردیابی ذرات ارائه شده است.

۱.۳.۱. تکثیر کننده الکترون گازی GEM

ردیاب‌های GEM^۱ از نوع آشکارسازهای گازی هستند که بسته به منطقه رانش بزرگ یا کوچک می‌توانند در دو ناحیه اتاقک یونش یا در ناحیه تناسبی کار کنند. در سال ۱۹۶۸ اختراع شمارنده تناسبی چند سیمه MWPC در سرن در حوزه آشکارسازهای گازی گام مهمی در آشکارسازی ذرات به شمار می‌رفت، چرا که هر دو قابلیت ردیابی و اندازه‌گیری انرژی ذره را دارا بود. با این وجود علامت حاصل از این آشکارساز در انرژی پایین ذرات بسیار کم بود و به وسیله دستگاه‌های استخراج داده قابل خواندن نبود. این مسئله موجب شد تا تحقیقات برای افزایش بهره الکترونی منجر به اختراع آشکارسازهای تکثیر کننده الکترونی گازی شود. تکثیر کننده الکترونی گازی GEM، مفهوم نسبتاً جدیدی در آشکارساز ذرات است که در سال ۱۹۹۷ توسط فابو سالی در گروه تحقیقاتی آشکارسازهای گازی در سرن اختراع شد [۶]. ایده اولیه آن افزایش بهره الکترونی برای محفظه‌های چند سیمه به منظور آشکارسازی تک فوتون کم انرژی و افزایش مقدار بهره اولیه از مرتبه ۱۰ به مرتبه ای از ۱۰^۴ بود. این آشکارساز شامل یک صفحه پلیمری است که یک پوشش فلزی دو طرف آن را می‌پوشاند و به صورت شیمیایی حفره‌هایی بر روی آن ایجاد می‌شود. صفحات معمولی GEM شامل دو لایه مسی با ضخامت حدود ۵ میکرومتر است که توسط یک لایه از پلیمر کاپتون با ضخامت ۵۰ میکرومتر از یکدیگر جدا شده است. کاپتون ماده‌ای پلاستیکی با مقاومت الکتریکی حدود ۱۰^{۱۱}Ω/m و قدرت دی‌الکتریک بالا است که قابلیت ساخت در ضخامت‌های بسیار کوچک را دارا است. این صفحات به صورت شیمیایی و به وسیله الگویی از حفره‌های بسیار ریز سوراخ سوراخ می‌شود تا در حضور میدان الکتریکی هر کدام از آنها نقش تکثیر کنندگی الکترون‌ها را ایفا کنند. با اعمال یک اختلاف ولتاژ مناسب،

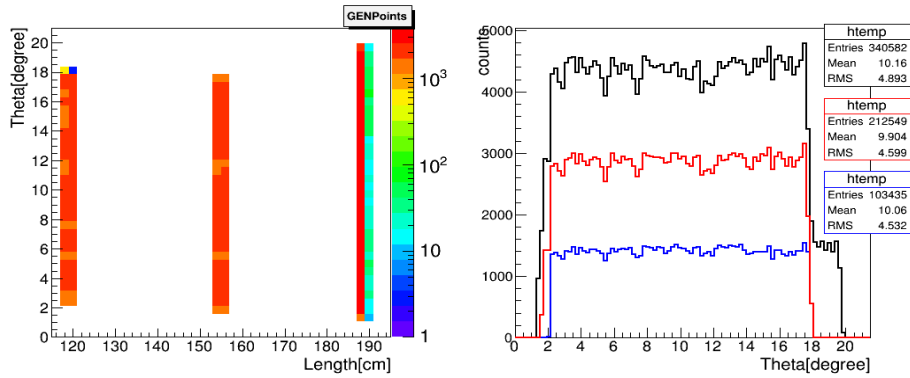
الکترون‌های ایجاد شده به درون این حفره‌ها کشیده شده و با تکثیر درون آنها از طرف دیگر خارج می‌شوند. در این حالت هر حفره مانند یک تکثیر کننده تناسبی عمل می‌کند. این تکثیر کننده می‌تواند به تنهایی مانند یک آشکارساز یا پیش تقویت کننده عمل کند. تفکیک بودن طبقه تقویت تپ‌ها از طبقه خواندن الکترونیکی اطلاعات، منجر به سالم‌تر بودن عملکرد و آزادی عمل در طراحی الکترودهای گردآوری بار می‌شود [۶].

۲. مواد و روش‌ها

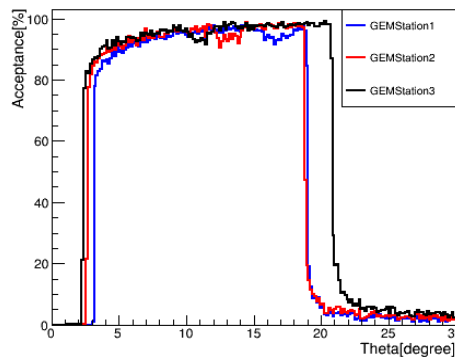
۱.۲. شبیه‌سازی آشکارساز GEM

در پروژه PANDA از آشکارسازهای سریع و دقیقی جهت آشکارسازی استفاده می‌شود. در ناحیه طیف‌سنج هدف به دلیل نیاز به دقت بسیار زیاد برای ردیابی مسیر تولید ذرات باردار و البته برای تجزیه و تحلیل تکانه ذرات تولید شده در اطراف ناحیه هدف پروتونی ثابت، آشکارسازهای سیلیکونی مورد استفاده خواهند بود، با این حال، آنها زاویه پذیرش کوچکی برای ذرات گسیل شده در جهت‌های رو به جلو و زوایای بسته خواهند داشت. بنابراین، یک مجموعه از صفحات مسطح با مساحت بزرگ از آشکارسازهای تکثیر کننده الکترون گازی نیز به عنوان اولین آشکارساز ردیاب رو به جلو پس از دستگاه ردیاب مرکزی قرار می‌گیرند. طراحی این آشکارساز به صورت سه بعدی و شامل سه ایستگاه قرصی شکل در راستای ردیاب مرکزی چیدمان اصلی آزمایش PANDA است که هر ایستگاه دارای ۴۹ لایه با جنس و ابعاد مختلف شامل پنجره ورودی آشکارساز، کاتد، صفحات GEM، لایه‌های حساس به شمارش ذرات، قسمت‌های خنک کننده و بخش مربوط به اجزای الکترونیکی دستگاه است. شعاع خارجی هر ایستگاه با توجه به محدودیت فضای موجود تقریباً از حدود ۴۵ تا ۷۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. در سرتاسر محیط آشکارساز گاز (۳۰٪ - ۷۰٪ Ar/CO₂) وجود دارد. بر طبق بررسی‌های انجام شده، این لایه‌های قرصی شکل قادر خواهند بود آشکارسازی ذرات تولید شده در برهم‌کنش پروتون-پادپروتون را در زوایای

۱. Gas Electron Multipliers



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شکل سمت چپ توزیع زاویه‌ای ناحیه فعال هر سه ایستگاه آشکارساز ردیاب تکثیر کننده الکترون گازی (نمودار زاویه قطبی تنا بر حسب مکان Z لایه‌های حساس هر ایستگاه) و شکل سمت راست نمودار شمارش ذرات بر حسب زاویه قطبی تنا به ترتیب برای ایستگاه اول به تنهایی (آبی)، برای ایستگاه اول و دوم با هم (قرمز) و برای هر سه ایستگاه با هم (سیاه) را نشان می‌دهند.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار توزیع زاویه‌ای میزان پذیرش ذرات توسط ناحیه فعال هر ایستگاه ردیاب GEM.

۲.۲. بررسی عملکرد آشکارساز GEM

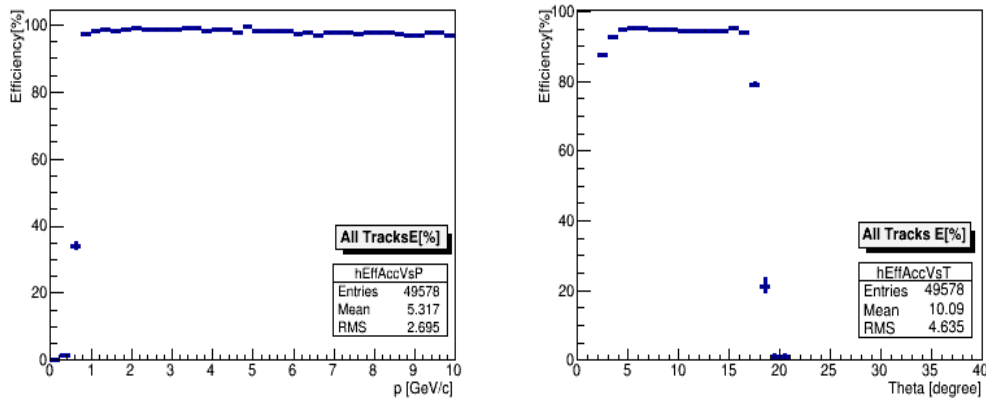
به منظور بررسی عملکرد هندسه طراحی شده برای آشکارساز GEM در اندازه‌گیری و آشکارسازی ذرات باردار و بازده و قدرت تفکیک آن، شبیه‌سازی به ازای تعداد ۱۰۰ هزار رویداد با انتشار تک ذرات باردار (در این شبیه‌سازی میون‌ها) در گستره تکانه ۰٫۵ تا ۱۰ GeV/c و با توزیع فضایی همسانگرد انجام شده است.

۳. نتایج

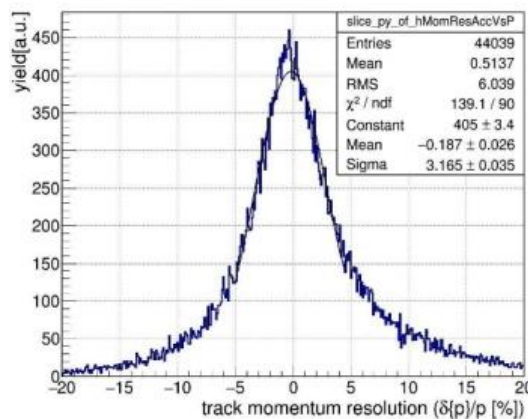
۳.۱. بازده ردیابی و قدرت تفکیک تکانه آشکارساز GEM

شکل ۱ نمودار توزیع زاویه‌ای ذرات برای هر سه ایستگاه ردیاب تکثیر کننده الکترون گازی GEM برای پروژه PANDA و شکل ۲ میزان پذیرش زاویه‌ای ذرات به تفکیک برای هر ایستگاه را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها این

قطبی تقریباً ۲ تا ۲۰ درجه پوشش بدهند [۷]. صفحات GEM و همچنین آند دستگاه به گونه‌ای طراحی شده‌اند که به صورت ورقه‌های دو رویه مس-کاپتون-مس چسبیده به هم و به صورت پیکسل پیکسل (از مرتبه ۱۰۰ میکرون) در راستاهای عمودی و افقی (صفحات پشتی)، دایروی و شعاعی (صفحات جلویی) تقسیم بندی شده‌اند تا در فرایند آشکارسازی در شبیه‌سازی مونت کارلو مکان و رد ذرات قابل شناسایی باشند. همچنین، برای هر ایستگاه دو حجم مجزا از ترکیب Ar/CO₂ به ضخامت تقریباً یک سانتی متر تعبیه شده است که نقش ناحیه یونش را برای فرایند آشکارسازی ایفا کنند. مکان قرار گرفتن این سه ایستگاه در چیدمان اصلی آزمایش پروژه PANDA به دلیل محدودیت فضایی موجود بسیار مهم است و باید به دقت جایگذاری شوند که با سایر قسمت‌ها تداخلی ایجاد نشود.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سمت راست: نمودار توزیع زاویه‌ای، سمت چپ: نمودار توزیع تکانه برای بازده ردیابی GEM.

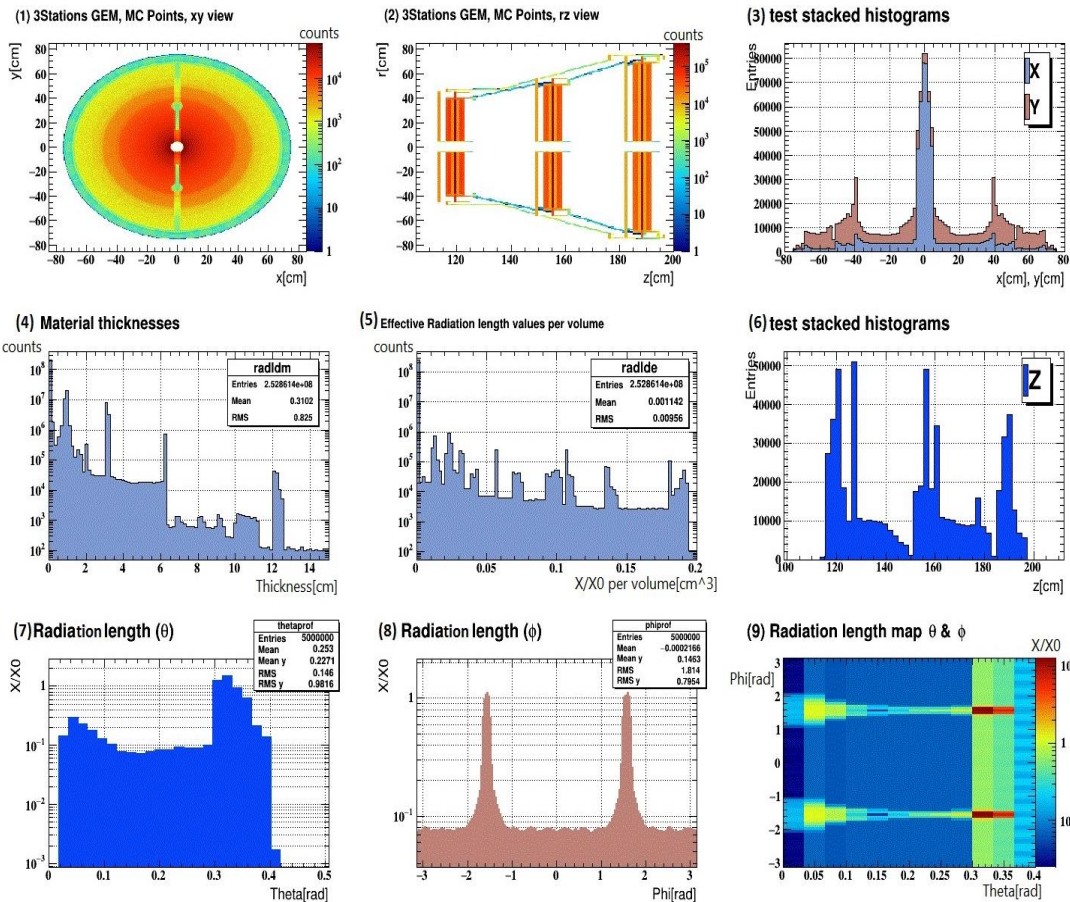


شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار قدرت تفکیک تکانه برای ردهای آشکار شده ردیاب GEM.

۲.۳. تخمین طول تابش آشکارساز GEM

برای بررسی بیشتر عملکرد هندسه و تخمین میزان انرژی از دست رفته ذرات با توجه به نوع، ضخامت، چگالی، و میزان طول تابش ویژه مواد X به کار رفته در این هندسه، میزان طول تابش جزئی X/X_0 برای کلیه حجم‌های هندسه مطابق شکل ۵ اندازه‌گیری شده است. از آنجایی که این آشکارساز یکی از داخلی‌ترین آشکارسازهای چیدمان آزمایش PANDA است، فهمیدن تأثیر مواد به کار رفته در آن بر روی کاهش انرژی ذراتی که از درون آن عبور می‌کنند و به دستگاه‌های دیگر می‌رسند، مهم است. بدین منظور با استفاده از کد محاسباتی Geant4 تعداد پنج میلیون رویداد با انتشار ذرات مجازی جیانتینو در زاویه قطبی (θ) صفر تا ۴۵ درجه و زاویه سمتی ϕ صفر تا ۳۶۰ درجه شبیه‌سازی شدند. ذرات مجازی جیانتینو ذرات بدون باری هستند که اندرکنش فیزیکی با محیط مادی

آشکارساز قادر است زوایای بسته ۲ تا ۲۰ درجه را به خوبی پوشش بدهد. همچنین، میزان بازده و قدرت تفکیک تکانه ذرات در آشکارساز مذکور، با استفاده از یک الگوی استاندارد بر پایه روش نقشه‌برداری منسجم [۸]، روش شناسایی هلیکس [۵] و ترابرد ذرات باردار درون میدان مغناطیسی مطابق شکل‌های ۳ و ۴ برآورد شده است. شکل ۳، نمودار توزیع زاویه‌ای بازده میزان ردیابی ذرات، و بازده میزان ردیابی بر حسب تکانه ذرات فرودی را نشان می‌دهد. مطابق با این نمودارها، میزان بازده ردیابی این آشکارساز در زوایای روبه‌جلو و در گستره تکانه ذرات بین $0.5 \text{ GeV}/c$ تا $10 \text{ GeV}/c$ بیشتر از ۹۰٪ برآورد شده است. شکل ۴، میزان و قدرت تفکیک تکانه برای ردهای آشکار شده را نیز نشان می‌دهد که با برازش نمودار گاوسی بر روی آن میزان قدرت تفکیک تکانه $\sigma = \pm 0.35 / (3.165 \pm 0.035)$ تخمین زده شده است.

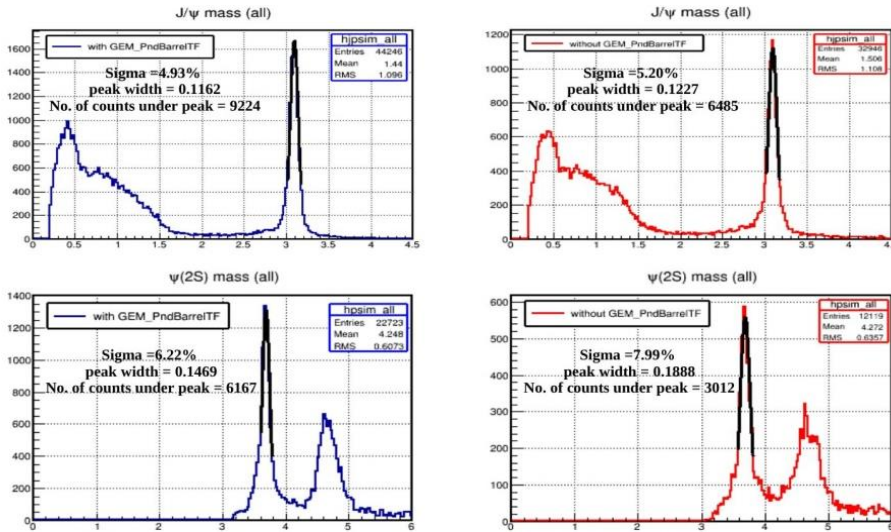


شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودارهای طول تابش برای آشکارساز طراحی شده ردیاب تکثیر کننده الکترون گازی GEM در شبیه سازی مونت کارلو. در این شکل ۱- نمای $y-x$ را برای کل شمارش های انجام شده توسط سه ایستگاه GEM، ۲- نمای $r-z$ (در اینجا شعاع ایستگاه ها است) را برای کل شمارش های انجام شده توسط سه ایستگاه GEM، ۳- میزان شمارش وارد شده به کل آشکارساز و کل ناحیه پوشش داده شده توسط آن را در راستای محورهای x و y ، ۴- میزان شمارش بر حسب ضخامت های مواد به کار رفته در کل هندسه را، ۵- میزان طول تابش جزئی بر واحد حجم بر حسب سانتی متر مکعب را، ۶- میزان شمارش وارد شده به کل آشکارساز و کل ناحیه پوشش داده شده توسط آن را در راستای محور z ، ۷- میزان طول تابش جزئی بر حسب زاویه قطبی θ را بر حسب رادیان برای کل هندسه GEM، ۸- میزان طول تابش جزئی بر حسب زاویه سمتی بر حسب رادیان برای کل هندسه GEM را، و ۹- نمودار زاویه سمتی بر حسب زاویه قطبی θ را به عنوان تابعی از کمیت طول تابش جزئی نشان می دهد.

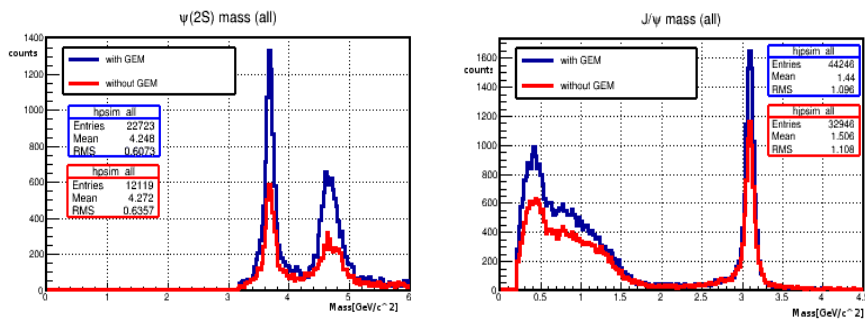
10^{-1} است. مقادیر بزرگ تر مربوط به مواد و حجم های به کار برده شده برای قسمت های الکترونیکی، کابل ها و صفحات نگهدارنده دستگاه هستند که مواد حجیم تری برای آنها به کار برده شده است.

۳.۳. بررسی کیفیت بازسازی جرم توسط آشکارساز GEM
به منظور بررسی نقش آشکارساز GEM در بازسازی و اندازه گیری دقیق تر جرم ذرات و بررسی قدرت تفکیک جرمی

ندارند ولی با عبور مستقیم از درون مواد و حجم های مختلف با مشخص کردن حدود مرزهای آنها قادر به تخمین و اندازه گیری طول تابش موادی که از آن عبور می کنند، هستند [۹]. همان طور که در کلیه قسمت های شکل ۵ دیده می شود عملکرد هندسه مشخص و مورد تأیید است، بخصوص چنانچه در قسمت های ۷، ۸ و ۹ این شکل آمده است در اکثر بخش های اصلی و فعال آشکارساز، میزان طول تابش برای این هندسه طراحی شده و مواد به کار رفته آن مقدار کوچکی در حدود



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودارهای اندازه جرم ناوردای بازسازی شده برای $J/\Psi(1S)$ (بالا) و $\Psi(2S)$ (پایین)، با حضور آشکارساز GEM (آبی - چپ) و بدون آن (قرمز - راست) در هندسه کلی آزمایش PANDA.



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودارهای مقایسه ای اندازه گیری جرم ناوردا بازسازی شده برای $\Psi(2S)$ (چپ) و $J/\Psi(1S)$ (راست)، با حضور آشکارساز GEM (آبی) و بدون آن (قرمز) در هندسه کلی آزمایش PANDA.

مطابق اندازه گیری های PDG به دست آمده و مورد تأیید است [۱۰]. برای پرداختن به اهمیت نقش این آشکارساز در هندسه کلی چیدمان آزمایش PANDA، این نمودارها به ازای حضور و عدم حضور این آشکارساز در هندسه و چیدمان کلی در شکل ۷ با هم مقایسه شده اند. همان طور که مشاهده می شود این آشکارساز در بهبود و افزایش دقت مقادیر اندازه گیری شده نقش مثبتی دارد و با استفاده از آشکارساز GEM تعداد ذرات ردیابی شده افزایش یافته، قله منحنی تیزتر و اندازه جرم دقیق تر شده است. میزان قدرت تفکیک جرمی با حضور آشکارساز GEM در چیدمان کلی برای جرم ذرات $\Psi(2S)$ و $J/\Psi(1S)$ به ترتیب 0.06228 ± 0.00138 و 0.04935 ± 0.00057 برآورد شده است.

آن، با استفاده از کانال (بنچ مارک) واپاشی مزون چارمونیم $\text{anti}P+P \rightarrow \Psi(2S) \rightarrow \gamma J/\Psi(1S) \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ کلیه شبیه سازی به ازای تعداد ده هزار رویداد برای برهم کنش پروتون-پادپروتون با تکانه متوسط $6 \text{ GeV}/c$ و با استفاده کد Geant4 به طور جداگانه اجرا شد. بدین منظور و برای مقایسه بهتر، کل هندسه آزمایش PANDA با حضور و بدون حضور آشکارساز GEM در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۶ نمودار توزیع جرمی را برای $\Psi(2S)$ و $J/\Psi(1S)$ نشان می دهد که مقدار جرم آنها به ترتیب $3.094 \pm 0.0014 \text{ GeV}/c^2$ و $3.0678 \pm 0.0012 \text{ GeV}/c^2$ حاصل شد. مقادیر حاصل برای جرم ذرات $\Psi(2S)$ و $J/\Psi(1S)$ به روش بازسازی ناوردای جرم

۱. Invariant mass reconstruction

۴. بحث و نتیجه گیری

پایه‌سازی و شبیه‌سازی اولیه هندسه آشکارساز ردیاب GEM برای پروژه PANDA، با استفاده از کدهای محاسباتی مورد نظر ارائه و با موفقیت انجام شد. عملکرد این آشکارساز با اندازه‌گیری میزان پذیرش زاویه‌ای، بازده و قدرت تفکیک تکانه ذرات مورد بررسی قرار گرفت. بر طبق نتایج این شبیه‌سازی، در ناحیه طیف‌سنج هدف در زوایای رو به جلو، این آشکارساز قادر است ذرات باردار گسیل شده در زوایای بسته حدود ۲ تا ۲۰ درجه را به خوبی پوشش دهد. بازده و قدرت تفکیک تکانه ذرات برای

مراجع

1. S Spataro, *Journal of Physics: Conference Series* **331** (2011) 032031.
2. Events generators webpage: <http://www.slac.stanford.edu/lange/EvtGen>.
3. A Capella *et al.*, *Phys. Rept.* **236** (1994) 225.
4. M Bleicher *et al.*, *J. Phys. G* **25** (1999) 1859.
5. P Yepes, *Nucl. Inst. Meth. A* **380** (1996) 582.
6. F Sauli, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **805** (2016) 2.
7. N. Divani-Veisi *et al.*, Monte Carlo simulation for the PANDA GEM-tracker, *GSI SCIENTIFIC REPORT* (2015) 92.
8. S Spataro, *Journal of Physics: Conference Series* **119** (2008) 032035.
9. S Bianco *et al.*, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A* **654** (2011) 630.
10. Particle Data Group webpage: <http://www-pdg.lbl.gov>.

آن قابل قبول و مورد تأیید است. با توجه به حجم و اندازه کل مواد تعریف شده، طول تابش کمتر از 10^{-1} برای قسمت‌های اصلی آن تخمین زده شده که باعث می‌شود تا در رسیدن تابش‌ها به سایر بخش‌های مجموعه آزمایش PANDA، برای سایر شناسایی‌ها و اندازه‌گیری‌ها، خللی ایجاد نشود. مطالعه بر روی این آشکارساز و بررسی عملکرد آن در شبیه‌سازی‌های فیزیکی و مطالعه سایر کانال‌های واپاشی در برهم کنش پروتون-پادپروتون منجر به بازسازی و اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری برای تکانه و جرم ذرات گسیل شده خواهد شد.