

کاربرد توموگرافی پراکندگی میون در شناسایی مواد پرتوزا با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو

زهرا ایمانی^۱، نجمه محمدی^{۱*} و یوسف پزشکیان^{۱*}

^۱گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی تبریز، تبریز، ایران.

*آذربایجان شرقی، تبریز، دانشگاه صنعتی تبریز، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کد پستی: ۵۳۳۱۸-۱۷۶۳۴.

پست الکترونیکی: pezeschkian@sut.ac.ir ; n_mohammadi@sut.ac.ir

چکیده

این مقاله به شناسایی و تصویربرداری از مواد پرتوزا به عنوان زباله های هسته ای، با استفاده از تکنیک توموگرافی پراکندگی میون می پردازد. در این مطالعه، از کد مونت کارلو Geant4 برای بررسی زاویه پراکندگی و تضعیف انرژی میون ها هنگام عبور از مواد پرتوزا استفاده شده است. برای این منظور ۱۰۵ میون با انرژی مشخص در بازه ۱ GeV الی ۸ GeV به صورت تک انرژی و با گام های ۱۰۰ MeV به صورت سطحی گسیل شده و عبور آن ها از مواد پرتوزای مختلفی نظیر اورانیوم، پلوتونیوم، استرانسیوم، کبالت، کادمیوم و سزیم ترابرد شده است. نتایج نشان داد که زاویه پراکندگی با چگالی مواد متناسب است به گونه ای که محتمل ترین زاویه پراکندگی در مواد با چگالی پایین مثل سزیم به ۱۳/۰۵ mRad و در مواد با چگالی بالاتر مثل پلوتونیوم به ۶۸/۰۵ mRad می رسد. همچنین با افزایش انرژی میون های فرودی، میزان انحراف زاویه ای آن ها کاهش می یابد که با نظریه مولیر همخوانی دارد. علاوه بر این مشاهده گردید که در مواد با چگالی بالا، تضعیف انرژی میون ها بیشتر است. بر اساس نتایج به دست آمده، نفوذ بیشتر میون ها در مواد با چگالی کمتر مشاهده شد که می تواند در کاربردهای عملیاتی مانند مدیریت و نظارت بر مخازن زباله های هسته ای مفید باشد. بنابراین، تفاوت رفتار میون با مواد دارای چگالی های مختلف، می تواند به عنوان ابزاری دقیق و کارآمد برای تشخیص مواد پرتوزا به کار گرفته شود.

کلیدواژگان: توموگرافی پراکندگی میون، شبیه سازی مونت کارلو، Geant4، زاویه پراکندگی میون، تضعیف انرژی میون.

۱. مقدمه

روش های نوآورانه، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. میون ها ذرات بنیادی مشابه الکترون ها اما سنگین تر از آن ها هستند و انرژی بالا و قدرت نفوذ فوق العاده ای دارند. این ذرات به طور طبیعی از پرتوهای کیهانی تولید می شوند و به همین جهت تولید آن ها نیازمند هزینه و انرژی ویژه ای نیست و به صورت

شناسایی دقیق و به موقع مواد پرتوزا نه تنها از لحاظ ایمنی و بهداشت عمومی بلکه برای حفاظت از محیط زیست و جلوگیری از سوء استفاده های هسته ای اهمیت ویژه ای دارد. در این زمینه، تکنیک های نوین تصویربرداری نقشی کلیدی ایفا می کنند و توموگرافی پراکندگی میون^۱ (MST) به عنوان یکی از

¹ Muon Scattering Tomography

طبیعی و پیوسته در دسترس هستند [۲،۱]. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که MST در طی دو دهه گذشته به سرعت توسعه یابد و در حوزه‌هایی مانند زمین‌شناسی، مهندسی عمران، باستان‌شناسی و ایمنی هسته‌ای کاربردهای فراوانی پیدا کند [۳-۷].

یکی از کاربردهای این تصویربرداری در زمینه مدیریت و تشخیص زباله‌های هسته‌ای است که نیازمند روش‌هایی دقیق و غیرمخرب برای شناسایی محل و میزان ذخیره مواد پرتوزا است. روش توموگرافی پراکندگی میون با بهره‌گیری از نفوذ بالای میون‌ها در داخل مواد، امکان تهیه تصاویر سه‌بعدی از ساختار داخلی مخازن زباله‌های هسته‌ای را فراهم می‌آورد بدون این‌که نیاز به تخریب یا تماس فیزیکی با این مخازن باشد. این ویژگی به‌ویژه در مواردی که دسترسی مستقیم به محل‌های دفن یا نگهداری زباله‌های هسته‌ای دشوار یا پرخطر است، بسیار ارزشمند است [۹،۸]. مطالعاتی که اخیراً برای ارزیابی قابلیت توموگرافی پراکندگی میون در ارائه تصاویری با وضوح بالا از مخازن زباله‌های هسته‌ای صورت گرفته است [۱۰،۱۱]، نشان می‌دهد که این روش می‌تواند تصاویر با وضوح بالا و دقت قابل توجهی از ساختار داخلی مخازن زباله‌های هسته‌ای ارائه دهد.

با وجود مزایای فراوان، روش توموگرافی پراکندگی میون مانند هر تکنیک تصویربرداری دیگری با محدودیت‌هایی همراه است. از مهم‌ترین این محدودیت‌ها، زمان‌بر بودن فرآیند تصویربرداری است؛ به‌گونه‌ای که برای آشکارسازهای افقی، شار میون در سطح دریا تقریباً معادل یک میون بر سانتی‌متر مربع بر دقیقه ($1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) گزارش شده است [۱۲]. بنابراین جمع‌آوری آمار کافی برای بازسازی تصویری با کیفیت مطلوب، نیازمند زمان‌های طولانی (از چند ساعت تا چند روز) است. همچنین دقت مکانی این روش در مقایسه با برخی روش‌های

تصویربرداری مانند پرتونگاری با اشعه ایکس یا گامای صنعتی، محدودتر است و وضوح تصویر نهایی به شدت به تعداد میون‌های آشکارساز شده بستگی دارد [۱۳]. افزون بر این، عملکرد سیستم‌های MST تا حدی به شرایط محیطی مانند ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی و نوسانات شار کیهانی وابسته است که می‌تواند بر کیفیت و قابلیت تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها تأثیر بگذارد. با این حال، ماهیت غیرمخرب^۱ و غیرفعال^۲ بودن این روش در کنار عدم نیاز به چشمه‌های مصنوعی، آن را به گزینه‌ای بسیار جذاب برای کاربردهایی تبدیل می‌کند که روش‌های فعال^۳ به دلایل ایمنی یا محدودیت دسترسی، قابل استفاده نیستند.

اساس توموگرافی پراکندگی میون، انحراف زاویه‌ای میون نسبت به راستای فرودی به هنگام عبور از مواد است [۱۴]. در این مقاله به بررسی زاویه پراکندگی و همچنین تضعیف انرژی میون‌ها هنگام عبور از مواد پرتوزا پرداخته شده است. برای این منظور، از شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از کد Geant^۴ [۱۵]، استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

میون‌ها، به‌عنوان ذرات باردار سنگین، در حین عبور از ماده با میدان الکتریکی هسته‌ها و الکترون‌های اتم‌ها برهم‌کنش‌های کشسان متعددی انجام می‌دهند. این برهم‌کنش‌های کولنی، هرچند به‌تنهایی سبب انحراف‌های کوچک و تصادفی در مسیر حرکت میون می‌شوند، اما تجمع آن‌ها در طول مسیر می‌تواند به تغییر قابل‌توجه زاویه حرکت میون منجر گردد. این پدیده، پراکندگی چندگانه کولنی^۴ (MCS) نامیده می‌شود که عامل اصلی انحراف میون‌ها در ماده محسوب می‌گردد. میزان این انحراف زاویه‌ای به پارامترهایی چون نوع ماده (عدد اتمی و چگالی)، ضخامت عبوری و تکانه میون وابستگی مستقیم دارد.

³ Active

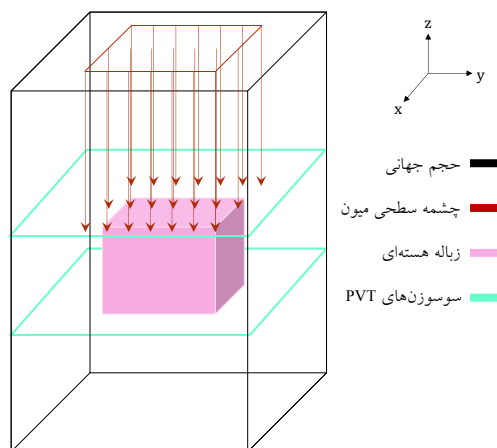
⁴ Multiple Coulomb Scattering

¹ Non-destructive

² Passive

تولید زوج^۱ و پراکندگی چندگانه^۲ به ترتیب با استفاده از $G^4\text{MuIonisation}$ ، $G^4\text{MuBremsstrahlung}$ ، $G^4\text{MuPairProduction}$ و $G^4\text{MuMultipleScattering}$ که کلاس های اختصاصی برای برهم کنش های میون با ماده محسوب می شوند، تعریف شده اند.

هندسه شبیه سازی شده در این مطالعه، در شکل ۱ نمایش داده شده است. حجم جهانی به صورت یک مکعب مستطیل با ابعاد $130 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$ است که حاوی هوا است. در مرکز این حجم، مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ به عنوان محل نگهداری زباله های هسته ای شامل اورانیوم، پلوتونیوم، استرانسیوم، کبالت، کادمیوم و سزیم تعریف شده است. همه مواد موجود در هندسه شبیه سازی، مطابق با پایگاه داده مواد $G^4\text{NIST}$ تعریف شده اند که مشخصات آن ها در جدول ۱ آمده است. جهت ثبت ورود و خروج میون از مکعب حاوی مواد پرتوزا، از سوسوزن های پلاستیکی پلی وینیل تولوئن^۶ (PVT) با ضخامت 0.2 cm در بالا و پایین این مکعب بهره گرفته شده است.



شکل (۱): طرحواره هندسه شبیه سازی شده در G^4 .

در این شبیه سازی از چشمه سطحی میون واقع در صفحه xy با ارتفاع $z = 65 \text{ cm}$ که توسط ^7GPS تولید می شود،

بر اساس نظریه مولیر^۱، توزیع احتمالی زاویه پراکندگی به خوبی با یک تابع گاوسی با میانگین صفر قابل توصیف است و انحراف معیار این زاویه پراکندگی از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۷، ۱۶].

$$\sigma_\theta = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta p c} \sqrt{\frac{T}{X_0} \left[1 + 0.338 \ln \left(\frac{T}{X_0} \right) \right]} \quad (1)$$

در این رابطه p تکانه ذره باردار، L ضخامت ماده و X_0 طول تابش ماده است.

طول تابش یک پارامتر کلیدی در فیزیک ذرات است و مقیاسی از فاصله ای را که یک ذره باردار مانند میون در ماده طی می کند تا انرژی خود را به مقدار $1/e$ (حدود ۳۷٪) از مقدار اولیه کاهش دهد، نشان می دهد. این پارامتر به خواص ماده بستگی داشته و از رابطه ۲ به دست می آید که در آن، A عدد جرمی، Z عدد اتمی و ρ چگالی ماده است.

$$X_0 \approx \frac{716.4 A g/cm^2}{\rho Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} \quad (2)$$

بخش بزرگی از انحراف میون نسبت به راستای فرودی به ماده، به دلیل پراکندگی های چندگانه است. سایر برهم کنش ها (یونیزاسیون، تابش ترمزی و تولید زوج) بیشتر موجب تضعیف انرژی میون در ماده شده و نقش کمتری در انحراف این ذره دارند.

۱.۲ شبیه سازی G^4

در پژوهش حاضر، کد مونت کارلوی G^4 ۱۱.۲.۲، برای بررسی زاویه پراکندگی و کاهش انرژی میون ها هنگام عبور از مواد پرتوزا به کار برده شده است. جهت تعیین دقیق برهم کنش های میون با ماده، تعریف فیزیک این شبیه سازی با استفاده از کلاس $G^4\text{VUserPhysicsList}$ انجام شده است. در این کلاس برهم کنش های یونیزاسیون^۲، تابش ترمزی^۳،

^۵ MuMultipleScattering

^۶ Polyvinyl toluene

^۷ General Particle Source

^۱ Molière's theory

^۲ Ionisation

^۳ Bremsstrahlung

^۴ PairProduction

جدول (۱): مشخصات مواد از پایگاه داده مواد G4_NIST.

ماده	چگالی (g/cm ³)	عدد اتمی
Pu	۱۹/۸۴	۹۴
U	۱۸/۹۵	۹۲
Co	۸/۹	۲۷
Cd	۸/۵۶	۴۸
Sr	۲/۵۴	۳۸
Cs	۱/۸۷۳	۵۵

۳. نتایج و بحث

۱.۳. پراکندگی میون

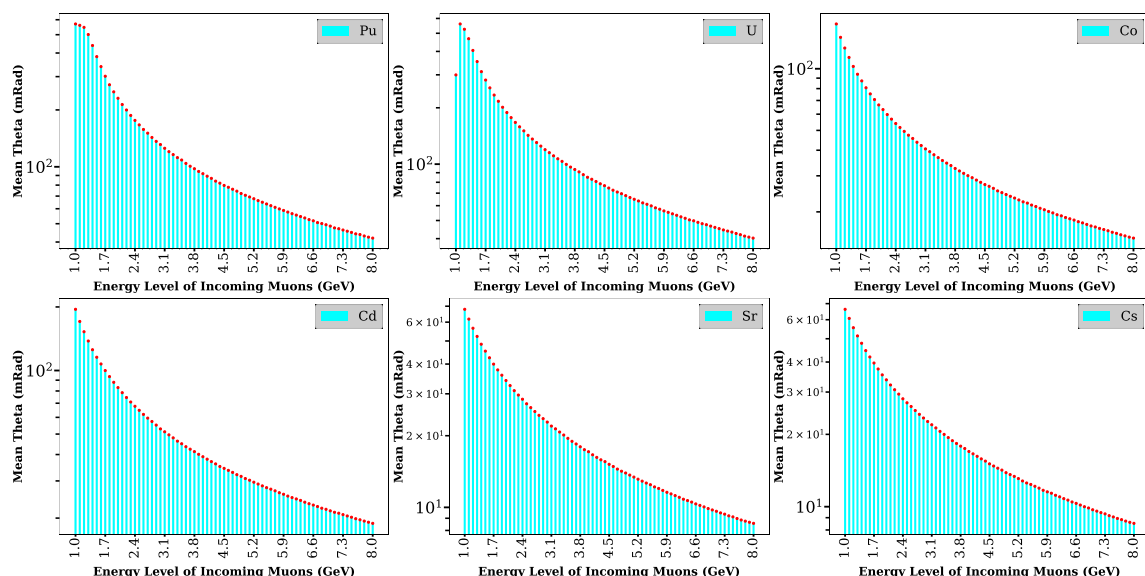
میانگین زاویه انحراف میون‌ها برای میون‌های تک انرژی در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که برای تمامی مواد پرتوزا، افزایش انرژی منجر به کاهش میانگین زاویه انحراف میون‌ها نسبت به راستای فرود آن‌ها شده است. این نتیجه در توافق با رابطه ۱ است که در آن، بین انرژی یک ذره باردار و زاویه انحراف آن درون ماده، رابطه‌ای معکوس وجود دارد. به بیان دیگر، هنگامی که انرژی میون افزایش می‌یابد، ذره با سرعت بیشتری در ماده حرکت می‌کند و احتمال برهم‌کنش میون با ماده کاهش می‌یابد. بنابراین، انحراف کمتری از مسیر اصلی خود پیدا می‌کند [۱۲].

استفاده شده است. برای بررسی زاویه پراکندگی و تضعیف انرژی میون‌ها در مواد، میون‌های تک انرژی از ۱ GeV تا ۸ GeV با گام‌های ۱۰۰ MeV از این چشمه منتشر می‌شوند که در هر بار، ۱۰^۵ میون از چشمه وارد ماده می‌شود. همچنین مقدار قطع برد^۱ برای ذرات میون، برابر با مقدار پیش‌فرض Geant4 یعنی ۱ mm در نظر گرفته شده است.

ترابرد ذرات میون با استفاده از کلاس G4Step انجام شده است. در این کلاس، بردار تکانه ($\vec{p}$) میون‌های رسیده به سوسوزن پایین بدست آمده است و سپس زاویه پراکندگی میون نسبت به راستای مثبت محور Z از رابطه ۳ حاصل شده است. لازم به ذکر است، عدم قطعیت خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی، در همه موارد کمتر از ۲٪ است.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{p_z}{|\vec{p}|}\right) \quad (3)$$

زاویه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، با استفاده از کد پایتون تحلیل شده و در نهایت زاویه انحراف میون نسبت به راستای گسیل آن، محاسبه شده است.



شکل (۲): توزیع میانگین زاویه پراکندگی میون‌ها بر حسب انرژی فرودی ۱ GeV تا ۸ GeV برای مواد مختلف.

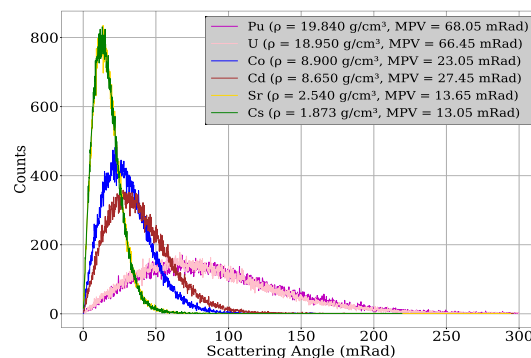
^۱ Range cut-off

این مواد از یکدیگر خواهد شد. اما زاویه پراکندگی سایر مواد به دلیل نزدیکی مقادیر چگالی، اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند. از این رو، در عمل، تشخیص این مواد با استفاده از زاویه پراکندگی آن‌ها دشوار خواهد بود. بنابراین، هر چه تفاوت چگالی میان مواد بیشتر باشد، به دلیل تمایز بالاتر در توزیع زاویه پراکندگی، تشخیص مواد دقیق‌تر خواهد بود [۲۱، ۲۰].

۲.۳. تضعیف انرژی میون

میون‌ها هنگام عبور از ماده، علاوه بر پراکندگی چندگانه، برهم‌کنش‌های یونیزاسیون، تولید جفت و تابش ترمزی را نیز تجربه می‌کنند که این فرایندها باعث کاهش انرژی آن‌ها در طول عبور از ماده می‌شود [۲۲]. شکل ۴ میانگین انرژی میون‌های خروجی از مواد مختلف را نمایش می‌دهد. طبق این شکل، با افزایش انرژی میون‌های فرودی، انرژی میون‌های خروجی نیز افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، تضعیف انرژی میون در ماده کمتر می‌شود. در واقع، افزایش انرژی میون‌های فرودی به معنای افزایش سرعت آن‌ها بوده و در نتیجه، سریع‌تر از مواد عبور کرده و فرصت کمتری برای برهم‌کنش با ماده پیدا می‌کنند، بنابراین انرژی کمتری را در طول مسیر از دست می‌دهند [۲۳]. برای مقایسه اثر چگالی بر تضعیف انرژی میون، طیف انرژی میون‌های خروجی برای میون‌های فرودی با انرژی ۴ GeV در شکل ۵ نمایش داده شده است. بر اساس میانگین انرژی خروجی میون‌ها، این ذرات در عبور از پلوتونیوم، اورانیوم، کبالت، کادمیوم، استرانسیوم و سزیم به ترتیب با میانگین تضعیف انرژی ۳۴/۷۸٪، ۳۳/۵۳٪، ۱۹/۵۶٪، ۱۷/۶۴٪، ۵/۵٪ و ۳/۹٪ انرژی مواجه می‌شوند. این نشان می‌دهد میون‌ها هنگام عبور از اورانیوم و پلوتونیوم به‌عنوان موادی با چگالی بالا، بیشترین تضعیف انرژی را دارند و با کاهش چگالی مواد، مقدار این افت انرژی، کاهش یافته است. به گونه‌ای که میون‌های عبور کرده از سزیم با انرژی نزدیک به انرژی فرودی از آن خارج شده‌اند.

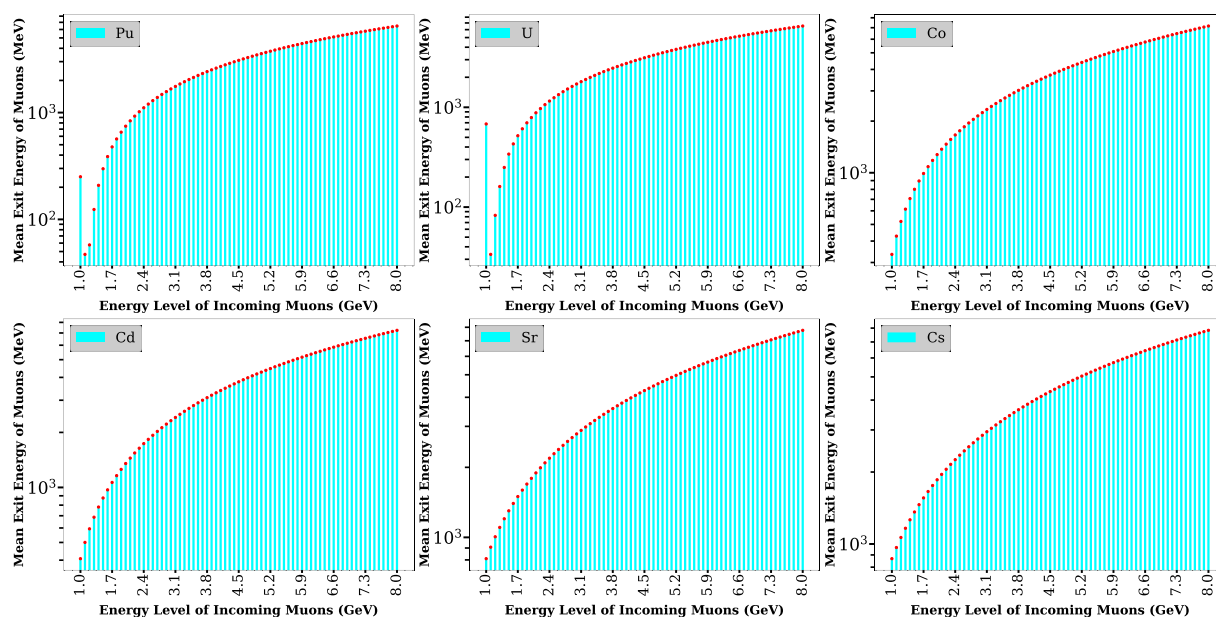
میانگین انرژی میون‌ها در سطح دریا در حدود ۴ GeV است [۱۹، ۱۸]. از این رو برای بررسی تأثیر چگالی ماده بر زاویه پراکندگی میون، طیف زاویه پراکندگی برای میون فرودی با انرژی ۴ GeV رسم شده است (شکل ۳).



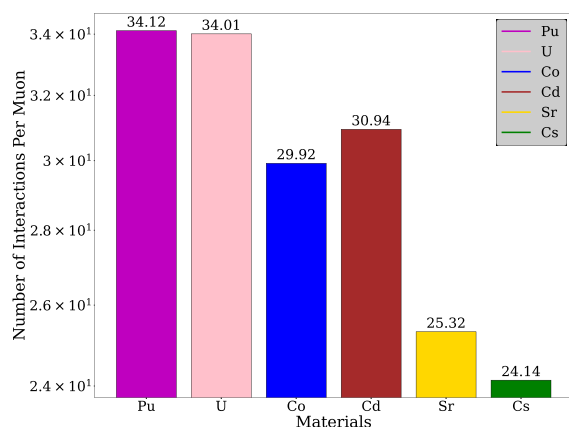
شکل (۳): توزیع زاویه پراکندگی میون با انرژی فرودی ۴ GeV برای مواد مختلف با گام‌های ۰/۱ mRad

با توجه به این شکل، زاویه‌ای که میون‌ها با بیشترین احتمال از ماده خارج شده‌اند^۱ (MPV)، با کاهش چگالی ماده، کاهش یافته است. به طوری که این زاویه برای مواد پلوتونیوم، اورانیوم، کبالت، کادمیوم، استرانسیوم و سزیم به ترتیب دارای مقادیر ۶۸/۰۵، ۶۶/۴۵، ۲۳/۰۵، ۲۷/۴۵، ۱۳/۶۵ و ۱۳/۰۵ mRad است. بر اساس این نتایج، بزرگ‌ترین زاویه پراکندگی متعلق به اورانیوم و پلوتونیوم است که دارای بالاترین چگالی هستند. در مقابل، استرانسیوم و سزیم با کمترین چگالی، زاویه پراکندگی کمتری دارند. در مواد با چگالی بالا، تراکم زیاد اتم‌ها باعث برخورد بیشتر میون‌ها با ماده می‌شود که این امر منجر به افزایش پراکندگی می‌گردد. به همین دلیل، مواد چگال‌تر زاویه‌های پراکندگی بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند. این ویژگی به شناسایی مواد مختلف کمک می‌کند، زیرا زاویه پراکندگی با تغییر چگالی ماده تغییر می‌کند. بر اساس شکل ۳، چگالی پلوتونیوم و اورانیوم تقریباً ده برابر چگالی سزیم است که این تفاوت چگالی باعث افزایش حدودی زاویه پراکندگی این دو ماده به میزان پنج برابر نسبت به سزیم شده است. این اختلاف زاویه پراکندگی در آزمایش‌های تجربی موجب تشخیص بهتر

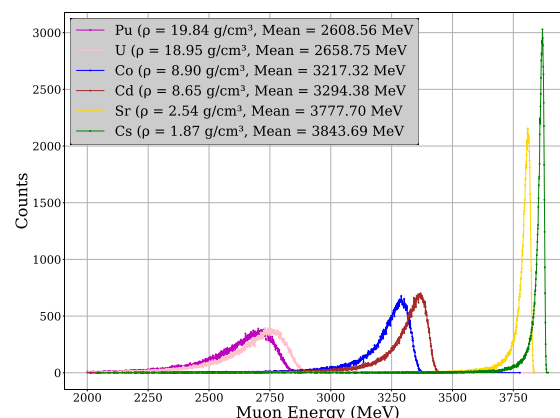
¹ Most Probable Value



شکل (۴): میانگین انرژی میون‌های خارج شده از مواد مختلف بر حسب انرژی فرودی.

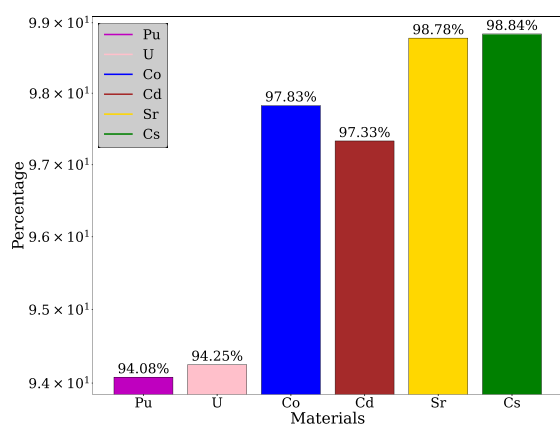


شکل (۶): تعداد برهم‌کنش‌های انجام شده به ازای یک میون با انرژی فرودی ۴ GeV در داخل مواد مختلف.



شکل (۵): توزیع انرژی میون‌های خارج شده از مواد مختلف با انرژی فرودی ۴ GeV.

در واقع با کاهش چگالی ماده، میون‌ها برهم‌کنش‌های کمتری را با ماده انجام داده و انرژی کمتری را از دست می‌دهند. شکل ۶ که مربوط به تعداد برهم‌کنش‌های انجام شده به ازای یک میون در داخل این مواد است، این مطلب را به‌خوبی نشان می‌دهد. ازسوی دیگر در داخل مواد با چگالی‌های کم، در نتیجه کاهش تعداد برهم‌کنش‌های انجام‌یافته توسط میون‌ها، اکثر این ذرات قادر به عبور از ماده می‌شوند. شکل ۷ تعداد میون‌های خارج شده از مکعب حاوی مواد مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، می‌توان مشاهده کرد که تعداد میون‌های خارج شده از مواد مختلف، با کاهش چگالی مواد، دارای افزایش نسبی است.



شکل (۷): درصد میون‌های خارج شده از داخل مکعب حاوی مواد مختلف.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از کد شبیه‌سازی مونت کارلو Geant^۴ برای بررسی زاویه پراکندگی و کاهش انرژی میون‌ها هنگام عبور از مواد پرتوزا استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه چگالی مواد بر زاویه پراکندگی و تضعیف انرژی میون‌ها است.

به طور خاص، مواد با چگالی بالاتر مانند اورانیوم و پلوتونیوم زاویه‌های پراکندگی بیشتری از خود نشان می‌دهند که ناشی از تعداد بیشتر برهم‌کنش میون‌ها با این مواد است. در مقابل، مواد با چگالی کمتر مانند استرانسیوم و سزیم دارای زاویه پراکندگی کمتری بوده که این امر به دلیل کاهش احتمال برهم‌کنش میون‌ها با این مواد است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش انرژی میون‌های فرودی، میزان انحراف زاویه‌ای آن‌ها کاهش می‌یابد. این یافته با نظریه مولیر همخوانی دارد و نشان‌دهنده این است که میون‌های با انرژی بالاتر، به دلیل عبور سریع از ماده، کمتر در معرض برهم‌کنش‌های متعدد با ماده هستند و بنابراین تغییر مسیر آن‌ها کمتر است.

۵. مراجع

1. G. Yang, T. Clarkson, S. Gardner, D. Ireland, R. Kaiser, D. Mahon, R. A. Jebali, C. Shearer, M. Ryan. Novel muon imaging techniques. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 377 (2137) (2019) 20180062.
2. T. K. Gaisser. Spectrum of cosmic-ray nucleons, kaon production, and the atmospheric muon charge ratio. *Astropart. Phys.* 35 (12) (2012) 801–806.
3. R. D'Alessandro, F. Ambrosino, G. Baccani, L. Bonechi, M. Bongi, A. Caputo, R. Ciaranfi, L. Cimmino, V. Ciulli, M. D'Errico, F. Giudicepietro, S. Gonzi, G. Macedonio, V. Masone, B. Melon, N. Mori, P. Noli, M. Orazi, P. Passeggio, R. Peluso, G. Saracino, L. Scognamiglio, P. Strolin, E. Vertech, L. Viliani. Volcanoes in Italy and the role of muon radiography. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 377 (2137) (2019) 20180050.
4. M. J. Dobrowolska, J. J. Velthuis, C. De Sio, A. K. Kopp, R. Milne, P. Pearson. Development of muon scattering tomography for detection of reinforcement in concrete. *J. Instrum.* 17 (9) (2022) C09011.
5. M. J. Dobrowolska, J. J. Velthuis, A. K. Kopp, M. Perry, P. Pearson. Towards an application of muon scattering tomography as a technique for detecting rebars in concrete. *Smart Mater. Struct.* 29 (5) (2020) 055015.
6. A. Bonneville, R. T. Kouzes, J. Yamaoka, C. Rowe, E. Guardincerri, J. M. Durham, C. L. Morris, D. C. Poulson, K. Plaud-Ramos, D. J. Morley, J. D. Bacon, J. Bynes, J. Cercillieux, C. Ketter, K. Le, I. Mostafanezhad, G. Varner, J. Flygare, A. T. Lintereur. A novel muon detector for borehole density tomography. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 851 (2017) 108–117.
7. A. S. Georgadze. Rapid cargo verification with cosmic ray muon scattering and absorption tomography. *J. Instrum.* 19 (10) (2024) P10033.
8. G. Jonkmans, V. N. P. Anghel, C. Jewett, M. Thompson. Nuclear waste imaging and spent fuel verification by muon tomography. *Ann. Nucl. Energy* 53 (2013) 267–273.
9. C. Thomay, J. Velthuis, T. Poffly, P. Baesso, D. Cussans, L. Frazao. Passive 3D imaging of nuclear waste containers with Muon Scattering

علاوه بر این، تضعیف انرژی میون‌ها نیز به طور مستقیم با چگالی ماده مرتبط است به‌گونه‌ای که مواد با چگالی بالاتر باعث افزایش تضعیف انرژی میون‌ها می‌شوند که این امر می‌تواند در تعیین جنس زباله‌های هسته‌ای مؤثر باشد.

از دیگر نتایج حاصله می‌توان به افزایش تعداد میون‌های عبوری در مواد با چگالی پایین‌تر اشاره کرد. این موضوع نشان‌دهنده نفوذ بالاتر میون‌ها در مواد سبک‌تر است که می‌تواند در کاربردهای عملیاتی مانند مدیریت و نظارت بر مخازن زباله‌های هسته‌ای بسیار مفید باشد.

به‌طورکلی، این مطالعه نشان می‌دهد در صورت تفاوت قابل‌توجه چگالی مواد پرتوزا، توموگرافی پراکندگی میون می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد و دقیق برای شناسایی این مواد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، امکان تشخیص مواد مختلف با استفاده از توزیع انرژی میون‌های خارج شده از آن مواد نیز وجود دارد؛ اما از آنجایی که این توزیع انرژی در آزمایش‌ها تجربی قابل‌دستیابی نیست، این روش صرفاً در شبیه‌سازی می‌تواند نتیجه‌بخش باشد.

- Tomography. *J. Instrum.* 11 (3) (2016) P03008.
10. L. Frazão, J. J. Velthuis, S. Maddrell-Mander, C. Thomay. High-resolution imaging of nuclear waste containers with Muon Scattering Tomography. *J. Instrum.* 14 (8) (2019) P08005.
 11. A. F. Alrheli, D. Barker, C. De Sio, D. Kikola, A. K. Kopp, M. Mhaidra, J. P. Stowell, L. F. Thompson, J. J. Velthuis, M. J. Weekes. A quantitative assessment of Imaging High-Z and Medium-Z materials using Muon Scattering Tomography. arXiv:2201.01877 (2022).
 12. M. Tanabashi, K. Hagiwara, K. Hikasa, K. Nakamura, Y. Sumino, F. Takahashi, J. Tanaka, K. Agashe, G. Aielli, C. Amsler, M. Antonelli, D. M. Asner, H. Baer, Sw. Banerjee, R. M. Barnett, T. Basaglia, C. W. Bauer, J. J. Beatty, V. I. Belousov, J. Beringer, S. Bethke, A. Bettini, H. Bichsel, O. Biebel, K. M. Black, E. Blucher, O. Buchmuller, V. Burkert, M. A. Bychkov, R. N. Cahn, M. Carena, A. Ceccucci, A. Cerri, D. Chakraborty, M.-C. Chen, R. S. Chivukula, G. Cowan, O. Dahl, G. D'Ambrosio, T. Damour, D. de Florian, A. de Gouvêa, T. DeGrand, P. de Jong, G. Dissertori, B. A. Dobrescu, M. D'Onofrio, M. Doser, M. Drees, H. K. Dreiner, D. A. Dwyer, P. Eerola, S. Eidelman, J. Ellis, J. Erler, V. V. Ezhela, W. Fetscher, B. D. Fields, R. Firestone, B. Foster, A. Freitas, H. Gallagher, L. Garren, H. J. Gerber, G. Gerbier, T. Gershon, Y. Gershtein, T. Gherghetta, A. A. Godizov, M. Goodman, C. Grab, A. V. Gritsan, C. Grojean, D. E. Groom, M. Grunewald, A. Gurtu, T. Gutsche, H. E. Haber, C. Hanhart, S. Hashimoto, Y. Hayato, K. G. Hayes, A. Hebecker, S. Heinemeyer, B. Heltsley, J. J. Hernandez-Rey, J. Hisano, A. Hocker, J. Holder, A. Holtkamp, T. Hyodo, K. D. Irwin, K. F. Johnson, M. Kado, M. Karliner, Y. Kazama, U. F. Katz, E. Klempt, S. R. Klein, R. V. Kowalewski, F. Krauss, M. Kreps, B. Krusche, Y. V. Kuyanov, Y. Kwon, O. Lahav, J. Laiho, J. Lesgourgues, A. Liddle, Z. Ligeti, C.-J. Lin, T. M. Lippmann, C. Liss, T. M. Littenberg, K. S. Lugovsky, S. B. Lugovsky, A. Lusiani, Y. Makida, F. Maltoni, T. Mannel, A. V. Manohar, W. J. Marciano, A. D. Martin, A. Masoni, J. Matthews, U.-G. Meissner, D. Milstead, R. E. Mitche, K. Moenig, P. Molaro, F. Moortgat, M. Moskvic, H. Murayama, M. Narain, P. Nason, S. Navas, P. Neubert, P. Nevski, Y. Nir, K. A. Olive, S. P. Griso, J. Parsons, C. Patrignani, J. A. Peacock, M. Pennington, S. T. Petcov, V. A. Petrov, E. Pianori, A. Piepke, A. Pomarol, A. Quadt, J. Rademacker, G. Raffelt, B. N. Ratcliff, P. Richardson, A. Ringwald, A. Roesler, S. Rolli, A. Romaniouk, L. J. Rosenberg, J. L. Rosner, G. Rybka, R. A. Ryutin, C. T. Sachrajda, Y. Sakai, G. P. Salam, S. Sarkar, F. Sauli, O. Schneider, K. Scholberg, A. J. Schwartz, D. Scott, V. Sharma, S. R. Sharpe, T. Shutt, M. Silari, T. Sjostrand, P. Skands, T. Skwarnicki, J. G. Smith, G. F. Smoot, S. Spanier, H. Spieler, C. Spiering, A. Stah, S. L. Stone, T. Sumiyoshi, M. Syphers, K. Terashi, J. Terning, U. Thoma, R. S. Thorne, L. Tiator, M. Titov, N. P. Tkachenko, N. A. Tornqvist, D. R. Tovey, G. Valencia, R. van de Water, N. Varelas, G. Venanzoni, L. Verde, M. G. Vincet, P. Voge, A. Vogt, S. P. Wakely, W. Walkowiak, C. W. Walter, D. Wands, D. R. Ward, M. O. Wascko, G. Weiglein, D. H. Weinberg, E. J. Weinberg, M. White, L. R. Wiencke, S. Willocq, C.-C. Woh, J. Womersley, C. L. Woody, R. L. Workman, W.-M. Yao, G. P. Zeller, O. V. Zenin, R.-Y. Zhu, S.-L. Zhu, F. Zimmermann, P. A. Zyla, J. Anderson, L. Fuller, V. S. Lugovsky, P. Schaffner. Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D* 98 (3) (2018) 030001.
 13. E. Niederleithinger, S. Gardner, T. Kind, R. Kaiser, M. Grunwald, G. Yang, B. Redmer, A. Waske, F. Mielentz, U. Effner, C. Köpp, A. Clarkson, F. Thomson, M. Ryan, D. Mahon. Muon Tomography of the Interior of a Reinforced Concrete Block: First Experimental Proof of Concept. *J. Nondestruct. Eval.* 40 (3) (2021) 65.
 14. S. Pesente, S. Vanini, M. Benettoni, G. Bonomi, P. Calvini, P. Checchia, E. Conti, F. Gonella, G. Nebbia, S. Squarcia, G. Viesti, A. Zenoni, G. Zumerle. First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 604 (3) (2009) 738–746.
 15. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytrcek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J. J. Gomez Cadenas, I. Gonzalez, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F. W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya,

- M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampen, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O'Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M. G. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J. P. Wellisch, T. Wenaus, D. C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, D. Zschesche. GEANT4—a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 506 (3) (2003) 250–303.
16. S. Tripathy, J. Datta, N. Majumdar, S. Mukhopadhyay. Numerical evaluation of a muon tomography system for imaging defects in concrete structures. *Eur. Phys. J. Plus* 136 (8) (2021) 824.
 17. A. Georgadze. Optimization study of a muon tomography system for imaging of nuclear waste containers. *Acta Phys. Pol. A* 142 (3) (2022) 391–398.
 18. J. J. Beatty, J. Matthews, S. P. Wakely. 29. Cosmic Rays. In: M. Tanabashi et al. (Particle Data Group). *Phys. Rev. D* 030001 (October) (2019) 1-21.
 19. E. Preziosi, F. Arcieri, A. Caltabiano, P. Camarri, S. Casagrande, D. Cavicchioni, F. A. Danza, E. Fabrizi, M. Fabrizi, G. Festa, C. Fornaro, F. Marchese, D. Merella, M. C. Morone, P. Picella, P. Picozza, L. Pizzimento, A. Rocchi, R. Santonico, R. Senesi, R. Sparvoli, G. M. Todesco, A. Cianchi. TECNOMUSE: a novel, RPC-based, muon tomography scanner for the control of container terminals. *J. Phys. Conf. Ser.* 1548 (1) (2020) 012021.
 20. A. I. Topuz, M. Kiisk, A. Giammanco. Non-destructive interrogation of nuclear waste barrels through muon tomography: a Monte Carlo study based on dual-parameter analysis via GEANT4 simulations. *J. Instrum.* 17 (12) (2022) P12005.
 21. B. K. Sirasva, S. Jena, R. Gupta. Study of density independent scattering angle and energy loss for low- to high-Z material using Muon Tomography. arXiv:2302.00447 (2023).
 22. C. Grupen, B. Shwartz. *Particle Detectors*. Cambridge: Cambridge University Press; 2008.
 23. G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons; 2010.