

اعتبارسنجی مدل‌های تابش ترمزی Geant4 در انرژی ۱۹/۵ MeV

محسن اکبری فسخودی^۱، کورش جاویدان^۱

^۱ گروه فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

اعتبارسنجی مدل‌های فیزیکی Geant4 جهت اطمینان بخشی به گروه‌های کاری و پژوهشی که از این بسته نرم‌افزاری در مواردی چون دوزسنجی، طراحی آشکارساز و غیره استفاده می‌کنند از اهمیت بالایی برخوردار است. ما جهت اعتبارسنجی مدل تابش ترمزی به شبیه‌سازی یک آزمایش توسط این بسته نرم‌افزاری پرداخته‌ایم. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با نتایج آزمایش مقایسه کردیم تا میزان دقت مدل تابش ترمزی را با توجه به محدوده خطای این آزمایش بسنجیم. نتیجه بررسی‌ها با توجه به آزمون کای اسکوار نشان می‌دهد که فهرست فیزیک الکترومغناطیسی استاندارد و لیورمور در انرژی ۱۹/۵ MeV و $Z=78$ نتایج قابل قبولی به دست می‌دهند و نتایج فهرست فیزیک پلنوپه در این انرژی و این Z پذیرفتنی نیست. فهرست فیزیک الکترومغناطیسی استاندارد سرعت بهتر و فهرست فیزیک لیورمور اطمینان‌پذیری بیشتری نشان می‌دهد.

اعتبارسنجی گسترده و روش‌مند کل محتوی فیزیکی Geant4 برای تضمین اعتبار شبیه‌سازی‌های بر مبنای آن امری ضروری است. دو سطح مختلف اعتبارسنجی وجود دارد [۱]

۱. کمیت‌های میکروسکوپی فرآیندهای بنیادی مختلف مانند سطح مقطع، توزیع‌های زاویه‌ای و انرژی، ضریب تضعیف، قدرت ایستادن و غیره؛

۲. کمیت‌های ماکروسکوپی حاصل از شبیه‌سازی چیدمان‌های کامل آزمایشگاهی.

در هریک از دو مورد، نتایج شبیه‌سازی‌های Geant4 با داده‌های مرجع محرز و معتبر که احتمالاً از پایگاه داده‌های باز و به رسمیت شناخته شده (ICRU, NIST, غیره) و یا از انتشارات در مجلات داوری شده به دست آمده‌اند مقایسه می‌شوند. توافق بین شبیه‌سازی و داده‌های مرجع باید به شیوه‌ای کمی با استفاده از ابزار آماری مناسب مورد آزمون قرار گیرد.

آزمایشی که به منظور اعتبارسنجی در این مقاله انتخاب شد آزمایشی است که در دهه ۵۰ توسط کوچ و همکاران صورت گرفته است [۲].

در این آزمایش الکترون‌های ۱۹/۵ MeV حاصل از یک بتاترون ۲۲ MeV به یک تارگت پلاتینیومی ۰/۰۰۵ اینچی برخورد داده می‌شود. پرتوهای اکس ناشی از این برخورد که در راستای مستقیم هستند توسط یک کالیماتور جدا شده و با مطالعه زوج الکترون-پوزیترون‌های ایجاد شده در یک اتاقک ابر مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این آزمایش توزیع انرژی پرتو اکس با استفاده از طیف انرژی زوج محاسبه می‌شود.

چیدمان آزمایش می‌تواند در دو قسمت توصیف شود: (۱) تجهیزات مورد نیاز برای ایجاد یک باریکه هم راستا شده پرتو اکس ناشی از بتاترون ۲۲ MeV؛ و (۲) تجهیزات مورد نیاز برای آشکارسازی، عکسبرداری و تحلیل الکترون‌های زوج. که ما از قسمت دوم فقط اتافک ابر و میدان مغناطیسی را در نظر می‌گیریم. در شبیه‌سازی، مولد اولیه یک تفنگ ساده که الکترون‌هایی با انرژی ثابت ۱۹/۵ MeV شلیک می‌کند در نظر گرفته شد. تارگت با ابعاد ذکر شده در مقاله و متشکل از عنصر پلاتینیم در مکانی که در پرتوهای اکس از آن ساطع می‌شوند قرار داده شد. اتافک یونیزاسیون را که تاثیر مستقیمی در نتیجه آزمایش نداشت در شبیه‌سازی ننگ‌جانیدیم. چون طول و عرض و مکان دیوار پرسلینی ذکر نشده بود طول و عرض آن را طوری در نظر گرفتیم که منفذ کالیماتور را پوشش دهد و آن را در مکانی دلخواه نزدیک کالیماتور و موازی با دیواره آن قرار دادیم. چون پرسلین‌ها ترکیبات مختلفی می‌توانند داشته باشند و به ترکیب دقیق آن اشاره نشده، ماده این دیواره را کاتولین که ماده غالب ترکیب پرسلین است قرار دادیم. کالیماتور هم بنابر ابعاد ذکر شده و مکان مشخص شده در شکل تعریف شد. ابعاد و مکان سپر فولاد-ماسونیتی از شکل استخراج و پیاده سازی شد. فولاد و ماسونیت هم مانند پرسلین ترکیبات مختلفی دارند که برای فولاد یک ترکیب دلخواه انتخاب شد و چون ماده غالب ماسونیت چوب و ماده غالب چوب سلولز است از ترکیب شیمیایی سلولز برای تعریف ماده آن استفاده کردیم. در شبیه‌سازی، میدان مغناطیسی را ثابت و غیر پالسی با شدت تعریف شده در نظر گرفتیم. جهت ثبت اطلاعات شبیه‌سازی، اتافک ابر را به عنوان آشکارساز حساس تعریف کردیم. برای تشخیص گاماهاهی که وارد اتافک ابر می‌شوند از متد GetStepStatus استفاده شد. برای تشخیص الکترون و پوزیترون‌های ناشی از یک تولید زوج از GetCreatorProcess()->GetProcessName و GetDefinition()->GetParticleName در یک ترکیب شرطی استفاده شد.

نتیجه گیری

جهت بررسی تاثیر سخت افزار در سرعت اجرای شبیه‌سازی، کد بدون تغییر در دو دستگاه با مشخصات مختلف روی Geant4 9.2.p02 مورد اجرا قرار گرفت. در هر دو حالت همانطور که انتظار می‌رود نتایج نهایی فیزیکی یکسان بود ولی اجرا در دستگاه اول ۳۹۸ دقیقه و در دستگاه دوم ۱۸۰ دقیقه به طول انجامید. کلیه اجراهای بعدی در دستگاه دوم صورت گرفت.

برای مقایسه مدل‌های تابش ترمزی مختلف Geant4 یعنی استاندارد، لیورمور (انرژی پایین) و پنلوپه، فهرست‌های فیزیکی مربوط تهیه گردید. در Geant4 9.3 با توجه به تغییراتی که در تعریف مدل‌ها ایجاد شده بود سه فهرست فیزیکی دیگر نیز تهیه شد.

کلیه اجراها با ۲۰ میلیون الکترون فرودی و مقدار قطع ۱ mm صورت گرفت. در هیچ یک از اجراها تولید زوجی در اتافک ابر ثبت نشد.

جهت مقایسه کیفی داده‌های شبیه‌سازی تعداد گاماها در اولین بازه انرژی هیستوگرام آنها به تعداد گاماها در اولین بازه داده مقاله بهنجار شده و هیستوگرام‌های مربوط در ترکیب‌های مختلف همراه هم در یک شکل رسم شدند. در بررسی اجمالی این شکل انحراف چشمگیر داده‌های پیلوپه از مقادیر تجربی کاملاً مشهود بود. جدا از بازه ۱۹-۲۰ MeV و ۱۹ MeV - ۱۸ که تعداد کم‌تر از ۵ است و به همین دلیل از نظر آماری قابل توجه نیست مقادیر تجربی حول ۱۰ MeV مقادیر بیشتری از داده‌های شبیه‌سازی دارند. در مقاله مربوط به داده‌ها نیز ذکر شده که مقادیر تجربی در ناحیه ۱۰ MeV بیشتر از مقادیر نظری هستند و اختلاف بیش از مقدار عدم قطعیت آماری آزمایش است.

به منظور بررسی کمی میزان تطابق داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی از آزمون کای اسکوار با رابطه زیر استفاده شد [۳]

$$\chi^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^r \frac{(Mn_i - Nm_i)^2}{n_i + m_i} \quad (1)$$

که M و N تعداد کل داده‌ها در هر یک از توزیع‌ها، r تعداد بین‌ها و m_i و n_i تعداد داده‌های توزیع مربوطه در بین i ام هستند.

با توجه به این که تعداد داده‌های توزیع تجربی در بازه ۱۹-۲۰ MeV و ۱۸-۱۹ MeV کمتر از ۵ است این دو بازه در محاسبه کای اسکوار به حساب آورده نشدند. بنابراین تعداد بین‌ها، r ، برابر ۱۷ گرفته شد. جهت محاسبه p -value درجه آزادی برابر $r - 1$ یعنی ۱۶ گرفته شد. خلاصه مقایسه هر یک از توزیع‌های شبیه‌سازی با توزیع تجربی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: خلاصه نتایج و p -value مربوط به هر یک از فهرست‌های فیزیک

| Geant4 Physics List | CPU | Memory | Geant4 | CLHEP | Duration | Number of Gammas | CHI-Squared | P-Value | Description |
|---------------------|-------------------------------------|--------------|-----------|---------|----------|------------------|-------------|------------|---------------------------------------|
| EM Standard | Intel ۳/۶ GHz .Cache ۲ MB .FSB ۸۰۰ | ۱ GB ۵۳۳ MHz | ۹,۲.p.۰,۲ | ۲,۰,۴,۳ | ۳۹۸ Min | ۶۰۱۱ | ۹/۲۸ | ۰/۹۰۱۴ | Incorrect Geometry |
| EM Standard | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۲.p.۰,۲ | ۲,۰,۴,۳ | ۱۸۰ Min | ۶۰۱۱ | ۹/۲۸ | ۰/۹۰۱۴ | Incorrect Geometry |
| EM Standard | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۲.p.۰,۲ | ۲,۰,۴,۳ | ۲۰۲ Min | ۱۰۸۸۷ | ۱۷/۰۹ | ۰/۳۷۹۴ | |
| EM Livermore | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۲.p.۰,۲ | ۲,۰,۴,۳ | ۷۳۰ Min | ۹۴۸۴ | ۱۶/۹۲ | ۰/۳۹۰۸ | |
| EM Penelope | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۲.p.۰,۲ | ۲,۰,۴,۳ | ۵۳۸ Min | ۱۲۱۹ | ۳۱۴/۳۳ | ۲/۷۲۹ e-۵۷ | |
| EM Standard | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۳ | ۲,۰,۴,۵ | ۱۸۶ Min | ۱۱۲۳۵ | ۱۹/۲۳ | ۰/۲۵۶۸ | Former Multiple Scattering |
| EM Standard | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۳ | ۲,۰,۴,۵ | ۲۱۳ Min | ۱۱۲۳۵ | ۱۹/۲۳ | ۰/۲۵۶۸ | New Multiple Scattering |
| EM Livermore | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۳ | ۲,۰,۴,۵ | ۶۲۵ Min | ۹۷۳۹ | ۹/۴۲ | ۰/۸۹۵۱ | Former Livermore |
| EM Livermore | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۳ | ۲,۰,۴,۵ | ۳۷۷ Min | ۹۶۵۸ | ۱۸/۰۶ | ۰/۳۲۰۵ | New Livermore New Multiple Scattering |
| EM Penelope | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۳ | ۲,۰,۴,۵ | ۵۰۲ Min | ۱۳۰۵ | ۳۳۲/۱۵ | ۵/۴۱۲e-۶۱ | Former Penelope |
| EM Penelope | Intel ۳/۰ GHz .Cache ۶ MB .FSB ۱۳۳۳ | ۲ GB ۸۰۰ MHz | ۹,۳ | ۲,۰,۴,۵ | ۳۳۳ Min | ۱۲۹۴ | ۳۸۴/۶۹ | ۵/۸۶۴e-۷۲ | New Penelope New Multiple Scattering |

همانگونه که مشاهده می‌شود همه مقادیر p -value بجز مقادیر فهرست فیزیکی پیلوپه از حداقل مقدار قابل قبول یعنی ۰/۰۵ بسیار بزرگ‌ترند. این بدان معناست که در ۱۹/۵ MeV استفاده از فهرست‌های فیزیکی الکترومغناطیسی استاندارد و

لیورمور برای شبیه سازی فرآیندهای الکترومغناطیسی الکترون مجازند. کاربر می تواند با توجه به محدودیت زمانی و دقت مورد نیاز از هر یک از فهرست های فیزیکی استاندارد و لیورمور استفاده کند. در مجموع می توان گفت که زمان اجرای کد در Geant4 9.3 چه با فهرست های سابق و چه با فهرست های جدید یا کاهش پیدا کرده و یا افزایش قابل ملاحظه ای نیافته است.

مرجع ها

1. K. Amako, S. Guatelli and V. Ivanchenko et al., Geant4 and its validation, *Nucl. Phys. B* **150** (2006), pp. 44–49
2. H.W. Koch, R.K. Carter, Determination of the Energy Distribution of Bremsstrahlung from 19.5 MeV Electrons, *Phys. Rev.* **77** 165 (1950)
3. N. D. Gagunashvili, Comparison of weighted and unweighted histograms, arxiv:physics/0605123 v1