



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

مقاله پژوهشی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸، شماره ۵، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۳-۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۳۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

پاسخ مدل‌های هادرونی Geant4 در بررسی نوترون‌های تولیدی در تابش پروتون به مواد سبک

حمیده خسته و لادن رضائی*

گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز، فارس، ایران.

*فارس، شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، گروه فیزیک، کدپستی: ۷۱۹۸۷-۷۴۷۳۱

پست الکترونیکی: Ladanrezaee313@gmail.com

چکیده

یکی از محصولات برهم‌کنش پروتون‌های پرنرژی با مواد سبک، نوترون است. با استفاده از کدهای محاسباتی مونت‌کارلو، می‌توان از طریق شبیه‌سازی سیستم، طیف نوترون‌های حاصل، دز و شار نوترون را محاسبه و پیش‌گویی کرد. اما استفاده از مدل‌های هادرونی مختلف در بررسی این فرآیند، می‌تواند بر نتایج این محاسبات تأثیرگذار باشد. در این پژوهش، پاسخ چهار مدل هادرونی موجود در ابزار مونت‌کارلوی Geant4، در برهم‌کنش پروتون با مواد سبک، به لحاظ ویژگی نوترون‌های تولیدی، با یکدیگر مقایسه شده است. این مدل‌ها، تحت عنوان مدل آبشاری دوتایی، مدل پیش‌ترکیبی، مدل آبشاری درون‌همسته‌ای برتینی و مدل درون‌همسته‌ای لیگه نامیده می‌شوند. این مقایسه، در محدوده انرژی بالینی در پروتون‌تراپی صورت گرفته است. هم‌چنین نتایج این شبیه‌سازی، با داده‌های تجربی مقایسه شده و تطبیق یا عدم سازگاری این مدل‌ها با نتایج تجربی، بررسی و تفسیر شده است. نتایج نشان می‌دهد که هیچ یک از مدل‌های تحت بررسی، نتایج تجربی را به‌طور کامل بازتولید نمی‌کنند، اما در محدوده خاصی از انرژی، مدل برتینی بهترین تطابق را با نتایج تجربی دارد.

کلیدواژگان: طیف نوترون، Geant4، مدل‌های هادرونی، شبیه‌سازی.

۱. مقدمه

روش‌های مناسب برای پیش‌گویی نتایج حاصل از چنین تابش‌هایی به مواد است. این امر به‌خصوص، در طراحی‌های درمانی نظیر پروتون‌تراپی و کربن‌تراپی، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. از آن‌جایی که قابلیت شبیه‌سازی انواع برهم‌کنش‌ها و ردگیری ذرات ثانویه در کدهای شبیه‌سازی وجود دارد، بالا بردن دقت در پیش‌گویی نتایج، مستلزم انتخاب بهترین مدل فیزیکی در محاسبات است. کد مونت‌کارلوی Geant4 [۲]، به‌دلیل قابلیت‌های فراوان و نیز امکان استفاده از مدل‌های مختلف فیزیکی در شبیه‌سازی

بررسی دقیق فرآیندهای مختلف در حین تابش یون‌های پرنرژی به مواد سبک نظیر بافت بدن انسان، یکی از نکات مهم در طراحی درمان محسوب می‌شود. برجای‌گذاری دز جذبی، تحت تأثیر فرآیندهای مختلفی از جمله برهم‌کنش‌های هادرونی یون‌ها با ماده هدف، در طول مسیر نفوذ یون در بافت بدن انسان است [۱]. برهم‌کنش هادرونی یون‌ها با نوکلئون‌های هسته هدف، به‌دلیل پیچیده بودن ماهیت نیروی هسته‌ای بسیار پیچیده است و بررسی آن به‌صورت تحلیلی ممکن نیست. استفاده از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو، یکی از

برای کربن ۱۲ در فانتوم^۱ PMMA (پلی متیل متاکریلیت با فرمول شیمیایی $C_5O_4H_8$ انجام شده است [۱۳]. این مطالعه، اختلاف را تا مرتبه اندازه، در مقایسه با داده‌های تجربی، خصوصاً در زوایای رو به جلو نشان می‌دهد. مطالعه‌ای نیز در ارتباط با ترکیب برخی از مدل‌های موجود در Geant4 توسط دودوت و همکارانش در تابش کربن انجام یافته است که سازگاری با داده‌های تجربی را تنها در انرژی‌های پایین نتیجه‌گیری می‌کند [۱۴].

از دید چنین مشکلاتی در مدل‌های هسته‌ای موجود در Geant4 برای بازتولید و پردازش ذرات ثانویه، در بازه‌های مختلف انرژی مفید در موارد درمانی نظیر پروتون‌تراپی یا کربن‌تراپی، به نظر می‌رسد که لازم است که نتایج حاصل از به‌کارگیری این مدل‌ها در کدهای مونت‌کارلو، مقایسه بیشتری با نتایج تجربی داشته باشند و قابلیت بازتولید ویژگی‌های ذرات ثانویه، به‌طور دقیق‌تر بررسی گردد و اختلافات آن‌ها با داده‌های تجربی تعیین گردد.

هدف از این پژوهش، مقایسه پاسخ چهار مدل هادرونی در کد Geant4 در محاسبه طیف نوترونی حاصل از تابش پروتون در محدوده انرژی بالینی در پروتون‌تراپی است. از این‌رو از چهار مدل هادرونی، با عنوان مدل آبشاری دوتایی^۲ (G4BinaryCascade) [۱۵]، مدل پیش‌ترکیبی^۳ (G4Precompound) [۱۶]، مدل آبشاری درون-هسته‌ای برتینی^۴ (G4BertiniCascade) [۱۷] و مدل آبشاری لیگه^۵، با عنوان اختصاری INCL (G4INCLCascade) [۱۸]، استفاده شده است. این مدل‌ها، به‌ترتیب با عنوان G4BIC، G4PRECOM، G4BERTI و G4INCL نامیده می‌شوند. از این‌رو، در هر بار اجرای شبیه‌سازی توسط Geant4، یکی

برهم‌کنش‌ها، گزینه‌ای مناسب در چنین مطالعاتی است. در کد Geant4، انتخاب مدل فیزیکی در شبیه‌سازی بر عهده کاربر می‌باشد.

برهم‌کنش غالب پروتون‌های پرانرژی با مواد، به‌صورت برهم‌کنش کولنی با ذرات باردار ماده و برهم‌کنش هادرونی با نوکلئون‌های هسته است. از آنجایی که نیروی کولنی، نیرویی بلندبرد است، از این‌رو پروتون‌ها عمده انرژی خود را از طریق یونش و برانگیزش اتم‌های ماده جاذب از دست می‌دهند. اما در طی برهم‌کنش هادرونی ممکن است ذرات گوناگونی تولید شوند که نوترون‌ها یکی از مهم‌ترین این ذرات هستند.

مطالعات مختلفی در زمینه استفاده از مدل‌های مختلف فیزیکی در شبیه‌سازی‌ها انجام گرفته است. تحقیقاتی جهت بررسی قابلیت‌های کد Geant4 در تابش فوتون [۳ و ۴]، تابش‌های سیکلوترونی [۵] و حفاظ‌سازی نوترونی [۶] انجام شده است. شین و همکارانش، پس از مشاهده عدم توافق نتایج تجربی و محاسبات بهره نوترونی توسط کد Geant4، سعی در بازتولید نتایج تجربی، با وارد کردن مدل تبادل بار در تولید نوترون داشته‌اند [۷]. مالیشکین و همکارانش نیز بررسی تولید نوترون و برجای‌گذاری دز را با کد Geant4 انجام داده‌اند [۸]. مطالعاتی با ابزار Geant4 نیز در زمینه حفاظ‌سازی در پروتون‌تراپی [۹]، حفاظ‌سازی نوترونی [۱۰]، و نیز آشکارسازی نوترونی [۱۱] انجام یافته است.

توانایی کدهای مونت‌کارلو برای بازتولید بهره ذرات تولیدی در تابش سایر یون‌ها نیز مطالعه شده است. بوهلن و همکارانش، امکان پیش‌گویی کد Geant4 در تابش کربن ۱۲ به یک فانتوم آب را مطالعه کرده‌اند [۱۲]. این مطالعه عدم توافق تا ۱۰۰٪ را برای مدل‌های موجود در ابزار Geant4 نشان می‌دهد. مقایسه دیگری با به‌کارگیری ابزار Geant4

¹ Poly(methyl methacrylate)

² Binary cascade model

³ Precompound model

⁴ Bertini intranuclear cascade model

⁵ Liege Intranuclear Cascade model

هدف مقایسه گردند. برای پروتون‌های پرنرژی، طول موج دوبروی پروتون‌ها از اندازه هسته کوچک‌تر است و در نتیجه ذرات تابشی با نوکلئون‌های منفرد برهم‌کنش می‌کنند. شرط زیر برای اعتبار مدل آبخاری هسته‌ای لازم است [۲۱]:

$$\lambda_B/v \ll \tau_C \ll \Delta t \quad (1)$$

که در آن λ_B طول موج دوبروی نوکلئون، v سرعت میانگین نسبی بین دو نوکلئون و Δt فاصله زمانی میان برخوردها است. در برخوردهای میان ذرات فرودی با انرژی‌های بالا به هسته‌ها، طول موج دوبروی ذرات فرودی و محصولات بعدی برخورد قابل مقایسه یا کوتاه‌تر از فاصله متوسط میان نوکلئون‌ها است. از این‌رو، زمان برخورد بین ذرات فرودی و یک ذره در هسته در مقایسه با زمان بین برخوردها در هسته کوتاه است. بر این اساس، در اولین گام در فرآیندهای هسته‌ای، برخورد منفرد میان ذرات فرودی و ذرات هسته‌ای می‌تواند بررسی گردد. به این ترتیب، به خواص پراکندگی ذرات با انرژی بالا بین نوکلئون‌های آزاد پرداخته می‌شود. از این‌رو، مدل‌های آبخاری معرفی شده در ابزار شبیه‌سازی Geant4 برای توصیف فیزیک مسئله بسیار مناسب می‌باشند. سازوکار واکنش هسته‌ای ذرات تابشی با انرژی بالا با هسته، تحت عنوان مدل آبخاری درون-هسته‌ای^۷ (INC)، ابتدا توسط سربر در سال ۱۹۴۷ پیشنهاد شد [۲۲]. از آن زمان تاکنون تلاش‌های فراوانی جهت بهبود نتایج این مدل شده است.

۱.۲.۲. مدل آبخاری درون-هسته‌ای برتینی (G4BERTI)

روش‌های استاندارد در پیاده‌سازی مدل برتینی، در محدوده انرژی $0-10$ GeV به کار برده می‌شود [۲۱]. بر اساس این مدل، واکنش هسته‌ای ناشی از برخورد ذرات با انرژی بالا به هسته را می‌توان توسط فرآیند دو مرحله‌ای شرح داد. در

از این مدل‌ها انتخاب شده و محاسبات طیف نوترونی، دز و شار با آن‌ها انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی در دسترس مقایسه شده و تفسیر شده‌اند.

۲. روش بررسی

۱.۲. کد مونت کارلوی Geant4

کدهای مختلفی جهت شبیه‌سازی برهم‌کنش تابش با مواد طراحی شده است که یکی از این موارد، ابزار شبیه‌سازی Geant4 می‌باشد. این ابزار، در شبیه‌سازی تبارد ذرات در ماده، دارای قابلیت‌های فراوانی، از جمله انتخاب مدل‌های فیزیکی در برهم‌کنش‌ها می‌باشد. فرآیندهای فیزیکی ارائه شده در این ابزار شامل دامنه وسیعی از فرآیندهای الکترومغناطیسی، هادرونی و اپتیکی می‌شود. هم‌چنین مجموعه بزرگی از ذرات، مواد و عناصر در این کد قرار داده شده است [۲].

در این مطالعه، از مثال هادرون‌تراپی Geant4 اقتباس شده است [۱۹]. مدل الکترومغناطیس^۶ (EMY) Y، برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی را بین همه ذرات شبیه‌سازی می‌کند [۲۰]. اما شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های هادرونی پروتون با عناصر ماده هدف، از طریق مدل‌های G4BIC، G4PRECOM، G4BERTI، G4INCL صورت می‌گیرد تا نتایج حاصل از به‌کارگیری آن‌ها، با یکدیگر مقایسه گردد.

۲.۲. مدل‌های هادرونی در Geant4

ویژگی‌های کلی واکنش هسته‌ای ناشی از برخورد ذرات با انرژی بالا به هسته‌ها را می‌توان با روشی که چارچوب اصلی آن بسیار ساده است، بیان نمود. زمانی که یک هسته توسط پروتون پرنرژی بمباران می‌شود، برای درک آنچه اتفاق می‌افتد، باید ابعاد طول موج دوبروی این ذرات و ابعاد هسته

⁷ Intranuclear cascade

⁶ Electromagnetic Y

۳.۲.۲. مدل برهم کنش پیش ترکیبی (G4PRECOM)

مدل برهم کنش پیش ترکیبی در Geant4، توسعه و گسترش مدل جنبشی هادرون‌ها محسوب می‌شود [۱۶]. این مدل، در محدوده انرژی پایین، امکان استفاده از مدل جنبشی هادرون‌ها را با استفاده از پراکندگی ناکشسان نوکلئون‌ها با هسته فراهم می‌کند. هم‌چنین این مدل، گذار آرامی از حالت برانگیخته واکنش توصیف شده در مدل جنبشی هادرون‌ها به مرحله تعادلی واکنش توصیف شده توسط مدل باز برانگیزش را ارائه می‌کند [۲۱].

۴.۲.۲. مدل برهم کنش آبخاری دوتایی (G4BIC)

مدل G4BIC، یک آبخار درون-هسته‌ای است که ذرات تابشی و ثانویه را در هسته انتشار می‌دهد. برهم کنش‌ها میان ذرات اولیه یا ثانویه و هرکدام از نوکلئون‌های هسته به صورت جداگانه است [۱۵]. از مقادیر سطح مقطع، برای انتخاب نحوه برخورد‌ها استفاده می‌شود. در صورت وجود اطلاعات سطح مقطع تجربی، در شبیه‌سازی از آن‌ها استفاده می‌شود. انتشار ذرات در میدان هسته‌ای با حل عددی معادله حرکت انجام می‌شود. این آبخار هنگامی که متوسط انرژی ذرات ثانویه، زیر انرژی آستانه آبخار باشد پایان می‌یابد. در حال حاضر، برای انجام محاسبات در هادرون‌تراپی، این مدل برای فیزیک هادرون‌ها توصیه می‌شود [۲۱].

۳.۲. داده‌های تجربی

جهت تأیید اعتبار محاسبات مونت‌کارلو، نتایج محاسبات شار نوترون تولیدی برحسب انرژی پروتون فرودی، با نتایج تجربی در دسترس مقایسه گردیده است. تیلکویین و همکاران ایشان، با استفاده از یک شتاب‌دهنده ذرات، بریلیم را تحت تابش پرتوهای پروتون با انرژی‌های مختلف قرار دادند [۲۴]. هدف از این آزمایش، اندازه‌گیری میزان نوترون‌های تولیدی

مرحله اول، یک آبخار درون هسته‌ای آغاز می‌شود که منجر به انتقال مستقیم انرژی به نوکلئون‌های هسته می‌شود. انرژی توسط تابش مستقیم ذرات به بیرون حمل نمی‌شود و توسط نوکلئون‌های باقیمانده سبب تحریک هسته می‌شود. مرحله دوم واکنش، شامل گسیل ذرات کم‌انرژی (مدل تبخیر^۸) از هسته برانگیخته است [۱۷]. در مدل برتینی، توزیع تکانه نوکلئون‌ها به صورت توزیع تکانه گاز فرمی در نظر گرفته می‌شود.

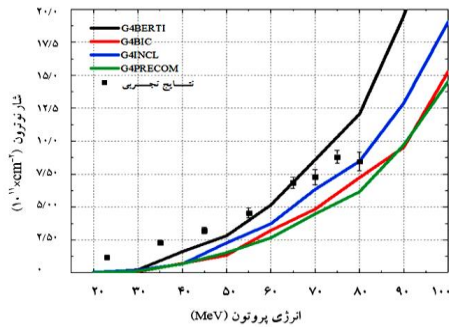
۲.۲.۲. مدل آبخاری درون-هسته‌ای لیگه (G4INCL)

از این مدل برای شبیه‌سازی واکنش‌های نوکلئون، پایون و هسته‌های سبک با هسته استفاده می‌شود. در مدل INCL، واکنش‌های هسته‌ای که طی آن ذرات هسته‌ای به بیرون پرتاب می‌شوند از طریق یک فرآیند دو مرحله‌ای شرح داده می‌شوند: مرحله اول واکنش هسته‌ای با ذرات با انرژی بالا تحت تأثیر برخوردهای شدید نوکلئون-نوکلئون و تابش ذرات سریع است و مرحله دوم، تحت تأثیر باز برانگیزش^۹ هسته باقیمانده، بر اساس فرآیند تبخیر یا شکافت است [۱۸]. این روش مناسب‌ترین روش مدل‌سازی برای تابش ذرات با انرژی بیش از ۲۰۰ MeV است [۲۳].

مدل آبخار درون-هسته‌ای لیگه، دارای محدودیت‌های خاصی در رابطه با انرژی و نوع ذرات تابشی و نوع هسته هدف است. محدوده انرژی برای نوکلئون‌ها و پایون‌های تابشی، ۱ MeV تا ۲۰ GeV است. هسته‌های پایدار، بیشتر از هسته‌های سبک و یا ناپایدار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این مدل هسته‌های سبک ($2 < A < 18$) نیز می‌توانند به عنوان ذرات تابشی به کار گرفته شوند [۲۱]. این مدل برای به‌حداقل رساندن تعداد پارامترهای آزاد توسعه داده شده است. این ویژگی، قدرت پیش‌بینی مدل را تضمین می‌کند.

^۸ Evaporation model

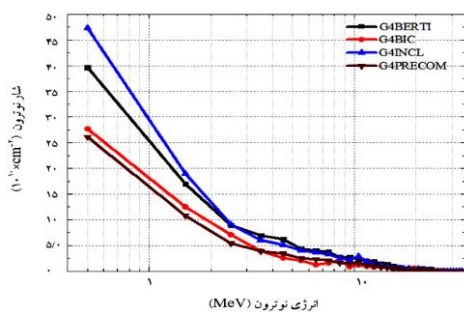
^۹ De-excitation



شکل (۱): مقایسه شار نوترون تولیدی برحسب انرژی پروتون فرودی در آزمایش تجربی (نقاط) و شبیه‌سازی Geant4 با به‌کارگیری چهار مدل هادرونی مختلف (خطوط توپر).

از شکل ۱ می‌توان دید که در انرژی‌های کم‌تر از ۴۵ MeV، پیش‌بینی تجربی، بیش‌تر از مقادیر حاصل از اجرای Geant4 است. در بازه انرژی ۶۵ MeV تا ۸۰ MeV مقادیر تجربی، بین دو نمودار حاصل از مدل برتینی و INCL است. به‌طور کلی، پیش‌بینی مدل برتینی از نظر مقدار شار تولیدی، از همه مدل‌ها بیشتر است. پس از آن، مدل‌های INCL، BIC و درنهایت، مدل پیش‌ترکیبی، به‌ترتیب در مراحل بعدی قرار دارند.

جهت بررسی طیف انرژی نوترونی تولید شده ناشی از برهم‌کنش پروتون‌های پراثری با مواد سبک، رخداد واکنش ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ جهت مقایسه مدل‌های مختلف هادرونی Geant4 انتخاب شده است. از این‌رو شبیه‌سازی برهم‌کنش پروتون با انرژی ۳۵ MeV با فانتوم بریلیمی توسط کد Geant4 انجام گرفته و در هر بار اجرای کد، یکی از مدل‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج این محاسبات، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): طیف انرژی نوترون تولید شده ناشی از برهم‌کنش پروتون‌های ۳۵ MeV با بریلیم.

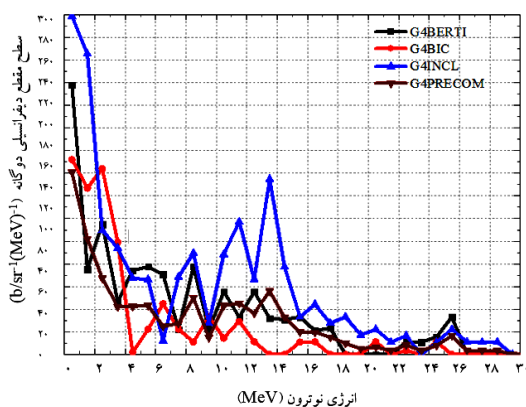
ناشی از برخورد پروتون‌های پراثری با اهداف بریلیمی بود. در این آزمایش پرتوهای پروتون تابشی دارای انرژی تابشی از ۲۳ MeV تا ۸۰ MeV و هدف بریلیم دارای قطر $40/3$ میلی‌متر انتخاب شده بود که برای توقف کامل پروتون درون این مواد کافی است. اطراف چشمه نوترونی، با آب و پودر MnSO_4 پر شده بود. نوترون‌ها توسط آب کند و توسط منگنز جذب می‌شوند (در این حالت منگنز به‌حالت برانگیخته می‌رود که نیمه عمر حالت برانگیخته $2/6$ ساعت است). با استفاده از ویژگی‌های واپاشی منگنز و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی میزان نوترون‌های تولید شده در این آزمایش محاسبه شده است [۲۴].

۳. نتایج

برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی Geant4 و نتایج تجربی، هندسه سیستم، متناظر با سیستم تجربی مرجع [۲۴] تعریف شده است. از این‌رو ماده هدف از جنس بریلیم انتخاب شده است و انرژی پرتوهای تابشی پروتون از ۲۰ MeV تا ۱۰۰ MeV، که تقریباً منطبق بر بازه انرژی سیستم تجربی در نظر گرفته شده است. فانتوم نیز، مکعبی به ابعاد $40 \times 40 \times 40$ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. پرتو فرودی به شکل یک پرتو مدادی به شعاع ۲ mm و بدون واگرایی انتخاب شده است. از محاسبات کد دو نوع خروجی می‌گیریم: دز جذبی حاصل از نوترون‌های تولید شده و نیز مقدار شار نوترون برحسب انرژی پروتون تابشی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های هادرونی، چهار مدل G4BIC، G4BERTI، G4INCL و G4PRECOM، برای چهار بار اجرای جداگانه کد، انتخاب شده است. نتایج حاصل از این محاسبات، برای شار نوترون‌های تولیدی برحسب انرژی پروتون تابشی، در شکل ۱ رسم شده است. در این شکل، نتایج تجربی مرجع [۲۴] نیز نمایش داده شده است.

خارج می‌شوند، اندازه‌گیری می‌شود. اگر اندازه‌گیری برای تمام انرژی‌های ذرات گسیلی انجام گیرد، کمیت اندازه‌گیری شده، سطح مقطع دیفرانسیلی، $d\sigma/d\Omega$ خواهد بود و اگر در بازه‌های معین انرژی اندازه‌گیری انجام شود، کمیت به دست آمده، سطح مقطع دیفرانسیلی دوگانه، $d^2\sigma/d\Omega dE$ خواهد بود.

به منظور محاسبه سطح مقطع دیفرانسیلی دوگانه طیف نوترونی، در چارچوب آزمایشگاه در جهت تابش پرتو پروتونی اولیه (زاویه $\theta_{lab}=0$)، یک لایه بریلمی به ضخامت ۱ cm در شبیه‌سازی، در نظر گرفته شده و طیف نوترونی حاصل از تابش پروتون‌های 35 MeV در این زاویه فضایی محاسبه شده است. در شکل ۳، تغییرات سطح مقطع دیفرانسیلی دوگانه تولید نوترون برحسب انرژی نوترون، برای چهار مدل فیزیکی، مقایسه گردیده است. کاهش نامنظم میزان نوترون‌ها برحسب انرژی به دلیل وابستگی زاویه‌ای واکنش ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ است [۲۵]. در انرژی‌های بالاتر می‌توان گفت که میزان سطح مقطع دیفرانسیلی پیش‌بینی شده توسط مدل INCL در بالاترین رتبه و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل BIC در پایین‌ترین رتبه قرار دارد. مقادیر پیش‌بینی شده توسط دو مدل دیگر، دارای تغییرات کاهشی مشابه با یکدیگر هستند که بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط دو مدل دیگر قرار دارند.

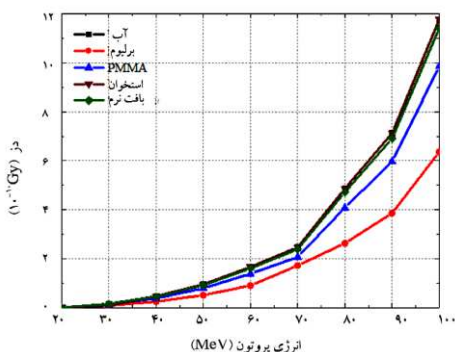


شکل (۳): سطح مقطع دیفرانسیلی دوگانه برحسب انرژی نوترون.

همان‌گونه که از شکل ۲ پیداست، تغییرات کلی میزان نوترون‌ها برحسب انرژی، برای هر چهار مدل با یکدیگر هم‌خوانی دارند. از نظر تعداد نوترون تولیدی، به ترتیب مدل INCL، برتینی، BIC و در نهایت مدل پیش‌ترکیبی، بیشترین مقدار نوترون را تولید می‌کنند. با توجه به این‌که محور افقی در مقیاس لگاریتمی رسم گردیده است، کاهش تعداد نوترون‌های تولیدی برحسب انرژی، به آرامی صورت می‌گیرد. این کاهش، به دلیل بالا بودن احتمال تولید هسته مرکب ${}^{10}\text{B}$ با انرژی برانگیختگی کم رخ می‌دهد [۲۵]. پروتون‌ها با عبور از بریلم، انرژی خود را از دست می‌دهند. چنان‌چه پروتون به درون هسته بریلم وارد شود، هسته باقیمانده در حالت برانگیخته خواهد بود. تعداد هسته‌های مرکب با انرژی برانگیختگی کوچکتر، بیشتر از تعداد هسته‌های برانگیخته با انرژی بیشتر است. برای رسیدن به پایداری، ممکن است یک نوترون دارای انرژی جنبشی از هسته برانگیخته تابش شود. از این‌رو میزان نوترون‌های دارای انرژی بالا، از میزان نوترون‌های دارای انرژی پایین کمتر است. طیف نوترونی در برخی انرژی‌های خاص دارای اکستریم‌های نسبی کوچکی است که ناشی از واکنش‌های تشدید ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ است. در این انرژی‌ها، میزان نوترون‌ها نسبت به انرژی‌های مجاور افزایش می‌یابد [۲۵].

سطح مقطع دیفرانسیلی دوگانه برای تولید نوترون، در تابش پروتون به ماده سبک نیز در این‌جا مورد بررسی قرار گرفته است. احتمال یافتن ذرات گسیلی در زاویه فضایی $d\Omega$ در یک انرژی معین، به عنوان سطح مقطع دیفرانسیلی دوگانه $d^2\sigma/d\Omega dE$ معرفی می‌شود. به منظور اندازه‌گیری این کمیت در فرآیند شبیه‌سازی، پنجره آشکارساز (برای مثال، یک قطعه زاویه فضایی به اندازه $d\Omega$ با واحد استرادیان)، نسبت به سطح کره‌ای که در آن قرار دارد، کوچک در نظر گرفته می‌شود و تنها قسمتی از محصولات واکنش که از زاویه فضایی $d\Omega$

است. مقدار دز نوترونی جذب شده در فانتوم PMMA، بیشتر از بریلیم است و بیشترین مقدار دز مربوط به فانتوم آب، استخوان و بافت نرم است، که نمودارهای مربوط به آنها بر یکدیگر منطبق هستند.

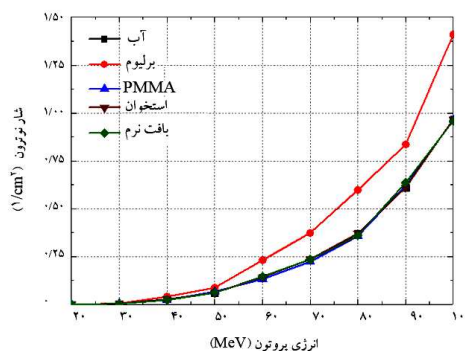


شکل (۵): دز نوترونی بر جایگذاری شده در فانتوم‌های مختلف، به‌ازای تابش یک پروتون.

۴. بحث

در این پژوهش، چندین مدل هادرونی در Geant4، برای مطالعه ویژگی نوترون‌های تولید شده توسط پرتوهای پروتونی تابش‌دهی شده به یک ماده سبک بررسی شده است. نتایج شکل ۱ به‌وضوح نشان می‌دهد که هیچ یک از مدل‌های تحت بررسی نمی‌تواند شار نوترون تولیدی را در همه انرژی‌های پروتون تابشی بازتولید کند. به‌علاوه، تشخیص این نکته آسان نیست که کدام مدل، بیشتر از سایر مدل‌ها برای مقایسه با داده‌های تجربی مناسب است. در انرژی‌های پایین پروتون از ۲۰ MeV تا ۵۵ MeV، هر چهار مدل تحت بررسی نتایج عددی را کمتر از آنچه در تجربه رخ می‌دهد، پیش‌گویی کرده‌اند. از این‌رو می‌توان گفت که هیچ یک از این چهار مدل، برای پیش‌گویی مقادیر شار نوترون در انرژی‌های پایین پروتون، مناسب نیستند. اما نتیجه قطعی که می‌توان گرفت این است که برای پرتوهای پروتونی با انرژی ۵۵ MeV تا ۶۵ MeV، پیش‌گویی مدل برتینی، توافق خوبی با داده‌های تجربی دارند. از انرژی ۶۵ MeV تا ۸۰ MeV، پیش‌گویی مدل برتینی، مقادیر شار نوترون را بیش از آنچه

پاسخ مواد سبک مختلف در تابش پروتون و طیف نوترونی تولید شده ناشی از برهم‌کنش پروتون با این مواد نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به‌این‌منظور، فانتوم‌های آب، بریلیم، استخوان، بافت نرم و PMMA، تحت تابش پروتون قرار داده شده و پاسخ آن‌ها از جنبه شار نوترون تولیدی و دز نوترونی مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل BIC برای توصیف نحوه برهم‌کنش پروتون با مواد مختلف، در این مطالعه انتخاب شده است. شار نوترونی کل بر حسب انرژی پروتون تابشی، در طی برهم‌کنش پروتون با فانتوم‌ها در شکل ۴ رسم شده است. در انرژی‌های کم، پروتون‌ها قدرت نفوذ به هسته را نداشته و از این‌رو بازده نوترونی در انرژی‌های کم ناچیز بوده و در فانتوم‌های مختلف تقریباً یکسان است. با افزایش انرژی پروتون، فانتوم بریلیم، نسبت به سایر فانتوم‌ها شار نوترونی بیشتری حاصل می‌کند. این موضوع سبب می‌شود که این ماده برای تولید نوترون با استفاده از پروتون‌های پرانرژی بسیار مناسب باشد. سایر فانتوم‌ها از هسته‌های یکسانی (عمدتاً از هیدروژن، اکسیژن و کربن) ساخته شده‌اند و شار نوترونی تقریباً یکسانی را تولید می‌کنند.



شکل (۴): شار نوترونی کل در فانتوم‌های مختلف.

در شکل ۵، دز کل نوترونی به‌ازای تابش یک پروتون در فانتوم‌های مختلف رسم شده است. بریلیم نسبت به سایر فانتوم‌ها انرژی در واحد جرم کمتری را از نوترون‌ها جذب می‌نماید. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که پس از تولید نوترون در فانتوم بریلیمی، احتمال جذب دوباره آن کمتر

با توجه به این که در مدل INCL کمترین میزان از پارامترهای آزاد وجود دارد از این رو انتظار می‌رود که این مدل، قدرت پیش‌بینی مناسب‌تری داشته باشد که این انتظار تا حدودی از نتایج شکل ۱ حاصل می‌شود. این نتیجه، هم‌خوان با نتایج حاصل از کار گروه دودوت و همکاران ایشان است [۱۴]. طبق نتایج ایشان، INCL، بهتر از سایر مدل‌ها، توزیع‌های زاویه‌ای را خصوصاً برای ذرات ثانویه سبک بازتولید می‌کند [۱۴].

همان‌گونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است، در بین این چهار مدل، مدل پیش‌ترکیبی قوی‌ترین عدم سازگاری را با داده‌های تجربی دارد. این مربوط به طبیعت دوگانه مکانیسم برهم‌کنش است که در این مدل، فرض شده است. این مدل، گذار آرامی از حالت برانگیخته واکنش توصیف شده در مدل جنبشی هادرون به مرحله تعادلی واکنش توصیف شده توسط مدل باز برانگیزش را ارائه می‌کند و در محدوده انرژی پایین معتبرتر است. سه مدل دیگر، داده‌های تجربی را اندکی بهتر، بازتولید می‌کنند، خصوصاً مدل INCL چنین است. این نتیجه تعجب برانگیز نیست، زیرا این مدل‌ها عمدتاً بر اساس مفهوم آبشار هسته‌ای هستند که منشأ آن‌ها از برخوردهای نوکلئون-هسته است. در چنین واکنش‌هایی، هندسه برخورد بسیار ساده است و توصیف واکنش‌های هسته-هسته ساده‌تر است. به علاوه، با هدف بریلیمی، نوترون‌ها اساساً توسط واکنش تبادل بار تولید می‌شوند و INCL تنها مدلی است که این سهم را بازتولید می‌کند. این مشاهدات، توسط بوهلن و همکاران ایشان [۱۲] و آیوانهو و همکاران ایشان [۲۶] نیز تأیید شده است.

به‌منظور بررسی ویژگی نوترون‌های تولیدی از مواد مختلف، علاوه بر بررسی برهم‌کنش پروتون با بریلیم، به بررسی برهم‌کنش پروتون با آب، PMMA، استخوان و بافت نرم پرداخته شد. همان‌گونه که مشاهده شد برای تولید نوترون

در تجربه رخ می‌دهد، پیش‌گویی می‌کند. در همین بازه انرژی، مدل‌های INCL، BIC و پیش‌ترکیبی، مقادیری را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کنند. درست در انرژی ۸۰ MeV، مدل INCL سازگاری مناسب با نتیجه تجربی دارد. از این رو می‌توان گفت که مدل BIC و پیش‌ترکیبی در این بازه انرژی مناسب نیستند، اما نتایج مدل برتینی (به‌عنوان حد بالا) و نتایج مدل INCL (به‌عنوان حد پایین)، دو مرز مناسب، برای محدوده نتایج تجربی در این بازه انرژی هستند. در انرژی‌های بالاتر پروتونی، داده‌های تجربی مورد نیاز است تا برای بررسی اعتبار مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

در نمودار شار نوترون تولیدی، پیش‌بینی مدل برتینی از نظر مقدار، از همه مدل‌ها بیشتر است. پس از آن، مدل‌های INCL، BIC و درنهایت، پیش‌ترکیبی، در رتبه‌های بعدی قرار دارند. اما در نمودار سطح مقطع دیفرانسیلی، INCL در بالاترین مرتبه و مدل BIC در پایین‌ترین مرتبه قرار دارند. یکسان نبودن رفتار یک مدل فیزیکی در پیش‌گویی نتایج در محاسبه دو کمیت مختلف نشان می‌دهد که تولید نوترون در برخورد پروتون با مواد سبک، باید وابسته به زاویه گسیل نوترون باشد، به طوری که در تولید نوترون‌هایی که در جهت تابش پرتو پروتونی اولیه گسیل می‌شوند ($\theta_{lab}=0$)، مدل INCL، بیشترین مقدار را پیش‌بینی می‌کند، در حالی که در تولید کل نوترون‌های تولیدی در حجم هدف، پیش‌بینی بیشترین مقدار، توسط مدل برتینی انجام می‌گیرد. این موضوع نشان می‌دهد که انتخاب مدل هادرونی برای اجرای کد Geant4، خصوصاً در مسائل طراحی درمان در پروتون‌تراپی، جهت پیش‌بینی عوارض جانبی ناشی از تابش، از دقت و حساسیت ویژه‌ای برخوردار است.

با این که هر یک از مدل‌ها، پیش‌بینی متفاوتی ارائه می‌دهند، اما به نظر می‌رسد که مدل‌های فیزیکی INCL و برتینی، نزدیک‌ترین پیش‌بینی به مقادیر تجربی را دارا هستند.

شبیه‌سازی ترابرد پروتون در مواد سبک، برای بررسی ویژگی نوترون‌های تولیدی استفاده شد. در این فرآیند شبیه‌سازی، چهار مدل آبخاری G4BERTI, G4PRECOM, G4BIC و G4INCL به‌عنوان مدل‌های هادرونی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش پروتون پارانرژی با مواد استفاده گردید. انتخاب یک مدل هادرونی معین، می‌تواند در نتایج محاسبات تأثیرگذار باشد. بالاخص، این موضوع زمانی دارای اهمیت ویژه‌ای خواهد بود که در طراحی درمان، پیش‌بینی عوارض جانبی ناشی از تابش در پروتون‌تراپی، مد نظر قرار داشته باشد. نتایج به‌دست آمده از کد Geant4 با نتایج تجربی نیز مقایسه شد. اگر چه در این مطالعه، مدل INCL بهترین تطابق را با نتایج تجربی داشت، سایر مدل‌های هادرونی دیگر نیز به‌دلیل استفاده از مفهوم آبخار هسته‌ای، از نظر کلی قابل قبول هستند. بنابراین کد شبیه‌سازی Geant4 و مدل‌های آبخاری موجود در آن می‌توانند تا حدود مطلوبی، ویژگی نوترون‌های تولیدی از برهم‌کنش پرتوهای پارانرژی پروتون با مواد سبک را پیش‌بینی کنند.

با استفاده از پرتو پروتونی، بریلیم انتخاب بهتری می‌باشد. با این وجود سایر مواد نیز میزان قابل توجهی از نوترون را تولید می‌کنند. دز و تعداد نوترون‌های تولیدی در بافت نرم و استخوان قابل توجه است و جهت تخمین آسیب به بافت‌های سالم، باید آن را در محاسبات لحاظ کرد. این نکته جهت طراحی درمان در پروتون‌تراپی، اهمیت زیادی دارد که بدیهی است که برای این امر، نیاز است تا قبل از آن، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نیز مقایسه گردند. بررسی طیف نوترونی حاصل از برخورد پروتون با بریلیم و سطح مقطع دیفرانسیلی دوگانه نیز نشان می‌دهد که میزان نوترون‌ها با انرژی کمتر، بیشتر از تعداد نوترون‌ها با انرژی بیشتر است. برای بازتولید دقیق بهره‌های نوترونی برای کل ناحیه انرژی، مهم است که جداولی از داده‌های تجربی غنی، در دسترس قرار داشته باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از کد مونت‌کارلوی Geant4 برای

۶. مراجع

- [1] D. Schardt, I. Schall, H. Geissel, H. Irnich, G. Kraft, A. Magel, M.F. Mohar, G. Munzenberg, F. Nickel, C. Scheidenberger, W. Schwab and L. Sihver. Nuclear fragmentation of high-energy heavy-ion beams in water, *Advanced Space Research*, 17 (1996) 87–94.
- [2] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asri, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma and D. Zschiesche. GEANT4: a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 506 (2003) 250–303.
- [3] J.W. Shin, S.W. Hong, C.I. Lee and T.S. Suh. Application of a GEANT4 simulation to a ^{60}Co therapy unit, *Journal of Korean Physical Society*, 59 (2011) 12–19.
- [4] S. Hurtado, M. García-León and R. García-Tenorio. GEANT4 code for simulation of a germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 518 (2004) 764–774.
- [5] J.W. Shin, T.S. Park, S.W. Hong, J.K. Park, J.T. Kim and J.S. Chai. Estimates of SEU for semiconductors using MC50 cyclotron and GEANT4 simulation, *Journal of Korean Physical Society*, 59 (2011) 2022–2025.
- [6] J.W. Shin, S.W. Hong, S.I. Bak, D.Y. Kim and C.Y. Kim. GEANT4 and PHITS simulations of the shielding of neutrons from the ^{252}Cf source, *Journal of Korean Physical Society*, 65 (2014) 591–598.
- [7] J.W. Shin and T.S. Park. New charge exchange model of GEANT4 for $^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$ reaction, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 342 (2015) 194–199.
- [8] Y. Malyshev, I. Pshenichnov, I. Mishustin, T. Hughes, O. Heid and W. Greiner. Neutron production and energy deposition in fissile spallation targets studied with GEANT4 toolkit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 289 (2012) 79–90.

- [9] S. Avery, C. Ainsley, R. Maughan and J. McDonough. Analytical shielding calculations for a proton therapy facility, *Radiation Protection Dosimetry*, 131 (2008) 167–179.
- [10] S.I. Bak, T.S. Park, S.W. Hong, J.W. Shin and I.S. Hahn. GEANT4 simulation of the shielding of neutrons from ^{252}Cf source, *Journal of Korean Physical Society*, 59 (2011) 2071–2074.
- [11] K. Banerjee, T.K. Ghosh, S. Kundu, T.K. Rana, C. Bhattacharya, J.K. Meena, G. Mukherjee, P. Mail, D. Gupta, S. Mukhopadhyay, D. Pandit, S.R. Banerjee, S. Bhattacharya, T. Bandyopadhyay and S. Chatterjee. Variation of neutron detection characteristics with dimension of BC501A neutron detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 608 (2009) 440–446.
- [12] T.T. Böhlen, F. Cerutti, M. Dosanjh, A. Ferrari, I. Gudowska, A. Mairani, and J.M. Quesada. Benchmarking nuclear models of FLUKA and GEANT4 for carbon ion therapy, *Physics in Medicine and Biology* 22 (2010) 5833–5847.
- [13] B. Braunn, A. Boudard, J. Colin, J. Cugnon, D. Cussol, J.C. David, P. Kaitaniemi, M. Labalme, S. Leray, and D. Mancusi. Comparisons of hadrontherapy-relevant data to nuclear interaction codes in the Geant4 toolkit, *Journal of Physics (Paris): Conference Series*, 420 (2013) 012163–012172.
- [14] J. Dudouet, D. Cussol, D. Durand, and M. Labalme. Benchmarking GEANT4 nuclear models for hadron therapy with 95 MeV/nucleon carbon ions, *Physical Review C*, 89 (2014) 054616–054619.
- [15] G. Folger, V.N. Ivanchenko and J.P. Wellisch. The binary cascade, *European Physical Journal A*, 21 (2004) 407–417.
- [16] K.K. Gudima, S.G. Mashnik and V.D. Toneev. Cascade-exciton model of nuclear reactions, *Nuclear Physics A*, 401 (1983) 329–361.
- [17] A. Heikkinen, N. Stepanov and J.P. Wellisch. Bertini intra-nuclear cascade implementation in GEANT4, *Computing in High Energy and Nuclear Physics*. 2003 Conference Proceedings (2003), arXiv:nucl-th/0306008.
- [18] A. Boudard, J. Cugnon, J.C. David, S. Leray and D. Mancusi. New Potentialities of the Liège Intranuclear Cascade (INCL) Model for Reactions Induced by Nucleons and Light Charged Particles, *Physical Review C*, 87 (2012) 014606–014634.
- [19] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, P. Arce, M. Asari, T. Aso, E. Bagli, A. Bagulya, S. Banerjee, G. Barrand, B.R. Beck, A.G. Bogdanov, D. Brandt, J.M.C. Brown, H. Burkhardt, P. Canal, D. Canoott, S. Chauvie and H. Yoshida. Recent developments in Geant4, *Nuclear Instrument and Method in Physics Research Section A*, 835(1) (2016) 186–225.
- [20] G. Cirrone, G. Cuttone and E. Mazzaglia. Hadrontherapy: a Geant4-Based Tool for Proton/Ion-Therapy Studies, *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2 (2011) 207–212.
- [21] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asari, G. Barrand, R. Capra, S. Chauvie and R. Chytrcek. Geant4 development and applications, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(1) (2006) 270–278.
- [22] R. Serber. Nuclear reactions at high energies, *Physical Review*, 72 (1947) 1114–1116.
- [23] D. Mancusi, A. Boudard, J. Cugnon, J.C. David, P. Kaitaniemi and S. Leray. Extension of the Liège intranuclear-cascade model to reactions induced by light nuclei, *Physical Review C*, 90 (2014) 054602–054632.
- [24] I. Tilquin, P. Froment, M. Cogneau, T. Belbar, J. Vervier and G. Ryckewaert. Experimental measurements of neutron fluxes produced by proton beams (23–80 MeV) on Be and Pb targets, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 545 (2005) 339–343.
- [25] U. Amaldi, and G. Kraft. Radiotherapy with beams of carbon ions, *Reports on Progress in Physics*, 68 (2005) 1861–1882.
- [26] A.V. Ivanchenko, V.N. Ivanchenko, J.M. Quesada, and S. Incerti. Geant4 hadronic physics for space radiation environment, *International Journal of Radiation and Biology*, 88 (2012) 171–175.