



مطالعه‌ی میزان فراوانی هسته‌های سنگین تولید شده در کربن‌درمانی با استفاده از ابزار Geant4

سید محمد متولی^۱، وحید زنگانه^{۲*}، سپیده باقری^۱

۱. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، صندوق پستی: ۴۷۴۱۵-۴۱۶، بابلسر - ایران
۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان، صندوق پستی: ۴۹۱۳۸-۱۵۷۵۹، گرگان - ایران

*Email: vahid.zanganeh@gmailu.ac.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۹

چکیده

باریکه‌های یون کربن-۱۲ در محدوده انرژی ۱۰۰-۴۵۰ MeV/u دارای شرایط بسیار خوبی برای تومورهای مقاوم به تابش و واقع در عمق هستند. در انرژی‌های بیش از ۴۰۰ MeV/u تابش با افزایش عمق به طور چشم‌گیری تحت تأثیر فرایندهای تکه‌تکه شدن هسته‌ای قرار می‌گیرد. در این مطالعه با به‌کارگیری ابزار Geant4 که سه مدل فیزیکی آبشار درون‌هسته‌ای دودویی (BIC)، آبشار درون‌هسته‌ای لیژ (INCL) و کوانتوم مولکولی دینامیکی (QMD) برای ذرات سنگین تعریف شده است، با بررسی مدل QMD موجود در ابزار Geant4، اثرات ذرات سنگین حاصل از تکه تکه شدن هسته‌ای با محاسبه بر روی میزان فراوانی هسته‌های تولید شده با عدد اتمی در بازه $1 < Z < 5$ (ذرات H، He، Li، Be و B) در عمق‌های مختلف فانتوم آب در ناحیه‌ی قبل و بعد از قله‌ی براگ و توزیع زاویه‌ای این ذرات به وسیله‌ی این مدل بررسی شده‌اند. نمودار فراوانی ذرات نشان می‌دهد که با افزایش عدد اتمی تولید ذرات کاهش می‌یابد. ذرات H و He بیش‌ترین فراوانی را دارند و دامنه‌ی آن‌ها بسیار بیش‌تر از دامنه‌ی یون‌های کربن اولیه است. همچنین با توجه به نمودار توزیع زاویه‌ای، ذرات H و He توزیع بسیار گسترده‌تری را از خود نشان داده‌اند و بیش‌ترین درزسانی را در ناحیه‌ی خارج از موضع درمان دارند. همچنین با افزایش عدد اتمی توزیع زاویه‌ای کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ابزار Geant4، هادرون‌درمانی، هسته‌های سنگین، مدل QMD

Studying the abundance of heavy nuclei produced in carbon therapy using Geant4 toolkit

S.M. Motevalli¹, V. Zanganeh^{2*}, S. Bagheri¹

1. Department of Nuclear Physics, Faculty of Sciences, University of Mazandaran, P.O.BOX: 47415-416, Babolsar - Iran
2. Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Golestan University, P.O.BOX: 15759-49138, Gorgan - Iran

Technical Paper

Received 22.5.2022, Accepted 10.8.2022

Abstract

Carbon-12 ion beams in the energy range of 100-450 MeV/u have excellent conditions for radiation-resistant and deep-seated tumors. At energies above 400 MeV/u, radiation is significantly affected by nuclear fragmentation processes of increasing depth. In this project, using the Geant4 toolkit, three physical models of Binary Intranuclear Cascade (BIC), Lige Intranuclear Cascade (INCL), and Quantum Molecular Dynamics (QMD) for heavy particles are defined in this toolkit. By examining the QMD model available in the Geant4 toolkit, the effects of heavy particles because of fragmentation of the nucleus by calculating the abundance of nuclei produced with an atomic number in the range $5 > Z > 1$ (H, He, Li, Be and B particles) at different depths of the water phantom before and after the Bragg peak and the angular distribution of these particles have been investigated by this model. The particle abundance graph shows that particle production decreases with an increasing atomic number. H and He particles are the most abundant and their range is much broader than the range of primary carbon ions. Also, according to the angular distribution diagram, H and He particles have shown a much wider distribution. This is because they have the highest dose of deposition in the area outside the treatment field. Also, with increasing atomic numbers, the angular distribution decreases.

Keywords: Geant4 toolkit, Hadron therapy, Heavy nuclei, QMD model



۱. مقدمه

هادرودرمانی یک روش جایگزین برای درمان تومورهای سرطانی است که با استفاده از ذرات باردار (مانند پروتون‌ها، یون‌های کربن و ذرات آلفا) تومورهای سرطانی را مورد هدف قرار می‌دهند. در مقایسه با پرتودرمانی متداول، هادرودرمانی دو مزیت عمده دارد: پرتاب دقیق با استفاده از یک گستره‌ی متناهی و نشان‌دهنده‌ی دز بیشینه در انتهای مسیر (قله‌ی براگ^۱) و بازدهی بیولوژیکی بالاتر در ناحیه‌ی قله‌ی براگ. این مزیت این امکان را فراهم می‌کند تا تومور بهتر مورد هدف قرار بگیرد، در حالی که بافت‌های سالم اطراف تومور آسیب نبینند. مزیت دیگر هادرودرمانی به اثرات بیولوژیکی القا شده توسط ذرات باردار مربوط می‌شود. زیرا مقدار RBE^2 با اندازه‌ی یون افزایش و مقدار OER^3 با اندازه‌ی یون کاهش می‌یابد. برای به دست آوردن تخریب بیولوژیکی یکسان، دز مورد نیاز برای یون‌های کربن تقریباً یک سوم دزسانی توسط پرتوهای x است. همچنین برای پروتون‌ها و ذرات آلفا، دز مورد نیاز به ترتیب ۱۰٪ و ۲۰٪ پایین‌تر از دزسانی توسط پرتوهای x است. بنابراین، در رابطه با باریکه‌های یون کربن-۱۲، بازدهی بیولوژیکی بهتر و بیش‌تری نسبت به فوتون‌درمانی اندازه‌گیری شده است [۱].

مقاومت رادیویی به دلیل اثر اکسیژن، هنگامی که از یون‌های ($Z \geq 6$) استفاده می‌شود، تقریباً از بین می‌رود. در رابطه با نوترون‌ها، به دلیل بالستیک ضعیفی که دارند هدف‌گیری دقیق یک تومور مشکل است. از این‌رو یون‌درمانی با باریکه‌های یون‌های سبک می‌تواند ابزار کارآمدی برای درمان تومورهای مقاوم در برابر رادیودرمانی باشد [۱]. بنابراین، یون‌های کربن در محدوده انرژی $400-1000 \text{ MeV/u}$ به دلیل ویژگی‌های فیزیکی (بالستیک) و بیولوژیکی (RBE بالا و OER پایین) شرایط بسیار خوبی را برای درمان تومورهای مقاوم به تابش واقع در عمق ارائه می‌دهد [۱]. این یون‌ها دارای توزیع دز-عمق مناسبی هستند به طوری که در ناحیه‌ی قله‌ی براگ گسترش جانبی باریکه کوچک و اثر بیولوژیکی [۱] بالایی دارند [۲].

طی آزمایش‌هایی که انجام شده است، در انرژی‌های بالا (بیش از 400 MeV/u)، که در کاربرد باریکه‌های کربن-۱۲ در تومورهای مقاوم و واقع در عمق مورد نیاز است، مشاهده شده است که تابش با افزایش عمق به طور چشم‌گیری تحت تأثیر فرایندهای تکه‌تکه شدن^۴ هسته‌ای قرار می‌گیرد. ۷۰٪ از این

ذرات به بافت سالم می‌رسند که خود باعث تولید ذرات ثانویه و دز اضافه می‌شوند [۲]. بنابراین در پروفایل دز-عمق باریکه‌های یون سنگین یک دزسانی قبل و بعد از قله‌ی براگ وجود دارد. در نتیجه در نظر گرفتن این هسته‌های سنگین در نتایج شبیه‌سازی هادرودرمانی نقش مهمی دارد. با استفاده از مدل‌هایی که در ابزار Geant4^۵ [۳] تعریف شده است، مانند مدل‌های آبخاری [۴، ۵] (مدل QMD^۶ [۶])، مدل INCL^۷ [۷]، مدل BIC^۸ [۸])، این امکان وجود دارد که بتوان نقش و اهمیت این ذرات سنگین را در دزسنجی به صورت شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار داد [۹].

اولین مطالعات تجربی تکه‌تکه شدن یون‌های سبک در آب یا مواد معادل بافت که به کاربردهای پزشکی اختصاص داده شده است در سال ۱۹۷۱ در Princeton پرداخته شده است [۱۰]. در LBL برکلی اندازه‌گیری‌های دقیق بر روی ویژگی‌های باریکه‌های نئون-۲۰ $20-670 \text{ MeV/u}$ [۱۱، ۱۲] و مطالعات تکه‌تکه شدن در انرژی‌های پایین‌تر در GANIL برای باریکه‌های کربن-۱۲ $12-95 \text{ MeV/u}$ و هدف‌های PMMA انجام شده‌اند [۱۳]. طی مطالعات Haettner و همکارانش، ویژگی‌های ذرات ثانویه‌ی تولید شده (H, He, Li, Be, B) در عمق‌های مختلف آب با استفاده از باریکه‌های یون کربن-۱۲ 200 MeV/u و 400 MeV/u تحویلی توسط سینکروترون یون‌های سنگین SIS-۱۸ در GSI بررسی شده است. طیف انرژی و بازده در زاویه‌های آزمایشگاهی $0-10^\circ$ درجه و در عمق‌های مختلف آب، مربوط به ناحیه‌ی قله‌ی براگ و دم منحنی براگ ثبت و هم‌چنین توزیع زاویه‌ای، طیف‌های انرژی و عملکرد آن‌ها در عمق‌های مختلف آب بررسی شده است. برخی از نتایج اولیه‌ی این کار توسط Haettner و همکارانش منتشر شده است و مجموعه‌ی کاملی از نتایج تجربی به دست آمده در این کار به عنوان یک پرونده داده EXFOR در دسترس است [۱۴]. مدل QMD در دهه هشتاد توسط آیچلین و استاکر معرفی شد [۱۵، ۱۶]. در این مدل، همه‌ی نوکلئون‌های هدف و پرتابه به عنوان ذرات شرکت‌کننده در نظر گرفته می‌شوند و تابع موج کل سیستم به صورت ضرب مستقیم آن‌ها فرض می‌شود. جمله‌های پتانسیل هامیلتونی در این مدل از رابطه‌ی کلی ذره‌ها در سیستم محاسبه می‌شود. بر خلاف آبشار دودویی که به صورت متوالی مسیر ذرات را دنبال می‌کند، با توجه به این‌که مدل QMD همبستگی نوکلئون‌های زیادی را در بر دارد،

5. Quantum Molecular Dynamics
6. Liège Intranuclear Cascade Model
7. Binary Intranuclear Cascade Model

1. Bragg Peak
2. Relative Biological Effectiveness
3. Oxygen Enhancement Ratio
4. Fragmentation

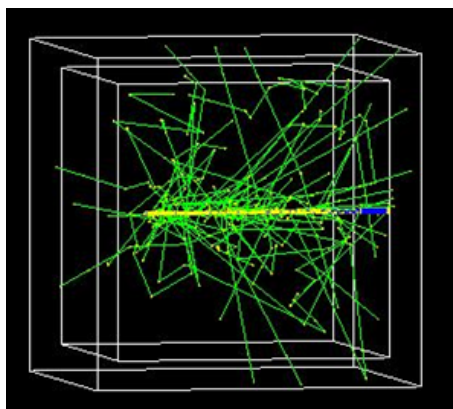


شبیه‌سازی شده است. همچنین با استفاده از کلاس `G4NistManager` ماده‌ی حجم جهانی هوا انتخاب، سپس فانتوم آب درون حجم جهانی قرار داده شده است. به منظور کنترل تولید ذرات اولیه‌ی چشمه با استفاده از `G4ParticleGun` موجود در کلاس اجباری `IonTable` و `G4VUserPrimaryGeneratorAction` و جدول چشمه‌ی کربن در امتداد فانتوم قرار داده می‌شود. برای شبیه‌سازی واکنش هسته- هسته‌ی غیرکشسان در `Geant4` از مدل دینامیکی (`G4QMDReaction`) و پارامتر قطع 0.7 میلی متر استفاده می‌شود.

برای استخراج کمیت‌های مورد نظر از کلاس‌های اختیاری موجود در ابزار `Geant4` استفاده می‌شود. به منظور بررسی توزیع دز از کلاس اختیاری `G4UserSteppingAction` برای بررسی رفتار هر گام استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از کلاس `G4UserTrackingAction` توزیع زاویه‌ای ذرات بررسی می‌شوند. در شکل ۱ نحوه ترابرد ذرات تولید شده ارائه شده است.

۳. نتایج

در این تحقیق با استفاده از ابزار `Geant4` و مدل `QMD` که برای ذرات سنگین در این ابزار تعریف شده است و با استفاده از کلاس‌های اصلی، شکل هندسی ابعاد را بر اساس مرجع [۲] به منظور بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی شده است. صحت نتایج با بررسی محل قله‌ی براگ و دز نسبی تولید شده نسبت به عمق فانتوم آب بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، انرژی به جای گذاشته شده‌ی نسبی برحسب عمق برای انرژی 400 MeV/u با نتایج تجربی مرجع [۲] مقایسه شده است.



شکل ۱. شبیه‌سازی هندسه‌ی مربوط به باریکه‌های کربن-۱۲ در یک فانتوم آب به ابعاد $350 \times 350 \times 350$ میلی‌متر با استفاده از `Geant4`.

فرستی برای محاسبه نه تنها یک جسم بلکه تشکیل پاره‌ها را نیز فراهم می‌کند. از آنجایی که مدل‌های فیزیکی `BIC` و `INCL` در مطالعات هسته‌های سنگین تولید شده دارای خطای بیش‌تری نسبت به مدل `QMD` می‌باشد [۱۷].

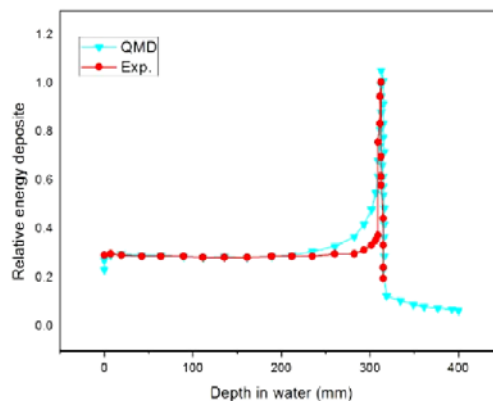
با توجه به این‌که در مطالعات تجربی انجام شده بر روی توزیع دز کربن با انرژی 400 MeV/u اهمیت ذرات سنگین تولید شده در فرایندهای تکه‌تکه شدن داخل ماده بررسی نشده و از طرفی واکنش ذرات هسته‌ای منجر به کم شدن شار باریکه‌ی اولیه و همچنین تولید ذراتی با Z کم‌تر و عمق نفوذ بیش‌تر می‌شود. ذرات تولید شده در همان جهت و با سرعت یون‌های اولیه به حرکت خود ادامه می‌دهند و برد بیش‌تری دارند. بنابراین در پروفایل دز- عمق باریکه‌های یون سنگین یک دزسانی قبل و بعد از قله‌ی براگ وجود دارد. باید ارزیابی شود که چه ذراتی تولید می‌شوند، میزان پراکندگی هر یک از ذرات چگونه است و کدام یک دارای اهمیت بیش‌تری هستند. بررسی تکه‌تکه شدن هسته‌ای و تولید ذرات سنگین در اثر شکافت هسته‌ای که در مسیر یون‌های سنگین در بافت اتفاق می‌افتد پیچیده است. به همین منظور در این تحقیق قصد داریم با ابزار شبیه‌ساز مونت‌کارلو `Geant4` و در نظر گرفتن مدل فیزیکی `QMD` موجود در این ابزار، نقش ذرات سنگین تولید شده در عمق‌های مختلف و نحوه‌ی توزیع زاویه‌ای آن‌ها را مورد بررسی قرار دهیم.

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق با توجه به این‌که مدل `QMD`، نسخه‌ی `JQMD` است، در ابزار `Geant4` تعریف شده است که از این ابزار به منظور ترابرد ذرات در ماده استفاده می‌شود [۱۸، ۱۹]. در این ابزار از مفاهیم پیشرفته‌ی شیء‌گرایی به زبان `C++` بهره گرفته شده است. به منظور تعریف هندسه‌ی آشکارساز، تعیین نوع و مشخصات چشمه و تعریف فرایندهای فیزیکی به ترتیب سه کلاس اصلی `G4VUserDetectorConstruction`، `G4VUserPhysicsList` و `G4VUserPrimaryGeneratorAction` تعریف می‌شود [۱۷]. در کلاس سوم، چگونگی اعمال فیزیک مسئله در شبیه‌سازی بیان می‌شود. در ابتدا به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، هندسه و آشکارساز بر اساس شرایط گزارش شده در مطالعات تجربی مرجع [۲] یک فانتوم آب به ابعاد $350 \times 350 \times 350$ میلی‌متر مکعب شبیه‌سازی شده است. با استفاده از کلاس `G4VUserDetectorConstruction` حجم جهانی را که ذرات در آن ترابرد می‌شوند، با دستور `G4Box` به صورت یک مکعب به ابعاد 200 سانتی‌متر مکعب



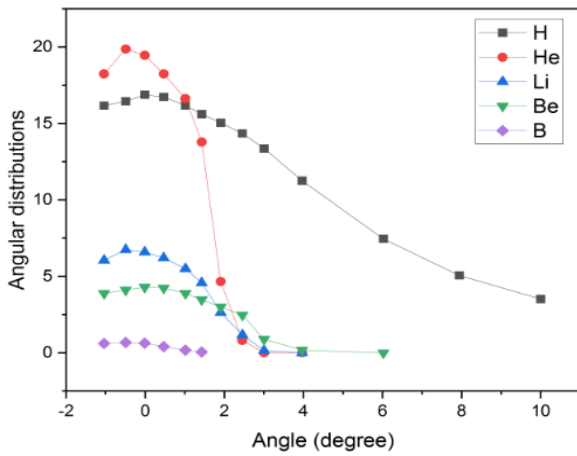
به منظور نشان دادن اهمیت ذرات سنگین تولید شده حاصل از فرایند تکه‌تکه شدن، فراوانی ذرات ثانویه در عمق‌های مختلف از هدف شبیه‌سازی شده است. نتایج به صورت تعداد فراوانی ذرات تولید شده (N) به ازای ذرات اولیه (N₀) به صورت تابعی از عمق‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. با افزایش عمق تا ناحیه‌ی قله‌ی براگ (ناحیه‌ای که ذرات اولیه، تولید ذرات جدید را متوقف می‌کنند) تولید ذرات افزایش می‌یابد. بعد از قله میزان ثانویه‌ها به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد و تولید ذره‌ی بور به صفر می‌رسد. همان‌طور که واضح هست، هسته‌های هیدروژن و هلیم غالباً بیش‌تر از ذرات سنگین‌تر (لیتیم، برلیوم و بور) تولید می‌شوند که این مسأله به دلیل وابستگی سطح مقطع (احتمال انجام واکنش) فرایندهای هسته‌ای به انرژی می‌باشد. همان‌طور که نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد در ناحیه قبل از پیک براگ انرژی ذرات ورودی بیش‌تر بوده و احتمال تولید هسته‌های سنگین ثانویه بیش‌تر می‌باشد و با کاهش انرژی این احتمال تکه‌تکه شدن کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در عمق ۲۷۵ mm ذرات تولید شده حدود ۰٫۹ هسته‌های هیدروژن، ۰٫۴۷ هسته‌های هلیم، ۰٫۴۵ هسته‌های لیتیم، ۰٫۲۵ هسته‌های برلیوم و ۰٫۴۵ هسته‌های بور است. تولید کم‌تر برلیوم را شاید بتوان به دلیل اثر شکست کامل ^۱Be به دو ذره‌ی آلفا توجیه کرد [۲]. هم‌چنین در توجیه فراوانی این ذرات سنگین می‌توان به این نکته اشاره کرد که برهم‌کنش پرتابه‌های باردار با مواد به‌طور کلی به‌صورت برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی و هسته‌ای می‌باشد. در محدوده‌ی انرژی چندصد مگا الکترون ولت به ازای هر نوکلئون، فرایندهای غالب همان فرایندهای الکترومغناطیسی است. مهم‌ترین این فرایندها، شامل برهم‌کنش‌های "یونش"، "برانگیزش" و "پراکندگی کولنی" از اتم‌ها یا هسته‌های اتمی می‌باشند. یونش و برانگیزش ناشی از پراکندگی ناکشسان کولنی پرتابه از الکترون‌های اتمی است. در این نوع فرایندها، پرتابه در طی مسیر حرکتش انرژی خود را از دست داده و کند می‌شود و این انرژی صرف کندن الکترون‌های مداری یا صرف تغییر مدار الکترون‌های اتم‌های هدف می‌شود. این نوع فرایندها اغلب باعث تولید الکترون‌های ثانویه که به الکترون‌های دلتا نیز معروفند می‌شود. از طرفی دیگر، هادرون‌ها برهم‌کنش‌های هسته‌ای با هسته‌های هدف انجام می‌دهند. در انرژی ذرات باردار در هادرون درمانی این نوع برهم‌کنش‌ها نقش بسیار مهم دارند. این برهم‌کنش‌ها شامل: پراکندگی‌های کشسان، پراکندگی‌های ناکشسان و واکنش‌های هسته‌ای می‌باشند. از آنجایی که در انرژی‌های بسیار زیاد احتمال واکنش هسته‌ای از نوع تکه‌تکه شدن زیاد هست (سطح



شکل ۲. قله‌ی براگ برای باریکه‌های کربن-۱۲ در یک فانتوم آب. نمودارهای قرمز و آبی به ترتیب مربوط به داده‌های تجربی و مدل QMD هستند.

طی برخورد یک پرتابه با هسته هدف، یک شبه‌پرتابه و یک شبه هدف برانگیخته تشکیل می‌شود که در اثر واپاشیده شدن ذرات ثانویه گسیل می‌شود. ذرات ثانویه شامل ذرات سبک، ذرات آزاد و ذرات سنگین است [۱]. این ذرات بسته به جرم، انرژی و بار ثانویه تأثیر بیولوژیکی زیادی بر روی بیمار خواهند داشت. این اثر بیولوژیکی برای ذرات سنگین بیش‌تر است. برخوردهای هسته-هسته دو اثر عمده دارند: در اثر اول، پرتابه به دلیل تغییر ماهیت آن پس از برخورد ناپدید می‌شود که در این صورت انرژی آن به قله‌ی براگ نمی‌رسد و در اثر دوم ذرات ثانویه‌ای تولید می‌شوند که اندازه‌های کوچک‌تر و سرعتی نزدیک به سرعت پرتابه دارند که در این صورت در فراتر از قله‌ی براگ انرژی‌رسانی می‌کنند [۱]. ذره در حین تابیدن به بدن تحت فرایندهایی قرار می‌گیرد که به دلیل پیچیدگی ماهیت هسته‌ای نمی‌توان آن‌ها را به صورت تحلیلی بررسی کرد. مکان قله‌ی براگ به انرژی ذره‌ی فرودی بستگی دارد که در این‌جا مکان قله‌ی براگ در عمق حدود ۳۰۰ میلی‌متر واقع شده است که با نتایج تجربی طبق مرجع [۲] هم‌خوانی خوبی دارد. به وضوح می‌توان دید که نشان دادن بیشینه دز در انتهای مسیر در یک قله‌ی کاملاً تیز واقع شده است. یک دزسانی در ناحیه‌ی قبل و بعد از قله‌ی براگ مشاهده می‌شود که به دلیل شکافت و وجود پاره‌های شکافت است. لازم به ذکر است در محاسبه دز به جای گذاشته شده در فانتوم از کلاس G4ScoringManager استفاده شده و اندازه‌ها مشها به‌صورت مکعب‌های ۰٫۵ در ۰٫۵ در ۰٫۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. هم‌چنین تعداد ذرات اولیه ۱۰۷ بوده و خطای انجام شبیه‌سازی کم‌تر از ۳ درصد می‌باشد.





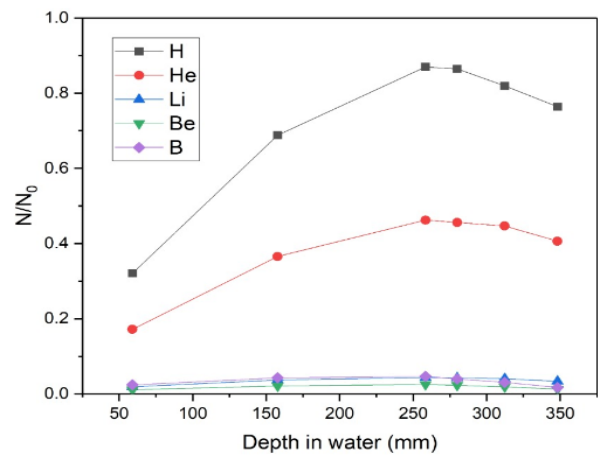
شکل ۴. توزیع‌های زاویه‌ای ذرات ثانویه تولید شده برای باریکه‌های فرودی کربن-۱۲ در یک فانتوم آب. رنگ‌های مشکی، قرمز، آبی، سبز و سوسنی به ترتیب برای ذرات ثانویه تولید شده H، He، Li، Be و B می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اهمیت و نقش ذرات سنگین تولید شده در کربن‌درمانی پرداخته شده است. با توجه به داده‌های تجربی موجود در انرژی ۴۰۰ MeV/u، شبیه‌سازی در این انرژی انجام شده است. در این شبیه‌سازی از ابزار Geant4 استفاده کرده و به منظور در نظر گرفتن نقش ذرات سنگین تولید شده در شبیه‌سازی از مدل QMD موجود در این ابزار استفاده شده است. تولید ذرات هسته‌ای ثانویه در عمق‌های مختلف در امتداد مسیر نفوذ یون‌های اولیه در آب، در ناحیه‌ی قبل و فراتر از قله‌ی براگ بررسی شد. اهمیت تکه‌تکه شدن هسته‌ای برای دزنشانی در شکل ۳ مشهود است، که نشان‌دهنده‌ی اتلاف قابل‌توجهی و صرفاً نمایی، ذرات هیدروژن و هلیم به عنوان فراوان‌ترین آن‌ها نشان داده شده است. دامنه‌ی آن‌ها بسیار بیشتر از یون‌های کربن اولیه است و بیش‌ترین دز را در ناحیه‌ی فراتر از قله‌ی براگ (دم) تولید می‌کنند. با افزایش عدد اتمی ذرات ثانویه، تولید آن‌ها کم‌تر می‌شود و به صفر می‌رسد. نمودار توزیع زاویه‌ای ذرات ثانویه (شکل ۴)، نشان می‌دهد که ذرات هلیم در یک مخروط باریک رو به جلو (3° درجه) حرکت می‌کنند، در حالی که ذرات هیدروژن توزیع بسیار گسترده‌تری از خود نشان می‌دهند و بنابراین عامل بیش‌ترین دزسانی در خارج از موضع در زاویه‌های بزرگ‌تر هستند.

مقطع) در فواصل کم، فراوانی ذرات باردار سنگین زیاد است و با کاهش انرژی ذرات در عمق به دلایل ذکر شده در بالا احتمال تکه‌تکه شدن ذرات کاهش پیدا می‌کند و از طرفی احتمال فرایندهای دیگر افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت، ذرات سبک با بار کم، برد طولانی‌تری دارند و میزان کاهش فراوانی به بار هسته‌ای ذرات تولید شده (Z_f) بستگی دارد. در این محاسبات از کلاس G4UserSteppingAction موجود در Geant4 استفاده کرده‌ایم. در این کلاس امکان استخراج اطلاعات مانند نوع ذره، انرژی ذرات، جهت تکانه و غیره وجود دارد. با قرار دادن شرط در این کلاس و مشخص کردن نوع ذره از لحاظ اولیه یا ثانویه بودن و عدد جرمی ذرات تولید شده در داخل فانتوم می‌توانیم تعداد ذرات تولید شده در فانتوم را شمارش کنیم و فراوانی آن‌ها را محاسبه کنیم. هم‌چنین با مشخص کردن جهت تکانه این امکان وجود دارد که پراکندگی این ذرات بررسی شود.

توزیع زاویه‌ای ذرات تولید شده در زوایای مختلف آب در شکل ۴، نشان داده شده است. برای ذرات سنگین‌تر از هلیم تا بور، همه‌ی دامنه‌های زاویه‌ای پوشانده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ذرات به شدت رو به جلو حرکت می‌کنند. ذرات هیدروژن و هلیم توزیع گسترده‌ای دارند. با افزایش بار هسته‌ای ذرات، توزیع‌ها کم‌تر و باریک‌تر می‌شوند. FWHM^۱ حدود ۳ درجه برای ذرات بور، ۳/۵ درجه برای برلیم، ۴/۵ درجه برای لیتیم، ۵/۳ درجه برای هلیم و ۱۰ درجه برای هیدروژن است. توزیع زاویه‌ای ذرات به طور عمده از روند فرایند تکه‌تکه شدن هسته‌ای ناشی می‌شود و تنها کمی تحت تأثیر پراکندگی کولونی قرار می‌گیرد.



شکل ۳. فراوانی ذرات ثانویه تولید شده در عمق‌های مختلف در یک فانتوم آب برای باریکه‌های فرودی کربن-۱۲. رنگ‌های مشکی، قرمز، آبی، سبز و سوسنی به ترتیب برای ذرات ثانویه تولید شده H، He، Li، Be و B می‌باشد.

1. Full Width at Half Maximum

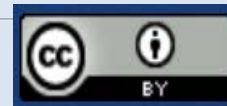


مراجع

1. D. Cussol, *Nuclear physics and hadrontherapy*, *École Joliot-Curie de Physique Nucléaire*, 12 (2011).
2. E. Haettner, et al, *Experimental study of nuclear fragmentation of 200 and 400 MeV/u 12C ions in water for applications in particle therapy*, *Physics in Medicine & Biology*, **58(23)**, 8265 (2013).
3. Geant4 - a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter, <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant4/geant4.html>.
4. S.G. Mashnik, et al., *Recent developments of the cascade-exaction model of nuclear reactions*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **39(sup2)**, 720-725 (2002).
5. J. Cugnon, C. Volant, S. Vuillier, *Improved intranuclear cascade model for nucleon-nucleus interactions*, *Nuclear Physics A*, **620(4)**, 475-509 (1997).
6. J. Aichelin, "Quantum" molecular dynamics—a dynamical microscopic n-body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions, *Physics Reports*, **202(5-6)**, 233-360 (1991).
7. A. Boudard, et al, *New Potentialities of the Liege Intranuclear Cascade (INCL) Model for Reactions Induced by Nucleons and Light Charged Particles*, *Physical Review C*, **87**, 014606-014634 (2012).
8. G. Folger, V.N. Ivanchenko, J.P. Wellisch, *The binary cascade*, *The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei*, **21(3)**, 407-417(2004).
9. A. Lechner, V.N. Ivanchenko, J. Knobloch, *Validation of recent Geant4 physics models for application in carbon ion therapy*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **268(14)**, 2343-2354 (2010).
10. H.D. Maccabee, M.A. Ritter, *Fragmentation of high-energy oxygen-ion beams in water*, *Radiation Research*, **60(3)**, 409-421 (1974).
11. W. Schimmerling, et al, *The Fragmentation of 670A MeV Neon-20 as a Function of Depth in Water: I. Experiment*, *Radiation Research*, **120(1)**, 36-71 (1989).
12. J. Llacer, J.B. Schmidt, C.A. Tobias, *Characterization of fragmented heavy-ion beams using a three-stage telescope detector: measurements of 670-MeV/amu 20Ne beams*, *Med. Phys.*, **17**, 151-57 (1990).
13. B. Braunn, et al, *Nuclear reaction measurements of 95 MeV/u 12C interactions on PMMA for hadrontherapy*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **269(22)**, 2676-2684 (2011).
14. E. Haettner, et al, *Experimental study of nuclear fragmentation of 200 and 400 MeV/u 12C ions in water for applications in particle therapy*, *Physics in Medicine & Biology*, **58(23)**, 8265 (2013).
15. H. Stocker, W. Greiner, *Phys. Rep.*, **137**, 277 (1986).
16. J. Aichelin, H. Stocker, *Phys. Lett. B*, **176**, 14 (1986).
17. <https://geant4userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/index.html>.
18. J. Allison, et al., *Recent developments in Geant4*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **835**, 186-225 (2016).
19. R. Kaderka, et al, *Out-of-field dose measurements in a water phantom using different radiotherapy modalities*, *Physics in Medicine & Biology*, **57(16)**, 5059 (2012).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سید محمد متولی، وحید زنگانه، سپیده باقری (۱۴۰۲)، مطالعه‌ی میزان فراوانی هسته‌های سنگین تولید شده در کربن‌درمانی با استفاده از ابزار Geant4، ۱۰۵، ۱۶۴-۱۵۹

DOI: 10.24200/nst.2022.1127.1744

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1480.html

