

مدل صفر بعدی برای تعیین چگالی ذره‌ای و انرژی واکنش همجوشی $P-^{11}B$ در پرتودرمانی

سیده نسرین حسینی مطلق* و محمد قاسمی شبانکاره

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

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

پست الکترونیکی: hosseinimotlagh@hotmail.com

چکیده

از واکنش همجوشی $P-^{11}B$ سه ذره آلفا گسیل می‌گردد. ذرات آلفا تأثیر به‌سزایی در مرگ سلول‌های سرطانی ایفا می‌کنند. وقتی که بورن در محل تومور انباشته می‌شود پروتون‌های تابیده شده از خارج از بدن می‌توانند با بورن‌های درون تومور واکنش دهند. همچنین یک پرتو گاما سریع از واکنش همجوشی $P-^{11}B$ منتشر می‌شود. قله پرتو گامای سریع ۷۱۹ KeV تولید شده از واکنش همجوشی $P-^{11}B$ نقش مفیدی را برای ما ایفا می‌کند. این روش درمان ویژگی‌ها و مزایایی مانند کاربرد قله براگ در درمان، هدف‌گیری دقیق تومور، افزایش اثر درمان و مشاهده و نظارت بر ناحیه درمان در طول درمان را دارا می‌باشد.

کلیدواژگان: همجوشی، پروتون، بورن، گاما، تومور.

۱. مقدمه

پایه‌ی این واکنش استوار بوده و به عنوان یک روش پرتودرمانی محسوب می‌شود [۱-۴]. در روش‌های مرسوم فعلی مانند روش درمان با تسخیر نوترون توسط بورن^۲ (BNCT)، بعد از تسخیر نوترون توسط بورن نشان‌گذاری شده در ناحیه تومور، یک ذره آلفا در نقطه‌ی تسخیر آزاد می‌شود [۵] که این ذره آلفا باعث مرگ سلول تومور می‌شود [۶]. این در حالی است که در روش PBFT سه ذره آلفا از واکنش همجوشی $P-^{11}B$ منتشر می‌شود که اگر این واکنش برای پرتودرمانی به کار برده شود می‌تواند منجر به نتایج

واکنش همجوشی $P-^{11}B$ در حوزه فیزیک هسته‌ای از سال ۱۹۶۰ مورد بررسی قرار گرفته است. هنگام واکنش همجوشی $P-^{11}B$ ابتدا یک هسته ^{12}C در حالت برانگیخته تشکیل می‌شود، سپس این کربن برانگیخته به یک ذره آلفا با انرژی ۳/۷۶ MeV و یک هسته 8Be واپاشی می‌کند، برلیوم نیز به دو ذره آلفا هر یک با انرژی ۲/۷۴ MeV تقسیم می‌شود. در این مطالعه به معرفی روش درمانی با استفاده از واکنش همجوشی $P-^{11}B$ و محاسبه چگالی ذرات حاضر در این واکنش پرداخته می‌شود. اصول درمان با همجوشی پروتون بورن^۱ (PBFT) بر

² Boron Neutron Capture Therapy

¹ Proton Boron Fusion Therapy

تولیدی سلول‌های تومور را از بین می‌برند. همچنین اثر افزایش در ماکزیمم قله براگ را که به واسطه بورن در BUR رخ داده است، مشاهده می‌شود.

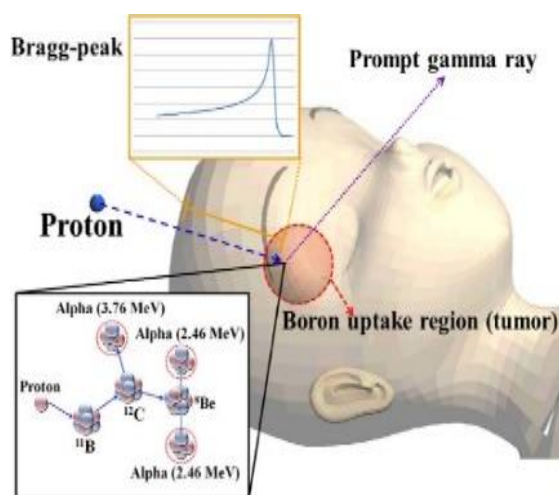
۲. اشعه گامای سریع

پس از یک برخورد هسته‌ای، هسته معمولاً در حالت برانگیخته باقی می‌ماند، یعنی نوکلئون‌ها در سطح انرژی بالاتری نسبت به حالت زمینه قرار می‌گیرند. در فاصله زمانی 10^{-19} تا 10^{-9} ثانیه، گذار هسته‌ها از حالت برانگیخته به حالت زمینه صورت می‌گیرد. در این فرآیند تعداد یک یا بیشتر اشعه γ گسیل می‌شود. این گسیل ناهمسانگرد است و وابسته به واپاشی می‌باشد. به دلیل مبدأ و مقیاس زمانی گسیل پس از واکنش هسته‌ای، این فوتون‌ها پرتو گامای سریع (PGs) می‌شوند.

در مقایسه با سیگنال PET^4 ، PGs یک کاوشگر مناسب برای تشخیص برد پروتون می‌باشند. استفاده از اشعه گامای سریع برای ارزیابی درمان در سال ۲۰۰۳ پیشنهاد شد. از آن به بعد، موضوعات متعددی در زمینه تصویربرداری با PGI⁵ برای تعیین پروفایل مکانی گسیل فوتون‌ها ارائه شدند، و به منظور اندازه‌گیری برد پروتون و دز جذب شده در تومور، سیستم‌های فعال و منفعل توسط گروه‌های تحقیقاتی در سراسر جهان در حال توسعه می‌باشند.

اولین سیستم مورد بررسی دوربین‌های کامپتون⁶ (CC) بود که معمولاً در اختر فیزیک برای تشخیص انفجار پرتو گامای پر انرژی استفاده می‌شود. در حالت CC دو مرحله‌ای، از وقوع پدیده کامپتون در یک آشکارساز پراکننده و یک جاذب کامل فوتونی و پراکنده کننده فوتون بهره گرفته می‌شود. با

درمانی مؤثرتری در القای مرگ سلول‌های توموری با استفاده از شار کوچکتری شود. علاوه بر این اتلاف انرژی پروتون در طی انتشار در ماده از طریق قله براگ نیز توضیح داده می‌شود. پس از آنکه بورن نشانه‌گذاری شده در ناحیه تومور انباشته شد، اگر بخشی از حداکثر دز پروتون (قله براگ) در منطقه تومور که ناحیه جذب بورن می‌باشد^۱ (BUR) قرار گیرد، یک اثر درمانی چشم گیر با کمترین آسیب به بافت سالم را می‌توان انتظار داشت. زیرا اولاً، تولید سه ذره آلفا در از بین بردن سلول‌های سرطانی با استفاده از یک پروتون و داشتن شار کوچکتر منجر به بازده بالای درمانی نسبت به روش نوترونی معمول یا BNCT می‌شود. ثانیاً، واکنش همجوشی $P-^{11}B$ یک پرتو گاما سریع را از واکنش همجوشی تولید می‌کند که می‌توان آن را به وسیله آشکارساز گاما یا توموگرافی کامپیوتری با تک فوتون تابشی^۲ (SPECT) شناسایی کرده و تصویری از ناحیه درمان در طول PBFT قابل مشاهده نمود. شکل ۱ نمودار طرحواری از اساس PBFT را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمودار طرحواری از PBFT.

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود پروتون با بورن در منطقه تومور واکنش می‌دهد پس از واکنش، سه ذره آلفای

³ Prompt Gamma rays

⁴ Positron Emission Tomography

⁵ Prompt Gamma Imaging

⁶ Compton Camera

¹ Boron Uptake Region

² Single Photon Emission Computed Therapy

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{E}{\tau_E} + Q_\alpha n_p n_{B^{11}} \langle \sigma v \rangle - P_{rad} + P_{aux} \quad (4)$$

که در اینجا n_α ، n_p و $n_{B^{11}}$ چگالی ذرات آلفا، هیدروژن، ^{11}B و انرژی می‌باشد. پارامترهای τ_α ، τ_p ، $\tau_{B^{11}}$ و τ_E به ترتیب زمان محصورشدگی ذرات آلفا، هیدروژن، ^{11}B و انرژی می‌باشد. ورودی‌های کنترلی شامل نرخ سوخت‌رسانی هیدروژن (S_p) ، ^{11}B $(S_{B^{11}})$ و همچنین توان کمکی P_{aux} است. $Q_\alpha = 2.87 \text{ MeV}$ انرژی ذرات آلفا می‌باشد. با تعریف کمیت‌های نسبی $f_p = \frac{n_p}{n_i}$ ، $f_B = \frac{n_B}{n_i}$ ، $f_\alpha = \frac{n_\alpha}{n_i}$ معادلات فوق کمی ساده‌تر می‌گردد که در آن‌ها n_i برابر است با $n_i = n_p + n_{B^{11}} + 3n_\alpha$. واکنش‌پذیری $P-^{11}\text{B}$ $\langle \sigma v \rangle$ به شدت غیرخطی، مثبت و تابعی از دمای پلاسما T است که با رابطه:

$$\langle \sigma v \rangle = C_1 \zeta^{3/6} \xi^2 \exp(-3\zeta^{1/3} \xi) + 5.41 \times 10^{-15} T^{-3/2} \times \exp\left(-\frac{148}{T}\right) \text{ cm}^3/\text{s} \quad (5)$$

محاسبه می‌گردد که در آن:

$$\zeta = 1 - \frac{C_2 T + C_4 T^2 + C_6 T^3}{1 + C_3 T + C_5 T^2 + C_7 T^3} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{C_0}{T^{1/3}} \quad (7)$$

و پارامترهای C_i از مرجع [۳] مشخص می‌شود. در این کار تابش اتلافی P_{rad} به طور تقریبی به صورت:

$$P_{rad} = P_{brem} = A_b Z_{eff}^2 n_e^2 \sqrt{T} \quad (8)$$

نوشته می‌شود که در آن $A_b = 5.5 \times 10^{-37} \text{ Wm}^3 / \sqrt{\text{KeV}}$

$$Z_{eff} = \sum_i \frac{n_i Z_i^2}{n_e} = \frac{n_p + n_{B^{11}} + 4n_\alpha}{n_e}$$

ضریب تابش ترمزی، عدد اتمی مؤثر، $n_e = n_p + n_{B^{11}} + 2n_\alpha$ چگالی الکترونی،

$$T = \frac{2E}{3n} \text{ دمای پلاسما می‌باشد. توان گرمایی خالص پلاسما به صورت}$$

پلاسما می‌باشد. توان گرمایی خالص پلاسما به صورت

اندازه‌گیری انرژی به‌جا گذاشته شده در هر دو آشکارساز (الکترون کامپتون و فوتون پراکنده شده) و همچنین موقعیت هر دو رویداد، می‌توان زاویه پراکندگی را با توجه به معادله کامپتون محاسبه کرد. تاکنون چندین نوع CC مورد بررسی قرار گرفته‌اند با این حال، هیچ کدام تا به حال در شرایط بالینی بکار گرفته نشده‌اند.

در این کار واکنش همجوشی پروتون بور باعث ایجاد یک باریکه گامای سریع می‌شود. هنگامی که این تک فوتون سریع با استفاده از یک دوربین گاما یا دستگاه SPECT آشکارسازی شود، منطقه درمان را می‌توان در طول PBFT، مورد نظارت و پایش قرار داد.

علاوه بر این، باریکه گامای آبی گسیل شده توسط این واکنش می‌تواند اطلاعاتی در مورد منطقه درمان را فراهم کند و برای تأیید خروج اشعه گامای آبی با قله انرژی 720 KeV لازم است شبیه‌سازی طیف انرژی انجام شود. در این کار این شبیه‌سازی با کد Geant4 انجام شده است.

۳. مدل صفر بعدی برای تعیین چگالی ذره‌ای و

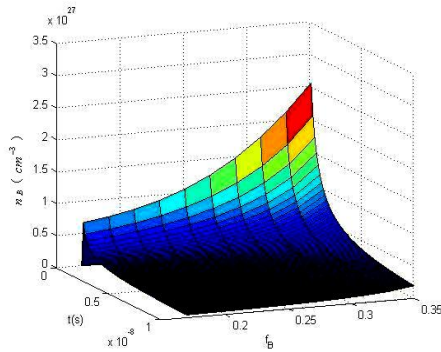
انرژی واکنش همجوشی P-11B

در این قسمت مقاله از مدل صفر بعدی برای سوختن پلاسما و معادلات توازن ذره و انرژی استفاده شده است. در این مدل رفتار سوخت‌های هیدروژن و ^{11}B و چگالی آنها به طور جداگانه در نظر گرفته شده که این کار به ما اجازه می‌دهد که از سوخت ایزوتوپی مناسبی به عنوان محرک استفاده شود. مدل مذکور توسط معادلات زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dn_\alpha}{dt} = -\frac{n_\alpha}{\tau_\alpha} + n_p n_{B^{11}} \langle \sigma v \rangle \quad (1)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = -\frac{n_p}{\tau_p} - n_p n_{B^{11}} \langle \sigma v \rangle + S_p \quad (2)$$

$$\frac{dn_{B^{11}}}{dt} = -\frac{n_{B^{11}}}{\tau_{B^{11}}} - n_p n_{B^{11}} \langle \sigma v \rangle + S_{B^{11}} \quad (3)$$



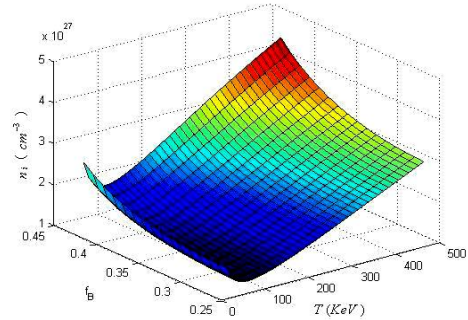
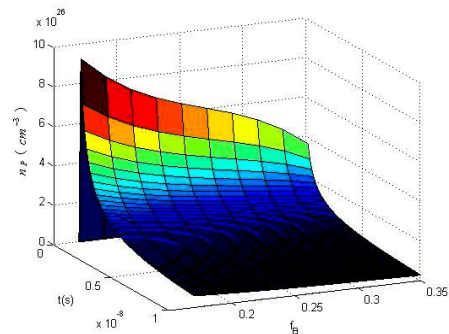
شکل (۵): تحولات زمانی برای چگالی ذرات آلفا.

در این کار از شبیه‌ساز Geant4^۱ که قوی‌تر از کد شبیه‌سازی MCNPX^۲ است استفاده شده است که در ادامه توصیف می‌شود و نتایج آن با کار یان^۳ و همکاران [۶] که در سال ۲۰۱۴ برای مطالعه شبیه‌سازی پرتودرمانی به کمک واکنش همجوشی P-^{۱۱}B صورت گرفته است، مقایسه می‌شود.

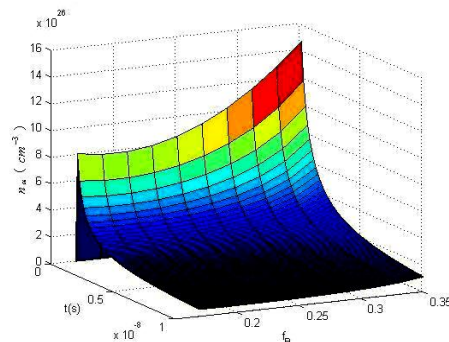
شبیه‌سازی مونت‌کارلو توسط بسیاری از بسته‌ها و کدهای الکترونیکی مانند الکترون و فوتون از طریق محیط‌های گسترده^۴ (ETRAN) [۷]، کد انتقال N ذره (MCNP) [۸]، کد انتقال مونت کارلو اشعه-x/الکترون^۵ (PENLOPE) [۹]، کد رگباری الکترون الکترون-گاما^۱ (EGS) [۱۰]، کد شبیه‌سازی مونت‌کارلو تصویربرداری نوری الکترونی^۷ (MANTIS) [۱۱]، کد شبیه‌سازی هندسی^۸ (FLUKA) [۱۲] و کد شبیه‌سازی ردیابی است که آخرین آن‌ها Geant4، یک پلت فرم برای شبیه‌سازی عبور ذرات از ماده است.

این کد در زبان برنامه نویسی C++ نوشته شده است [۱۳] که اجازه گسترش نرم‌افزار شئی‌گرا را می‌دهد. تعدادی از

توان همجوشی هم با رابطه $P = P_{fusion} - P_{rad} + P_{aux}$ و $P_{fusion} = Q_{\alpha} n_p n_{B^{11}} \langle \sigma v \rangle$ تعریف می‌شود که $n_{pB^{11}} = n_p + n_{B^{11}}$ چگالی کل هیدروژن و ^{۱۱}B می‌باشد. در شکل ۲ الی ۵ تحولات زمانی مربوط به چگالی n_i ، پروتون، بورن و ذرات آلفا مشخص شده است که همگی نهایتاً با گذشت زمان به تعادل می‌رسند.

شکل (۲): تحولات زمانی برای چگالی n_i .

شکل (۳): تحولات زمانی برای چگالی پروتون.



شکل (۴): تحولات زمانی برای چگالی بورن.

^۱ GEometry ANd Tracking

^۲ Monte Carlo N-Particle extended

^۳ Yoon

^۴ Electron TRANsport

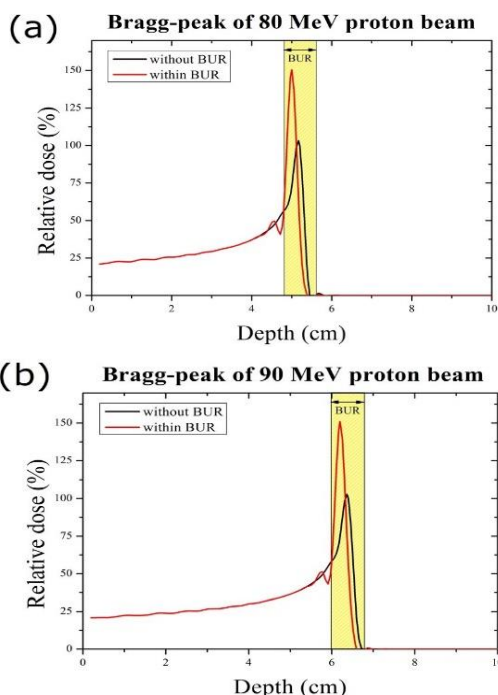
^۵ A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport

^۶ Electron Gamma Shower

^۷ Monte carlo x-rAy electroN optIcal Imaging Simulation

^۸ FLUKtuierende KAskade

رفته) در کلاس عملی G4Stepping ساخته شده و خروجی به صورت یک عدد تصادفی ساخته شده و سپس با استفاده از چارچوب تجزیه و تحلیل داده‌های هدف در یک فایل اصلی طراحی می‌شود. یان و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۴ برای مطالعه شبیه‌سازی پرتودرمانی به کمک واکنش همجوشی P-¹¹B، از یک فانتوم آب با هندسه استوانه‌ای (چگالی: ۱ gr/cm³، قطر ۱۶ cm و ارتفاع ۶ cm) و یک طیف پروتون ۸۰ MeV (۴×۱۰^۷ particles/cm².s) تایید شده از فاصله ۵۰ سانتی متری به سطح آب، استفاده کردند. که نتایج شبیه‌سازی حاصل از کار آن‌ها در زیر می‌آید: شکل ۶ نشان دهنده درصد عمق دز پروتون^۳ (PDD) مربوط به سه انرژی مختلف الف: ۸۰ مگاالکترون‌ولتی، ب: ۹۰ مگاالکترون‌ولتی و ج: ۱۰۰ مگاالکترون‌ولتی می‌باشد. PDD درون آب بدون منطقه‌ای که محتوی برون باشد به عنوان مرجع استفاده شده است. افزایش حداکثر سطح دز به ترتیب ۵۰/۵، ۵۰/۹ و ۷۰/۵ درصد می‌باشد. افزایش بیش از نیمی از موارد در هر سه مورد گزارش شده است.



³ Proton Dose Depth

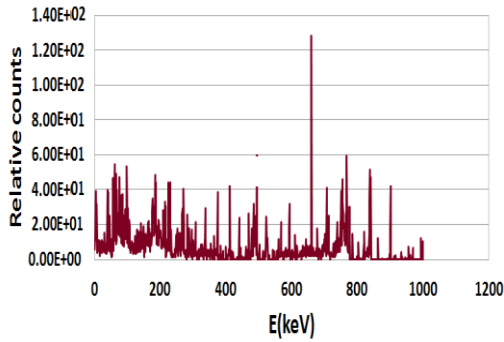
کتابخانه‌های مفید مانند کتابخانه استاندارد قالب^۱ (STL) برای ذخیره‌سازی اشیاء و الگوریتم‌های مفید برای مرتب‌سازی، جستجو و کپی کردن اشیاء، کتابخانه جریان ورودی/خروجی^۲ (IOStream) برای خواندن/نوشتن داده‌ها و کتابخانه رشته‌ای مربوط به ویژگی رشته‌ها است.

جنبه‌های شبیه‌سازی که ممکن است در یک آزمایش واقعی مورد نیاز باشند و توسط Geant4 پوشش داده شوند عبارتند از: هندسه سیستم، خواص ذرات بنیادی، فرآیندهای فیزیکی مورد انتظار برهمکنش ذره با ماده، تولید رویداد اولیه، ردیابی ذرات و میدان‌های الکترومغناطیسی از جمله داده‌های ذرات پیشگام (pre-step)، تولید و ذخیره‌سازی رویدادها و مسیره‌ها، فرآیندهای مجسم‌سازی و تسخیر و تجزیه و تحلیل داده‌های شبیه‌سازی شده است. در این کار، مجموعه سخت‌افزاری مورد استفاده برای اجرای نسخه ۹/۵ کد GEANT4، یک سیستم شخصی با حافظه ۲/۱ گیگابایتی می‌باشد و سیستم عامل آن Scientific Linux CERN 5 بر روی آن نصب شده است. انتشار ذرات به صورت تصادفی در محیط همسانگرد رخ می‌دهد. از کلاس Construction G4Detector برای طراحی آشکارسازی فانتوم پر از آب که در هوا جاسازی شده استفاده می‌شود.

مواد با استفاده از خواص فیزیکی آن با استفاده از کلاس G4Material تعریف می‌شوند. پیاده‌سازی تمامی فرآیندهای فیزیکی موردنظر ناشی از برهم‌کنش ذره با آب (پراکندگی چندگانه، یونیزاسیون، Bremsstrahlung و نابودی) با استفاده از لیست کلاس G4Physics تنظیم می‌شوند. چشمه پروتونی با استفاده از کلاس عملی G4Primary مدل‌سازی می‌شوند. در پایان هر رویداد از ۵۰۰۰۰ رویداد تولید شده، داده‌های پس گام (post-step) (موقعیت ذره (x, y, z) و انرژی از دست

¹ Standard Template Library

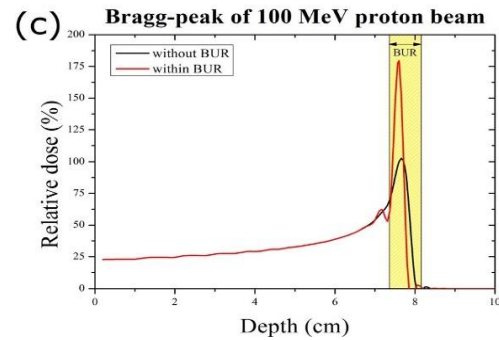
² Input/Output Stream



(ب)

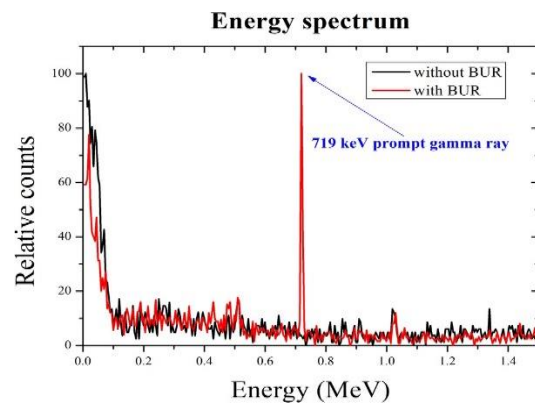
شکل (۷): طیف انرژی پرتو گامای سریع که از واکنش همجوشی پروتون بورون تولید شده است. نمودار (الف) با استفاده از شبیه‌سازی MCNPX که یان و همکاران انجام داده‌اند به دست آمده است. خط سیاه نشان‌دهنده طیف گاما مربوط به فانتوم آب فاقد منطقه محتوی پرون و خط قرمز نشان‌دهنده طیف گاما در فانتوم آب دارای منطقه محتوی پرون است [۶]. نمودار (ب) طیف انرژی گاما را با استفاده از شبیه‌سازی Geant4 و با در نظر گرفتن فانتوم آبی که دارای منطقه محتوی پرون (BUR) می‌باشد که در این تحقیق به دست آمده است. پیک ۷۱۹ کیلو الکترون‌ولتی پرتو گاما سریع در طیف قابل مشاهده است.

شکل ۷ نشان‌دهنده طیف انرژی اشعه گامای سریع حاصل شده از شبیه‌سازی می‌باشد. خط مشکی نشان‌دهنده طیف اشعه گامای سریع ناشی از فانتوم آبی است که فاقد منطقه محتوی پرون (BUR) می‌باشد و حاوی هیچ پیک مشخصی نمی‌باشد. با این حال با شبیه‌سازی با شرایط یکسان در شبیه‌سازی قبلی، زمانی که منطقه محتوی پرون درون فانتوم آب قرار گرفته باشد یک پیک اشعه گامای سریع در طیف مشاهده می‌شود. تعداد پیک اشعه گامای سریع ۷۱۹ کیلو الکترون‌ولتی به اندازه کافی برای شناسایی و تصویربرداری از محل درمان زیاد می‌باشد. اگر وقوع اشعه گامای سریع در طی تابش پرتو پروتون مشاهده شود محل درمان در طول PBFT مشاهده می‌شود. این بدان معنی است که وقتی پروتون توسط بورن تسخیر می‌شود تعداد پروتون‌های شمرده شده در هر اسلب^۱ (هندسه‌ای در شبیه‌سازی) در مرز به دلیل انجام واکنش همجوشی نسبتاً



شکل (۶): PDD های مرتبط با انرژی ذخیره شده در فانتوم آب. برای پروتون با انرژی‌های مختلف، مرکز منطقه محتوی پرون با نقطه‌ای که حداکثر دز پروتون جذبی در آن نقطه می‌باشد تطبیق داده شده است. PDD ای که نشان‌دهنده افزایش سطح دز در منطقه حاوی پرون (BUR) (خط قرمز) می‌باشد بر روی PDD بهنجار شده (خط سیاه) قرار گرفته است. انرژی‌های پروتون ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگا الکترون‌ولت بوده است. [۶].

علاوه بر این نتیجه، نقاط حداکثر سطح دز تقریباً مشابه با نقاط اصلی می‌باشد. این افزایش قابل ملاحظه در حداکثر سطح دز می‌تواند آسیب مؤثرتری به سلول‌های تومور وارد کند. علاوه بر این اگرچه ناحیه BUR تغییر کرده است اما افزایش حداکثر سطح دز در طول تغییر انرژی پروتون می‌تواند حفظ شود. با این حال از آنجا که اثر بخشی این روش در نهایت به سطح مقطع واکنش وابسته می‌باشد به منظور اعمال در اثربخشی بالینی، افزایش سطح مقطع واکنش ضروری است.



(الف)

¹ Slab

۴. نتیجه‌گیری

به دلیل اینکه روش PBFT هنوز در مرحله بررسی‌های اولیه است تأیید اثربخشی آن نیازمند مطالعات، شبیه‌سازی‌ها و آزمایشات بیشتری برای استفاده بالینی از آن می‌باشد. لذا در این کار بررسی دینامیکی واکنش همجوشی $P-^{11}B$ با جزئیات بیشتری انجام شد تا با محاسبه نظری چگالی ذرات موجود در این واکنش همجوشی بتوان قدمی دیگر در شناسایی اثرات و چگونگی روند این واکنش برداشته شود و از نتایج آن در مطالعات آینده مربوط به درمان استفاده نمود و نیز کمکی به بررسی‌ها و انجام آزمایشات آتی بر اساس مطالعه فانوم ذکر شده به عنوان گام بعدی در جهت استفاده از PBFT در زمینه بالینی انجام شود.

کوچک می‌باشد. در این مطالعه شبیه‌سازی به دلیل اینکه تنظیم کد شامل چشمه پروتون با پروتون تالی می‌باشد، این تنظیم باعث دشواری تشخیص علت افزایش دز پروتون تولیدی توسط ذرات آلفا می‌شود. اگر واکنش جذب نوترون توسط بورن با چشمه نوترون و پروتون تالی شبیه‌سازی شود، تغییرات دز پروتون با ذرات آلفا می‌تواند به وضوح مشاهده شود. همچنین واقعاً کدهای MCNPX و Geant4 می‌توانند واکنش همجوشی $P-^{11}B$ را با داده‌های اولیه سطح مقطع واکنش شبیه‌سازی کنند. دلیل افزایش در قله به سطح تنها به دلیل افزایش چگالی می‌باشد [۶]. از مقایسه شکل‌های ۷-الف و ۷-ب همخوانی هر دو روش شبیه‌سازی MCNPX و Geant4 تأیید می‌گردد. اما اختلاف جزئی که مشاهده می‌شود به علت دقت بیشتر شبیه‌سازی Geant4 می‌باشد.

۵. مراجع

- [1] C. Labaune, C. Baccou, S. Depierreux, C. Goyon, G. Loisel, V. Yahia, and J. Rafelski. Fusion Reactions Initiated by Laser-Accelerated Particle Beams in a Laser-Produced Plasma, *Nature Communications*, 4 (2506) (2013).
- [2] J.M. Martinez-Val, S. Eliezer, M. Piera, and G. Velarde. Fusion Burning Waves in Proton-Boron-11 Plasmas, *Phys. Lett. A* 216(1-5) (1996) 142–152.
- [3] D. C. Moreau. Potentiality of the Proton-Boron Fuel for Controlled Thermonuclear Fusion, *Nuclear Fusion* 17(1) (1977) 13–20.
- [4] B. Levush and S. Cuperman. On the Potentiality of the Proton-Boron Fuel for Inertially Confined Fusion, *Nuclear Fusion* 22(11) (1982) 1519–1525.
- [5] T. Kobayashi, Y. Sakurai, and M. Ishikawa. A Noninvasive Dose Estimation System for Clinical BNCT Based on PG-SPECT—Conceptual Study and Fundamental Experiments Using HPGe and CdTe Semiconductor Detectors, *Med. Phys.* 27(9) (2000) 2124–2132.
- [6] Do-Kun Yoon, Joo-Young Jung, and Tae Suk Suha. Application of Proton Boron Fusion Reaction to Radiation Therapy: A Monte Carlo simulation study, *APPLIED PHYSICS LETTERS* 105(223507) (2014).
- [7] M.J. Berger and S.M. Seltzer. ETRAN. Monte Carlo Code Sys-tem for Electron and Photon Transport Through Extended Media, ORNL Documentation for RSIC Computer Code Package CCC-107 (1973).
- [8] J.F. Breisemeister. MCNP™ –A general Monte Carlo N-particle Transport Code. Version 4C Manual LA-13709-M (2000) 1–790.
- [9] F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea, E. Acosta and J. Sempaul. PENELOPE-A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Nuclear Science Committee. Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation And Development (2001)1–248.
- [10] W.R. Nelson, H. Hirayama and DWO. Rogers. The EGS4 Code System. Rapport SLAC-265. Standard Linear Accelerator Center, (Standford, Californie) (1985) 1–206.
- [11] A. Badano and J. Sempau. MANTIS: Combined x-ray, Electron and Optical Monte Carlo Simulations of Indirect Radiation Imaging Systems, *Physics in Medicine and Biology* 51(6) (2006) 1545–1561.
- [12] A. Ferrari. Fluka: A Multi-Particle Transport Code, Geneva CERN (2005).
- [13] Geant4 User's Guide for Application Developers. V.GEANT4 6.1. Application Developers Guide (2004) 1–221.