



## محاسبه تولید رادیوایزوتوپ تشخیصی ید- $^{120}\text{g}$ از طریق واکنش $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{gI}$ با استفاده از کدهای هسته‌ای Talys و Geant4

فرزاد عیسی‌زاده و اکبر عبدی‌سرای\*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، آذربایجان غربی، ایران.

\*آذربایجان غربی، ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کدپستی: ۵۷۵۶۱۵۱۸۱۸

پست الکترونیکی: ak.abdi@urmia.ac.ir

### چکیده

رادیوایزوتوپ ید- $^{120}\text{g}$  با نیمه‌عمر ۱/۳۵ ساعت به دلیل گسیل پوزیترون در تصویربرداری PET استفاده می‌شود. در این مطالعه واکنش  $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{gI}$  با استفاده از کدهای Geant4، SRIM، Talys جهت محاسبه‌ی برد پروتون، سطح مقطع و بهره‌ی تولید ید- $^{120}\text{g}$  شبیه‌سازی شده است. مقدار برد پروتون در هدف تلوریوم- $^{120}\text{g}$  با استفاده از کدهای Geant4 و SRIM به ترتیب ۷۲۵/۵۹ و ۷۳۱/۶۸ میکرومتر در انرژی ۱۴ MeV محاسبه شد. مقادیر سطح مقطع نیز با کدهای Geant4 و Talys در بازه‌ی انرژی ۶/۵ تا ۳۶ MeV محاسبه و با مقادیر تجربی مقایسه گردید. مقدار ماکزیمم سطح مقطع با استفاده از کد Geant4 برابر ۶۶۷/۹۹ میلی‌بارن در انرژی ۱۴ MeV و با کد Talys برابر با ۵۳۷/۸۳ میلی‌بارن در انرژی ۱۴/۵ MeV به دست آورده شده است. بهره‌ی تولید ید- $^{120}\text{g}$  با استفاده از این کدها در انرژی ۱۴ MeV به ترتیب ۶۴۲/۷۳ و  $۳۴۶/۹۴ \text{ MBq}\mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$  محاسبه شده است.

کلیدواژگان: ید- $^{120}\text{g}$ ، شتاب‌دهنده، سطح مقطع، بهره‌ی تولید، کد مونت کارلوی Geant4.

### ۱. مقدمه

برم-۷۵، سلنیم-۷۳، پتاسیم-۳۸ و غیره از جمله رادیوایزوتوپ‌هایی هستند که توسط شتاب‌دهنده‌های ذرات تولید می‌شوند. رادیوایزوتوپ ید- $^{120}\text{g}$  با نیمه‌ی عمر ۱۳/۲ ساعت در تصویربرداری  $^1\text{SPECT}$  کاربرد دارد [۱]. امروزه از رادیوایزوتوپ ید- $^{120}\text{g}$  با نیمه‌عمر ۱/۳۵ ساعت که با گسیل پوزیترون با انرژی ۴ MeV و اپاشی می‌کند، جهت استفاده‌ی

رادیوایزوتوپ‌های کاربردی در پزشکی هسته‌ای به‌وسیله شتاب‌دهنده‌های ذرات، راکتورهای هسته‌ای و ژنراتورها جهت استفاده در تصویربرداری، تشخیص و درمان تولید می‌شوند. رادیوایزوتوپ‌هایی که توسط شتاب‌دهنده‌ها تولید می‌شوند، نسبت به دیگر رادیوایزوتوپ‌ها دارای بهره‌ی تولید بالاتری می‌باشند. ید- $^{120}\text{g}$ ، ید- $^{123}\text{g}$ ، ژرمانیم-۶۸، کلر- $^{34}\text{m}$

<sup>1</sup> Single Photon Emission Computed Tomography

مونت کارلوی Geant4 محاسبه شدند. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی مقایسه گردید. هم‌چنین برای محاسبه‌ی برد پروتون در هدف تلوریوم-۱۲۰ از کدهای SRIM و Geant4 استفاده شده است. در کد Talys از چهار روش متفاوت پتانسیل مدل اپتیکی کروی<sup>۲</sup> (OMPs)، مدل ترکیبی گیلبرت-کامرون<sup>۳</sup> (CGCM)، مدل گاز فرمی جابه‌جا شده<sup>۴</sup> (BSFGM) و مدل ابرشاره‌ی تعمیم‌یافته<sup>۵</sup> (GSM) استفاده شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

کد SRIM یک کد کامپیوتری می‌باشد که از روش مونت کارلوی برای محاسبات برد و توان توقف یون‌ها در مواد مختلف استفاده می‌کند. این کد، محاسبات خود را براساس رفتار مکانیک کوانتومی برخورد یون-اتم انجام می‌دهد [۸، ۹]. در قسمت ورودی برنامه، نوع ایزوتوپ و ماده‌ی هدف و هم‌چنین یون موردنظر تعریف می‌شود و در قسمت خروجی مقدار نفوذ یون در ماده‌ی هدف به‌ازای انرژی‌های مختلف یون به‌دست می‌آید. کد هسته‌ای Talys که به زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است، واکنش‌هایی را بررسی می‌نماید که ذرات پرتودهی شده در واکنش شامل پروتون، نوترون، آلفا، دوترون، تریتون،  $^3\text{He}$  و هم‌چنین فوتون با انرژی بین  $0.1\text{ KeV}$  و  $200\text{ MeV}$  باشند [۱۰، ۱۱]. در این کد می‌توان از مدل‌های میکروسکوپی و پدیده شناختی مختلفی جهت محاسبات سطح مقطع، بهره‌ی تولید، پراکندگی زاویه‌ای، طیف انرژی و ... برای ایزوتوپ‌های مختلف [۱۲، ۱۳] چه در حالت ایزومری [۱۴] و چه در حالت غیرایزومری استفاده کرد. در این مطالعه از دو روش پتانسیل مدل اپتیکی کروی و مدل چگالی تراز برای محاسبه‌ی سطح مقطع تولید  $120\text{g-I}$  از طریق واکنش  $^{120}\text{Te(p,n)}$  استفاده می‌شود.

تشخیصی و تصویربرداری با کیفیت بهتر در PET<sup>۱</sup> استفاده می‌شود [۲، ۳]. PET یک روش تصویربرداری سه‌بعدی می‌باشد که از واپاشی پوزیترون جهت تصویربرداری استفاده می‌کند [۴]. رادیوایزوتوپ‌های دیگری مثل ژرمانیم-۶۸ با نیمه‌عمر ۲۷۱ روز، آرسنیک-۷۲ با نیمه‌عمر ۲۶ ساعت، آهن-۵۲ با نیمه‌عمر ۸/۳ ساعت، ایتریوم-۸۶ با نیمه‌عمر ۱۴/۷ و غیره نیز برای استفاده در PET وجود دارند اما  $120\text{g-I}$  در مقایسه با آن‌ها دارای نیمه‌عمر مطلوب‌تر می‌باشد و بهره‌ی تولید آن از طریق واکنش  $^{120}\text{Te(p,n)}$  بالا است. ایزوتوپ‌های دیگری از ید وجود دارند که می‌توان جهت استفاده در PET آن‌ها را به‌کار برد. برای مثال رادیوایزوتوپ ید-۱۲۴ با نیمه‌عمر ۴/۱۵ روز که از طریق واکنش‌های  $^{124}\text{Te(p,n)}$  و  $^{124}\text{Te(d,2n)}$  تولید می‌شود [۳، ۵] و یا رادیوایزوتوپ ید-۱۲۲ با نیمه‌عمر ۳/۶ دقیقه که در سیستم ژنراتوری  $^{122}\text{Xe} \rightarrow (\text{EC}, 20.1\text{ h}) \rightarrow ^{122}\text{I}$  تولید می‌شود، اشاره نمود [۶]. در سال ۱۹۹۶ آقای Zweit و همکارانش مطالعاتی بر روی حالت‌های ایزومری و پایه‌ی ید-۱۲۰  $^{120\text{m,gI}}$  انجام دادند [۷]. واکنش‌های مختلفی جهت تولید رادیوایزوتوپ  $^{120}\text{gI}$  وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به واکنش‌های  $^{120}\text{Te(p,n)}$ ،  $^{120}\text{Te(p,2n)}$  و  $^{127}\text{I(p,8n)}$  اشاره نمود. تولید  $^{120}\text{gI}$  از طریق واکنش‌های  $^{120}\text{Te(p,n)}$  و  $^{122}\text{Te(p,2n)}$  در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط آقای Hohn و همکارانش در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲، ۳]. این واکنش‌ها در یک شتاب‌دهنده‌ی ذرات با پرتودهی هدف تلوریوم توسط پروتون‌ها انجام می‌گیرد. در این مطالعه سطح مقطع و بهره‌ی تولید واکنش  $^{120}\text{Te(p,n)}$  توسط کد Talys و روش

<sup>4</sup> Back-Shifted Fermi Gas Model

<sup>5</sup> Generalized Superfluid Model

<sup>1</sup> Positron Emission Tomography

<sup>2</sup> Spherical Optical Model Potential

<sup>3</sup> Composite Gilbert Cameron Model

## پتانسیل مدل اپتیکی کروی (OMPs)

از جمله پرکاربردترین و بنیادی‌ترین مدل‌های هسته‌ای برای مطالعه‌ی واکنش‌های هسته‌ای، مدل اپتیکی می‌باشد. در این مدل هسته مانند یک توپ کریستالی در نظر گرفته می‌شود و وقتی که نور به توپ کریستالی می‌تابد، قسمتی از آن جذب هسته شده و قسمتی دیگر از راه پراکندگی‌های کشسان و غیرکشسان و انعکاس، پراکنده خواهد شد. پراکندگی‌ها به صورت پتانسیل مختلط  $U(r)$  از راه رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$U(r) = V(r) + iW(r) \quad (1)$$

که در این رابطه، تابع  $V(r)$  حقیقی بوده و برای بررسی پراکندگی کشسان و برهم‌کنش‌های بین ذرات و هدف، پاسخگو می‌باشد و  $W(r)$  که موهومی است قسمت مربوط به جذب را پیش‌بینی می‌کند [۱۱].

مدل چگالی تراز<sup>۱</sup> (LDM)

یکی از کمیت‌های بسیار مهم که برای بررسی آماری هسته استفاده می‌شود، کمیت چگالی تراز می‌باشد که می‌توان با استفاده از آن سایر کمیت‌های ترمودینامیکی مربوط به هسته را بررسی کرد. این کمیت برای محاسبات سطح مقطع نیز نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. در حالت کلی، چگالی کل حالت‌ها برای اسپین مشخص  $J$  و پارته‌ی مشخص  $\pi$  و تعداد ترازها بر انرژی برحسب  $\text{MeV}$  در محدوده‌ی انرژی برانگیختگی  $E_x$ ، از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$\rho^{tot}(E_x) = \sum_J \sum_{\pi} \rho(E_x, J, \pi) \quad (2)$$

مدل چگالی تراز از مدل‌های میکروسکوپی دقیق‌تری برای محاسبات سطح مقطع استفاده می‌کند که برای هر کدام از آن‌ها رابطه‌ی ۲ با شکلی متفاوت تعریف می‌شود. در این مطالعه از سه مدل میکروسکوپی ترکیبی گیلبرت-کامرون، مدل

میکروسکوپی گاز فرمی جابه‌جا شده و مدل میکروسکوپی

ابرشاره‌ی تعمیم‌یافته استفاده می‌شود [۱۱].

## مدل ترکیبی گیلبرت-کامرون (CGCM):

مقدار چگالی حالت‌ها بر واحد انرژی در یک دمای ثابت که توسط آقایان گیلبرت و کامرون اندازه‌گیری شده است، از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\rho_{CGC}^{tot}(E_x) = \frac{1}{T} \times \exp\left(\frac{E_x - E_0}{T}\right) \quad (3)$$

که در این رابطه  $T$  دمای هسته،  $E_x$  انرژی برانگیختگی انطباق و  $E_0$  حداقل انرژی برانگیختگی می‌باشند [۱۱].

## مدل گاز فرمی جابه‌جا شده (BSFGM):

در این مدل، هسته به‌عنوان یک گاز فرمیونی غیربرهم‌کنش در نظر گرفته خواهد شد. چگالی حالت‌ها برای این مدل از راه رابطه‌ی ۴ قابل محاسبه می‌باشد:

$$\rho_F^{tot}(E_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \times \frac{\sqrt{\pi}}{12} \times \frac{\exp(2\sqrt{aU})}{a^{\frac{1}{4}} \times U^{\frac{5}{4}}} \quad (4)$$

در این رابطه،  $a$  پارامتر چگالی تراز،  $U$  انرژی برانگیختگی مؤثر و  $E_x$  انرژی انطباق می‌باشند. مقدار  $U$  از راه رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$U = E_x - \Delta^{BSFG} \quad (5)$$

در این رابطه،  $\Delta$  پارامتر تغییر انرژی به انرژی جفت‌شدگی است [۱۱].

## مدل ابرشاره‌ی تعمیم‌یافته (GSM):

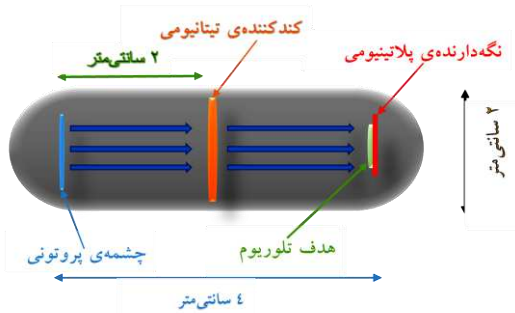
در این مدل، یک گذار فاز از حالت ابرشارگی در انرژی پایین به ناحیه‌ی انرژی بالا اتفاق خواهد افتاد. رابطه‌ی چگالی حالت‌ها برای این مدل به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$\rho_{GS}^{tot}(E_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \times \frac{e^S}{\sqrt{D}} \quad (6)$$

که در این رابطه،  $S$  آنتروپی،  $D$  دترمینان و  $\sigma$  پارامتر قطع اسپین می‌باشند.

<sup>1</sup> Level Density Model

از هدف قرار داده شده است. فیزیک مورد استفاده در این مطالعه، فرآیندها و مدل‌های هادرونی نظیر G4HadronElasticPhysicsHP, G4HadronPhysicsFT FP\_BRT\_HP, G4HadronPhysicsQGSP\_BIC\_HP می‌باشند.



شکل (۱): هندسه‌ی هدف و چشمه‌ی شبیه‌سازی شده (ذرات شتاب گرفته به سمت هدف) با کد Geant4.

یکی از ویژگی‌های بسیار مهم و کاربردی کد Geant4 این است که می‌تواند تعداد رخدادهایی را که منجر به واکنش مورد نظر می‌شوند، محاسبه کند. در این مطالعه از این ویژگی کد Geant4 برای انجام محاسبات سطح مقطع و بهره‌ی تولید استفاده می‌شود. مقدار فعالیت به‌ازای هر انرژی پروتون فرودی در پایان پرتودهی برحسب میلی‌کوری با استفاده از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$N(t) = \frac{N_{i,second}}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (8)$$

در این رابطه  $N_{i,second}$ ، تعداد ایزوتوپ‌های مدنظر تولید شده بر مدت زمان پرتودهی،  $\lambda_i$  ثابت واپاشی رادیوایزوتوپ تولید شده (بر ثانیه) و  $t$  مدت زمان پرتودهی برحسب ثانیه می‌باشد.

مقدار  $N_{i,second}$  را می‌توان از طریق رابطه‌ی ۹ محاسبه کرد [۱۸]:

$$N_{i,second} = \frac{N_{i,run}}{t_{event} \times n_{event}} \quad (9)$$

که در این رابطه،  $N_{i,run}$  تعداد ایزوتوپ‌های تولید شده در فرآیند پرتودهی،  $n_{event}$  تعداد کل رخدادها و  $t_{event}$  زمان پرتودهی به‌ازای هر رخداد می‌باشد. با تقسیم نتیجه‌ی حاصل

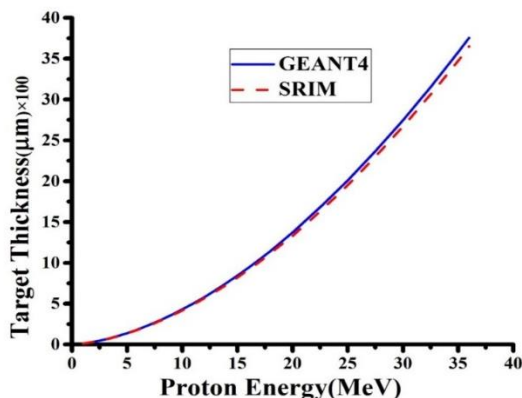
در تمامی این مدل‌ها، پارامتر  $a$  از طریق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$a(E_x) = a \times \left( 1 + \delta w \times \frac{1 - e^{-\gamma U}}{U} \right) \quad (7)$$

که در این رابطه،  $\tilde{a}$  مقدار تخمینی پارامتر  $a$ ،  $\delta w$  تصحیح انرژی پوسته و  $\gamma$  پارامتر تعدیل هستند [۱۱].

در این مطالعه از کد مونت‌کارلوی Geant4.10.6 برای شبیه‌سازی واکنش  $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{I}$  استفاده شده است. کد Geant4 یک کد هسته‌ای می‌باشد که از روش مونت‌کارلو برای انجام محاسبات استفاده می‌کند. این کد براساس زبان برنامه‌نویسی C++ پایه‌ریزی شده است [۱۵]. کد Geant4 در زمینه‌های مختلف علمی نظیر فیزیک پزشکی، شتاب‌دهنده‌ها، حفاظ نوترونی و ... به‌کار برده می‌شود [۱۶]. از ویژگی‌های مثبت این کد می‌توان به انتخاب دقیق ابعاد و هندسه‌ی هدف و چشمه، بازه‌ی انرژی چشمه، فیزیک مناسب استفاده شده و ... اشاره نمود. این کد فرآیندهایی مثل واپاشی، الکترومغناطیسی، هادرونی، اپتیکی و ... را می‌تواند مورد بررسی قرار دهد [۱۷]. وقتی ذرات به‌طرف هدف پرتاب می‌شوند در خروجی تمامی ایزوتوپ‌ها و نوکلیدهای تولیدشده و همچنین واکنش‌های رخ داده، به‌صورت جداگانه نمایش داده خواهند شد.

در این مطالعه هندسه و چشمه‌ی موردنظر از طریق کد Geant4 با توجه به شکل ۱ شبیه‌سازی شده است. با توجه به این شکل، پروتون‌ها با انرژی بین ۶/۵ MeV تا ۳۶ MeV به‌سمت هدف تلوریوم-۱۲۰ با درصد فراوانی ایزوتوپی ۹۹/۶٪ که توسط نگهدارنده‌ی پلاتینیومی نگه داشته شده، در یک شتاب‌دهنده‌ی سیکلوترون، شتاب داده می‌شوند. چشمه‌ی پروتونی به‌صورت باریکه‌ای با شعاع ۱/۵ میلی‌متر در فاصله‌ی ۴ سانتی‌متری از هدف تعریف شده است و به‌صورت همسانگرد در راستای محور Z با زاویه‌ی تقریباً صفر به‌طرف هدف پرتاب می‌شود. تعداد پروتون‌ها ۱۰<sup>۶</sup> درنظر گرفته شده است [۲۳]. یک قرص کندکننده‌ی تیتانیومی نیز بین هدف و چشمه به فاصله‌ی ۲ سانتی‌متری



شکل (۲): تغییرات برد پروتون در هدف تلوریوم-۱۲۰.

### مقادیر سطح مقطع:

سطح مقطع واکنش  $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{gI}$  در بازه انرژی پروتونی ۶/۵ MeV تا ۳۶ MeV با استفاده از کد Talys از طریق چهار مدل متفاوت و همچنین با استفاده از کد مونت کارلوی Geant4 محاسبه شد.

شکل ۳ مقادیر سطح مقطع تولید  $^{120}\text{gI}$  با استفاده از مدل‌های CGCM، BSFGM، GSM و OMPs را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تولید ید-۱۲۰g در هدف تلوریوم-۱۲۰ از انرژی ۶/۵ MeV شروع شده و تا انرژی ۱۴ MeV افزایش می‌یابد. پس از این انرژی، تولید ید-۱۲۰g به تدریج رو به کاهش خواهد بود.

درواقع در بازه انرژی ۶/۵-۱۴ MeV کمترین آلودگی‌های ایزوتوپی و غیرایزوتوپی برای ید-۱۲۰g در هدف تلوریوم-۱۲۰ اتفاق می‌افتد. بنابراین بازه بهینه انرژی برای این واکنش ۶/۵-۱۴ MeV انتخاب می‌شود. بیشترین مقدار سطح مقطع مربوط به انرژی ۱۴ MeV است که مقدار آن با استفاده از مدل CGCM برابر ۶۶۷/۹۹ میلی‌بارن محاسبه شده است.

از رابطه‌ی ۸ بر مدت زمان پرتودهی و جریان باریکه‌ی ذرات، مقدار بهره‌ی تولید قابل محاسبه خواهد بود.

در کد Talys نیز امکان محاسبه‌ی بهره‌ی تولید وجود دارد که با اضافه کردن دستور production y در فایل ورودی برنامه و همچنین در اختیار داشتن مدت زمان پرتودهی، مقدار انرژی ورودی باریکه، مقدار انرژی خروجی باریکه و جریان باریکه، مقدار بهره‌ی تولید برحسب واحد دلخواه در فایل خروجی برنامه داده خواهد شد. این محاسبات در کد Talys از رابطه‌ی ۱۰ پیروی می‌کنند:

$$Y = \frac{N_A a_{is} a_{ch} I}{M} \int_{E_{out}}^{E_{in}} \frac{\sigma(E)}{S_p(E)} (1 - e^{-\lambda t}) dE \quad (10)$$

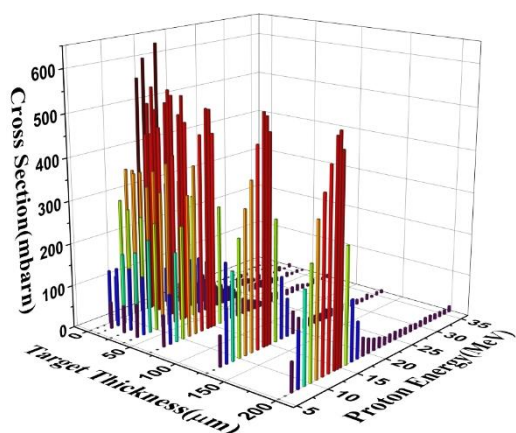
در این رابطه  $Y$ ،  $N_A$ ،  $a_{is}$ ،  $a_{ch}$ ،  $I$ ،  $M$ ،  $E_{in}$ ،  $E_{out}$ ،  $\sigma(E)$ ،  $S_p(E)$  و  $\lambda$  به ترتیب بهره‌ی تولید برحسب Bq، عدد آوگادرو، فراوانی ایزوتوپ هسته‌ی هدف، فراوانی شیمیایی عنصر هدف، جریان باریکه‌ی پروتون، جرم مولی ماده‌ی هدف، انرژی ورودی باریکه، انرژی خروجی باریکه، سطح مقطع در انرژی  $E$ ، توان توقف ماده‌ی هدف، ثابت واپاشی محصول پرتوزا و مدت زمان پرتودهی می‌باشند.

### ۳. نتایج

#### تغییرات برد پروتون در هدف تلوریوم-۱۲۰:

در این مطالعه از کدهای Geant4 و SRIM برای محاسبه‌ی برد پروتون در هدف تلوریوم-۱۲۰ استفاده شده است. مقادیر به‌دست آمده برحسب انرژی‌های مختلف پروتون‌های فرودی در شکل ۲ نشان داده شده است. برای مثال، ضخامت مناسب از هدف تلوریوم-۱۲۰ برای متوقف کردن پروتون‌های با انرژی ۱۴ MeV، با استفاده از کد Geant4 و SRIM به ترتیب برابر ۷۲۵/۵۹ و ۷۳۱/۶۸ میکرومتر محاسبه شده است.

سطح مقطع واکنش  $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{gI}$  با استفاده از کد Geant4 در ضخامت‌های مختلف از هدف تلوریوم-۱۲۰ به‌ازای انرژی‌های مختلف پروتون‌های فرودی محاسبه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. در واقع مقادیر سطح مقطع در ضخامت‌های مختلف هدف تغییرات چشم‌گیری نداشته است، به‌جز ضخامت ۱ میکرومتر که به‌دلیل این‌که ضخامتی بسیار نازک می‌باشد، مقدار سطح مقطع دارای خطای بیشتری نسبت به سایر ضخامت‌ها است.

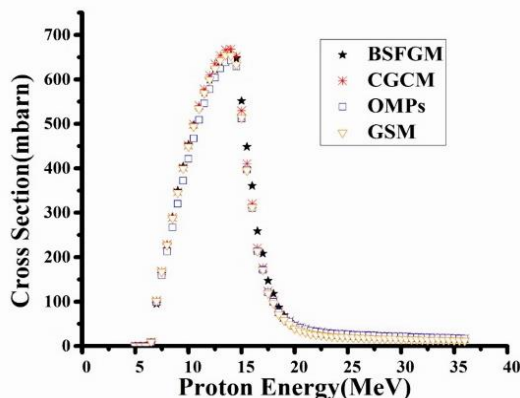


شکل (۵): مقادیر سطح مقطع تولید بد- $^{120}\text{g}$  در ضخامت‌های مختلف از هدف تلوریوم-۱۲۰ به‌ازای انرژی‌های مختلف از پروتون.

#### مقادیر بهره‌ی تولید:

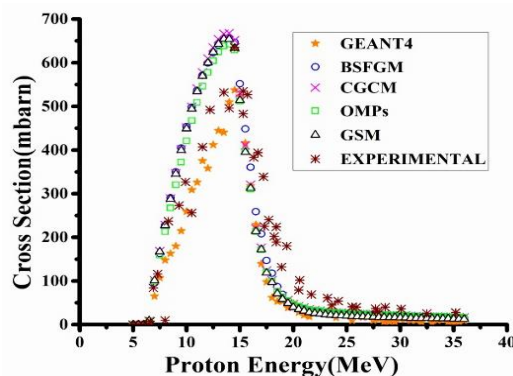
برای محاسبه‌ی بهره‌ی تولید بد- $^{120}\text{g}$ ، هدف تلوریوم-۱۲۰ به‌مدت یک ساعت توسط باریکه‌ای از پروتون‌ها با جریان ۱ میکروآمپر پرتودهی شده است [۲۳]. مقادیر بهره‌ی تولید به‌ازای انرژی‌های مختلف پروتون و در هدف ضخیم<sup>۱</sup> از تلوریوم-۱۲۰ توسط کدهای Talys و Geant4 در شکل ۶ نشان داده و با مقادیر تجربی [۲] مقایسه شده‌اند.

هدف ضخیم هدفی است که وقتی پروتون به آن برخورد کند، کل انرژی خود را از دست داده و در هدف متوقف خواهد شد. در انرژی ۱۴ MeV مقدار بهره‌ی تولید بد- $^{120}\text{g}$  در هدف ضخیم تلوریوم-۱۲۰ از طریق کدهای Talys و



شکل (۳): مقادیر سطح مقطع حاصل از کد Talys با چهار مدل متفاوت.

در شکل ۴، مقادیر سطح مقطع تولید بد- $^{120}\text{g}$  از طریق واکنش  $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{gI}$  با استفاده از کد Geant4 با مقادیر حاصل از چهار مدل کد Talys و همچنین مقادیر تجربی [۲] مقایسه شده است. مطابق این شکل، توافق بسیار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های تجربی وجود دارد. بیشترین مقدار سطح مقطع محاسبه شده با استفاده از کد Geant4 در انرژی ۱۴/۵ MeV است که مقدار آن برابر  $537/83$  میلی‌بارن می‌باشد. این مقدار در مقایسه با مقادیر حاصل از چهار مدل کد Talys و داده‌های تجربی دارای توافق خوبی می‌باشد. مقدار تجربی سطح مقطع در انرژی ۱۴/۵ MeV،  $635$  میلی‌بارن می‌باشد که دارای اختلاف در حدود ۱۵٪ با مقدار شبیه‌سازی حاصل از کد Geant4 و در حدود ۵٪ با مقدار حاصل از شبیه‌سازی کد Talys می‌باشد.

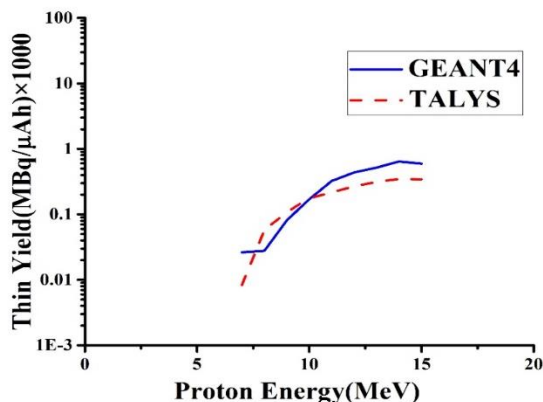


شکل (۴): مقایسه‌ی مقادیر سطح مقطع شبیه‌سازی شده به‌وسیله‌ی کدهای Talys و Geant4 با مقادیر تجربی.

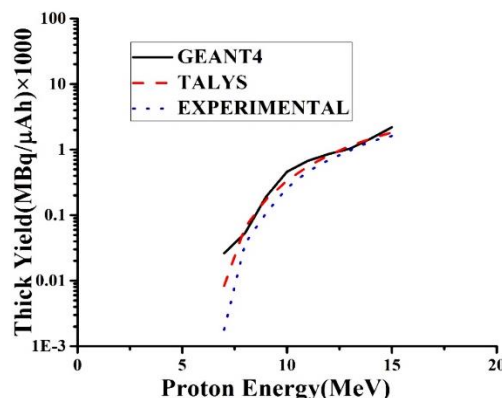
<sup>۱</sup> Thick Target

Geant4 به ترتیب برابر با  $1483/51$  و  $1475/38 \text{ MBq}\mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$

محاسبه شده است.



شکل (۷): مقادیر بهره‌ی تولید ید- $^{120}\text{g}$  در هدف نازک تلوریوم- $^{120}$  حاصل از کدهای Geant4 و Talys.



شکل (۶): مقایسه‌ی مقادیر بهره‌ی تولید شبیه‌سازی شده با استفاده از کدهای Geant4 و Talys برای ید- $^{120}\text{g}$  در هدف ضخیم تلوریوم- $^{120}$  با مقادیر تجربی.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تولید ید- $^{120}\text{g}$  از طریق واکنش  $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{gI}$  با استفاده از کدهای SRIM، Geant4 و Talys شبیه‌سازی شد. بیشترین مقدار سطح مقطع محاسبه شده توسط کد Geant4 برای تولید ید- $^{120}\text{g}$  از طریق واکنش  $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{gI}$  در انرژی  $14/5 \text{ MeV}$ ، برابر  $537/83$  میلی‌بارن محاسبه شد. برای هدف ضخیم تلوریوم- $^{120}$ ، در انرژی  $14 \text{ MeV}$ ، مقدار بازده تولید محاسبه‌شده توسط کدهای Geant4 و Talys به ترتیب برابر با  $1475/38 \text{ MBq}\mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$  و  $1483/51$  می‌باشند و این مقادیر به مقدار تجربی آن  $1341/19 \text{ MBq}\mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$  بسیار نزدیک هستند.

اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده تجربی در حدود ۹ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از طریق کدهای Geant4 و Talys و همچنین داده‌های تجربی، بهره‌ی تولید ید- $^{120}\text{g}$  از طریق واکنش  $^{120}\text{Te}(p,n)^{120}\text{gI}$  زیاد است، بنابراین هدف تلوریوم- $^{120}$ ، هدف مناسبی برای تولید این رادیوایزوتوپ کاربردی در پزشکی هسته‌ای می‌باشد. در کشور ما نیز امکان تولید چنین رادیوایزوتوپ‌هایی وجود دارد

همچنین در این مطالعه بهره‌ی تولید در ضخامت نازک<sup>۱</sup> (Thin) از هدف تلوریوم- $^{120}$  با استفاده از این دو کد محاسبه شد. ضخامت نازک، ضخامت‌هایی از هدف است که پروتون پس از برخورد با آن  $1 \text{ MeV}$  از انرژی خود را از دست داده و از هدف خارج خواهد شد.

این مقادیر در شکل ۷ نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مطابق شکل ۷، توافق بسیار خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده حاصل از این دو کد وجود دارد. مقدار بهره‌ی تولید ید- $^{120}\text{g}$  در هدف نازک تلوریوم- $^{120}$  در انرژی  $14 \text{ MeV}$  با استفاده از کد Talys،  $3467/94 \text{ MBq}\mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$  و با استفاده از کد Geant4،  $642/73 \text{ MBq}\mu\text{A}^{-1}\text{h}^{-1}$  به دست آمده است.

این دو مقدار تفاوتی در حدود ۴۵٪ دارند که نسبتاً زیاد می‌باشد که به دلیل ضخامت بسیار کوچک (در حد چند دهم میکرومتر) هدف است و این اختلاف در تعداد نقاط محدودی از شکل ۷ قابل مشاهده است و در سایر نقاط توافق بسیار خوبی با همدیگر دارند.

<sup>۱</sup> Thin Thickness

کمترین آلودگی ایزوتوپی و غیرایزوتوپی می‌باشند، مقادیر بهره‌ی تولید در هدف ضخیم و نازک تلوریوم-۱۲۰ محاسبه شد. مقایسه‌ی بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که توافق بسیار خوبی بین این مقادیر وجود دارد. بنابراین کدهای SRIM، Geant4 و Talys ابزارهای مناسبی برای شبیه‌سازی واکنش‌های هسته‌ای قبل از تولید رادیوایزوتوپ‌هایی مثل  $^{120}\text{g}$  می‌باشند.

که می‌توان به تولید رادیوداروها در مرکز پرتودهی SSDL کرج اشاره نمود. کد Geant4 به دلیل این که امکان انجام محاسبات بیشتر و هم‌چنین تعریف دقیق هندسه هدف را به کاربر می‌دهد، نسبت به دو کد Talys و SRIM کارایی بیشتری دارد. هم‌چنین کد SRIM نسبت به کد Talys در انجام محاسبات محدودتر است. با انتخاب انرژی بهینه در بازه‌ی  $14-16\text{ MeV}$  که دارای بیشترین سطح مقطع و

## ۵. مراجع

- [1] M. Laruelle, R.M. Baldwin, R.T. Mlison, Y. Zea-Ponce, S.S. Zoghbi, M.S. Al-Tikeriti, E.H. Sybirska, R.C. Zimmermann, G. Wisniewski, J.L. Neumeyer. SPECT imaging of dopamine and serotonin transporters with [ $^{123}\text{I}$ ] P-CIT: Pharmacological characterization of brain uptake in nonhuman primates, SYNAPSE, 13 (4) (1993) 295-309.
- [2] A. Hohn, H.H. Coenen, S.M. Qaim. Nuclear data relevant to the production of  $^{120}\text{gI}$  via the  $^{120}\text{Te}$  (p,n)-process at a small-sized cyclotron, Appl Radiat Isot, 49 (12) (1997) 1493-1496.
- [3] A. Hohn, B. Scholten, H.H. Coenen, S.M. Qaim. Excitation functions of (p,xn) reactions on highly enriched  $^{122}\text{Te}$ : Relevant to the production of  $^{120}\text{gI}$ , Appl Radiat Isot, 49 (1-2) (1998) 93-98.
- [4] B. Smith. Nuclear Pharmacy. London, Pharmaceutical Press, (2010).
- [5] W. Jentzen, L. Freudenberg, E.G. Eising, W. Sonnenschein, J. Knust, A. Bockisch. Optimized  $^{124}\text{I}$  PET dosimetry protocol for radioiodine therapy of differentiated thyroid cancer, J Nucl Med, 49 (6) (2008) 1017-1023.
- [6] P. Richards, T.H. Ku. The  $^{122}\text{Xe}$   $^{122}\text{I}$  system: A generator for the 3.62-min positron emitter,  $^{122}\text{I}$ . J Appl Radiat Isotopes, 30 (1979) 250-252.
- [7] J. Zweit, M. Flower, A. Brown, P. Carnochan, S. Luthra, F. Brady, V. Pike, G. Vaidyanathan, M. Zalutsky, R. Ott, T. Jones. Iodine-120-mIBG: Production and nca labelling of a new PET radiotracer, J Nucl Med, 37 (5) (1996) 874.
- [8] J. Ziegler, J.P. Biersack. The stopping and range of ions in matter. NewYork, Treatise on heavy-ion science, (1985).
- [9] J. Ziegler, H. Andersen. Helium stopping powers and ranges in all element. NewYork, Pergamon, (1977).
- [10] Z. Karimi, M. Sadeghi, A. Ezati. Modeling and experimental production yield of  $^{64}\text{Cu}$  with  $^{nat}\text{Cu}$  and  $^{nat}\text{Cu}$ -NPs in Tehran research reactor, Nucl Eng Technol, 51 (1) (2019) 269-274.
- [11] A. Konig, S. Hilaire, Goriely S. TALYS1.95, A nuclear reaction program User manual. Netherlands, NRG, (2019).
- [12] M. Eslami, T. Kakavand, M. Mirzaii, S. Rajabifar. Prediction of production of  $^{22}\text{Na}$  in a gas-cell target irradiated by protons using Monte Carlo tracking, Nucl Instrum Methods Phys Res B, 342 (2014) 244-248.
- [13] M. Eslami, T. Kakavand. Simulation of the direct production of  $^{99m}\text{Tc}$  at a small cyclotron, Nucl Instrum Methods Phys Res B, 329 (2014) 18-21.
- [14] T. Kakavand, M. Mirzaii, M. Eslami, A. Karimi. Nuclear model calculation and targetry recipe for production of  $^{110m}\text{In}$ , Appl Radiat Isot, 104 (2015) 60-66.
- [15] J. Apostolakis, M. Asai, A.G. Bogdanov, H. Burkhardt, G. Cosmo, S. Elles, G. Folger, V.M. Grichine, A. Heikkinen, I. Hirvnacova, V.N. Ivanchenko, J. Jacquemier, T. Koi, R.P. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, I. McLaren, O. Link, M. Maire, W. Pokorski, T. Sasaki, N. Starkov, L. Urban, D.H. Wright. Geometry and physics of the Geant4 toolkit for high and medium energy applications, Radiat Phys Chem, 78 (10) (2009) 859-873.
- [16] M. Rostampour, M. Sadeghi, MR. Aboudzadeh, S. Hamidi, SF. Hosseini. Validation of GEANT4 Simulations for  $^{62,63}\text{Zn}$  Yield Estimation in Proton Induced Reactions of Natural Copper, Nucl Instrum Methods Phys Res B, 394 (2017) 141-144.
- [17] G.A.P. Cirrone, G. Cuttone, F. Dirose, L. Pandola, F. Romano, Q. Zhang. Validation of the Geant4 electromagnetic photon cross-section for elements and compounds, Nucl Instrum Methods Phys Res A, 618 (1-3) (2010) 315-322.
- [18] F. Poignant, S. Penfold, J. Asp, P. Takhar, Jackson P. GEANT4 simulation of cyclotron radioisotope production in a solid target, Med Phys, 32 (5) (2016) 728-734.