



طراحی هدف و امکان‌سنجی تولید ^{123}I از طریق واکنش $^{124}\text{Xe}(p, x)^{123}\text{I}$

محمد اسلامی^۱، طیب کاکاوند^۲، محمد میرزایی^{۳*}

۱. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه زنجان، صندوق پستی: ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، زنجان - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، صندوق پستی: ۵۵۹۹-۳۴۱۴۹، قزوین - ایران

۳. پژوهشکده‌ی کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج - ایران

چکیده: ^{123}I با نیم-عمر ۱۳٫۲ ساعت در مطالعه‌های پزشکی هسته‌ای تشخیصی با استفاده از روش مقطع‌نگاری کامپیوتری تک فوتونی از اهمیت فراوانی برخوردار است. در حال حاضر، ^{123}I اغلب از بمباران پروتونی گاز ^{124}Xe غنی شده و پس از طی زنجیره‌ی واپاشی $^{123}\text{I} \rightarrow ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{Cs}$ تولید می‌شود. دست‌یابی به ^{123}I با خلوص و فعالیت بالا مستلزم مشخصه‌یابی و بهینه‌سازی شرایط تولید از جمله هندسه‌ی محفظه‌ی گازی هدف و بازه‌ی مناسب انرژی ذره‌ی تابشی است. در این راستا، تابع‌های تحریک واکنش‌های $^{124}\text{Xe}(p, 2n)^{123}\text{Cs}$ ، $^{124}\text{Xe}(p, pn)^{123}\text{Xe}$ و $^{124}\text{Xe}(p, 2p)^{123}\text{I}$ با استفاده از پنج مدل هسته‌ای مختلف محاسبه و با نتایج تجربی دیگران مقایسه شد. از روی تابع‌های تحریک به دست آمده، بازه‌ی انرژی مناسب تولید انتخاب شد. از ترابرد پرتوهای فرودی در داخل هدف که با استفاده از روش مونت کارلو و دو کد محاسباتی SRIM و MCNPX انجام شد، توزیع این پروتون‌ها در درون گاز هدف به دست آمده و هدف به شکل مخروط ناقص طراحی شد. در ادامه، با استفاده از کد MCNPX بهره‌ی تولید ^{123}I تخمین زده شد. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج نظری و تجربی دیگران توافق خوبی را نشان داد.

کلیدواژه‌ها: بد-۱۲۳، گاز ^{124}Xe ، طراحی هدف، کد MCNPX

Target design and feasibility study of the production of ^{123}I radioisotope via $^{124}\text{Xe}(p, x)^{123}\text{I}$ reaction

M. Eslami¹, T. KaKavand², M. Mirzaii^{3*}

1. Department of Physics, Faculty of Science, Zanjan University, P.O.Box: 45371-38791, Zanjan - Iran

2. Department of Physics, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, P.O.Box: 34149-5599, Qazvin - Iran

3. Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 31485-498, Karaj - Iran

Abstract: The radioisotope of ^{123}I (13.2 h) is widely used in nuclear medicine diagnosis studies using single photon emission computed tomography (SPECT). At present, it is mostly produced by proton irradiation of highly enriched ^{124}Xe in a gas target and based on the decay chain of $^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$. Achievement of high purity and high activity of ^{123}I requires the characterization and the optimization of production conditions such as geometry of gas chamber and optimum range of the projectile particle energy. In this research work, for achieving the maximum purity and high activity, the excitation functions of $^{124}\text{Xe}(p, 2n)^{123}\text{Cs}$ ، $^{124}\text{Xe}(p, pn)^{123}\text{Xe}$ and $^{124}\text{Xe}(p, 2p)^{123}\text{I}$ reactions were calculated using five different nuclear models. The theoretical results were compared with the experimental observations. By using the excitation functions, the optimum range of the production was selected. The Monte Carlo method indicated the beam transport situation in the target body and energy distribution of protons in the gas. For this purpose the calculations were carried out by using MCNPX and SRIM codes. Then, the target geometry was designed as a Frustum-shaped. Finally, by means of the MCNPX code, the ^{123}I production yield was estimated. Good agreement between the simulated results and the theoretical yields, as well as the experimental yields was observed.

Keywords: ^{123}I , ^{124}Xe gas, Target design, MCNPX code

*email: mmirzaii@nrcam.org

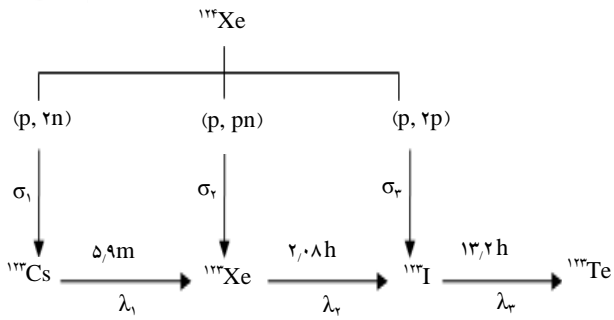
تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۷/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱/۱۰



۱. مقدمه

ید- ^{133}I با توجه به خواص رادیوفیزیکی اش از جمله نیم-عمر $13/2$ ساعتی و واپاشی صددرصدی از طریق گیراندازی الکترون و گسیل گاما با انرژی 159 keV و با نسبت انشعاب 83% [۱] نقش مهمی در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای به روش مقطع‌نگاری کامپیوتری تک فوتونی^(۱) دارد. عمر ماندگاری^(۲) طولانی و هزینه‌ی تمام شده‌ی کم در مقایسه با رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده در تصویربرداری مقطع‌نگاری نشری پوزیترون^(۳) و انعطاف‌پذیری آن در نشان‌دار کردن در فرایندهای داروسازی موجب محبوبیت این رادیوایزوتوپ در جهان شده است. مولد $^{133}\text{Xe} \rightarrow ^{133}\text{I}$ به دلیل اراییه‌ی محصولی با فعالیت و خلوص بالا، روش مورد علاقه برای تولید است. سه واکنش $^{133}\text{Xe}(p, \text{spall})^{133}\text{I}$ ، $^{133}\text{Xe}(d, n)^{133}\text{I}$ و $^{133}\text{Xe}(p, n)^{133}\text{I}$ برای مدت طولانی در تولید ^{133}I استفاده می‌شدند که در این بین واکنش (p, n) متعارف‌تر بوده است. این فرایندها خواستار شتاب‌دهنده‌هایی با انرژی بالا ($E > 60\text{ MeV}$) هستند [۲].

امروزه واکنش $^{134}\text{Xe}(p, x)^{133}\text{I}$ با ^{134}Xe با غنای بالا به دلیل قابل انجام بودن در یک شتاب‌دهنده‌ی کوچک ($E < 30\text{ MeV}$) و اراییه‌ی محصول با خلوص بالا مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه‌ی تولید ^{133}I از طریق فرایند $^{134}\text{Xe}(p, x)^{133}\text{I}$ توسط گروه‌های پژوهشی مختلفی با شرایط بمباران و هندسه‌های هدف متفاوت در آزمایشگاه‌های متفاوت انجام شده است [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸]. بمباران پروتونی گاز زنون از سه مسیر منجر به تولید ^{133}I می‌شود (شکل ۱). در این بین واکنش‌های $(p, 2n)$ و (p, pn) مسیر اصلی تولید هستند و واکنش $(p, 2p)$ سهم ناچیزی در تولید دارد. مشخصه‌های واپاشی هسته‌های تولید شده در این سه مسیر در جدول ۱ آمده است [۱]. اختلاف زیاد موجود در بین نتایج تجربی دیگران در اندازه‌گیری تابع تحریک^(۴) و بهره‌ی تولید^(۵)، محاسبه‌ی تابع تحریک و واکنش‌های فوق با جزییات بیش‌تر و با بهره‌گیری از پنج مدل هسته‌ای متفاوت را اجتناب‌ناپذیر نمود. در ادامه، با استفاده از کدهای مونت کارلو MCNPX [۹] و SRIM [۱۰] فرایند تولید و رفتار ذرات در داخل هدف شبیه‌سازی و بهره‌ی تولید تخمین زده شد.



شکل ۱. مسیرهای ممکن تولید ^{133}I در واکنش پروتون با ایزوتوپ ^{134}Xe [۵].

جدول ۱. اطلاعات واپاشی محصول‌های سنگین واکنش‌های مورد مطالعه [۱]

انرژی keV و نسبت انشعاب (%) پرتو	شیوه‌ی واپاشی (نسبت انشعاب %)	نیم-عمر	محصول سنگین
۵۹۷ (۸۳)	EC (~۳۰)، β^+ (~۷۰)	۵،۹ m	^{133}Cs
۱۴۹ (۴۹) ۱۷۸ (۱۵) ۳۳۰ (۸،۶)	EC (۸۷)، β^+ (~۱۳)	۲،۰۸ h	^{133}Xe
۱۵۹ (۸۳،۳)	EC (۱۰۰)	۱۳،۲ h	^{133}I

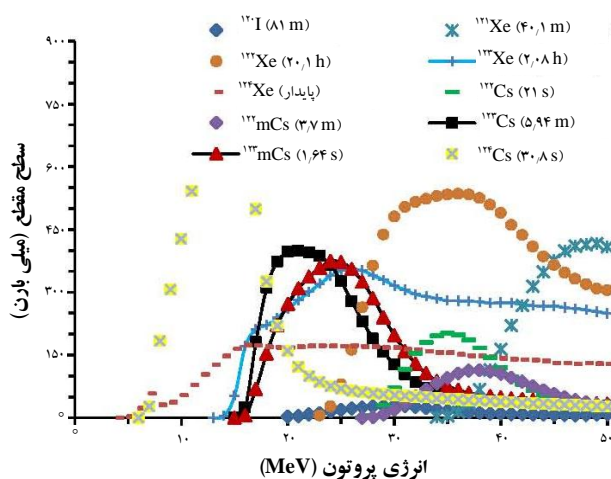
۲. روش انجام محاسبات

۲.۱ تابع تحریک

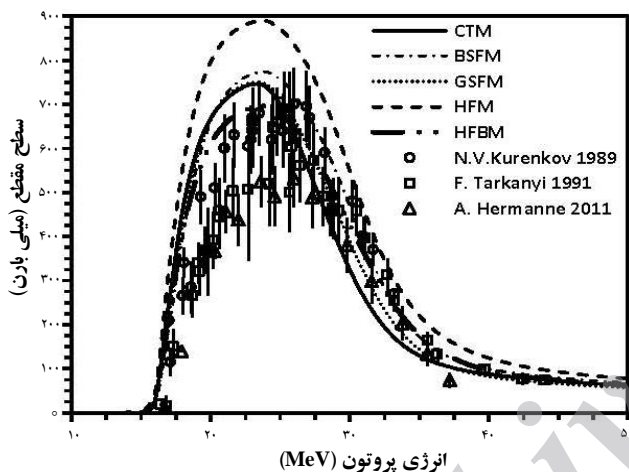
تابع تحریک و واکنش $^{134}\text{Xe}(p, x)$ با استفاده از تالی ۱.۴ [۱۱] در بازه‌ی انرژی $0-50\text{ MeV}$ محاسبه شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که در بازه‌ی انرژی $18-28\text{ MeV}$ سطح مقطع تولید ^{133}Cs ، ^{133}Xe و ^{133}I بیشینه است. ناخالصی ^{134}Cs تولید شده در این بازه با توجه به نیم-عمر کوتاهش ($30/8\text{ s}$) طی مدت کوتاهی واپاشیده و از بین می‌رود. از جمله‌ی ناخالصی‌های دیگر، ^{132}Xe است که با فرایند گذار فاز، قابل جداسازی از محصول اصلی است. ^{131}I ، با نیم-عمر ۸ دقیقه به میزان خیلی ناچیزی تولید می‌شود که با گذر زمان واپاشیده خواهد شد. برای درک بهتر مقدار سطح مقطع واکنش‌های تولیدکننده‌ی ^{133}I از طریق بمباران پروتونی ^{134}Xe ، شکل‌های ۳ و ۴، تابع تحریک برای تولید محصول‌های اصلی را نشان می‌دهند.



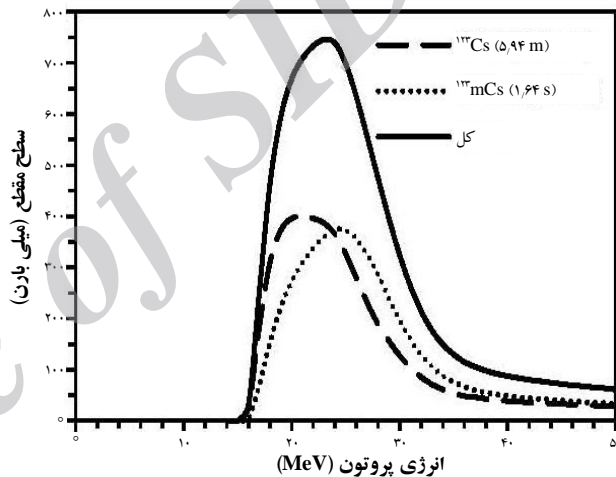
تابع تحریک و واکنش‌های اصلی $^{133}\text{Cs}(p, \gamma n)^{134}\text{Xe}$ و $^{133}\text{Xe}(p, pn)^{133}\text{Xe}$ با استفاده از پنج مدل هسته‌ای مختلف به طور جداگانه نیز محاسبه شد. برای این منظور، پارامترهای چگالی تراز هسته‌ای در قالب سه مدل پدیده شناختی دمایی ثابت (CTM)^(۶) [۱۲]، گاز فرمی جابه‌جا شده به عقب (BSFM)^(۷) [۱۳] و مدل آبرش‌سازی (GSFM)^(۸) [۱۴] و هم‌چنین دو مدل میکروسکوپی براساس محاسبه‌های هارتری-فوک (HFM)^(۹) [۱۵] و محاسبه‌های هارتری-فوک-بوگولیوبوف، موسوم به مدل ترکیبی (HFBM)^(۱۰) [۱۶] تغییر داده شده و محاسبه‌های تابع تحریک انجام شد. نتایج این محاسبه‌ها با نتایج تجربی کار دیگران مقایسه و در شکل‌های ۵ تا ۶ آورده شد.



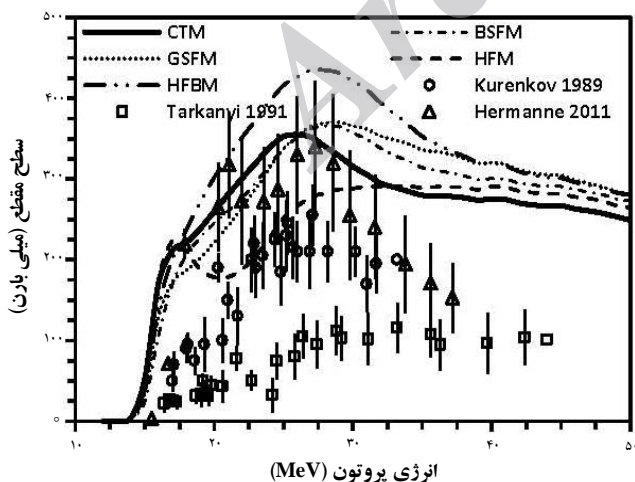
شکل ۲. تابع تحریک و واکنش $^{134}\text{Xe}(p, x)$ ، محاسبه شده با استفاده از تالی ۱.۴ [۱۱].



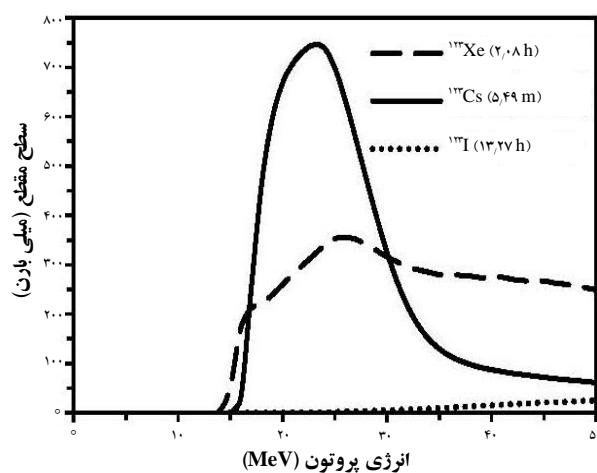
شکل ۵. تابع تحریک و واکنش $^{133}\text{Cs}(p, \gamma n)^{134}\text{Xe}$ محاسبه شده با استفاده از مدل‌های مختلف و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی دیگران.



شکل ۳. سطح مقطع تولید ^{133m}Cs ، ^{133}Cs و کل محاسبه شده با تالی ۱.۴ [۱۱].



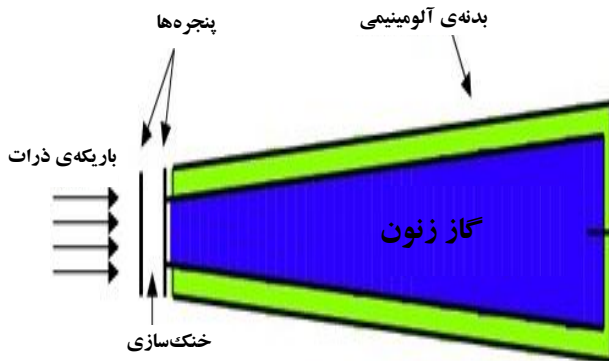
شکل ۶. تابع تحریک و واکنش $^{133}\text{Xe}(p, pn)^{133}\text{Xe}$ محاسبه شده با استفاده از مدل‌های مختلف و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی دیگران.



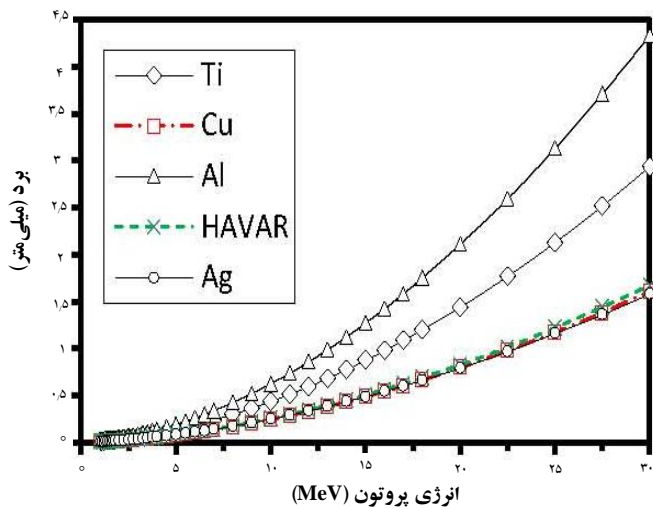
شکل ۴. سطح مقطع واکنش‌های $^{133}\text{Cs}(p, \gamma n)^{134}\text{Xe}$ ، $^{133}\text{Xe}(p, pn)^{133}\text{Xe}$ و $^{134}\text{Xe}(p, \gamma n)^{133}\text{I}$ محاسبه شده با تالی ۱.۴ [۱۱].

**۲.۲ طراحی هدف**

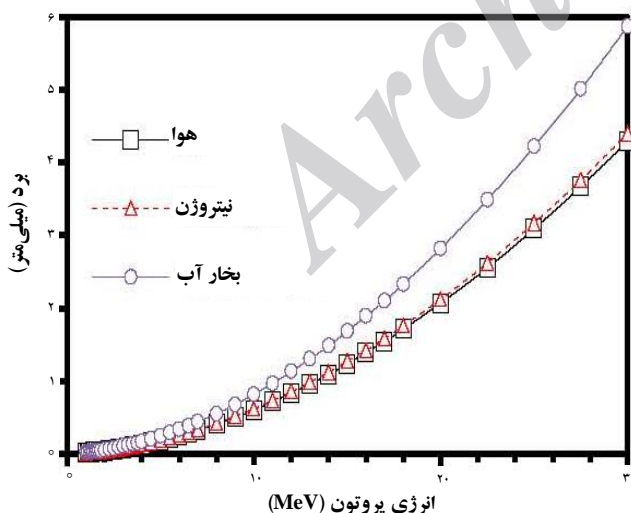
دست‌یابی به تولید بیشینه‌ی هر رادیوایزوتوپ با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌ها، مستلزم طراحی مناسب هدف است. اهمیت این موضوع در هدف‌های گازی با توجه به رفتار خاص ذرات گاز، دوچندان می‌شود. با توجه به الگوی متعارفی که در شکل اصلی هدف‌های گازی وجود دارد (شکل ۷) باریکه‌ی فرودی در مسیر حرکت به داخل گاز هدف، پس از خروج از محیط خلا موازی‌ساز، با دو پنجره که فاصله‌ی بین آن‌ها با یک ماده‌ی گازی خنک می‌شود، برخورد کرده و پس از آن وارد گاز هدف می‌شود.



شکل ۷. نمونه‌ی ساده‌ای از یک هدف گازی.



شکل ۸. رابطه‌ی برد-انرژی پروتون در مواد مختلف به کار رفته در ساخت پنجره‌های هدف، به دست آمده از کد SRIM.



شکل ۹. رابطه‌ی برد-انرژی پروتون در مواد مختلف به کار رفته در خنک‌سازی پنجره‌ها به دست آمده از کد SRIM.

در این فرایند، باریکه‌ی ذرات ورودی، تحت تأثیر محیط‌های پیش‌رو از جمله پنجره‌ها، گاز خنک‌کننده و نیز گاز هدف، دچار انحراف می‌شود. در نتیجه باریکه‌ی ورودی حالت موازی خود را از دست داده و واگرا می‌شود. این واگرایی موجب برخورد ذرات با دیواره‌ی هدف شده، سطح مقطع مؤثر ذرات با گاز هدف را کاهش می‌دهد. برای جلوگیری از این هدررفت، رفتار باریکه‌ی پروتونی فرودی در تمام محیط‌های هدف مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور برد ذرات در محیط‌های مختلف و نیز انحراف آن‌ها، با استفاده از شبیه‌سازی فرایند با کدهای MCNPX و SRIM به دست آورده شد. شکل ۸ رابطه‌ی برد-انرژی پروتون‌ها در مواد مختلف به کار رفته در ساخت پنجره‌های هدف را نشان می‌دهد.

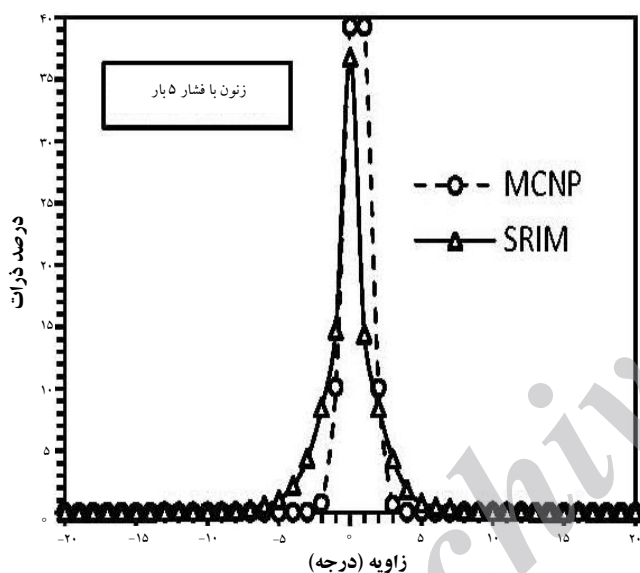
با توجه به توضیحات داده شده در بخش محاسبه‌ی تابع‌های تحریک، بازه‌ی بهینه‌ی تولید ۱۸-۲۸ MeV انتخاب شد. یعنی باریکه‌ی پروتونی می‌باید با انرژی ۲۸ MeV وارد لایه‌ی گاز شده و تا رسیدن انرژی آن به ۱۸ MeV از گاز خارج می‌شود. پس می‌باید انرژی اولیه‌ی ذرات فرودی اندکی بیش‌تر از ۲۸ MeV می‌بود تا کاهش انرژی در عبور از پنجره‌ها و ماده‌ی خنک‌کننده جبران می‌شد. این مهم با استفاده از محاسبه‌های برد و قدرت ایستاندگی در کد SRIM انجام شد (شکل‌های ۸ تا ۱۰). در این محاسبه‌ها معمولاً ضخامت پنجره‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که افت انرژی، کمینه (کم‌تر از ۰/۴ keV) باشد؛ براساس شرایط هدف معمول است که از پنجره‌هایی به ضخامت ۱۵، ۲۵ و یا ۵۰ μm استفاده می‌شود. با توجه به این که هدف مورد بحث این مقاله از نوع گازی بود، برای تحمل بیش‌تر فشارهای مکانیکی، ضخامت و پنجره‌های تیتانیومی ۵۰ μm و ضخامت ماده‌ی خنک‌کننده (هوا) ۳ mm در نظر گرفته شد.

جدول ۲. ورودی کدهای مونت کارلو برای محاسبه‌ی هندسه‌ی هدف

۲۸.۶۲ MeV	انرژی پرتابه
۰.۵ cm	شعاع باریکه
۵۰ μm	ضخامت پنجره‌های هدف
تیتانیوم	ماده‌ی سازنده‌ی پنجره‌ها
هوای خشک (۷۸/۴۴٪ نیتروژن، ۲۱/۰۷٪ اکسیژن، ۰/۴۶٪ آرگون) با فشار ۲ بار	خنک کننده‌ی پنجره‌ها

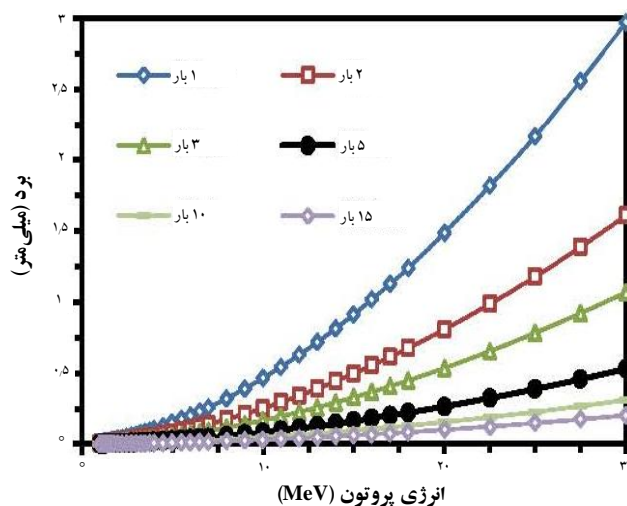
جدول ۳. زاویه‌ی واگرایی ذرات در داخل هدف

درصد ذرات		زاویه‌ی مسیر ذرات در داخل هدف (درجه)
MCNPX	SRIM	
۶۳,۸۸	۵۱,۳۳	۱-۰
۳۰,۳۷	۲۸,۲۳	۲-۱
۵,۸۳	۲۰,۴۴	۵-۲


شکل ۱۱. رابطه‌ی بین درصد-زاویه‌ی ذرات وارد شده به گاز هدف.

که در آن $H, M, t, I, \lambda, \sigma(E)$ و $S_p(E)$ ، به ترتیب، فراوانی ایزوتوپی هدف (درصد)، جرم هدف، زمان بمباران، شدت باریکه‌ی فرودی، ثابت واپاشی محصول واکنش، تابع تحریک و توان ایستاندگی هدف هستند.

برای شبیه‌سازی واکنش‌های فوق برای به دست آوردن بهره‌ی تولید ^{133}I ، تمامی نتایج به دست آمده تا بدین جای کار اعم از هندسه‌ی هدف و انرژی ذره‌ی فرودی، به عنوان ورودی کد MCNPX استفاده و شار پروتون در داخل هدف ^{136}Xe محاسبه شد. شکل ۱۲ توزیع شار بهنجار شده تا مقدار ۱

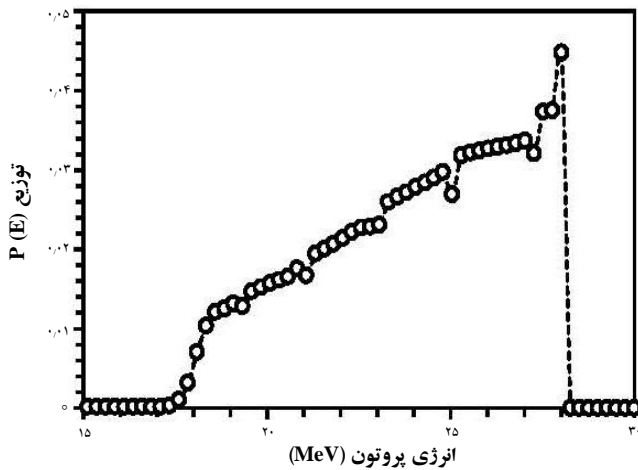

شکل ۱۰. رابطه‌ی برد-انرژی پروتون در گاز هدف (^{136}Xe) با فشارهای مختلف ۱ تا ۱۵ بار به دست آمده از کد SRIM.

محاسبه‌های هندسه‌ی هدف با استفاده از کدهای مونت کارلو MCNPX و SRIM انجام شد. جدول ۲ ورودی این کدها را نشان می‌دهد. از این شبیه‌سازی، برد ذرات در هدف گازی (طول هدف) و نیز زاویه‌ی واگرایی ذرات در هدف به دست آمد (جدول ۳ و شکل ۱۱). در شکل ۱۱ رابطه بین درصد ذرات وارد شده به داخل هدف و زاویه‌ی آن‌ها مشاهده می‌شود. طول هدف برای بازه‌ی انرژی ۱۸-۲۸ MeV، با استفاده از کدهای MCNPX و SRIM به ترتیب، ۲۴/۴ و ۲۴/۵ سانتی‌متر به دست آمد. با استفاده از این نتایج، هندسه‌ی هدف، مخروط ناقص با رئوسی به شعاع ۱ و ۳ و به طول ۲۴/۵ سانتی‌متر پیشنهاد شد. لازم به ذکر است که زاویه‌ی مسیر ذرات در داخل گاز، با توجه به جدول ۳، ۲/۵ درجه انتخاب شد تا درصد زیادی از ذرات فرودی در واکنش درگیر شوند.

۳.۲ بهره‌ی تولید ^{133}I

بهره‌ی تولید ^{133}I برای هر یک از واکنش‌های $^{136}\text{Xe}(p, 2n)$ ، $^{136}\text{Xe}(p, pn)$ و $^{136}\text{Xe}(p, 2p)$ به صورت نظری و نیز از شبیه‌سازی به دست آمد. در محاسبه‌های نظری از معادله‌ی زیر استفاده شد

$$Y = 0.102 * H(1 - e^{-\lambda t}) I / M \int \left(\frac{\sigma(E)}{S_p(E)} \right) dE \quad (1)$$



شکل ۱۲. توزیع شار بهنجار شده تا مقدار ۱ پروتون در داخل هدف ^{136}Xe .

جدول ۴. مقایسه بهره‌ی تولید شبیه‌سازی شده‌ی بد-۱۲۳ با نتایج به دست آمده از محاسبه‌های نظری و تجربی در ۶٫۶ ساعت پس از بمباران (برای بازه‌ی ۱۸-۲۸ MeV)

بهره‌ی تولید (mCi/μAh)		واکنش
MCNP X	SRIM تجربی	
۱۴٫۳۵	۱۶٫۴۶	$^{136}\text{Xe}(p, 2n)^{133}\text{Cs}$
۶٫۰۷	۶٫۶۹	$^{136}\text{Xe}(p, pn)^{133}\text{Xe}$
۰٫۰۴۲	۰٫۰۴۱	$^{136}\text{Xe}(p, 2p)^{133}\text{I}$
۲۰٫۴۶	۲۳٫۱۹	کلی تولید ^{133}I
		۱۵ (Tarkanyi ۱۹۹۱ [۲])
		۲۵ (Firouzbakht ۱۹۸۷ [۴])
		۲۷٫۸ (Kurenkov ۱۹۸۹ [۶])
		۲۱ (Hermanne ۲۰۱۱ [۳])

با توجه به توافق خوب بین نتایج، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو می‌توان قبل از تولید این رادیویزوتوپ ید، برآورد خوبی از بهره و فعالیت محصول به دست آورد.

پی‌نوشت‌ها

1. Single photon emission computed tomography (SPECT)
2. Shelf life
3. Positron emission tomography (PET)
4. Excitation function
5. Production yield
6. Constant temperature model
7. Back shifted fermi gas model
8. Generalized superfluid model
9. Hartree-fock model (HFM)
10. Hartree-fock-bogolyubov model (Combinatorial model) (HFBM)

ذرات فرودی (پروتون‌ها) را در داخل هدف ^{136}Xe نشان می‌دهد. بهره‌ی تولید شبیه‌سازی شده، این است

$$A(t) = \int_0^{E_{\max}} P(E)\sigma(E) \frac{dN_p}{dt} \rho d \frac{L}{M} dE (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

که در آن A ، $\frac{dN_p}{dt}$ ، ρ ، d ، M ، L ، λ ، t ، $\sigma(E)$ ، $P(E)$ به ترتیب فعالیت، شدت باریکه، چگالی اتمی هدف، جرم مولی هدف، ضخامت هدف، عدد آووگادرو، ثابت واپاشی محصول، زمان پرتودهی، سطح مقطع و تابع توزیع انرژی هستند. تابع توزیع انرژی با بهنجار کردن خروجی تالی $F4/E4$ برحسب انرژی به دست آمد که متوسط شار ذره در حجم هدف را محاسبه می‌کند. هم‌چنین از سطح مقطع‌های تالی ۱۰۴ با گزینش مدل دمایی ثابت استفاده شد.

۳. بحث و نتیجه‌گیری

تولید ^{133}I از طریق بمباران هدف گازی ^{136}Xe ، با استفاده از سه واکنش اصلی $(p, 2n)$ ، (p, pn) و $(p, 2p)$ مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا نتایج تابع‌های تحریک نشان داد که واکنش‌های غالب در تولید، واکنش‌های $(p, 2p)$ و (p, pn) هستند. با توجه به اختلاف قابل توجه در نتایج تجربی موجود، برای محاسبه‌ی سطح مقطع، از محاسبه‌های نظری و مدل‌های هسته‌ای استفاده و بهترین سطح مقطع نظری برای به کارگیری در محاسبه‌ها طوری انتخاب شد که با سطح مقطع‌های تجربی در توافق باشد. از مقایسه‌ی تابع‌های تحریک (شکل‌های ۵ و ۶)، داده‌های مدل دمایی ثابت انتخاب شد.

با استفاده از کدهای مونت کارلو مسیر تولید شبیه‌سازی و سعی شد هندسه‌ی هدف به صورت بهینه طراحی شود. در نهایت بهره‌ی تولید با استفاده از کد MCNPX تخمین زده شد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی و نیز با نتایج نظری به دست آمده از کدهای تالی ۱۰۴ و SRIM در توافق بود (جدول ۴).



- [1] Table de Radionucleides, (2004), <http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/I-123_tables.pdf>.
- [2] F. Tarkanyi, S.M. Qaim, G. Stocklin, M. Sajjad, R.M. Lambrecht, H. Schweikert, Excitation functions of (p, 2n) and (p, pn) reactions and differential and Integral yields of ^{123}I in proton induced reactions on highly enriched ^{124}Xe , Appl. Radiat. Isot, 42 (1991) 221-228.
- [3] A. Hermanne, F. Tarkanyi, S. Takacs, R. Adam Rebeles, A. Ignatyuk, S. Spellerberg, R. Schweikert, Limitation of the long-lived ^{121}Te contaminant in production of ^{123}I through the $^{124}\text{Xe}(p, x)$ route, Appl. Radiat. Isot, 69 (2011) 358-368.
- [4] L.M. Firouzbakht, R.R. Teng, D.J. Schlyer, A.P. Wolf, Production of iodine-123 from xenon-124 at energies between 15 and 34 MeV, Radiochim. Acta, 41 (1987) 1-4.
- [5] L.M. Firouzbakht, R.R. Teng, D.J. Schlyer, A.P. Wolf, Production of high purity iodine-123 from xenon-124: cross sections and yields, Radiochim. Acta, 56 (1992) 167-171.
- [6] N.V. Kurenkov, A.B. Malinin, A.A. Sebyakin, N.I. Venikov, Excitation functions of proton induced nuclear reactions on ^{124}Xe : production of ^{123}I , J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett, 135 (1989) 39-50.
- [7] N.A. Konyahin, V.N. Mironov, N.N. Krasnov, P.P. Dmitriev, V.P. Lapin, M.V. Paparin, Yield of ^{123}I from proton bombardment of ^{124}Xe over the energy range 16-21, 5 MeV, At. Energ, 67 (1989) 129-130.
- [8] L.C.A. Sumiya, V. Sciani, Evaluation of irradiation parameters of enriched ^{124}Xe target for ^{123}I production in cyclotrons, Appl. Radiat. Isot, 66 (2008) 1337-1340.
- [9] Monte Carlo Team, MCNP5/MCNPX-exe Package, Monte Carlo N-Particle extended, Los Alamos National Laboratory report (2008), <<http://mcnpx.lanl.gov/>>.
- [10] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM-the stopping and range of ions in matter, Nucl Instrum Methods B, 268 (2010) 1818-1823.
- [11] A.J. Koning, S. Hilaire, S. Goriely, TALYS-1.4 A nuclear reaction program, user manual, NRG, The Netherlands, (2011).
- [12] A. Gilbert, A.G.W. Cameron, A composite nuclear level density formula with shell corrections, Can. J. Phys. 43 (1965) 1446.
- [13] W. Dilg, W. Schantl, H. Vonach, M. Uhl, Level density parameters for the back-shifted fermi gas model in the mass range $40 < A < 250$, Nucl. Phys, A 217 (1973) 269.
- [14] A.V. Ignatyuk, J.L. Weil, S. Raman, S. Kahane, Density of discrete levels in ^{116}Sn , Phys. Rev, C 47 (1993) 1504.
- [15] S. Goriely, F. Tondeur, J.M. Pearson, A Hartree Fock nuclear mass table, At. Data Nucl. Data Tables, 77 (2001) 311.
- [16] S. Hilaire, S. Goriely, Global microscopic nuclear level densities within the HFB plus combinatorial method for practical applications, Nucl. Phys, A 779 (2006) 63.