



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ خرداد ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

## امکان سنجی تولید رادیوایزوتوپ $^{124}\text{I}$ از طریق واکنش $^{124}\text{Te}(p,n)$

اسلامی، محمد<sup>۱</sup>، میرزایی، محمد<sup>۲</sup>، کاکاوند، طیب<sup>۳\*</sup>

۱- دانشگاه زنجان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی

۳- دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده علوم، گروه فیزیک

### چکیده:

تابع برانگیختگی واکنش  $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$  با استفاده از مؤلفه‌های مدل اپتیکی در کد TALYS-1.4 پیش‌بینی شده است. بازه انرژی مناسب برای ذره‌ی پرتابه، با در نظر گرفتن حصول بیشینه سطح مقطع و کمینه آلودگی ایزوتوپی و غیر ایزوتوپی ناشی از کانال‌های واپاشی دیگر، انتخاب شده سپس هندسه هدف مشخصه‌یابی و طراحی‌گردیده است. با استفاده از نتایج تابع برانگیختگی و محاسبات قدرت ایستاندگی، بهره تولید نظری  $^{124}\text{I}$  در طی واکنش  $^{124}\text{Te}(p,n)$  محاسبه شده است. در نهایت مسیر تولید آن، با استفاده از یک روش مونتاژ کارلوی اختصاصی‌شده، شبیه‌سازی شده است. از مقایسه مقادیر بهره تولید حاصل از شبیه‌سازی با بهره نظری و نتایج تجربی، مشاهده می‌شود که توافق خوبی وجود دارد.

**کلید واژه‌ها:** تابع برانگیختگی، سطح مقطع، بهره تولید،  $^{124}\text{I}$ ، روش مونتاژ کارلو



# بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## ۱- مقدمه

رادیوایزوتوپ  $^{124}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 4/18 \text{ d}$ ,  $E_{\beta^+} = 2/13 \text{ MeV}$ ,  $I_{\beta^+} = 2.25\%$ )، تنها ایزوتوپ ید است که به صورت  $\beta^+$  تابش می‌کند [۱]. یکی از رادیوایزوتوپ‌های ویژه است که کاربرد فراوانی در تحقیقات پزشکی و تومورشناسی دارد و در هردوشاخه پزشکی هسته‌ای تشخیصی و درمانی استفاده می‌شود [۲]. هم‌چنین این رادیوایزوتوپ به دلیل دوز بالای تابش نسبت به  $^{131}\text{I}$  می‌تواند در توموگرافی گسیل پوزیترون (PET) به کار رود.

چندین روش برای تولید این رادیوایزوتوپ ارایه شده است که در این بین، روش معمول، واکنش دوترون القاید هروی هدف غنی‌شده  $^{124}\text{Te}$  در محدوده انرژی  $15 \text{ MeV}$  است [۳] و بازه‌ی انرژی مناسب برای تولید،  $E_d = 6-16 \text{ MeV}$  گزارش شده است [۴]. روش دیگر تولید، برهم‌کنش پروتون‌ها با ایزوتوپ‌های  $\text{Te}$  است [۵].

زیت و همکاران [۶] واکنش  $^{124}\text{I} (^{126}\text{Te}(p,3n))$  را در بازه‌ی انرژی  $E_p = 33/6-36/8 \text{ MeV}$  پیشنهاد داده‌اند، اما واکنش  $^{124}\text{I} (^{124}\text{Te}(p,n))$  پس از بررسی و تخمین میزان بهره تولید، جهت تولید در سیکلوترون‌های کوچک، مناسب و مورد علاقه به نظر می‌رسد. سطح مقطع این واکنش در بازه‌ی انرژی پرتابه‌ی پروتون، با ارائه‌ی داده‌های گسسته، توسط دو گروه تحقیقاتی [۷، ۱] اندازه‌گیری شده و ارزیابی آن‌ها توسط تاکاس و همکاران [۸] در بازه‌ی انرژی  $\text{MeV}$   $6-31 E_p$  صورت گرفته است.

در کار حاضر، به منظور تعیین دقیق سطح مقطع تولید  $^{124}\text{I}$  و هم‌چنین ناخالصی‌های ایزوتوپی و غیرایزوتوپی از کد هسته‌ای TALYS-1.4 [۹] مبتنی بر مدل اپتیکی و به همراه بهینه‌سازی‌هایی با استفاده از تخصیص چند پارامتر تاثیر گذار استفاده می‌شود. پس از بررسی تابع برانگیختگی واکنش و محاسبه‌ی ضخامت بهینه هدف، مسیر تولید بر مبنای کارهای تجربی صورت گرفته [۷، ۱] با استفاده از کدهای مونت کارلوی MCNPX و GEANT4 شبیه‌سازی شده و بهره‌ی تولید محصول تخمین زده می‌شود.

## ۲- روش کار

### ۲-۱- محاسبه‌ی سطح مقطع به وسیله کد TALYS-1.4

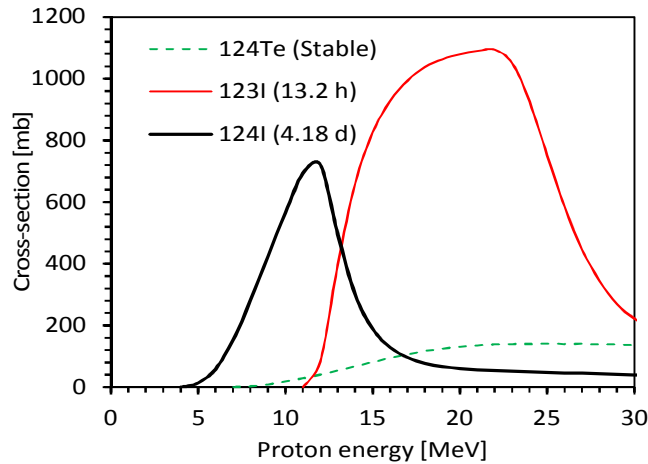
کد TALYS-1.4 یک برنامه کامپیوتری است که بر اساس مدل اپتیکی به پیش‌گویی سطح مقطع واکنش‌های هسته‌ای می‌پردازد که ذرات پرتابه آن‌ها می‌تواند نوترون، فوتون، پروتون، دوترون، تریتیون و آلفا باشد. این کد قادر است سطح مقطع کل تولید یک ایزوتوپ از طریق کانال‌های مختلف در یک عنصر طبیعی و هم‌چنین سطح مقطع تولید حالت‌های ایزومری یک ایزوتوپ را انجام دهد [۹]. با استفاده از این کد تابع برانگیختگی واکنش  $^{124}\text{Te}(p,x)$  در بازه‌ی انرژی پروتون‌های  $30-0 \text{ MeV}$  محاسبه گردید (شکل ۱). با توجه به این شکل، در بازه‌ی انرژی  $14-7 \text{ MeV}$  بیش‌ترین سطح مقطع تولید  $^{124}\text{I}$  را داریم. در عین حال، در همین بازه شاهد کم‌ترین میزان تولید



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

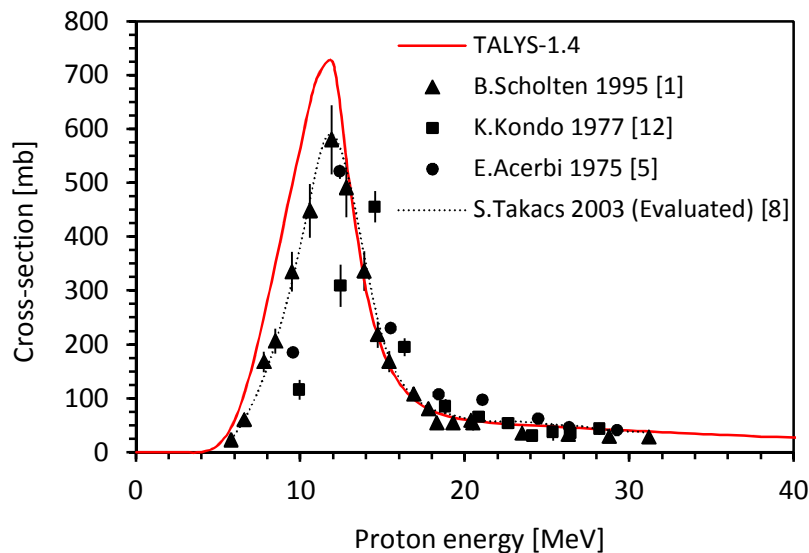
۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

ناخالصی ایزوتوپی  $^{123}\text{I}$  با نیمه عمر  $13.2\text{ h}$  هستیم که با توجه به نیمه عمر  $4.18\text{ d}$  روزی محصول اصلی ( $^{124}\text{I}$ )، طی یک زمان خنک سازی مشخص، واپاشی خواهد کرد. ناخالصی غیرایزوتوپی تولید شده در این بازه، مقدار ناچیزی از  $^{124}\text{Te}$  است که با استفاده از روش های شیمیایی قابل جداسازی است.



شکل ۱- تابع برانگیختگی واکنش  $^{124}\text{Te}(p,x)$  حاصل از کد TALYS-1.4.

مقایسه نتایج محاسبات کد TALYS-1.4 با نتایج تجربی بر گرفته از مرکز داده های هسته ای EXFOR [۱۰] در شکل ۲ آمده است. از آنجایی که پیش بینی کد، مقداری فراتر از نتایج تجربی است، برای حفظ دقت محاسبات در مراحل بعدی محاسبات و شبیه سازی، از سطح مقطع های ارزیابی شده ی تاکاس و همکاران [۸] که در شکل ۲ قابل مشاهده است، استفاده می کنیم.



شکل ۲-مقایسه ی سطح مقطع تجربی [۱، ۵، ۸، ۱۳] و ارزیابی شده ی واکنش  $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$  با نتایج کد TALYS.



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## ۲-۲- محاسبات ضخامت هدف و قدرت ایستاندگی

یکی از مسائل مهم در طراحی هدف، محاسبه ضخامت بهینه هدف است. کاهش انرژی ذرات فرودی (dE) در یک بازه معین (dx) را قدرت ایستاندگی گویند. ضخامت مورد نیاز هدف با استفاده از کد SRIM [۱۱] به گونه‌ای محاسبه می‌شود که پروتون ورودی با انرژی مشخص به هدف وارد شده و با افت انرژی مورد نظر از آن خارج شود. ضخامت بهینه هدف در بازه انرژی بهینه ۷-۱۴ MeV با استفاده از این کد مقدار  $529 \mu\text{m}$  محاسبه گردید. هم‌چنین قدرت ایستاندگی به‌عنوان تابعی از انرژی ذره‌ی فرودی، با استفاده از این کد محاسبه گردید.

## ۲-۳- محاسبه‌ی بهره تولید نظری

بهره تولید نظری در یک بازه مشخص از انرژی مطابق رابطه (۱) بدست می‌آید،

$$Y = 0.102 \times \left( \frac{I}{M} \right) \times H \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \left( \frac{\sigma(E)}{S_p(E)} \right) (1 - e^{-\lambda t}) dE \quad (1)$$

که در آن  $H$ ،  $M$ ،  $\lambda t$ ،  $\sigma(E)$  و  $S_p(E)$  به‌ترتیب، درصد فراوانی ایزوتوپی هدف، جرم مولی هدف، زمان بمباران، جریان باریکه‌ی فرودی، ثابت واپاشی محصول، سطح مقطع توان ایستاندگی هدف هستند. توان ایستاندگی با استفاده از کد SRIM، و سطح مقطع با استفاده از کد TALYS-1.4 محاسبه و یا از داده‌های تجربی ارزیابی شده استفاده می‌شود. مطابق رابطه‌ی بالا، با افزایش جریان باریکه‌ی فرودی، زمان بمباران و سطح مقطع واکنش، بهره‌ی تولید افزایش می‌یابد. بهره تولید نظری  $^{124}\text{I}$  در طی واکنش  $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$  با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید (جدول ۱).

## ۲-۴- شبیه‌سازی تولید بوسیله کدهای MCNPX و GEANT4

اکتیویته‌ی محصول با استفاده از خروجی کدها از طریق فرمول انتگرالی زیر محاسبه می‌شود،

$$Y = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} P(E) \sigma(E) \frac{dN_p}{dt} \times \rho \times d \times \frac{N_A}{M} (1 - e^{-\lambda t}) dE \quad (2)$$

که در آن  $\frac{dN_p}{dt}$ ،  $\rho$ ،  $d$ ،  $N_A$  و  $P(E)$  به‌ترتیب، جریان باریکه‌ی پروتونی، چگالی هدف، ضخامت هدف، ثابت آووگادرو و تابع توزیع انرژی هستند. پارامترهای دیگر مانند پارامترهای رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شوند. تابع توزیع انرژی با بهنجار کردن خروجی کدها با عنوان تالی حجمی برحسب انرژی به‌دست می‌آید که متوسط شار ذره را در واحد حجم سلول محاسبه می‌کند.

## ۳- نتایج

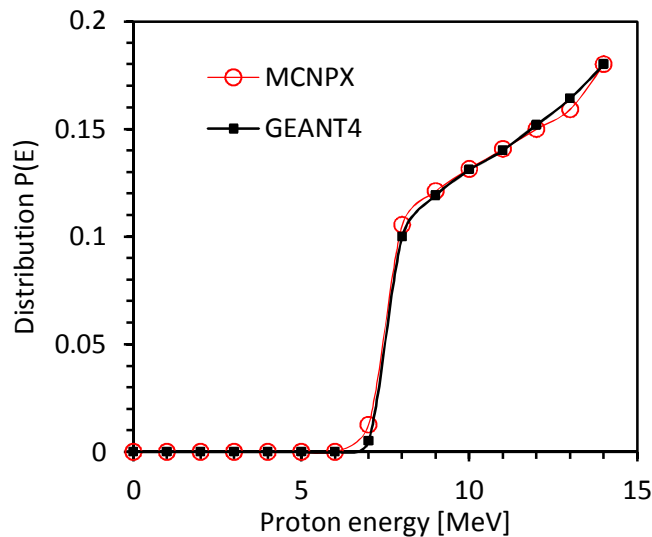
پس از محاسبه‌ی تابع برانگیختگی واکنش  $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$  با استفاده از کد TALYS-1.4 و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی (شکل‌های ۱ و ۲)، بازه‌ی انرژی پرتابه برای داشتن بیش‌ترین بهره‌ی تولید، ۷-۱۴ MeV انتخاب



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

می‌گردد. همچنین با استفاده از کد SRIM ضخامت هدف برای پروتون ورودی با انرژی مورد نظر مقدار  $529 \mu\text{m}$  محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی تولید  $^{124}\text{I}$  از طریق بمباران پروتونی هدف  $^{124}\text{Te}$  با استفاده از مشخصات آزمایشات تجربی [۷، ۱] از جمله شعاع باریکه، انرژی و جریان پروتون‌های خروجی و همچنین هندسه‌ی طراحی شده از طریق محاسبات کدهای TALYS-1.4 و SRIM برای هدف  $^{124}\text{Te}$ ، به وسیله کدهای MCNPX و GEANT4 صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی به صورت متوسط شار پروتون درون حجم هدف، بر حسب انرژی، توسط تالی F4/E4 و آشکارساز G4PSCellFlux به دست آمده و به یک بهنجار می‌شود. شکل ۳ تابع توزیع بهنجار شده‌ی پروتون را بر حسب انرژی درون هدف  $^{124}\text{Te}$  نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که پروتون‌های ورودی، انرژی خود را به تدریج درون هدف از دست می‌دهند. علاوه بر این نقاط اوج و نزول نمودارها بر درستی انتخاب بازه بهینه که قبلاً از روی محاسبات کد TALYS به دست آمد، صحه می‌گذارد. بهره‌ی تولید نظری از طریق رابطه‌ی (۱)، بهره‌ی تولید حاصل از شبیه‌سازی کدها از طریق رابطه‌ی تحلیلی (۲) و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی در جدول (۱) آمده است.



شکل ۳- تابع توزیع انرژی بهنجار شده پروتون‌ها درون هدف  $^{124}\text{Te}$ .

جدول ۱- مقایسه محاسبات حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای تولید  $^{124}\text{Te}$  در طی واکنش  $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$  در بازه انرژی پرتابه ۷-۱۴ MeV.

بهره تولید نظری (SRIM) <sup>(۱)</sup> (mCi/μAh)	بهره تولید شبیه‌سازی (mCi/μAh) <sup>(۲)</sup>		بهره تولید تجربی (mCi/μAh)	
	MCNPX	GEANT4	Scholten et al.[۱]	Sajjad et al.[۷]
۰/۷۱	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۵۷



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

<sup>۱</sup> با استفاده از سطح مقطع‌های تجربی ارزیابی شده [۸].

## ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این کار، تولید سیکلوترونی رادیوایزوتوپ  $^{124}\text{I}$  به وسیله بمباران پروتونی هدف  $^{124}\text{Te}$  بررسی و سطح مقطع وقوع این واکنش محاسبه شد. پس از انتخاب بازه انرژی پرتابه ۷-۱۴ MeV، که دارای بیشینه‌ی سطح مقطع و کمینه‌ی آلودگی‌های ایزوتوپی و غیرایزوتوپی بود، این واکنش توسط دو کد مونت‌کارلوی مختلف شبیه‌سازی گردید. برای کاهش خطای محاسبات، شبیه‌سازی با ترازد  $10^8$  ذره اجرا گردید و خطای آماری کمتر از ۱ درصد مشاهده شد. با مشاهده توافق بین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی (جدول ۱)، به نظر می‌رسد که با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بتوان قبل از تولید رادیوایزوتوپ‌ها، پیش‌بینی و برآوردی مفید از بهره و اکتیویته‌ی آن‌ها بدست آورد.

## مراجع

- [۱] B. Scholten, Z. Kovacs, F. Tarkanyi and S. M. Qaim, "Excitation Functions of  $^{124}\text{Te}(p,xn)^{124,123}\text{I}$  Reactions from 6 to 31 MeV with Special Reference to the Production of  $^{124}\text{I}$  at a Small Cyclotron", Appl. Radiat. Isot., Vol. 46, No. 4, pp. 255-259, 1995.
- [۲] M.A. Bakir, et al., "Iodine-124-labelled ICR 12, a new monoclonal antibody for imaging protooncogene expression in breast cancer using PET: optimization of labelling efficiency and immunoreactivity", J. Nucl. Med., Vol. 31, pp. 777, 1990.
- [۳] J. H. Zaidi, S. M. Qaim and G. Stiecklin, "Excitation functions of deuteron induced nuclear reactions on natural tellurium and enriched  $^{122}\text{Te}$ : production of  $^{123}\text{I}$  via the  $^{122}\text{Te}(d,n)^{123}\text{I}$ -process", Int. J. Appl. Radiat. Isot., Vol 34, pp. 1425, 1983.
- [۴] M. L. Firouzbakht, et al., "Iodine-124 production: excitation functions for the  $^{124}\text{Te}(d,2n)^{124}\text{I}$  and  $^{124}\text{Te}(d,3n)^{123}\text{I}$  reactions from 7 to 24 MeV", Nucl. Instr. Meth. B., Vol. 79, pp. 909, 1993.
- [۵] E. Acerbi, C. Birattari, M. Castiglioni, F. Resmini and M. Villa, "Production of  $^{123}\text{I}$  for medical purposes at the Milan AVF cyclotron" Int. J. Appl. Radiat. Isot., Vol. 26, pp. 741, 1975.
- [۶] J. Zweit, et al, "Excitation functions of proton induced reactions in natural tellurium: production of no-carrier added  $^{124}\text{I}$  for PET-applications", Proc. IV Int. Workshop on Targetry and Target Chemistry, Villigen, Switzerland (Ed., R. Weinreich), pp. 76, 1991.
- [۷] Munawwar Sajjad, Erol Bars, H.A. Nabi, "Optimization of  $^{124}\text{I}$  production via  $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$  reaction", Appl. Radiat. Isot., Vol. 64, pp. 965-970, 2006.
- [۸] S. Takacs, F. Tarkanyi, A. Hermanne, R. Paviotti de Corcuera, "Validation and upgrading of the recommended crosssection data of charged particle reactions used for production of PET radioisotopes", Nucl. Instr. Meth. B., Vol. 211, pp. 169-189, 2003.
- [۹] A. J. Koning, S. Hilaire and S. Goriely, "TALYS-1.4 A nuclear reaction program, user manual", NRG, The Netherlands, 2011.



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [۱۰] EXFOR, Experimental Nuclear Reaction Data, 2011, <http://www.nds.iaea.org/exfor>.
- [۱۱] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler and J. P. Biersack, "SRIM-the stopping and range of ions in matter", Nucl. Instr. Meth. B., Vol. 268, pp. 1818-1823, 2010.
- [۱۲] K. Kondo, R. M. Lambrecht and A. P. Wolf, "<sup>123</sup>I production for radiopharmaceuticals-XX. Excitation functions of the <sup>124</sup>Te(p,2n)<sup>123</sup>I and <sup>124</sup>Te(p,n)<sup>124</sup>I reactions and the effect of enrichment on radionuclidic purity", Int. J. Appl. Radiat. Isot. Vol. 28, pp. 395, 1977.