



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

## مقاله کنفرانسی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان (ویژه نامه) ۱۴۰۱، صفحه ۱۱۷-۱۲۰

ششمین کنفرانس سنجش و ایمنی پرتوهای یون ساز و غیر یون ساز (مرداد ماه ۱۴۰۰)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

# شبیه سازی تولید رادیوایزوتوپ پراسئودیمیوم-۱۴۰ به روش مونت کارلو

## ساناز آشوری و طیب کاکاوند\*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

\*قزوین، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کد پستی: ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸

پست الکترونیکی: kakavand@sci.ikiu.ac.ir

### چکیده

در این پروژه به بررسی امکان سنجی تولید مستقیم رادیوایزوتوپ پراسئودیمیوم-۱۴۰ به روش مستقیم با استفاده از تابع تحریک واکنش  $^{140}\text{Pr}(p,n)^{140}\text{Ce}$  که از کد محاسباتی TALYS-۱.۸ به دست آمده پرداخته شده است. از طرفی به دلیل نیمه عمر کوتاه ۳/۳۹ دقیقه این رادیوایزوتوپ می توان آن را در سیکلوترون های کوچک قابل حمل به مراکز درمانی تولید کرد. با استفاده از تابع تحریک، بازه انرژی بهینه برای پرتابه پروتون به منظور دستیابی به بیشینه سطح مقطع محصول  $^{140}\text{Pr}$  و کمینه آلودگی ایزوتوپی و غیرایزوتوپی که ناشی از کانال های واپاشی دیگر در طی انجام واکنش است، تعیین گردیده است. در نهایت بهره ی تولید نظری با بهره ی تولید شبیه سازی شده که به صورت مستقیم و غیرمستقیم از کد MCNPX به دست آمده اند، با هم مقایسه می شوند.

کلیدواژگان: رادیوایزوتوپ، پراسئودیمیوم-۱۴۰، بهره تولید، تابع تحریک، کد MCNPX.

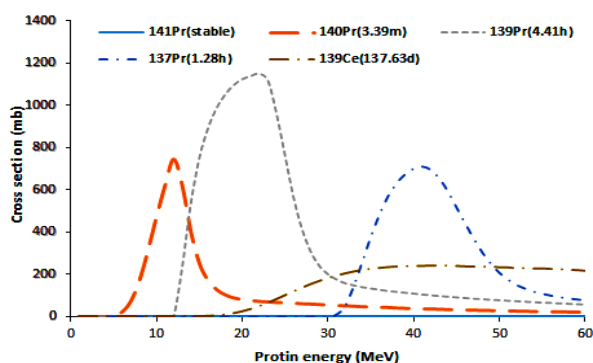
### ۱. مقدمه

بیومولکول های آلبومین سرم انسان متصل شوند [۱] و همچنین می توانند در اهداف تحقیقاتی مانند اندازه گیری تراکم استخوان و تصویربرداری مغز استخوان استفاده شوند [۲]. از طرفی با توجه به نیمه عمر کوتاه این رادیوایزوتوپ می توان آن را در سیکلوترون های کوچک قابل حمل به مراکز درمانی تولید کرد. واکنش های مختلفی منجر به تولید رادیوایزوتوپ  $^{140}\text{Pr}$  می شوند که به منظور دستیابی به عدم وجود ناخالصی در بازه ی بهینه انرژی باریکه فرودی، وجود هدفی با درصد فراوانی بالا به

رادیوایزوتوپ ها در علم پزشکی کاربرد فراوانی دارند و در زمینه های تشخیص و درمان از آن ها استفاده می شود. رادیوایزوتوپ پراسئودیمیوم-۱۴۰ با نیمه عمر ۳/۳۹ دقیقه با گسیل الکترون های اوژه ناشی از گیراندازی الکترون و تابش پوزیترون در تصویربرداری PET<sup>۱</sup> کاربرد وسیعی دارد. رادیوایزوتوپ های پراسئودیمیوم نقش مهمی در رادیوتراپی و تشخیص دارند و بیش ترین اهمیت پراسئودیمیوم-۱۴۰ به دلیل حضور در دسته ی لانتانیدها می باشد. لانتانیدها قادرند که به

<sup>۱</sup> PET (Positron Emission Tomography)

کامپیوتری است که براساس مدل اپتیکی به محاسبه‌ی سطح مقطع واکنش‌های هسته‌ای می‌پردازد، که ذره‌ی فرودی آن می‌تواند پروتون، نوترون، دوترون، فوتون، تریتون،  $^3\text{He}$  و آلفا باشد. کد TALYS می‌تواند سطح مقطع تولید حالت‌های ایزومری یک ایزوتوپ و سطح مقطع کل تولید یک ایزوتوپ را از طریق کانال‌های مختلف واپاشی بدست آورد، که با وارد کردن اطلاعاتی از قبیل بازه‌ی انرژی، نوع پرتابه و عدد جرمی هدف سطح مقطع واکنش را در بازه‌ی تعیین شده خواهیم داشت. که در این پروژه ابتدا سطح مقطع واکنش  $^{140}\text{Pr}(p, n)^{141}\text{Pr}$  با استفاده از کد TALYS-۱.۸ محاسبه شده و سپس نمودار تابع تحریک برای تمام کانال‌های واپاشی پس از بمباران رسم شده است (شکل ۱).



شکل (۱): تابع تحریک واکنش  $^{140}\text{Pr}(p, n)^{141}\text{Pr}$  با استفاده از کد

TALYS.

در شکل ۱ تابع تحریک فوق در بازه‌ی انرژی ۶۰-۰ مگا الکترون ولت برای پرتابه‌ی فرودی پروتون محاسبه شده، که با توجه به نمودار، بازه‌ی بهینه انرژی ۱۲-۵ مگا الکترون ولت در نظر گرفته شده است و هیچگونه ناخالصی ایزوتوپی و شیمیائی در این بازه نداریم. در شکل ۲ به مقایسه‌ی نتایج محاسبات کد TALYS-۱.۸ با نتایج تجربی برگرفته از مرکز داده‌های هسته‌ای EXFOR که منجر به تولید پراسئودیمیم- $^{140}\text{Pr}$  می‌شود، پرداخته شده است که تطبیق سطح مقطع به دست

عنوان یک اصل مسلم در انتخاب واکنش‌های هسته‌ای نقش بسزائی دارد. از میان کلیه مسیرهای ممکن تولید محصول  $^{140}\text{Pr}$ ، واکنش  $^{140}\text{Ce}(p, n)^{140}\text{Pr}$  به عنوان تنها مسیر بهینه که امکان دستیابی به یک محصول با بهره تولید قابل قبول و بدون ناخالصی ایزوتوپی و شیمیائی را فراهم می‌کند. بنابراین با توجه به پایدار بودن  $^{140}\text{Ce}$  و همچنین درصد فراوانی بالای این ایزوتوپ (۸۸.۸ درصد) به عنوان هدف مناسبی برای واکنش فوق تعیین گردیده است. از طرفی تولید  $^{140}\text{Pr}$  به دلیل نیمه عمر کوتاهی که دارد توسط صادقی و همکارانش به روش تولید ژنراتور طبق واکنش  $^{140}\text{Nd}(p, \gamma)^{140}\text{Pr}$  در حد نظری مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. از طرفی به دلیل هزینه‌های بالای آزمایش‌های هسته‌ای و نبود امکانات کافی برای انجام عملی بعضی از تست‌ها قبل از انجام آزمایش‌ها، می‌توانیم از کدهای شبیه سازی که در امور تحقیقاتی، خدماتی و آموزشی ارائه شده‌اند استفاده کنیم. همچنین به دلیل صرف زمان بسیار و هزینه‌های زیاد جهت مطالعه تولید رادیوداروها و بالا بودن خطر پرتوهای دریافتی توسط کاربران آزمایشگاه‌ها، به شبیه‌سازی تولید رادیوایزوتوپ مذکور پرداختیم.

در این پروژه بعد از بررسی تابع تحریک واکنش و محاسبه‌ی ضخامت بهینه هدف، بهره‌ی تولید  $^{140}\text{Pr}$  با استفاده از کد MCNPX به صورت مستقیم و غیرمستقیم شبیه‌سازی شده و همچنین بهره‌ی تولید نظری محاسبه شده و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

## ۲. روش انجام تحقیق

### ۱.۲. محاسبه سطح مقطع با استفاده از کد TALYS

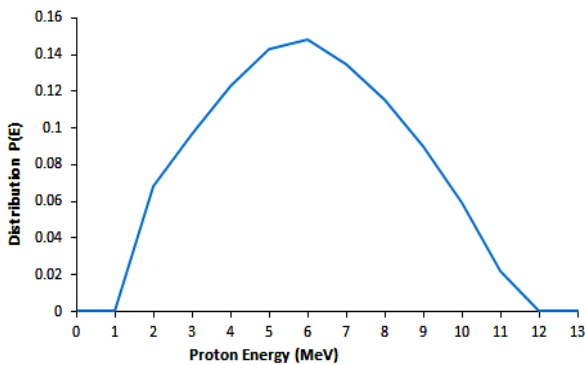
احتمال وقوع یک واکنش هسته‌ای را بر حسب سطح مقطع بیان می‌کنند، بنابراین سطح مقطع معیاری است که احتمال نسبی وقوع یک واکنش را نشان می‌دهد. یکی از کدهای مورد استفاده در این محاسبات کد TALYS-۱.۸ [4] که یک برنامه‌ی

مقطع واکنش بر حسب انرژی باریکه فرودی که بر اساس مدل اپتیکی با استفاده از کد TALYS-۱.۸ محاسبه شده و  $S(E)$  توان ایستاندگی هدف می‌باشد. برای محاسبه بهره‌ی تولید انتگرالی از رابطه‌ی ۲ با استفاده از خروجی کد MCNPX [۶] 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  $N_A$  عدد آووگادرو،  $\rho$  چگالی ماده هدف،  $d$  ضخامت هدف،  $I$  جریان باریکه‌ی فرودی،  $M$  جرم مولی ماده هدف،  $\sigma(E)$  سطح مقطع واکنش و  $P(E)$  تابع توزیع انرژی ذره‌ی فرودی درون هدف می‌باشد.

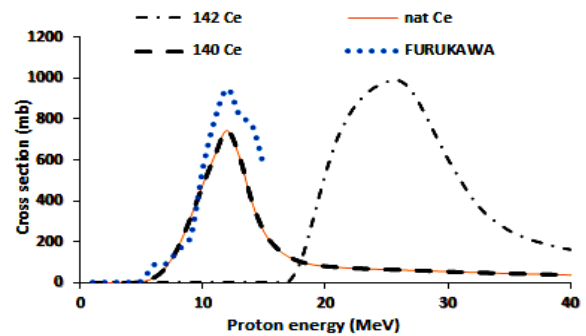
برای تعیین بهترین بازه‌ی انرژی از داده‌های سطح مقطع کد TALYS استفاده شده است. داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی به صورت متوسط شار پروتون، درون حجم هدف، بر حسب انرژی، توسط تالی  $F\epsilon/E\epsilon$  به‌دست آمده و نرمالیزه می‌شود (شکل ۳).



شکل (۳): تابع توزیع نرمالیزه شده شار پروتون.

در نهایت برای تعیین بهره‌ی تولید به روش شبیه‌سازی به صورت مستقیم از طریق روش مونت‌کارلو با استفاده از کد MCNPX (Monte Carlo N-Particle) که یکی از جامع‌ترین کدهایی است که در حل مسائل ترابرد توانایی گسترده‌ای دارد. در این روش می‌توان تعداد ایزوتوپ‌های

آمده از نتایج کد TALYS-۱.۸ با داده‌های تجربی در رابطه با واکنش  $^{140}\text{Ce}(p,n)^{140}\text{Pr}$  به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل (۲): سطح مقطع تجربی واکنش  $^{140}\text{Ce}(p,n)^{140}\text{Pr}$  در مقایسه با نتایج کد TALYS. سطح مقطع نظری واکنش‌های  $^{140}\text{Ce}(p,x)^{140}\text{Pr}$  و  $^{142}\text{Ce}(p,x)^{140}\text{Pr}$  نیز آورده شده است.

## ۲.۲. محاسبه ضخامت هدف

یکی از موارد مهم در طراحی هدف، محاسبه ضخامت بهینه‌ی هدف است. کاهش انرژی ذرات فرودی ( $dE$ ) در یک بازه‌ی معین ( $dx$ ) را قدرت ایستاندگی می‌نامند. ضخامت مورد نیاز هدف برای انجام واکنش و تولید محصول مورد نظر با استفاده از کد SRIM [5] محاسبه می‌شود. به طوری که ذره‌ی پرتابه‌ی فرودی، پروتون، با انرژی مشخص وارد هدف می‌شود و با افت انرژی از هدف خارج می‌شود. در واقع پروتون ورودی با انرژی ۱۲ مگاالکترون ولت وارد هدف و با انرژی ۵ مگاالکترون ولت از آن خارج می‌شود.

## ۳.۲. محاسبه بهره‌ی تولید $^{140}\text{Ce}(p,n)^{140}\text{Pr}$

بهره‌ی تولید واکنش به سه روش مورد بررسی قرار گرفته است، که برای محاسبه بهره‌ی تولید به روش نظری از رابطه‌ی ۱ در یک بازه‌ی مشخصی از انرژی استفاده می‌کنیم:

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

که در آن  $M$  جرم مولی ماده هدف،  $I$  جریان تابش پروتون،  $H$  درصد فراوانی هدف،  $t$  مدت زمان بمباران هدف،  $\sigma(E)$  سطح

### ۳. نتیجه گیری

در این تحقیق امکان سنجی و بهره‌ری تولید  $^{140}\text{Pr}$  از طریق واکنش  $^{140}\text{Ce}(p,n)^{140}\text{Pr}$  انجام گرفته است و پس از انتخاب بازه بهینه انرژی پرتابه پروتونی ۵-۱۲ مگا الکترون ولت، که دارای بیشینه سطح مقطع و کمینه آلودگی‌های ایزوتوپی و غیرایزوتوپی می‌باشد. از طرفی بنا بر پروژه‌ها و تحقیقات انجام شده در زمینه مطالعه‌ی تولید رادیوایزوتوپ‌ها توسط افراد و گروه‌های دیگر، معمولاً بهره‌ری تولید تجربی با بهره‌ری تولید حاصل از روش‌های شبیه سازی و انتگرالی مشابه بوده و با بهره‌ری تولید نظری اختلاف دارد، که این میزان اختلاف در بعضی از پروژه‌ها بیش‌تر و در بعضی کم‌تر است.

با توجه به موارد ذکر شده‌ی فوق و طبق جدول ۱ نتایج حاصل از کار ما هم در محاسبه‌ی بهره‌ری تولید به دو روش شبیه‌سازی و انتگرالی با هم در تطابق است و هر دوی آن‌ها با بهره‌ری تولید نظری کمی اختلاف دارد، که به‌نظر می‌رسد این اختلاف به دلیل این است که برای محاسبه‌ی بهره‌ری تولید، در روش نظری مقدار تابع توزیع به‌صورت شارپ (یک) در نظر گرفته شده است.

باقیمانده را با استفاده از کارت  $^1\text{Ftn res}$  در قالب تالی  $\text{F}\lambda$  محاسبه کرد، که در آن کد MCNPX از سطح مقطع‌های موجود در کتابخانه‌ی خود استفاده کرده و تعداد ایزوتوپ‌های باقی مانده را محاسبه می‌کند. که با استفاده از رابطه‌ی ۳ می‌توان به مقدار اکتیویته رسید که در آن  $N$  تعداد ایزوتوپ‌های باقیمانده،  $\lambda$  ثابت واپاشی هسته می‌باشد. و از آنجایی که بهره‌ری تولید برابر است با اکتیویته‌ی تولیدی نسبت به بار ذره‌ی فرودی و ذره‌ی فرودی ما پروتون است. و در نهایت بهره‌ری تولید بر حسب  $\text{Ci}/\mu\text{Ah}$  خواهد بود.

$$A = N\lambda \quad (3)$$

جدول (۱): بهره‌ری تولید در بازه انرژی پروتونی ۵-۱۲ مگا الکترون ولت.

واکنش	بهره تولید نظری ( $\text{Ci}/\mu\text{Ah}$ )	بهره تولید انتگرالی ( $\text{Ci}/\mu\text{Ah}$ )	بهره تولید شبیه‌سازی MCNP ( $\text{Ci}/\mu\text{Ah}$ )
$^{140}\text{Ce}(p,n)^{140}\text{Pr}$	۰/۰۴	۰/۲۰	۰/۲۱

### ۴. مراجع

- S. K. Zeisler, D. W. Becker. A new method for PET imaging of tumours: human serum albumin labeled with the long-lived Nd-140/Pr-1410 in vivo radionuclide generator. *Clin. Positron Imaging* 2 (6) (1999) 324.
- D. Nayak, S. Lahiri. Application of radioisotopes in the field of nuclear medicine. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 242 (1999) 423-432.
- M. Sadeghy, A. Ghanbarzade, M. Enferadi. Nuclear data for cyclotron production of  $^{140}\text{Nd}/^{140}\text{Pr}$  used in gamma camera monitoring, RIT, ERT and PET. *Kerntechnik* 75 (6) (2010) 363-368.
- A.J. Koning, S. Hilaire, M. C. Duijvestijn, TALYS-1.0. in Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology – ND2007, (EDP Sciences Volume 1, eds. O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge, R. Jacqmin and S. Leray, Apr. 22–27, 2007, Nice, France, 2008) pp. 211-214.
- J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, J. P. Biersack, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. B* 268 (2010) 1818.
- J. S. Hendricks, G. W. McKinney, M. L. Fensin, M. R. James, R. C. Johns, J. W. Durkee, J. P. Finch, D. B. Pelowitz, L. S. Waters, M. W. Johnson. MCNPX2.6.0 Extensions LA-UR-08-2216-Los Alamos National laboratory, 2008.

<sup>1</sup> residual