



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## بررسی بهره تولید مولیبدن-۹۹ از طریق بمباران پروتونی هدف اورانیوم طبیعی و

### توریوم-۲۳۲ با استفاده از روش شبیه سازی با کد MCNPX 2.6.0

زهره غلامزاده، معصومه علیزاده، عطیه جزء وزیری، امین داوری، سید محمد میروکیلی\*

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده راکتور

چکیده:

تولید مولیبدن ۹۹ که به طور گسترده ای در پزشکی هسته ای استفاده می شود علی رغم راکتورهای هسته ای، با استفاده از شتاب دهنده ها نیز انجام می پذیرد. در این کار، تولید مولیبدن ۹۹ بواسطه واکنش پروتون-شکافت در دو هدف توریوم و اورانیوم طبیعی با استفاده از یک شتاب دهنده پروتون با روش شبیه سازی با کد هسته ای MCNPX 2.6.0 بررسی شده است. نتایج محاسبات نشان می دهد در اثر تابش دهی هدف توریوم با ضخامت بهینه  $65 \mu\text{m}$  با استفاده از باریکه  $30 \mu\text{A}$  و انرژی  $\text{MeV}$  ۲۰ به میزان  $4/\text{cmCi/h}$  مولیبدن ۹۹ تولید می گردد. همچنین بهره تولید مولیبدن ۹۹ از هدف توریوم حدود ۳ برابر اورانیوم خواهد بود. از طرفی نتایج شبیه سازی با اختلاف نسبی کمتر از ۴٪ همخوانی خوبی با داده های تجربی دارد.

کلید واژه: بهره تولید مولیبدن ۹۹، شبیه سازی، کد MCNPX 2.6.0، واکنش پروتون-شکافت، توریوم، اورانیوم طبیعی

مقدمه

داده های تجربی به دست آمده توسط آنها نشان می دهد، برای انرژی پروتون  $22 \text{MeV}$  و حدود  $40 \text{MeV}$ ، بازده تولید  $^{99}\text{Mo}$  به ترتیب  $3/6 \text{MBq}/\mu\text{A.h}$  و  $21 \text{MBq}/\mu\text{A.h}$  بود [۱]. لبد<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۰ از روش  $^{99}\text{Mo}(\text{d},\text{x})^{99}\text{Mo}$ ، برای تولید مولیبدن ۹۹ استفاده کرده اند. نتایج حاصل از کار آنها نشان داده است که با استفاده از دوترون های  $20 \text{MeV}$ ، بازده تولید رادیوایزوتوپ مورد نظر  $8 \text{MBq}/\mu\text{A.h}$  خواهد بود [۲]. قداش<sup>۲</sup> و همکارانش سطح مقطع واکنش  $^{99}\text{Mo}(\text{d},\text{x})^{99}\text{Mo}$  و  $^{99}\text{Mo}(\text{p},\text{x})^{99}\text{Mo}$  را در انرژی های مختلف اندازه گیری کرده اند. نتایج حاصل از کار آنها نشان می دهد که پروتون با انرژی  $30 \text{MeV}$  بهره تولیدی حدود  $5/92 \text{MBq}/\mu\text{A.h}$  را ایجاد خواهد کرد. همچنین دوترون با انرژی  $33 \text{MeV}$  بهره تولیدی حدود  $3 \text{MBq}/\mu\text{A.h}$  را ایجاد خواهد کرد [۳]. سابلنیکوف<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۶ از روش  $^{100}\text{Mo}(\gamma,\text{n})^{99}\text{Mo}$  برای تولید این رادیوایزوتوپ استفاده کرده اند. نتایج حاصل از کار آنها نشان می دهد بهره تولید مولیبدن ۹۹ با این روش به ازای هر میلی گرم  $3/2^{100}\text{Mo}$  برابر  $\text{Bq}/\mu\text{A.h}$  است [۴].

روش کار

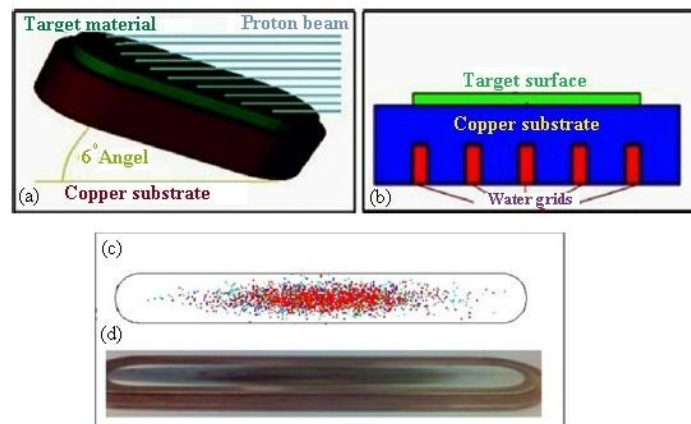
<sup>1</sup>Lebeda  
<sup>2</sup>Ghodash  
<sup>3</sup>Sabelnikov



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

دو هدف تورنیوم-۲۳۲ و اورانیوم طبیعی با ضخامت‌های متغیر توسط کد MCNPX2.6.0 شبیه سازی شدند [۵]. از کد SRIM برای تعیین بیشینه ضخامت مورد نیاز هدف‌های مذکور استفاده گردید [۶]. بهره تولید مولیبدن ۹۹ در بازه انرژی پروتون ۳۰-۱۵ MeV برای هدف‌های مدل شده در ضخامت‌های مختلف محاسبه گردید. از کارت HISTP برای حل معادلات بتمن با استفاده از کتابخانه CINDER90 به منظور محاسبه بهره مولیبدن ۹۹ در هر یک از ماده‌های هدف مدل شده استفاده گردید. گرمای به‌جای مانده در ماده هدف و زیرلایه مسی با استفاده از کد MCNPX 2.6.0 محاسبه شد. از کارت تالی F6 برای محاسبه گرمای به‌جای مانده استفاده شد. ضخامت بهینه هدف تورنیوم و اورانیوم مدل شده بر مبنای حصول بیشترین بازده تولید پیشنهاد گردید. پروفایل باریکه پروتونی سیکلوترون CYCLON30 و نگهدارنده هدف آن مطابق شکل (۱) مدل شد.



شکل ۱- هدف مدل شده توسط کد MCNPX 2.6.0 (a) نحوه قرارگیری هدف ضمن بمباران (b) معرفی قسمت‌های مختلف هدف مدل شده (c) معرفی پروفایل باریکه بر روی هدف مدل شده (d) پروفایل باریکه واقعی تابش‌دهی شتابدهنده CYCLON30

نتایج حاصل از شبیه سازی در این کار با سایر داده‌های موجود تئوری و تجربی مقایسه گردید. از مدل فیزیکی INCL4/ABLA برای محاسبات استفاده شده است.

بحث و نتایج

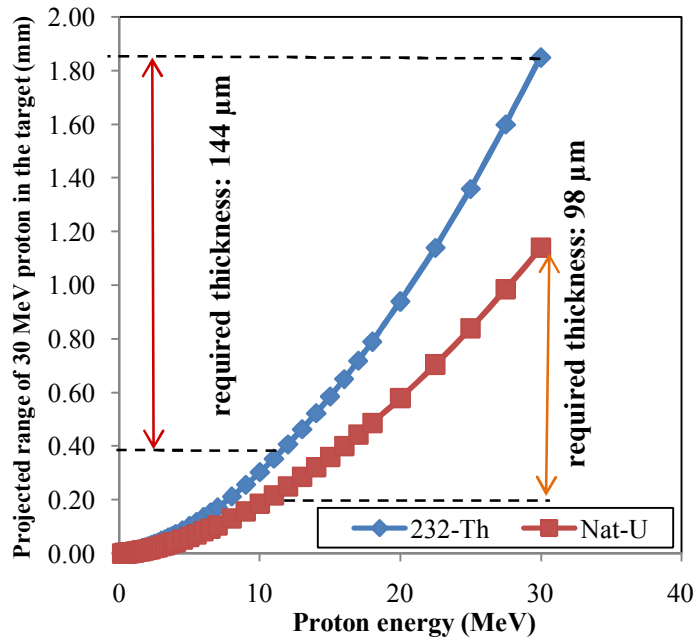
نتایج حاصل از محاسبات کد SRIM نشان می‌دهد که بیشینه ضخامت هدف تورنیوم برای بازه انرژی MeV ۳۰→۱۲ (مطابق بازه سطح مقطع مناسب واکنش پروتون-شکافت در دو هدف مدل شده) ۱۴۴ μm و برای هدف اورانیوم طبیعی ۹۸ μm است (شکل ۲). همچنین بررسی بهره تولید مولیبدن ۹۹ در ضخامت متغیر هدف‌های مدل شده نشان داد که بیشینه بهره تولید مولیبدن ۹۹ از هدف تورنیوم در ضخامت حدود ۶۵ μm و از هدف اورانیوم در ضخامت حدود ۱۸ μm حاصل می‌شود (شکل ۳-۵). محاسبه بهره تولید مولیبدن ۹۹ با بمباران هدف دارای ضخامت بهینه و انرژی ۲۰ MeV نشان می‌دهد که بهره تولید در هدف تورنیوم به دلیل سطح مقطع بیشتر واکنش و



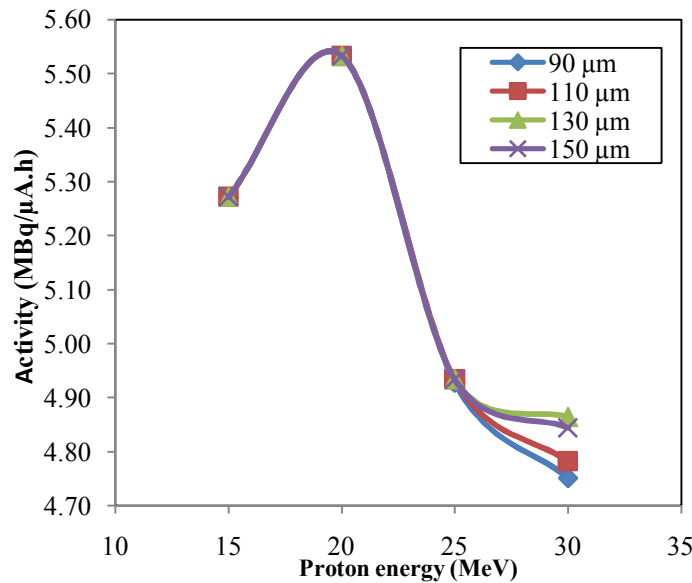
# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نیز ضریب انتقال حرارت بیشتر و در نتیجه تحمل جریان‌های بالاتر می‌تواند حدود ۳ برابر هدف اورانیوم باشد (جدول ۱).



شکل ۲- برد پروتون ۳۰ MeV در دو هدف تورنیوم و اورانیوم طبیعی

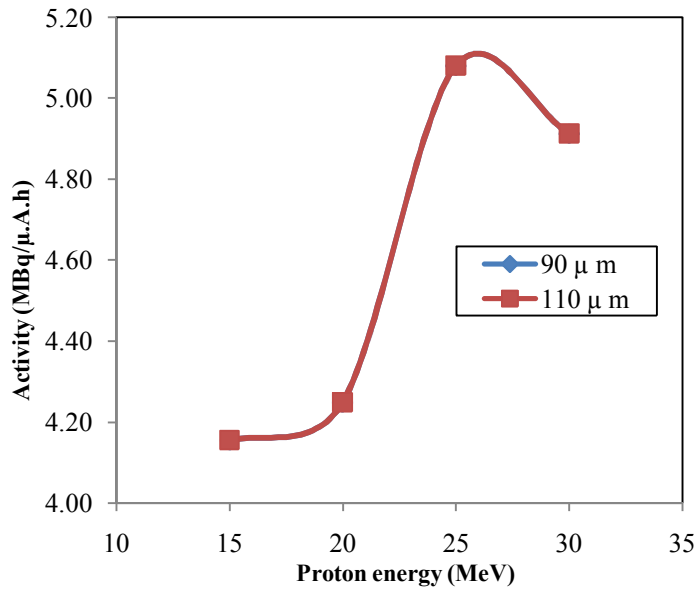


شکل ۳- مقایسه بهره تولید مولیبدن ۹۹ در هدف تورنیوم در انرژی‌های مختلف پرتابه پروتون و ضخامت‌های مختلف هدف

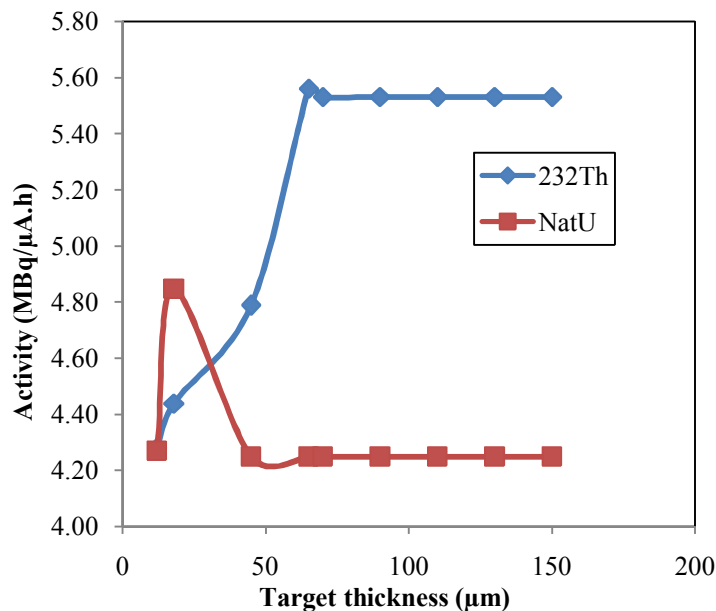


# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۴- مقایسه بهره تولید مولیبدن ۹۹ در هدف اورانیوم طبیعی در انرژی‌های مختلف پرتابه پروتون و ضخامت‌های مختلف هدف



شکل ۵- مقایسه بهره تولید مولیبدن ۹۹ در هدف اورانیوم طبیعی و توریم ۲۳۲ در انرژی‌های مختلف پرتابه پروتون و ضخامت‌های مختلف هدف

جدول ۱- مقایسه پارامترهای فیزیکی و بهره تولید مولیبدن ۹۹ در دو ماده هدف مدل شده



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$^{232}\text{Th}$	$^{235/238}\text{U}$	مشخصات فیزیکی
۶۵	۱۸	ضخامت ( $\mu\text{m}$ )
۵۴	۲۷	رسانایی گرمایی [15] ( $\text{W/mK}$ )
۱۷۵۰	۱۱۳۵	دمای ذوب [15] ( $^{\circ}\text{C}$ )
۱۰۷۷	۹۳۸	دمای میانگین ( $^{\circ}\text{C}$ )
۳۰	۳۰	جریان پروتون ( $\mu\text{A}$ )
۴/۵	۳/۹	بهره تولید $^{99}\text{Mo}$ ( $\text{mCi/h}$ )

هدف مورد استفاده در کار عباس و همکارانش توسط کد مدل شد. نتایج محاسبات نشان داد همخوانی خوبی بین بهره تولید محاسبه شده توسط کد و بهره تولید تجربی حاصل از کار این گروه با اختلاف نسبی کمتر از ۴٪ وجود دارد (بهره تجربی:  $3.7 \pm 0.3 \text{ MBq}/\mu\text{A.h}$ ، بهره تئوری:  $3.7 \pm 0.3 \text{ MBq}/\mu\text{A.h}$ ). در جدول ۲، مقایسه‌ای بین بهره تولید مولیبدن ۹۹ با استفاده از روش‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طوریکه مشاهده می‌شود، بهره تولید به روش پروتون-شکافت با سایر روش‌ها به خوبی رقابت می‌کند.

جدول ۲- مقایسه بهره تولید مولیبدن ۹۹ با روش‌های مختلف

واکنش	انرژی ورودی (MeV)	انرژی خروجی (MeV)	بهره $^{99}\text{Mo}$ تولید ( $\text{MBq}/\mu\text{A.h}$ )	مرجع
$^{nat}\text{Mo}(p,x)^{99}\text{Mo}$	۳۰	۰	۵/۹۲	[3], Experimental
$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$	□		۳/۰۲۹	[7]
$^{nat}\text{Mo}(d,x)^{99}\text{Mo}$	۲۲	۰	۸/۲۸	[3], Experimental
$^{232}\text{Th}(p, fission)^{99}\text{Mo}$	۲۵	۰	۵/۲۰	[1], Extrapolated experimental CS
This work, $^{232}\text{Th}(p, fission)^{99}\text{Mo}$	۲۵	۰	$4.93 \pm 0.29$	
This work, $^{235/238}\text{U}(p, fission)^{99}\text{Mo}$	۲۵	۰	$5.08 \pm 0.10$	

نتیجه گیری

روش تولید مولیبدن ۹۹ با استفاده از شتابدهنده می‌تواند به صورت کارآمد توسط مراکز پزشکی مورد استفاده قرار گیرد. بهره تولید مولیبدن ۹۹ با استفاده از تابش دهی هدف توریوم-۲۳۲ حدود ۱۵٪ بیشتر از



# بیست و یکمین کنفرانس هفت‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

به‌کارگیری هدف اورانیوم طبیعی است. با تابش‌دهی ۱۰۰ ساعت تابش‌دهی تورنیوم-۲۳۲ منجر به تولید  $450\text{mCi}$  مولییدن ۹۹ خواهد شد.

مراجع

1. Kamel Abbas, UweHolzwarth, Federica Simonelli, Jan Kozempel, IzabelaCydzik, Antonio Bulgheroni, GiulioCotogno, Christos Apostolidis, Frank Bruchertseifer, Alfred Morgenstern, Feasibility of  $99\text{Mo}$  production by proton-induced fission of  $232\text{Th}$ , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 278 (2012) 20–25
2. OndřejLebeda , MarekFikrle, New measurement of excitation functions for (d, x) reactions on  $^{nat}\text{Mo}$  with special regard to the formation of  $95\text{mTc}$ ,  $96\text{m}+g\text{Tc}$ ,  $99\text{mTc}$  and  $99\text{Mo}$ , Applied Radiation and Isotopes 68 (2010) 2425–2432
3. P. Chodash, C.T. Angell, J.Benitez, E.B. Norman, M.Pedretti, H.Shugart, E. Swanberg , R.Yee, Measurement of excitation functions for the  $^{nat}\text{Mo}(d,x)^{99}\text{Mo}$  and  $^{nat}\text{Mo}(p,x)^{99}\text{Mo}$  reactions, Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1447–1452
4. A. V. Sabel'nikov, O. D. Maslov, L. G. Molokanova, M. V. Gustova, and S. N. Dmitriev Preparation of  $99\text{Mo}$  and  $99\text{mTc}$  by  $100\text{Mo}(\gamma, n)$  Photonuclear Reaction on an Electron Accelerator, MT-25 Microtron Radiochemistry, 2006, Vol. 48, No. 2, pp. 191\_194.
5. Pelowitz DB (2008) Users' manual versión of MCNPX2.6.0, LANL, LA-CP-07-1473
6. Ziegler JF, Ziegler MD, Biersack JP, (2008) the code of SRIM–the Stopping and Range of Ions in Matter. IBM Research, New York, USA.
7. A. V. Sabel'nikov, O. D. Maslov, L. G. Molokanova, M. V. Gustova, and S. N. Dmitriev, Preparation of  $99\text{Mo}$  and  $99\text{mTc}$  by  $100\text{Mo}(\gamma, n)$  Photonuclear Reaction on an Electron Accelerator, MT-25 Microtron, Radiochemistry, 2006, Vol. 48, No. 2, pp. 191\_194.