



Investigation on neutron source production using laser proton accelerator

Golrokh, Hanie sadat¹; Kasesaz, Yaser²; Rahmani, Faezeh³

¹ Shahrood University of technology, Physics Department

² Nuclear Science and Technology Research Institute

³KNT university of Technology

Abstract: Development of neutron applications in medicine and industry required non-reactor and safe neutron source. In this research the investigation has been performed to produce a neutron source based on the use of proton laser accelerator and ^9Be and ^7Li target via (p,n) reaction. In this way, considering the Titan laser-based proton beam, the neutron yield and its angular distribution have been calculated using MCNPX Monet Carlo code, the results show that neutron yield of ^9Be is greater than ^7Li and its optimum thickness is between 2 and 4 mm.



بررسی ایجاد چشمه‌های نوترونی با استفاده از شتابدهنده لیزری پروتون

گلرخ، هانیه سادات*^(۱) - کاسه ساز، یاسر^(۲) - رحمانی، فائزه^(۳)

^۱دانشگاه شاهرود، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

^۲سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشگاه راکتور و ایمنی هسته‌ای

^۳دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای

چکیده:

توسعه کاربردهای نوترون در صنعت و پزشکی نیازمند دستیابی به چشمه‌های نوترونی ایمن و غیر راکتوری است. در این تحقیق امکان استفاده از یک باریکه پروتونی شتاب داده شده توسط لیزر به منظور تولید یک چشمه نوترونی از طریق اندرکنش (p,n) برای دو هدف بریلیوم و لیتیوم مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور با در نظر گرفتن طیف پروتونی اندازه گیری شده در لیزر تیتان و یافتن بهترین ضخامت برای هدف، طیف نوترونی حاصل از هدف بهینه محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که بریلیوم نسبت به لیتیوم از بهره تولید نوترونی بالاتری برخوردار است. و ضخامت بهینه آن بین ۴ تا ۶ میلی‌متر می‌باشد.

کلمات کلیدی: چشمه نوترون، بهره نوترونی، شتاب دهنده پروتون، لیزر تیتان، بریلیوم.

مقدمه:

یکی از محدودیت‌های موجود در توسعه کاربردهای مختلف نوترون مربوط به پیچیدگی، ایمنی و هزینه چشمه‌های نوترونی است. چشمه‌های تولید کننده نوترون شامل مولدهای نوترون، شتابدهنده‌ها، رادیوایزوتوپ‌ها و راکتورهای تحقیقاتی می‌باشد که در کاربردهای مختلفی از جمله رادیوگرافی نوترونی [۱]، نوترون درمانی [۲-۳]، مطالعه مواد [۴]، تولید انواع رادیوداروها [۵] و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از چشمه‌های نوترونی خاص، شتابگرهای لیزری هستند [۶] که در آنها با استفاده از یک لیزر با پالس‌های بسیار کوتاه و محدوده توانی بسیار بالا و همچنین استفاده از ورقه‌های نازک سانا می‌توان پروتون را تا چند ده مگا الکترون ولت شتاب داد [۷]. این روش به دلیل تولید پروتون‌هایی با انرژی بالاتر، اشغال فضای کمتر و سیستم ساده‌تر و هزینه کمتر نسبت به دیگر چشمه‌های تولیدکننده نوترون ارجحیت دارد [۸]. کاربردهای این نوع شتابگرها بسیار متنوع و در حال گسترش است [۹]. هیگینسن و همکارانش [۱۰] آزمایشی برای تولید یک منبع نوترونی با استفاده از یک لیزر شتابدهنده باریکه پروتونی ارائه دادند که در آن از یک لیزر تیتان با طول موج ۱۰۴۵ نانومتر و تمرکز بسیار بالایی (قطر لکه ۷ میکرومتر با ۲۰ درصد از انرژی) و نیز طول پالس‌های بسیار کوتاه در حد ۰/۷ پیکوثانیه استفاده شده است. این لیزر بر روی یک فویل مسی با ضخامت ۲۵ میکرومتر متمرکز شده است. طیف پروتونی این سیستم اندازه‌گیری شده است که شکل این طیف از نظر ریاضی توسط یک تابع ماکسولی دو دمایی مطابق رابطه ۱ تا ۳ بیان می‌شود، پارامترهای N_1 ، N_2 ، T_1 و T_2



تابت‌هایی هستند که جهت برازش منحنی بر طیف اندازه‌گیری شده به کار می‌روند و مقادیر آنها در رابطه‌های ۲ و ۳ داده شده است [۱۰].

$$dN/d\varepsilon = \left(N_1/\sqrt{\pi\varepsilon T_1}\right)e^{-\varepsilon/T_1} + \left(N_2/\sqrt{\pi\varepsilon T_2}\right)e^{-\varepsilon/T_2} \quad (۱)$$

$$T_1 = 2.9\text{MeV}, N_1 = 4.34 \times 10^{13} \quad (۲)$$

$$T_2 = 10.27\text{MeV}, N_2 = 5.44 \times 10^{12} \quad (۳)$$

تعداد کل پروتون‌ها در هر پالس حدود $2.7e13$ است [۱۰]. در تحقیق پیش رو با در نظر گرفتن این باریکه پروتونی و هدف‌هایی از جنس لیتیوم و بریلیوم، ضخامت هدف بهینه برای تولید بیشترین تعداد نوترون با انرژی پایین مورد مطالعه قرار گرفته است. محاسبات توسط کد MCNPX 2.7e انجام شده است.

روش کار:

جدول (۱) برخی ویژگی‌های لیتیوم و بریلیوم را که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، نشان می‌دهد. از آنجا که باریکه نوترون‌های کم انرژی کاربرد بیشتری دارند، لذا معیار بهینه‌سازی هدف در این پژوهش داشتن بالاترین بهره نوترونی و کمترین انرژی نوترونی ممکن در نظر گرفته شد و در پایان طیف انرژی نوترون برای چهار حالت بهینه محاسبه شد.

جدول (۱) برخی ویژگی‌های لیتیوم و بریلیوم

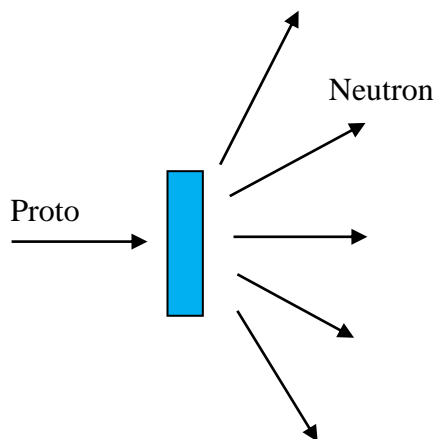
ظرفیت گرمایی ویژه $Jkg^{-1}T^{-1}$	جرم اتمی	فراوانی	ایزوتوپ
۳۵۸۲	۷/۰۱۶	۹۲/۴۱	لیتیوم-۷
۱۸۲۵	۹/۰۱۲	۱۰۰	بریلیوم-۹

شکل (۱) هندسه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. جهت محاسبه بهره تولید نوترون و انرژی نوترون به ترتیب از تالی $F1:n$ و $*F11:n$ روی سطح کره اطراف هدف استفاده شد.

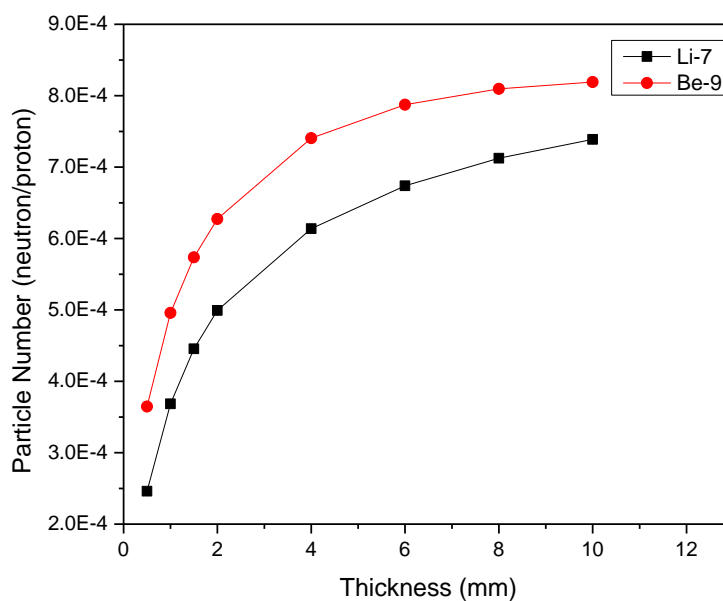
نتایج:

شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب بهره تولید نوترون و انرژی میانگین نوترون‌های تولیدی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، مقدار این دو کمیت برای هدف بریلیومی بالاتر از هدف لیتیومی است. همچنین مشاهده می‌گردد که از ضخامت حدود ۶ میلی‌متر تغییرات چشمگیری در تولید نوترون دیده نمی‌شود البته شیب تغییرات لیتیوم همچنان رو به افزایش است لذا ممکن است با بریلیوم در ضخامت‌های بالاتر برابری کند اما به دلیل پایین بودن دمای ذوب لیتیوم، نمی‌تواند هدف مناسبی برای تولید یک چشمه

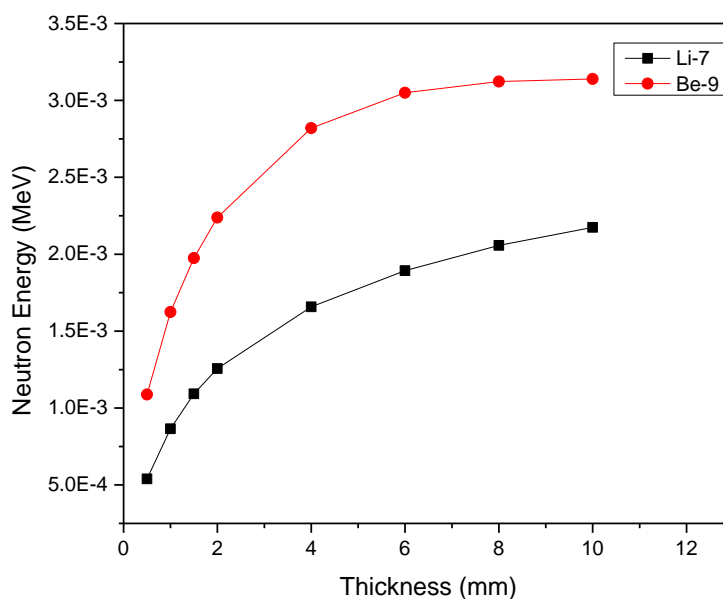
نوترون باشد، لذا برلیوم با ضخامت ۴ تا ۶ میلی‌متر در شعاع ۵/۵ میلی‌متر را به عنوان مناسب‌ترین هدف نسبت به لیتیوم برای تولید نوترون با استفاده از شتابدهنده‌ی لیزری پروتون انتخاب کرد.



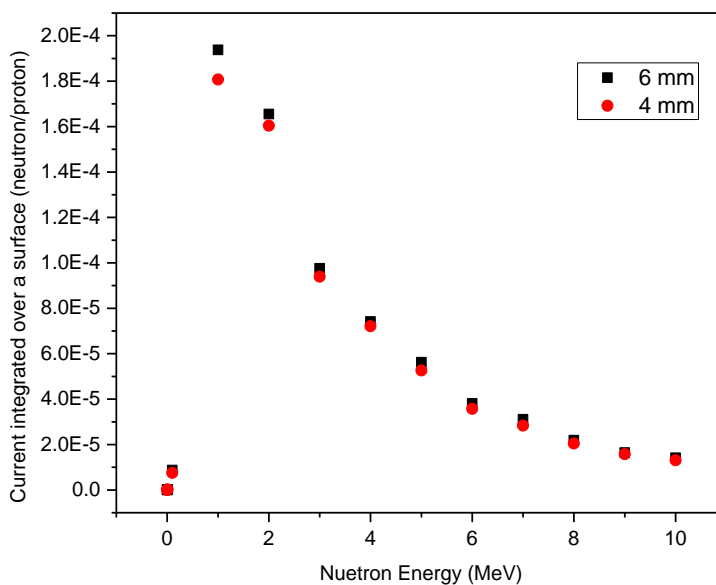
شکل (۱) هندسه شبیه‌سازی شده هدف مولد نوترون



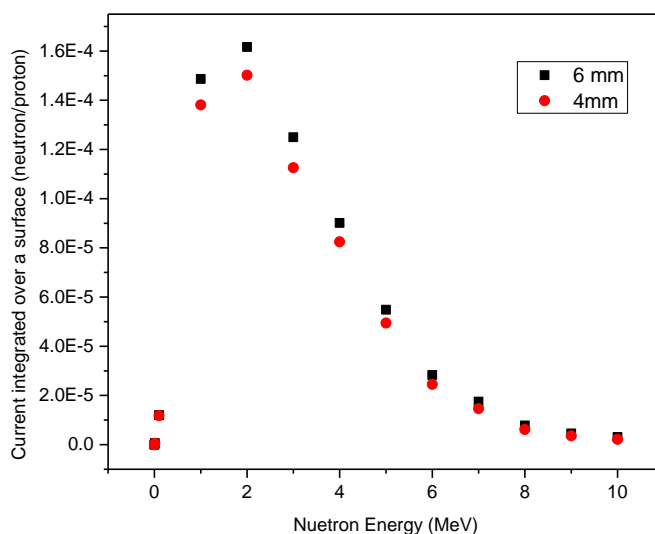
شکل (۲) بهره تولید نوترون به ازای ضخامت‌های مختلف هدف‌های لیتیومی و برلیومی



شکل (۳) انرژی میانگین نوترون به ازای ضخامت‌های مختلف هدف های لیتیومی و بریلیومی شکل‌های (۴) و (۵) طیف انرژی پروتون را برای دو هدف با ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، طیف نوترون‌های خروجی در انرژی‌های پایین دارای قله است.

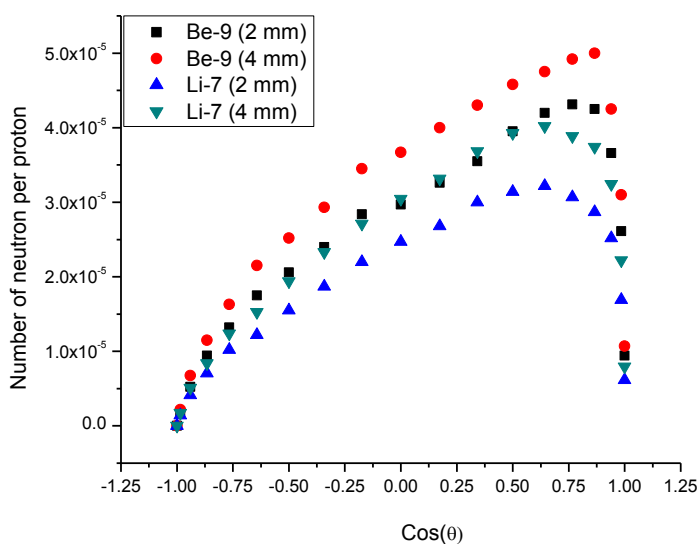


شکل (۴) طیف انرژی نوترون خروجی از هدف بریلیومی با ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متر



شکل (۵) طیف انرژی نوترون خروجی از هدف لیتیومی با ضخامت ۴ و ۶ میلی متر

شکل (۶) توزیع زاویه‌ای نوترون‌های تولیدی از هدف‌های مورد نظر با ضخامت ۴ و ۶ میلی متر را نسبت با باریکه فرودی نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت سهمی نوترون‌های رو به جلو بیشتر از نوترون‌هایی است که به سمت عقب حرکت می‌کنند. به در نظر گرفتن یک بازتابنده مناسب می‌توان اکثر نوترون‌ها را به سمت جلو هدایت نمود.



شکل (۶) توزیع زاویه‌ای نوترون‌های تولید شده



بحث و نتیجه گیری:

امروزه شتابدهنده‌های لیزری مورد توجه قرار گرفته‌اند و به شدت در حال توسعه هستند. یکی از کاربردهای مهم این شتابگرها ایجاد چشمه‌های نوترونی ایمن و قابل نصب در محل‌های عمومی است. در این تحقیق با در نظر گرفتن شتابگر لیزری تیتان، شرایط ایجاد یک چشمه نوترونی مورد مطالعه قرار گرفت. به طور کلی لیتیوم با آستانه انرژی پایین و بهره تولید نوترونی بالا به عنوان یک چشمه نوترونی مطرح است اما به دلیل ویژگی‌های شیمیایی و حرارتی ضعیفی که دارد طراحی یک چشمه نوترونی لیتیومی کار آسانی نخواهد بود. در این صورت می‌توان از بریلیم به دلیل داشتن ویژگی‌های شیمیایی و حرارتی خوب و بهره تولید نوترونی مناسب به عنوان یک چشمه تولید کننده نوترون استفاده کرد. بزرگترین برتری بریلیم نسبت به لیتیوم طراحی، ساخت، اجرا و عملیاتی کردن یک هدف و نگهداری آسان می‌باشد.

مراجع :

1. Viererbl, L., et al., *Neutron radiography facility on the LWR-15 research reactor*. 2014.
2. Peters, L., et al., *Second preliminary report of the MD Anderson study of neutron therapy for locally advanced gynecological tumors*. High LET Radiation in Clinical Radiotherapy; Suppl. Eur. J. Cancer. G, 2013: p. 3-10.
3. Sardjono, Y., et al., *Comparison Study of Beryllium and Lithium Target System for Beam Shaping Assembly Used in Boron Neutron Capture Therapy*. 2015.
4. Seviour, R., I. Bailey, and H. Owen, *Compact accelerator based neutron source for ^{99m}Tc production*. 2016.
5. Bobrikov, I., et al., *Structural evolution in LiFePO₄-based battery materials: In-situ and ex-situ time-of-flight neutron diffraction study*. Journal of Power Sources, 2014. **258**: p. 356-364.
6. Roth, M., *Neutron generation by laser-driven proton sources*. Reza Kenkyu, 2015. **43**(2): p. 93-97.
7. Daido, H., M. Nishiuchi, and A.S. Pirozhkov, *Review of laser-driven ion sources and their applications*. Rep Prog Phys, 2012. **75**(5): p. 056401.
8. Hofmann, K.M., et al., *A treatment planning study to assess the feasibility of laser-driven proton therapy using a compact gantry design*. Medical physics, 2015. **42**(9): p. 5120-5129.
9. Fourkal, E., et al., *Intensity modulated radiation therapy using laser-accelerated protons: a Monte Carlo dosimetric study*. Physics in medicine and biology, 2003. **48**(24): p. 3977.
10. Higginson, D., et al., *Laser generated neutron source for neutron resonance spectroscopy*. Physics of plasmas, 2010. **17**(10): p. 100701.