



طراحی چشمه فوتونوترون با استفاده از شتابدهنده خطی الکترون با انرژی ۵ و ۱۰ MeV

تاتاری، منصوره*^(۱)، گودارزی، پژمان^(۱)

^۱ دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته ای

چکیده:

در این مقاله با در نظر گرفتن الکترون‌های با انرژی ۵ و ۱۰ مگاالکترون ولت تولید شده از شتابدهنده خطی الکترون، چشمه فوتونوترون طراحی شده که در آن از تنگستن و آب سنگین استفاده شده است. آب سنگین به عنوان ماده خنک‌کننده نیز استفاده می‌شود. با استفاده از کد MCNPX هندسه مواد، بهینه‌سازی گردید. با استفاده از روش خنک‌سازی جت آب، تغییرات دمای تنگستن بر حسب تغییر شدت جریان الکترون و تغییر سرعت آب خنک‌کننده محاسبه شده است. با به‌کارگیری ابعاد بهینه هدف‌ها، فوتونوترون‌های تولید شده برابر با $1.9 \times 10^{10} \frac{n}{mA.s}$ با انرژی متوسط 0.05 MeV برای الکترون‌های 5 MeV و $1.25 \times 10^{11} \frac{n}{mA.s}$ با انرژی متوسط 0.16 MeV برای الکترون‌های 10 MeV محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: شتابدهنده الکترون، فوتونوترون، آب سنگین، خنک‌سازی به روش جت آب، کد MCNPX

Design of a photoneutron source using 5 and 10 MeV electron linac

Tatari, Mansoureh, Goudarzi, Pejman

Affiliation: Yazd University, Faculty of Science, Physics Department

Abstract:

In this paper, a photo-neutron source using 5 and 10 MeV electrons from a linear accelerator has been designed that tungsten and heavy water are used in this design. Heavy water is also used as a heat exchange medium. The Monte Carlo code MCNPX has been used to optimize the target's geometry. The jet impingement cooling method was used to obtain the temperature of tungsten target versus the electron current and also the velocity of heavy water coolant. Applying the optimized dimensions of the targets, the neutron yield was found to be 1.9×10^{10} and 1.25×10^{11} n/mA/s for 5 and 10 MeV electrons, respectively.

Keywords: Electron accelerator, Photoneutron, Heavy water, jet impingement cooling method, MCNPX code

مقدمه:

کاربردهای روزافزون نوترون در زمینه‌های مختلف علوم، پزشکی، صنعت و غیره، توجه جامعه علمی به تحقیق در زمینه روش‌های نوین تولید نوترون را افزایش داده است. در کنار راکتورها، شتابدهنده‌ها نیز به یکی از ابزار مهم تولید نوترون



تبدیل شده‌اند که با استفاده از آن‌ها نوترون از طریق تلاشی و یا واکنش‌های فوتوهسته‌ای تولید می‌شود. تحقیقات بر پایه طراحی و تولید چشمه فوتونوترون با استفاده از شتابدهنده‌های الکترون از سال ۱۹۵۰ شروع شده است و هم‌چنان در حال پیشرفت است [۱-۳]. از مزایای تولید فوتونوترون با استفاده از شتابدهنده نسبت به چشمه‌های رادیواکتیو می‌توان تولید نوترون با شدت بالا، امکان خاموش کردن بدون نیاز به حفاظ‌سازی، شدت پرتو گامای آلودگی (پرتوهای گامای مخلوط با نوترون) کم و غیره را نام برد. تحقیقاتی بر روی تولید فوتونوترون با استفاده از آب سنگین انجام شده است [۴-۶]. با استفاده از کد MCNP فوتونوترون تولید شده از آب سنگین با استفاده از الکترون‌های 10 MeV شتابدهنده خطی شبیه‌سازی شده که قابل مقایسه با نتایج تجربی است [۷]. در فرآیند تولید فوتونوترون، هندسه و خواص هدف تولید فوتون و هدف تولید نوترون تاثیر زیادی در شار نوترون تولیدی دارند. انرژی فوتون برای غلبه بر انرژی بستگی نوترون‌ها در هدف تولید فوتونوترون و سطح مقطع تولید فوتونوترون دارای اهمیت زیادی هستند. واکنش‌های ${}^2\text{D}(\gamma, n){}^1\text{H}$ و ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ دارای کم‌ترین مقدار انرژی آستانه برای تولید فوتونوترون هستند و هم‌چنین سطح مقطع این مواد برای تولید فوتونوترون توسط محققان زیادی به دست آمده است [۸-۱۰]. مقدار زیادی از انرژی الکترون‌های فرودی در هدف تولید فوتون تبدیل به گرما می‌شود و سبب افزایش دمای آن شده و می‌تواند بر خواص آن تاثیر بگذارد. در سال‌های اخیر برای حذف حرارت ایجاد شده در هدف، استفاده از تکنیک جت مایع مورد بررسی قرار گرفته که در آن مایع خنک کننده به سمت نازل جهت‌گیری می‌شود و بر روی هدف تریق می‌شود [۱۱]. در این مقاله از کد MCNPX برای طراحی چشمه فوتونوترون استفاده شده است [۱۲]. تنگستن به عنوان هدف تولید فوتون و آب سنگین به عنوان هدف تولید فوتونوترون و هم‌چنین به عنوان سیال انتقال‌دهنده حرارت تولید شده در تنگستن، به کار می‌رود. در اطراف این چشمه فوتونوترون، از بریلیم به عنوان بازتابنده نوترون‌ها و مبدل فوتون‌های باقیمانده به نوترون استفاده می‌شود. هم‌چنین روش جت مایع برای خنک‌سازی هدف تنگستن با به کارگیری نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است.

روش کار:

برای به دست آوردن فوتون‌های تابش ترمزی از یک قطعه تنگستن به شکل استوانه استفاده می‌شود. برای بیشینه کردن فوتون‌های تابش ترمزی، با استفاده از کد MCNPX ابعاد تنگستن بهینه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی‌ها باریکه الکترونی با شعاع 1 cm که دارای توزیع یکنواخت است در نظر گرفته می‌شود. در شعاع ثابت 1 cm تنگستن، تغییرات فوتون تولید شده در برابر تغییر ضخامت هدف برای الکترون‌های با انرژی 5 MeV و 10 MeV شبیه‌سازی می‌شود. به‌طور مشابه، در این ضخامت بهینه هدف، تغییرات فوتون تولید شده در برابر تغییر شعاع هدف بررسی می‌شود. بریلیم با انرژی آستانه 1 MeV و دوتریوم با انرژی آستانه $2/226 \text{ MeV}$ در بین مواد کم‌ترین انرژی آستانه را دارند. ابعاد هدف تولید نوترون به



همان روش هدف تولید فوتون بهینه شده است. یکی از آلودگی‌های باریکه نوترون، تابش گاما است. با پوشاندن چشمه نوترون با یک مبدل مناسب γ -n و یا یک بازتابنده می‌توان شار نوترون را افزایش داد [۱۳ و ۱۴]. چنانچه در شکل (۱) نشان داده شده است، از چند بازتابنده به صورت مخروطی شکل برای موازی کردن نوترون‌ها استفاده شده است. ماده بازتابنده باید دارای سطح مقطع کوچک جذب نوترون و سطح مقطع بزرگ پراکندگی نوترون باشد، هم‌چنین می‌توان از ماده‌ای در اطراف چشمه فوتونوترون استفاده کرد که سطح مقطع جذب نوترون آن کوچک باشد و انرژی آستانه تولید فوتونوترون در آن نیز کم باشد به طوری که فوتون‌های آلودگی قابلیت تولید فوتونوترون در آن را داشته باشند. گرافیت و سرب و بریلیوم به عنوان مواد بازتابنده انتخاب شده‌اند.

فلز تنگستن در محیط خشک و مرطوب فقط در دماهای نسبتاً پایین پایدار است و حدوداً در دمای 400°C اکسید می‌شود. لایه اکسید تشکیل شده ضخیم نمی‌باشد و باعث جلوگیری از فرآیند اکسید شدن نمی‌شود. در دماهای بالاتر از 700°C آهنک اکسید شدن افزایش خواهد یافت و در دماهای بالاتر از 900°C تنگستن شروع به تصعید می‌کند. وجود رطوبت در هوا نیز باعث افزایش سرعت فرآیند اکسید شدن می‌شود. اگرچه تنگستن فلزی با دمای ذوب بالا است ولی حساسیت آن به اکسید شدن یکی از معایب آن می‌باشد. قطعه تنگستن با آب مایع واکنش نمی‌دهد ولی در دمای حدوداً 600°C وجود بخار آب سبب واکنش اکسیداسیون در آن می‌شود [۱۵]. برای محاسبه حرارت تولید شده توسط الکترون‌های فرودی به تنگستن از تالی F6 کد MCNPX استفاده شده است. مقدار انرژی تولید شده در این قطعه برای الکترون‌های فرودی 5 MeV برابر با $3/50111\text{ MeV/e}$ و برای الکترون‌های 10 MeV برابر با $7/01998\text{ MeV/e}$ محاسبه شده است. برای دستیابی به بالاترین میزان جریان الکترون که به ازای آن قطعه تنگستن ذوب نمی‌شود یک مدل خنک‌سازی شبیه‌سازی شده است. در سیستم تولید نوترون از آب سنگین به عنوان هدف تولید نوترون و هم‌چنین سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود. به منظور جلوگیری از بخار شدن آن و واکنش اکسیداسیون، دمای قطعه تنگستن باید پایین‌تر از دمای نقطه بخار آب سنگین باقی بماند. یکی از موثرترین روش‌ها برای خنک‌سازی قطعه استفاده از تکنیک جت آب می‌باشد. از مزایای این روش خنک‌سازی می‌توان به ضریب انتقال حرارت بالا و توانایی در کنترل نرخ انتقال حرارت قطعه به وسیله عواملی مانند سرعت و آرایش جت‌های آب نام برد. به منظور جلوگیری از واکنش اکسیداسیون در قطعه تنگستن باید یک محدودیت دمایی برای آن در نظر گرفت. به منظور به دست آوردن میدان دما در قطعه تنگستن معادله بقای انرژی در قطعه به صورت روابط

$$q_{\text{tungsten-wall}}'' \times (\pi R^2 + 2\pi RL) + q_{\text{jet}}'' \times (\pi R^2) + q_{\text{tungsten-ambient}}'' \times (\pi R^2) = \dot{q} \times (\pi R^2 L) \quad (1)$$

نوشته می‌شود که q'' شار حرارت همرفتی (W/m^2)، \dot{q} آهنگ انرژی تولید شده در واحد حجم (W/m^3)، R شعاع تنگستن (m) و L ضخامت تنگستن (m) است. انتقال حرارت همرفتی بین سطح تنگستن و جت به صورت

$$q''_{jet} = h(T_{tungsten} - T_{jet}) \quad (2)$$

محاسبه می‌شود که h ضریب انتقال حرارت همرفتی (W/m^2K) است. در محاسبات از عدد نوسلت مربوط به جت استفاده می‌شود. هم‌چنین انتقال حرارت همرفتی بین سطح تنگستن و محیط اطراف به صورت

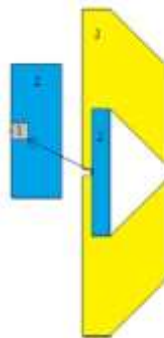
$$q''_{tungsten-ambient} = h(T_{tungsten} - T_{ambient}) \quad (3)$$

قابل محاسبه است. آهنگ خالص انتقال حرارت تابشی بین تنگستن و دیواره‌ها به صورت

$$q''_{tungsten-wall} = \varepsilon\sigma(T_{tungsten}^4 - T_{wall}^4) \quad (4)$$

محاسبه می‌شود که ε و σ ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$) به ترتیب گسیل مندی^۱ و ثابت استفان بولتزمن هستند.

بر اساس این مدل برای محاسبه دمای قطعه در هر شار حرارتی تابش شده به قطعه، قانون بقای انرژی به طور عددی در نرم افزار برنامه‌نویسی MATLAB شبیه‌سازی شده و برای مشخص شدن شعاع مناسب به ازای هر جریان الکترون و مقادیر مختلف سرعت جت یک مطالعه پارامتریک انجام شده است. در این مطالعه محدودیت دمای قطعه را برابر با K ۳۵۰ در نظر می‌گیریم.



شکل (۱) مقطع چشمه فوتونوترون طراحی شده: ۱- تنگستن، ۲- آب سنگین، ۳- بازتابنده

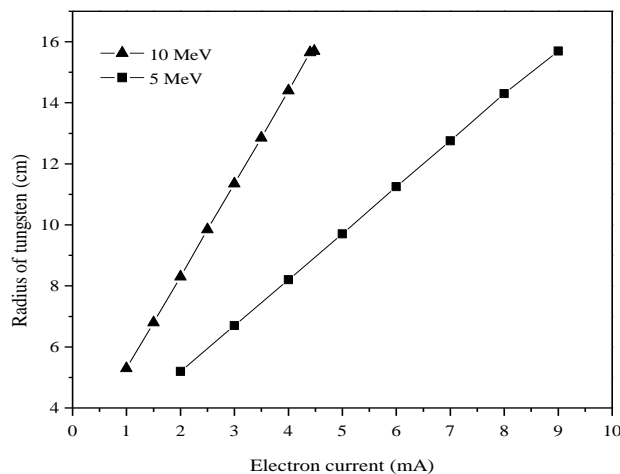
نتایج:

^۱Emissivity



نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بیشینه فوتون تولیدی در هدف تولید فوتون در ضخامت تقریباً 0.07 cm و 0.15 cm به ترتیب برای الکترون‌های 5 MeV و 10 MeV است. همچنین برای هر دو انرژی در شعاع تقریباً $1/5\text{ cm}$ تولید فوتون به اشباع می‌رسد. ضخامت بهینه هدف D_2O برابر با 8 cm و 9 cm برای الکترون‌های 5 MeV و 10 MeV است و شعاع بهینه 32 cm محاسبه شده است. پوشاندن چشمه فوتونوترون با یک لایه بریلیوم سبب افزایش شار نوترون چندین مرتبه بزرگ‌تر از بازتابنده‌های گرافیت و سرب می‌شود. این افزایش شار به دلیل برهم‌کنش فوتون‌های آلودگی با بریلیوم است. بریلیوم می‌تواند به عنوان بازتابنده و هم‌چنین مبدل فوتون‌های آلودگی عمل کند [۱۶]. هنگامی که انرژی فوتون‌های آلودگی بیشتر از $1/666\text{ MeV}$ (انرژی آستانه $\gamma\text{-n}$ در بریلیوم) باشد تولید فوتونوترون اتفاق می‌افتد. در جدول (۱) تعداد کل فوتونوترون تولیدی و انرژی میانگین آن‌ها نشان داده شده است.

شکل (۲) تغییرات شعاع تنگستن بر حسب تغییر جریان الکترون را برای سرعت جت 3 m/s نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که برای الکترون‌های 5 MeV می‌توان جریان الکترونی را تا $9/02\text{ mA}$ و برای الکترون‌های 10 MeV تا $4/5\text{ mA}$ افزایش داد. در این حالت برای جریان بیشینه الکترون‌ها، شعاع مناسب قطعه تنگستن را می‌توان برابر با $15/7\text{ cm}$ تخمین زد. در جدول (۲) نتایج عددی برای جریان الکترونی بیشینه برای سرعت‌های مختلف سیال برای الکترون‌های 5 MeV و 10 MeV را نشان می‌دهد.



شکل (۲) تغییرات شعاع تنگستن بر حسب تغییرات شدت جریان الکترون‌های فرودی در حالتی که سرعت جت 3 m/s است



جدول (۱) فوتونوترون تولید شده و انرژی متوسط آن هنگامی که از هدف بهینه بریلیوم با ضخامت ۵۰ cm استفاده شود

انرژی متوسط نوترون (MeV)	فوتونوترون تولید شده (n/mA/s)	انرژی الکترون (MeV)
۰/۰۵	$1/9 \times 10^{10}$	۵
۰/۱۶	$1/25 \times 10^{11}$	۱۰

جدول (۲) شدت جریان بیشینه الکترون‌های فرودی بر حسب تغییر سرعت آب سنگین

سرعت آب سنگین (m/s)	I_{max} برای الکترون‌های	
	۵ MeV (mA)	۱۰ MeV (mA)
۱	۴/۳۴	۲/۱۶
۳	۹/۰۳	۴/۴۹
۵	۱۲/۷۱	۶/۳۱
۷	۱۵/۹۱	۷/۹۰
۹	۱۸/۸۳	۹/۳۴

بحث و نتیجه گیری:

در این مقاله طراحی یک چشمه فوتونوترون با استفاده از الکترون‌های با انرژی ۵ و ۱۰ MeV تولید شده توسط یک شتابدهنده خطی الکترون مورد مطالعه قرار گرفته است. از کد MCNPX برای بهینه‌سازی ابعاد این طراحی استفاده شده است. ضخامت و شعاع بهینه هدف تولید فوتون (تنگستن) برای تولید بیش‌ترین مقدار فوتون در سطح جلویی تنگستن در انرژی‌های ۵ و ۱۰ MeV به ترتیب برابر با ۰/۰۷ و ۰/۱۵ cm و شعاع بهینه ۱/۵ cm برای هر دو انرژی به دست آمده



است. با به کار بردن این ابعاد بهینه برای تنگستن، ضخامت بهینه هدف تولید فوتونوترئون (D_2O) در این انرژی‌ها برابر با ۸ و ۹ cm و شعاع آن برابر با ۳۲ cm محاسبه شده است. از گرافیت، سرب و بریلیوم به عنوان بازتابنده نوترون استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که بریلیوم با ضخامت ۵۰ cm شار نوترون بیشتری را نسبت به سرب و گرافیت تولید می‌کند، زیرا بریلیوم دارای انرژی آستانه کمی برای تولید فوتونوترئون است و بنابراین فوتون‌های باقیمانده قادر به تولید نوترون در بریلیوم هستند. شار نوترون خروجی از روزنه بریلیوم با قطر ۸ cm و به فاصله ۲۸ cm از سطح D_2O برابر با $n/(mA.s)$ 1.9×10^{11} برای انرژی ۵ MeV و $1/25 \times 10^{11} n/(mA.s)$ برای انرژی ۱۰ MeV محاسبه شده است. میانگین انرژی نوترون‌ها برابر با ۰/۰۵ و ۰/۱۶ MeV در انرژی‌های ۵ و ۱۰ MeV است. برای کنترل دمای تنگستن جهت جلوگیری از ذوب شدن آن در شدت جریان‌های الکترونی بالا، روش خنک‌سازی جت آب با استفاده از برنامه‌نویسی با نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. حد دمایی ۳۵۰ K برای تنگستن فرض شده است. به ازای سرعت‌های مختلف سیال در جت آب، بیشینه شدت جریان الکترونی که این حد دمایی حفظ می‌شود قابل محاسبه است. هم‌چنین در یک سرعت خاص سیال، می‌توان تغییرات شدت جریان الکترون را با تغییر شعاع تنگستن و در نظر گرفتن حد دمایی ۳۵۰ K به‌دست آورد. به عنوان مثال در سرعت ۳ m/s، بیشینه شدت جریان الکترونی در این حد دمایی برابر با ۹/۰۲ mA برای الکترون‌های MeV ۵ و ۴/۵ mA برای الکترون‌های MeV ۱۰ است و در این شدت جریان‌ها شعاع قطعه تنگستن برابر با ۱۵/۷ cm است.

مراجع:

- [1] W. C. Barber, W. D. George, *Neutron yields from targets bombarded by electrons*. Phys. Rev. **116**, 1551 (1959).
- [2] M. J. Berger, S. M. Seltzer, *Bremsstrahlung and photoneutrons from thick tungsten and tantalum targets*. Phys. Rev. C. **2**, 621 (1970).
- [3] S. M. Seltzer, M. J. Berger, *Photoneutron production in thick targets*. Phys. Rev. C. **7**, 858 (1973).
- [4] V. M. Golovkov, T. N. Basina, M. R. Yakovlev, *Measurement of the photoneutron flux density distribution from cylindrical targets*. Sov. Phys. J. **32**, 667 (1989).
- [5] T. N. Vasina, V. M. Golovkov, M. R. Yakovlev, *Photoneutron yields from targets of 2H_2O , Be, and ^{238}U irradiation with bremsstrahlung from 4- to 8-MeV electrons*. Sov. Atom. Energy. **66**, 75 (1989).
- [6] D. Salehi, D. Sardari, M. Salehi Jozani, *Study of characteristics for heavy water photoneutron source in boron neutron capture therapy*. Chinese. Phys. C. **37**, 7 (2013).
- [7] G. E. Dale, J. M. Gahl, *Modeling the neutron yield of a therapeutic thermal neutron source driven with a repetitively pulsed electron linac*. Pulsed Power Plasma Sci. **2**, 1154 (2001).
- [8] R. C. Mobley, R. A. Laubenstein, *Photo-neutron thresholds of beryllium and deuterium*. Phys. Rev. **80**, 309 (1950).
- [9] M. J. Jakobson, *Photodisintegration of Be^9 from threshold to 5 Mev*. Phys. Rev. **123**, 229 (1961).
- [10] E. Guth, C. J. Mullin, *Theory of photo- and electro-disintegration of $Be-9$* . Phys. Rev. **76**, 234 (1949).
- [11] J. K. Kim, K-O. Kim, *Current research on accelerator-based boron neutron capture therapy in Korea*. Nucl. Eng. Technol. **41**, 531 (2009).



- [12] MCNPXTM, Version 2.4.0, *Monte Carlo N-Particle transport code system for multiparticle and high energy applications*, LA-CP-02-408 (September 2002).
- [13] D. A. Allen, T. D. Beynon, *A design study for an accelerator-based epithermal neutron beam for BNCT*. Phys. Med. Biol. **40**, 807 (1995).
- [14] L. Auditore, R. Barna, D. D. Pasquale, A. Italiano, A. Triro, M. Trimarchi, *Study of a 5 MeV electron linac based neutron source*. Nucl. Instr. Meth. B. **229**, 137 (2005).
- [15] E. Lassner, W. Schubert, *Tungsten: properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, (1999).
- [16] B. J. Patil, S. T. Chavan, S. N. Pethe, R. Krishnan, V. N. Bhoraskar, S. D. Dhole, *Design of 6 MeV linear accelerator based pulsed thermal neutron source: FLUKA simulation and experiment*. Appl. Radiat. Isot. **70**, 149 (2012).