



طراحی و شبیه‌سازی پارامترهای موثر در خنک‌کاری تارگت جامد مولد نوترون صنعتی ۴۰۰ وات

باقری، علی*^(۱) - صداقت‌موحد، مرتضی^(۱) - رضایی، عماد^(۱) - اصل‌زعیم، علیرضا^(۱) - قپانوری، مریم^(۱)

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

یکی از نکات فنی مهم در طراحی هدف‌های جامد برای مولدهای نوترون، مساله انتقال حرارت و خنک‌کاری آن می‌باشد. فلز تیتانیوم به علت جذب سطحی بالای دوتریوم بهترین گزینه برای ساخت تارگت مولد نوترون می‌باشد. ولی از طرفی ضریب انتقال حرارتی پایینی دارد، لذا برای انتقال و خارج نمودن حرارت تولیدی بر روی سطح تیتانیوم باید تیتانیوم بر روی فلزاتی مانند مس با قدرت انتقال حرارت بالا قرار گیرد. در این مقاله یک هدف مسی با قابلیت خنک‌شوندگی با آب برای مولد نوترون صنعتی ۴۰۰ وات، طراحی و با نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی گردیده است. پارامترهایی که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است شامل تعیین ضخامت تارگت و دبی آب ورودی به سیستم خنک‌کاری تارگت است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای دو پارامتر ذکر شده، تارگتی با ضخامت ۰٫۷۵ میلی‌متر با دبی آب ۴٫۶۷ لیتر بر دقیقه جهت خنک‌کاری تارگت جامد مولد نوترون صنعتی ۴۰۰ وات در نظر گرفته شد.

کلمات کلیدی: تارگت جامد، مولد نوترون، خنک‌کاری

مقدمه:

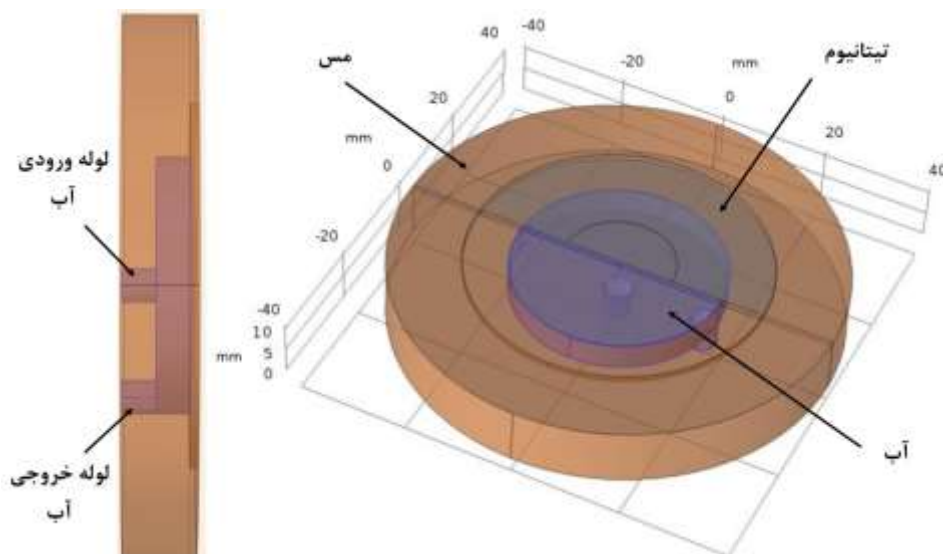
مولدهای نوترون، شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیکی کم انرژی‌ای هستند که در آن‌ها نوترون، بر مبنای اندرکنش‌های $D(d,n)^3\text{He}$ و $T(d,n)^4\text{He}$ با انرژی‌های ۱۴ MeV و ۲٫۴۵ MeV تولید می‌شود. این واکنش‌ها گرمازا بوده، لذا دوترون‌ها برای انجام اندرکنش، شتاب بسیار کمی نیاز خواهند داشت. مولدهای نوترونی که بر پایه‌ی شتاب‌دهی باریکه یونی دوتریوم و برخورد آن با تارگتی از تریتیوم یا دوتریوم کار می‌کنند معمولاً به صورت استوانه‌ای ساخته می‌شوند. ساختار استوانه‌ای اجازه می‌دهد تا بتوان به صورت عملی بر باریکه یونی و ولتاژ بالا نظارت داشت [۸-۱]. امروزه مولدهای نوترون، به دلیل آن‌که می‌توانند جایگزین راکتورهای هسته‌ای و منابع رادیواکتیو در زمینه‌های مختلف علوم نوترون مانند تحقیقات پزشکی، تجزیه و تحلیل مواد، کاربردهای حفاظتی و تشخیصی (تشخیص مین‌های زمینی) و.. باشند، بسیار جذاب و پرکاربرد هستند. مولدهای نوترون یکی از پرکاربردترین دستگاه‌های هسته‌ای در زمینه صنعت و پزشکی می‌باشند. در زمینه صنعت از این مولدها برای کاربردهای مختلفی مانند کشف مواد منفجره و مین‌یابی، به عنوان

راه‌انداز اولیه راکتورهای تحقیقاتی شکافت و برخی تصویربرداری‌های صنعتی خصوصاً در رادیوگرافی نوترونی برای تشخیص تغییر شکل و ترک در مخازن بزرگ صنعتی و یا لوله‌های انتقال نفت و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸-۱].

در مولدهای نوترون از برخورد باریکه یونی با تارگت جامد، نوترون تولید خواهد شد. برخورد باریکه یونی به سطح تارگت، باعث بالا رفتن دمای تارگت می‌شود. لذا برای نگه داشتن دمای تارگت در دمای بهینه، نیاز به استفاده از سیستم خنک‌کاری در آن می‌باشد. در این مقاله با توجه به نیاز به خنک‌کاری تارگت، به طراحی و شبیه‌سازی خنک‌کاری تارگت مورد استفاده در مولد نوترون صنعتی $400W$ پرداخته شده است.

روش کار:

طراحی و شبیه‌سازی تارگت مورد استفاده در مولد نوترون صنعتی با استفاده از نرم افزار COMSOL انجام شده است. با توجه به اینکه جذب دوتریوم و تریتیوم در تیتانیوم از عناصر دیگر بیشتر و نیز دمای ذوب آن بالا و در حدود $1668^{\circ}C$ می‌باشد، تارگت از جنس تیتانیوم انتخاب شده است. از آنجایی که تیتانیوم دارای رسانندگی گرمایی بالایی نمی‌باشد، از مس به عنوان زیر لایه، همچنین به عنوان استحکام بخشی به لایه تیتانیومی، استفاده شده است. با توجه به اینکه ظرفیت گرمایی آب بالا و در حدود $4187 J/Kg.K$ است، جهت خنک‌کاری تارگت از آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شده است.



شکل ۱: نمایی از تارگت طراحی شده.

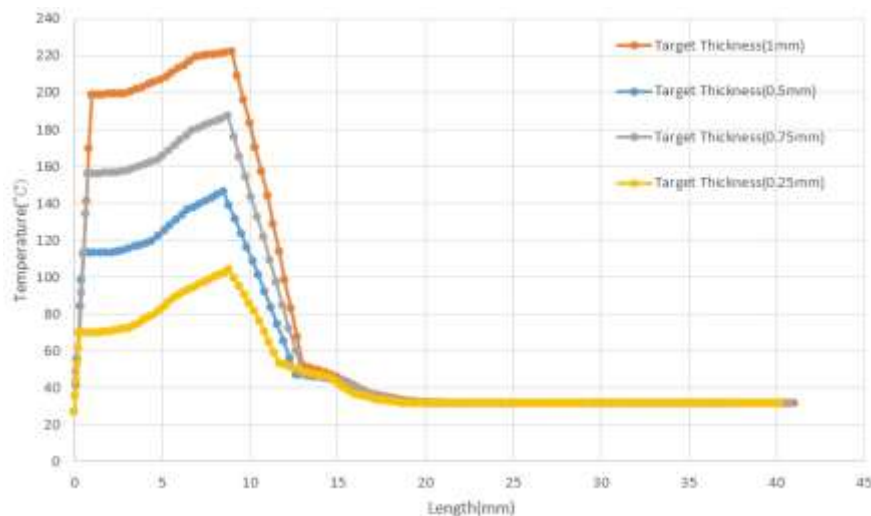


شکل ۱ نمایی از تارگت طراحی شده توسط نرم افزار COMSOL را نشان می‌دهد. تارگت با قطر ۸۰ mm و ضخامت ۱۱ mm در نظر گرفته شده است. آب دیونیزه در تماس مستقیم با آب جهت خنک‌کاری بهتر در نظر گرفته شده است. قطر لوله‌های آب ورودی و خروجی ۵ mm انتخاب شده است. در شبیه‌سازی از تارگت‌هایی با ضخامت‌های ۱ mm، ۰٫۷۵ mm، ۰٫۵ mm و ۰٫۲۵ mm استفاده شده است. قطر باریکه یونی ورودی بر روی تارگت ۲۰ mm است. توان باریکه یونی مولد نوترون برابر با ۴۰۰ W در نظر گرفته شده است که بطور یکنواخت بر روی تارگت توزیع شده است. لوله ورودی آب طوری طراحی شده است که آب را در ابتدای ورود به محفظه در وسط تارگت و باریکه یون قرار دهد. این عمل باعث خنک‌کاری بهتر مرکز تارگت خواهد شد.

برای شبیه‌سازی انتقال حرارت از ماژول‌های Heat Transfer و Laminar Flow در نرم‌افزار که به صورت کوپل شده قرار داده شدند، استفاده شده است. دمای ورودی آب ۲۵ °C در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.

نتایج:

برای عدم انتشار و بازپس دهی یون‌های باریکه ورودی که خود منجر به کاهش بهره نوترونی مولد نوترون خواهد شد، بایستی دمای تارگت را کمتر از ۲۰۰°C نگه داری کرد [۹]. لذا بایستی سرعت ورودی آب و ضخامت تارگت را طوری تنظیم کرد که دمای تارگت کمتر از دمای ذکر شده باشد. در ابتدا لازم است رفتار و تغییرات دمای سطح تارگت در ضخامت‌های مختلف برای یک دبی آب که آن را برابر ۴٫۷ lit/min (برابر با سرعت ۱ m/s) در نظر گرفته‌ایم، مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۲ تغییرات دمای سطح تارگت در امتداد قطر آن را نشان می‌دهد.

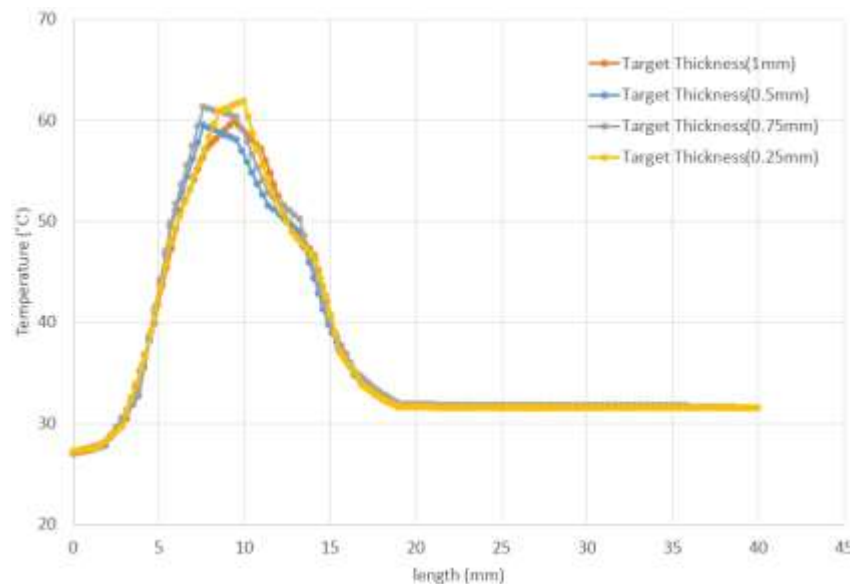




شکل ۲: تغییرات دمای سطح تارگت در امتداد طول آن و در ضخامت‌های مختلف.

همانطور که در نمودار نمایان است، در اطراف مرکز تارگت به دلیل هم را ستا بودن با آب ورودی، دما در سطح پایینی قرار دارد. مقداری که از مرکز دور می‌شویم دما افزایش می‌یابد. شعاع لوله ورودی آب ۲٫۵ mm در نظر گرفته شده است که با نگاهی به نمودار می‌توان دریافت که با دور شدن از طول ۲٫۵ mm، دمای تارگت تا طول تقریبی ۱۰ mm، که شعاع باریکه یونی ورودی است، دوباره افزایش می‌یابد. به طور تقریبی بعد از اتمام شعاع باریکه ورودی، دما کاهش یافته و بعد از طول ۱۹ mm از مرکز تارگت و در جایی که تماس آب با تارگت تمام می‌شود، دما به عدد ثابتی می‌رسد. از شکل ۲ می‌توان دریافت که با ضخامت ۱ mm دمای تارگت بیشتر از ۲۰۰°C خواهد شد که این مقدار مطلوب نمی‌باشد. این نمودار نشان می‌دهد که هرچه ضخامت تارگت کمتر باشد دمای سطح تارگت پایین‌تر خواهد بود.

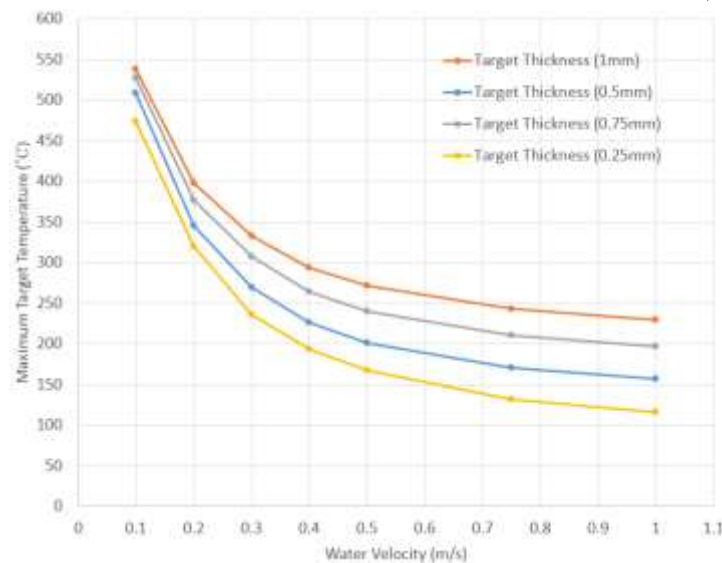
تغییرات دمای سطح آب در تماس با تارگت نیز در دبی ۴٫۷ lit/min، در شکل ۳ نشان داده شده است. به طور تقریبی در فاصله ۱۰ mm از مرکز تارگت و تا جایی که توان باریکه دیگر اعمال نمی‌شود، دما رو به فزونی است. بعد از این فاصله دما کاهش یافته و بعد از ۱۹ mm که آب دیگر در تماس با تارگت نمی‌باشد، دما ثابت خواهد شد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که دمای آب در سطح مطلوبی قرار دارد و با دمای جوش آب فاصله زیادی دارد. لذا آب در داخل محفظه به بخار تبدیل نخواهد شد.



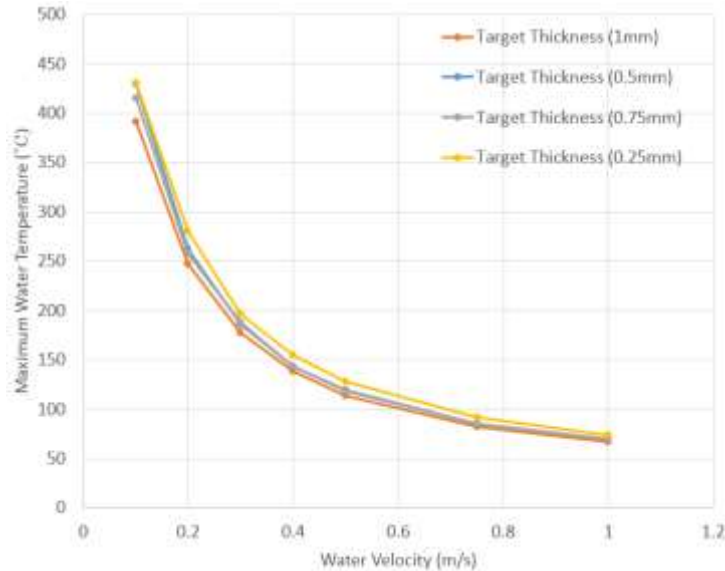
شکل ۳: تغییرات دمای آب در امتداد طول تارگت در ضخامت‌های مختلف تارگت.

برای یافتن حد سرعت آب ورودی، به گونه‌ای که دمای تارگت بیشتر از 200°C نشود، نمودار دمای ماکزیمم سطح تارگت برای سرعت‌های مختلف آب در شکل ۴ رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش سرعت آب دمای سطح تارگت کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار می‌توان دریافت که برای اینکه تارگت در دمای کمتر از 200°C باقی بماند بایستی برای ضخامت‌های 0.25 mm ، 0.5 mm و 0.75 mm به ترتیب دبی آب ورودی برابر 1.76 lit/min ، 2.53 lit/min و 4.47 lit/min باشد. برای ضخامت 1 mm بایستی دبی آب به بیش از 4.7 lit/min برسد.

نمودار دمای ماکزیمم آب بر حسب سرعت نیز در شکل ۵ رسم شده است. در این نمودار نیز با افزایش سرعت از دمای ماکزیمم آب کاسته می‌شود. با استفاده از داده‌های نمودار می‌توان دریافت که برای نگه داشتن دمای آب به زیر 100°C ، لازم است که دبی آب برای ضخامت‌های مختلف، از 3.53 lit/min بیشتر باشد. لذا در این تارگت طراحی شده، برای تمام ضخامت‌های ذکر شده، لازم است که دبی آب ورودی از 4.7 lit/min بیشتر باشد.



شکل ۴: تغییرات دمای ماکزیمم تارگت بر حسب سرعت آب ورودی.



شکل ۵: تغییرات دمای بیشینه آب بر حسب سرعت آب ورودی.

بحث و نتیجه گیری:

برای ساخت تارگت جامد مولد نوترون 400 W ، هرچه ضخامت تارگت کمتر باشد دمای تارگت از 200°C کمتر خواهد شد و دمای بیشینه تارگت کاهش پیدا می‌کند. اما از طرفی کاهش ضخامت تارگت، منجر به ازدیاد دمای آب به بیش از 100°C خواهد شد. همچنین به دلیل آنکه تارگت در تماس مستقیم با آب قرار دارد بایستی ضخامت تارگت را طوری در نظر گرفت که فشار آب تأثیری بر اعوجاج و خمیدگی بر روی سطح تارگت نداشته باشد. لذا با توجه به مقادیر بدست آمده برای ماکزیمم دمای تارگت و آب می‌توان نتیجه گیری کرد که ضخامت تارگتی برابر با 0.75 mm که در آن دبی آب ورودی برابر با 4.47 lit/min در نظر گرفته شده باشد، بهترین گزینه برای خنک‌کاری تارگت می‌باشد.

مراجع:

- [1] Kononov, V.N, et al. "Accelerator-based fast neutron sources for neutron therapy", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 564, (525–531) 2006.
- [2] Cloth, P., Conrads, "Neutronics of a dense-plasma focus—An investigation of a fusion plasma," H., Nucl. Sci. Eng. 62, (591–600) 1977.
- [3] Antolak, A.J., et al., "Negative ion-driven associated particle neutron generator" Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 806, (30–35) 2016.



- [4] J. M. Elizondo-Decanini et al., “Novel Surface-Mounted Neutron Generator,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 40, no. 9, (2145–2150) 2012.
- [5] J. Reijonen et al., “D-D neutron generator development at LBNL,” (eng), Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine, vol. 63, no. 5-6, (757–763) 2005.
- [6] B. A. Ludewigt, R. P. Wells, and J. Reijonen, “High-yield D–T neutron generator,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 261, no. 1-2, (830–834) 2007.
- [7] Totsuka, D., Yanagida, T., Fukuda, K., Kawaguchi, N., Fujimoto, Y., Pejchal, J., “Performance test of Si PIN photodiode line scanner for thermal neutron detection,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 659(1), (399-402) 2011.
- [8] “Neutron generators for analytical purposes”, International atomic energy agency Vienna, IAEA Radiation Technology Reports Series No. 1, 2012.
- [9] J. Kim, “Neutron sources using DT mixed beams driven into solid target,” Nucl. Instrum. Methods 145, (9-17) 1977.