



طراحی و ساخت هدف جامد به همراه سامانه خنک‌کننده جهت بررسی پدیده گداخت سطحی

آمنه کارگریان، مریم قپانوری^{*}، مرتضی صداقت، علیرضا اصل زعیم، علی باقری
پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران- ایران

*Email: mghapanvari@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۳/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۸

چکیده

در این مقاله، جهت بررسی پدیده گداخت سطحی در دستگاه مولد نوترون صنعتی، به طراحی و ساخت هدف جامد با قابلیت خنک‌شوندگی پرداخته شد. در اولین قدم برای رسیدن به چنین هدفی، جنس و ضخامت لایه‌ها و زیرلایه‌های مناسب جهت استفاده به عنوان هدف جامد مولدهای نوترون صنعتی، به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار سریم، مورد بررسی کامل قرار گرفت. سپس، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نمونه‌هایی از هدف جامد به روش لایه‌نشانی کند و پاش ساخته شد. علاوه بر این، با توجه به اهمیت دمای هدف و اثرگذاری آن در گداخت سطحی، به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول، سامانه خنک‌کننده‌ای طراحی و سپس ساخته شد. همچنین، با توجه به ولتاژ بالای اعمالی به هدف و در تماس بودن آن با سامانه خنک‌کننده، به منظور عایق‌کاری آن، عایق‌های الکتریکی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و عایق مناسبی طراحی و ساخته شد. در ادامه و به منظور امکان آزمون هدف‌های جامد و بخش‌های جانبی آن، سیستم خلأ مناسبی طراحی و ساخته شد. در نهایت، پس از طراحی و ساخت کلیه بخش‌ها، سامانه جهت آزمون نهایی، مونتاژ و راه‌اندازی شد. در آزمون‌های انجام شده با گاز دوتریوم، شار نوترون به کمک آشکارساز LB۶۴۱۱ اندازه‌گیری گردید. در ولتاژ حدود ۲۵ کیلوولت و جریان حدود ۲۰ میلی‌آمپر، موفق به تولید نوترون با شار 6×10^5 n/s شدیم. این میزان شار نوترونی افزایش دوبرابری نرخ نوترون تولیدی در اثر پدیده گداخت سطحی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: گداخت سطحی، هدف خنک‌شونده، نوترون‌های سریع، نرم‌افزار سریم، نرم‌افزار کامسول

Design and construction of a solid target with a cooling system to investigate the surface fusion phenomenon

A. Kargaryan, M. Ghapanvari*, M. Sedaghat, A. Aslezaem, A. Bagheri

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran

Research Article

Received 24.5.2021, Accepted 30.8.2021

Abstract

In this paper, in order to investigate the surface fusion phenomenon in an industrial neutron generator, a solid target with cooling capability was designed and constructed. The first step to this goal is to thoroughly investigate the material and thickness of the layers and substrates suitable for use as solid targets for industrial neutron generators, using SRIM-code simulations. Then, using the simulation results, samples of the solid target were constructed by the sputtering coating method. In addition, due to the importance of the target temperature and its effect on surface fusion, the cooling system using COMSOL multiple physics simulation software, was designed and built. In addition, to insulate the high voltage applied to the target which is in contact with the cooling system, various electrical insulators were studied and suitable insulation was selected, designed, and manufactured. Then, to test the solid targets and their side parts, a suitable vacuum system was designed and constructed. Finally, after designing and constructing all the parts, the system was assembled and set up for final testing. In deuterium filling gas tests, the neutron flux was measured using the LB6411, ³He detector. At around 25 kV voltage and 20 mA current, we were able to detect neutrons with the rate of 6×10^5 n/s, which was a sign of success. This amount of neutron production indicates duplication of the neutron rate produced by the surface fusion phenomenon.

Keywords: Fusion surface, Cooling target, Fast neutrons, SRIM software, Camsol software



۱. مقدمه

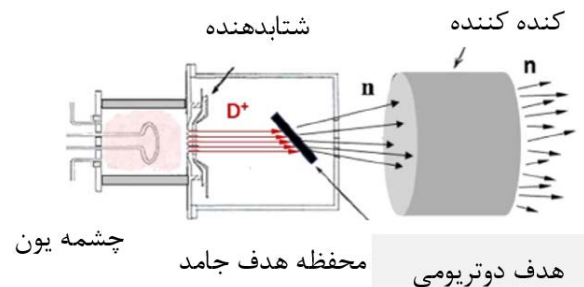
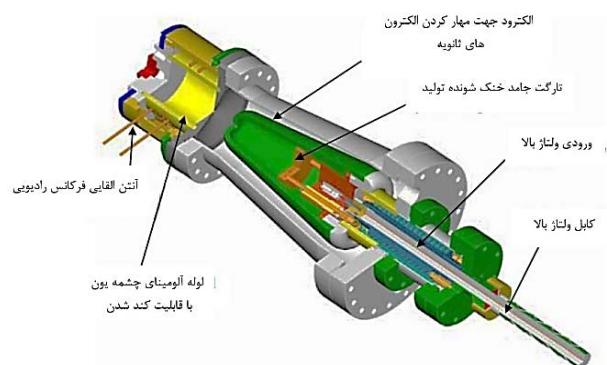
فرایندهای گداخت هسته‌ای در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی که یک نوع مولد نوترون به شمار می‌رود نیز با توجه به افزایش سطح مقطع واکنش هسته‌ای دوتریوم-دوتریوم با افزایش انرژی ذرات برخوردکننده (که در محدوده انرژی صفر تا صد و پنجاه کیلو الکترون ولت برای دستگاه‌های الکترواستاتیکی اینرسی است) واکنشی مطلوب جهت تولید نوترون به شمار می‌روند. با این وجود، علاوه بر پراکندگی کولنی بسیار زیاد بین ذراتی که برخورد سر به سر انجام می‌دهند، معمولاً در فشارهای کاری دستگاه الکترواستاتیکی اینرسی (که حدود یک تا پنج پاسکال می‌باشد) برخوردهای منجر به تبادل بار نیز سطح مقطع بالایی داشته و عملاً تعداد بسیار زیادی از یون‌ها قبل از رسیدن به انرژی مورد نیاز با این برخوردها از سیستم حذف می‌شوند. به نظر می‌رسد که واکنش‌های گروه سوم و چهارم از همه مهم‌تر باشند. به عبارتی دیگر، واکنش‌هایی که در آن‌ها ذرات خنثی پر انرژی با ذرات گاز زمینه برهم‌کنش می‌کنند سهم زیادی در تولید نوترون دارند. از طرفی آزمایشات اخیر در سال ۲۰۱۸ میلادی نشان داده است که واکنش یون‌های پر انرژی با یون‌هایی که بر روی سطح کاتد لایه نشانی شده‌اند، می‌تواند تا هشتاد درصد نوترون‌ها را تولید نماید.

طبق آخرین تحقیقات صورت گرفته در زمینه مکانیزم‌های مختلف و مؤثر در تولید نوترون در این نوع دستگاه‌ها (محصورسازی الکترواستاتیکی) به نظر می‌رسد گداخت سطحی^۵ سهم عمده را دارا می‌باشد (حدود ۸۰ درصد). ریچارد بودن-رید و همکاران نشان دادند که ماده کاتد نیز می‌تواند در اندازه‌گیری‌های گداخت سطحی مؤثر باشد. به عنوان مثال انتخاب ماده گرافیت برای کاتد نتایج بهتری نسبت به فولاد ضدزنگ خواهد داشت. از طرفی نرخ گداخت اندازه‌گیری شده در دستگاه‌های مولد نوترون از نوع محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی (IEC)^۶ نشان می‌دهد پدیده گداخت سطحی بین یون‌های پر انرژی و اهداف جانب به زمان و فشار اعمال شده بستگی دارد. بنابراین چگالی سطحی هدف بر روی سطح فلز، در طراحی سیستم‌های IEC بسیار حایز اهمیت است [۱۰، ۱۱]. لذا، این موضوع می‌تواند جدید زمینه تحقیقاتی جدیدی را ایجاد نماید تا برای شناخت بیشتر این نوع واکنش‌ها بررسی‌های بیشتری صورت گیرد. بنابراین چگالی یون‌های هدف در این‌جا به مدت زمان کاری دستگاه و شرایط کاری آن بستگی دارد. به عبارتی، هرچه دستگاه با جریان بالاتر و مدت زمان بیشتری کار کند احتمالاً تعداد یون‌های بیشتری

امروزه مولدهای نوترون^۱، به دلیل آن‌که می‌توانند جایگزین رآکتورهای هسته‌ای و منابع پرتوزا 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. شکل ۱ طرحی از مولد نوترون معمولی که ۳ جز اصلی (منبع یون^۲، شتاب‌دهنده الکتروستاتیک^۳ و هدف^۴) را شامل می‌شود را نشان می‌دهد [۹-۱].

در یک دستگاه مولد نوترون صنعتی، فرایندهای مختلفی در تولید نوترون مؤثر هستند. آزمایش‌های مختلف نشان داده‌اند که به طور عمده چهار فرایند اصلی منجر به واکنش‌های هسته‌ای و تولید نوترون در این نوع دستگاه‌ها می‌شود. به واسطه این فرایندها، رژیم‌های مختلف کاری برای تولید نوترون در این نوع دستگاه وجود دارد:

- واکنش‌های باریکه یون با گاز زمینه
- واکنش‌های باریکه یون با باریکه یون
- واکنش ذرات خنثی پر انرژی با گاز زمینه
- واکنش یون‌های پر انرژی با یون‌های لایه نشانی شده بر روی سطح کاتد



شکل ۱. طرحی از یک مولد نوترون صنعتی [۷، ۸].

1. Neutron Generator
2. Ion Source
3. Electrostatic Accelerator
4. Target



یکی از نکات فنی مهم در طراحی هدف‌های جامد برای مولدهای نوترون، تعیین مشخصات لایه و زیر لایه و جنس مواد انتخاب شده و مسأله انتقال حرارت و خنک‌کاری آن می‌باشد. در این بخش به طراحی و شبیه‌سازی پارامترهای مهم در هدف جامد مولد نوترون با استفاده از نرم‌افزار سریم^۲ خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است که در تمامی محاسبات و شبیه‌سازی‌های انجام شده، توان مولد نوترون برابر با ۴۰۰ W در نظر گرفته شده است که به طور یکنواخت بر روی هدف توزیع شده است. این توان برای مولد نوترونی با انرژی باریکه‌ی ۴۰ KeV و جریان یونی ۱۰ mA در نظر گرفته شده است.

در میان فلزات، طلا و نقره از هدایت گرمایی بالایی برخوردارند. اما به دلیل هزینه زیاد آن‌ها استفاده از مس در جاهایی که انتقال حرارت اهمیت می‌یابد بسیار مرسوم‌تر است. بنابراین فلز مس را برای زیرلایه انتخاب نمودیم. قطر زیرلایه با توجه به ابعاد نگه‌دارنده هدف باید انتخاب شود. ضخامت زیرلایه باید به اندازه‌ای باشد که از استحکام لازم برای تحمل تغییر فشار که ناشی از خلأ و فشار هوا در دو طرف سطح آن است برخوردار باشد. کم بودن ضخامت زیرلایه باعث تغییر شکل آن شده و سبب نشت هوا و مایع خنک‌کننده به درون خط انتقال باریکه می‌شود و کلاً به سیستم خلأ و همچنین اجزای الکتریکی و ولتاژ بالا آسیب رسانده و خسارت جدی وارد می‌کند [۱۲]. بیش‌ترین فشار خلأ کاری که ما برای آزمون نمونه هدف انتخاب کردیم از مرتبه 10^{-5} mbar می‌باشد. برای تعیین ضخامت مورد نیاز جهت تحمل این مقدار خلأ، زیرلایه با ضخامت ۱ میلی‌متر انتخاب کردیم. فلز تیتانیوم به دلیل قابلیت جذب هیدروژن و کم بودن سطح مقطع توقف و در نتیجه دارا بودن بهره نوترونی بالاتر نسبت به دیگر فلزات ذکر شده، به عنوان هدفی برای تولید نوترون استفاده بیش‌تری دارد. بنابراین جنس لایه را تیتانیوم انتخاب نمودیم.

به منظور انتخاب ضخامت لایه، دانستن برد دوتریوم در تیتانیوم اهمیت دارد. برای محاسبه برد دوتریون با انرژی E در تیتانیوم از نرم‌افزار سریم استفاده شد. محاسبات برای عمق نفوذ در مواد و ایزوتوپ‌های مختلف برای یون‌های مختلف توسط روش مونت‌کارلو در نرم‌افزارهایی مانند سریم قابل محاسبه هستند. کد سریم یک کد محاسباتی مونت کارلو می‌باشد که برهم‌کنش‌های یون‌های پرنانرژی با اهداف را شبیه‌سازی می‌کند. در واقع سریم یک نرم‌افزار محاسبه برد ذرات است که روی

بر روی سطح کاتد خواهند نشست و هدف چگال‌تر خواهد شد. البته با افزایش دمای کاتد تعداد یون‌های فراری از سطح نیز افزایش خواهند یافت. لذا دمای کاتد نیز در این موضوع تأثیرگذار است و بحث خنک‌کاری کاتد در این مورد ضروری به نظر می‌رسد. مطالعه گداخت سطحی یکی از موارد به روز در جهت رسیدن به نرخ بالاتر نوترون می‌باشد. برای بررسی این نوع واکنش‌ها می‌توان هدف‌های مختلف با هندسه و جنس‌های مختلفی مانند استیل، مولیبدن، مس و تیتانیوم را در معرض برخورد یون‌های پرنانرژی قرار داد و نرخ تولید نوترون در آن‌ها را مقایسه کرد. شناخت دقیق و کامل عوامل مختلف تأثیرگذار بر نرخ گداخت سطحی می‌تواند گام مهمی در جهت ساخت مولدهای نوترون صنعتی با بهره بالا باشد.

در این مقاله، به طراحی و ساخت هدف جامد با قابلیت خنک‌شوندگی جهت بررسی پدیده گداخت سطحی در دستگاه مولد نوترون صنعتی پرداخته شده است. بخش ۲ شامل طراحی مجموعه هدف شامل زیرلایه، لایه و جنس و ضخامت آن‌ها، سامانه خنک‌کننده و ورودی ولتاژ بالا می‌باشد. در بخش ۳ به توضیح مراحل ساخت مجموعه هدف، سامانه خنک‌کننده، ورودی ولتاژ بالا و محفظه خلأ، اختصاص داده شده است. انجام آزمایش و داده‌گیری در بخش ۴ ارایه شده است و نتیجه‌گیری در بخش ۵ ذکر خواهد شد.

۲. طراحی

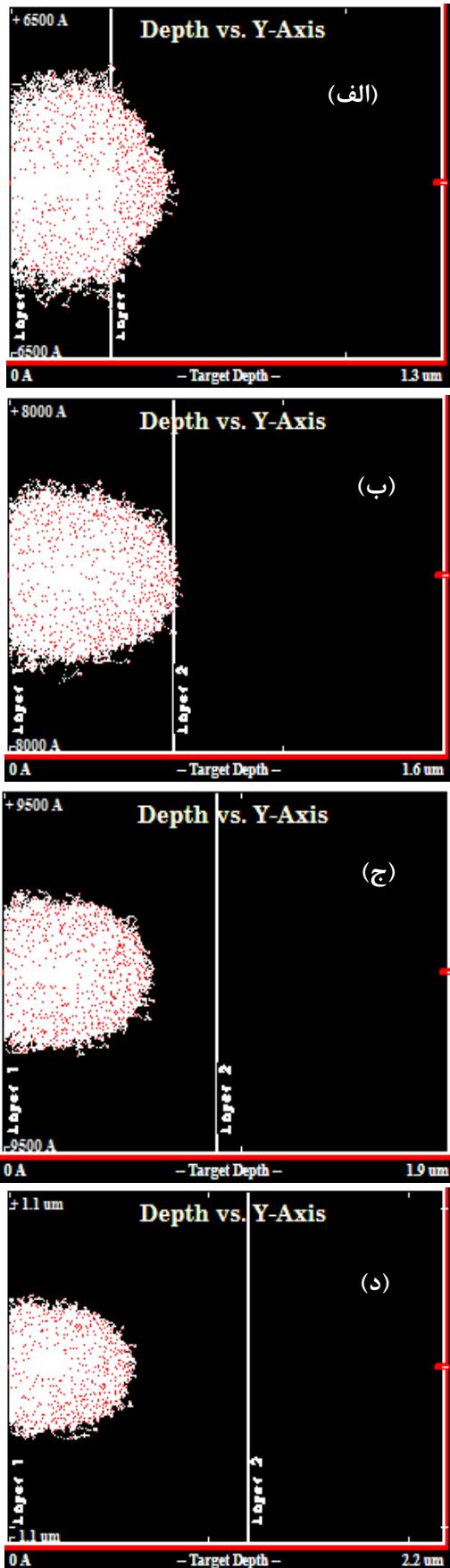
در این بخش، به طراحی مجموعه هدف شامل زیرلایه، لایه و جنس و ضخامت آن‌ها، سامانه خنک‌کننده و ورودی ولتاژ بالا پرداختیم.

۱.۲ طراحی هدف

هدف‌هایی که برای استفاده در مولدهای نوترونی که شار بالایی از نوترون تولید می‌کنند معمولاً شامل یک لایه فلزی با ضریب جذب زیاد برای هیدروژن است که روی یک لایه حامل^۱ که از یک فلز با ضریب جذب و انتشار پایین برای هیدروژن و ضریب بالایی از هدایت حرارتی است قرار می‌گیرد و هم‌چنین می‌تواند یک لایه میانی^۲ که از جنس فلز از نوع دیگری که دارای ضریب هدایت حرارتی بالا و ضریب کند و پاش پایین باشد را بین فلز و لایه حامل قرار داد.

1. Carrier Layer
2. Intermediate Layer



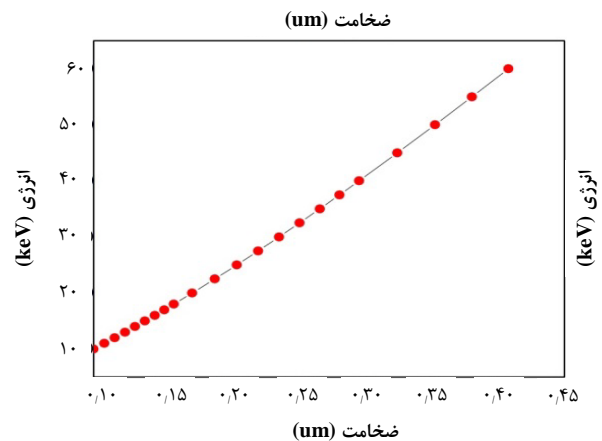


شکل ۳. نحوه ورود باریکه دوترون در تیتانیوم برحسب ضخامت، محاسبه شده توسط نرم افزار سریم.

ویندوز نصب می شود و می تواند برد یون های مختلف در موارد مختلف را محاسبه کند [۱۲، ۱۳].

برای یون های دوتریوم و هدف از جنس تیتانیوم این محاسبات بر حسب انرژی ذره فرودی محاسبه شده است. شکل ۲ نمودار میزان بیشینه عمق نفوذ یا برد را برحسب ضخامت تیتانیوم نشان می دهد.

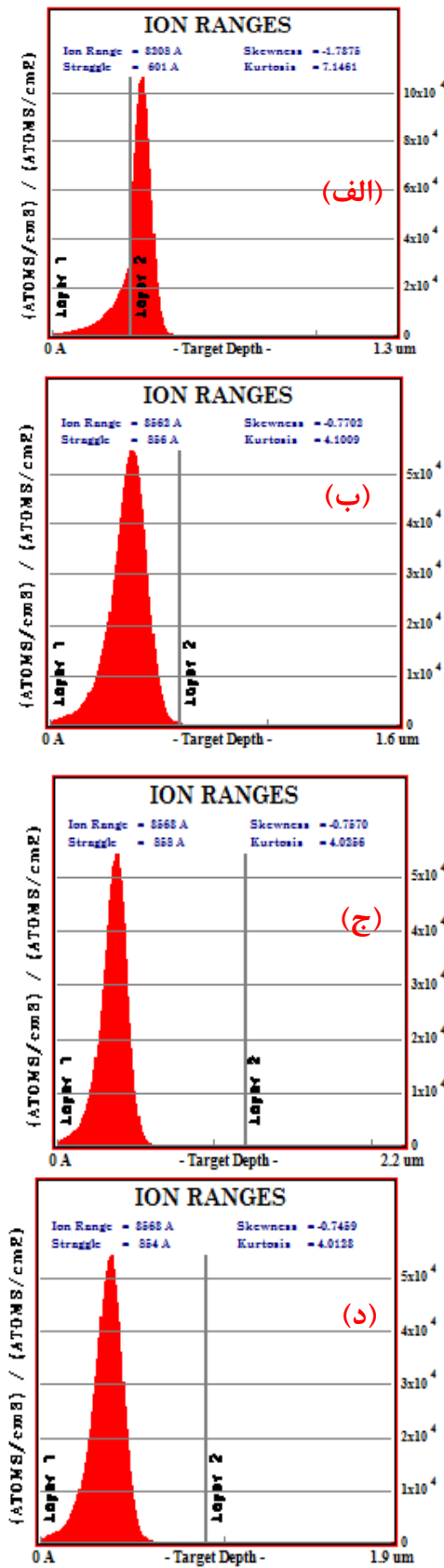
لایه تیتانیوم نسبتاً سریع در محل بالاترین چگالی یون دچار کند و پاش شود و زیرلایه پس از مدت کوتاهی در معرض دید قرار می گیرد. این عامل باعث می شود بازده نوترون بسیار سریع کاهش یابد و این خطر وجود دارد که پرتوهای یونی بتوانند سوراخی را از طریق زیرلایه به درون سامانه خنک کننده ایجاد کنند. به منظور جلوگیری از این مشکل، تعیین ضخامت بهینه و مناسب لایه امری ضروری است که هم چنین موجب افزایش طول عمر هدف نیز می شود. با توجه به این که برد دوتریوم در تیتانیوم تقریباً ۰.۳ میکرومتر است ما ضخامت های ۰.۳، ۰.۶، ۰.۹، ۱.۲ میکرومتر را برای ضخامت لایه انتخاب کردیم. با استفاده از نرم افزار سریم، به شبیه سازی نحوه عمق نفوذ باریکه دوتریوم در ضخامت های مختلف لایه پرداختیم. شکل ۳ نی مرخ (برش عرضی) توزیع فضایی ۲- بعدی تراپرد ذرات باریکه دوتریوم را در این ضخامت ها نشان می دهد. همان طور که مشخص است در ضخامت های ۰.۳ و ۰.۶ میکرومتر باریکه دوتریوم در زیرلایه نفوذ می کند، بنابراین مناسب نیستند. اما در ضخامت های ۰.۹ و ۱.۲ میکرومتر هیچ نفوذی صورت نمی گیرد. لذا ضخامت حدود ۱ میکرومتر برای لایه تیتانیوم مناسب تشخیص داده می شود. در شکل های ۳ و ۴، لایه ۱ (زیرلایه) از جنس مس و لایه ۲ از جنس تیتانیوم می باشد.



شکل ۲. برد دوترون در تیتانیوم برحسب انرژی دوترون.



باعث خنک‌کاری بهتر مرکز هدف خواهد شد. قطر لوله‌های آب ورودی و خروجی ۵ mm انتخاب شده است. دمای ورودی آب ۲۵ درجه‌سانتی‌گراد در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. برد دوترون در تیتانیوم برحسب انرژی دوترون.

در شکل ۴، توزیع فراوانی عمقی باریکه دوتریوم در ضخامت‌های مختلف لایه تیتانیوم نشان داده شده است. شکل ۵ نحوه توزیع یون‌ها در سطح لایه تیتانیوم را در ضخامت‌های مختلف لایه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل می‌توان دید، یون‌های دوتریوم در ضخامت‌های ۰/۳ و ۰/۶ میکرومتر به درون لایه نفوذ می‌کنند.

با توجه به این‌که جذب دوتریوم و تریتیوم در تیتانیوم از عناصر دیگر بیشتر و نیز دمای ذوب آن بالا و در حدود ۱۶۶۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، هدف از جنس تیتانیوم به ضخامت ۱ میکرومتر انتخاب شده است. از آنجایی که تیتانیوم دارای رسانندگی گرمایی بالایی نمی‌باشد، از مس به عنوان زیرلایه با ضخامت ۳ میلی‌متر، هم‌چنین به عنوان استحکام بخشی به لایه‌ی تیتانیومی، استفاده شده است.

۲.۲ طراحی سامانه خنک‌کننده و ورودی ولتاژ بالا

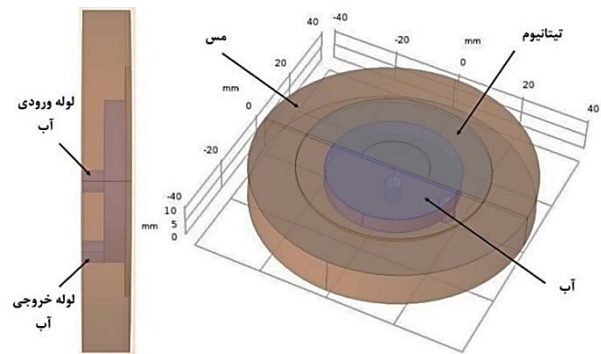
یکی از نکات فنی مهم در طراحی هدف‌های جامد برای مولدهای نوترون، مسأله انتقال حرارت و خنک‌کاری آن می‌باشد. فلز تیتانیوم به علت جذب سطحی بالای دوتریوم بهترین گزینه برای ساخت هدف مولد نوترون می‌باشد. ولی از طرفی ضریب انتقال حرارتی پایینی دارد، لذا برای انتقال و خارج نمودن حرارت تولیدی بر روی سطح تیتانیوم باید آن را بر روی فلزاتی مانند مس با قدرت انتقال حرارت بالا، قرار داد. در این بخش به طراحی و شبیه‌سازی پارامترهای مهم در سامانه خنک‌کننده خواهیم پرداخت. طراحی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از روش المان محدود^۱ می‌تواند مسائلی در فیزیک و مهندسی را که لازم است برای آن از چند فیزیک استفاده کرد را شبیه‌سازی کند. لذا برای بهره‌گیری از چند فیزیک، از زیر برنامه‌های مختلفی استفاده می‌کند که با توجه به نیاز مسأله می‌توان از آن‌ها در کنار هم در نرم‌افزار به صورت کوپل شده، استفاده کرد. با توجه به این‌که ظرفیت گرمایی آب بالا و در حدود ۴۱۸۷ J/Kg.K است، جهت خنک‌کاری هدف از آب دیونیزه به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شده است. شکل ۶ نمایی از هدف طراحی شده توسط نرم‌افزار کامسول را نشان می‌دهد. هدف 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 محفظه‌ی آب، ۳۸ mm و ضخامت آن ۵ mm در نظر گرفته شده است. محل قرارگیری لوله‌های ورودی و خروجی آب در شکل ۵ نشان داده شده است. لوله‌ی ورودی آب طوری طراحی شده است که آب را در ابتدای ورود به محفظه در وسط هدف و باریکه‌ی یون قرار دهد. این عمل

1. Finite Element Method

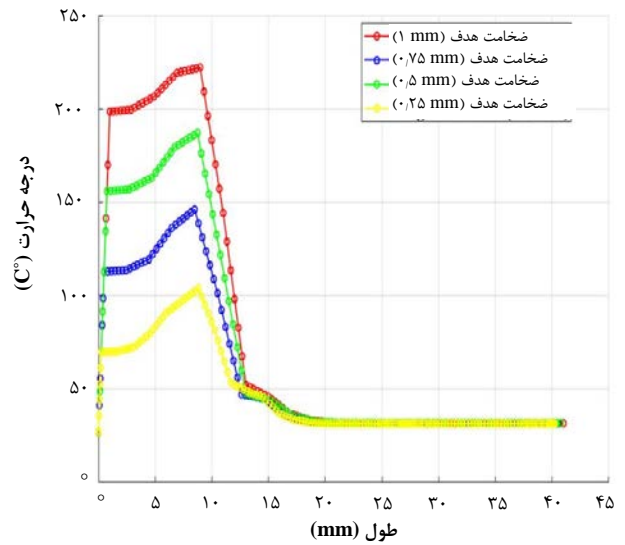


همان طور که در نمودار نمایان است، در اطراف مرکز هدف به دلیل هم راستا بودن با آب ورودی، دما در سطح پایینی قرار دارد. مقداری که از مرکز دور می شویم دما افزایش می یابد. شعاع لوله ورودی آب ۲٫۵ mm در نظر گرفته شده است که با نگاهی به نمودار می توان دریافت که با دور شدن از طول ۲٫۵ mm، دمای هدف تا طول تقریبی ۱۰ mm، که شعاع باریکه یونی ورودی است، دوباره افزایش می یابد. به طور تقریبی بعد از اتمام شعاع باریکه یونی ورودی، دما کاهش یافته و بعد از طول ۱۹ mm از مرکز هدف و در جایی که تماس آب با هدف تمام می شود، دما به عدد ثابتی می رسد. از شکل ۶ می توان دریافت که با ضخامت ۱ mm دمای هدف بیش تر از ۲۰۰ درجه سانتی گراد خواهد شد که این مقدار مطلوب نمی باشد. این نمودار نشان می دهد که هرچه ضخامت هدف کم تر باشد دمای سطح هدف پایین تر خواهد بود.

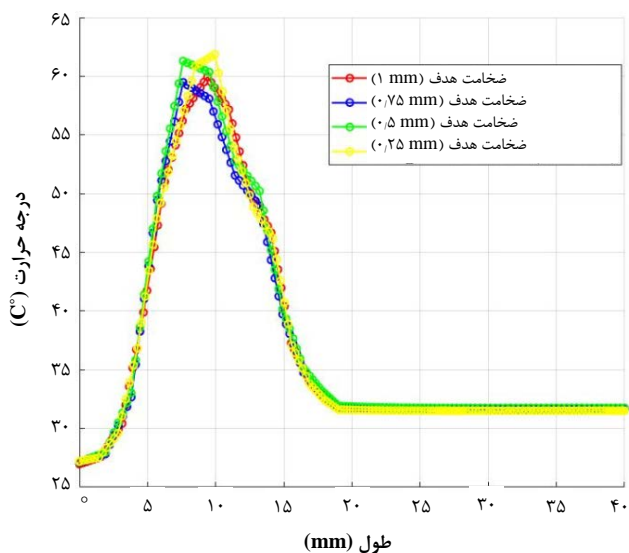
تغییرات دمای سطح آب در تماس با هدف نیز در سرعت ۱ m/s، در شکل ۷ نشان داده شده است. به طور تقریبی در فاصله ی ۱۰ mm از مرکز هدف و تا جایی که توان باریکه دیگر اعمال نمی شود، دما رو به فزونی است. بعد از این فاصله دما کاهش یافته و بعد از ۱۹ mm که آب دیگر در تماس با هدف نمی باشد، دما ثابت خواهد شد. با توجه به این شکل می توان دریافت که دمای آب در سطح مطلوبی قرار دارد و با دمای جوش آب فاصله ی زیادی دارد. لذا آب در داخل محفظه به بخار تبدیل نخواهد شد.



شکل ۵. نمایی از هدف طراحی شده.



شکل ۶. تغییرات دمای سطح هدف در امتداد طول آن و در ضخامت های مختلف.

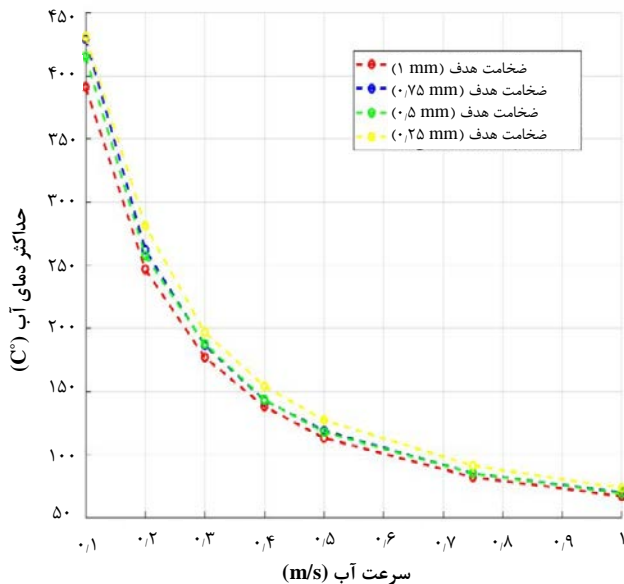


شکل ۷. تغییرات دمای آب در امتداد طول هدف در ضخامت های مختلف هدف.

برای بررسی نحوه ی انتقال حرارت و خنک کاری هدف، در شبیه سازی از هدف هایی با ضخامت های ۱ mm، ۰٫۷۵ mm و ۰٫۲۵ mm استفاده شده است. قطر هدف تیتانیومی برابر با ۵۴ mm می باشد. قطر باریکه یونی ورودی بر روی هدف ۲۰ mm است. برای شبیه سازی انتقال حرارت از زیر برنامه های انتقال گرما^۱ و جریان آرام^۲ در نرم افزار که به صورت کوپل شده قرار داده شدند، استفاده شده است [۱۴]. برای حل مسأله، سیستم را در حالت پایا فرض کردیم. هم چنین فرض شده است که شار گرمایی به صورت پیوسته بر سطح تارگت اعمال می شود. حل مسأله در دمای و فشار محیط انجام شده است. در ابتدا لازم است رفتار و تغییرات دمای سطح هدف در ضخامت های مختلف برای یک سرعت مشخص ورودی که آن را برابر ۱ m/s در نظر گرفته ایم، مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۶ تغییرات دمای سطح هدف در امتداد قطر آن را نشان می دهد.

1. Heat Transfer
2. Laminar Flow



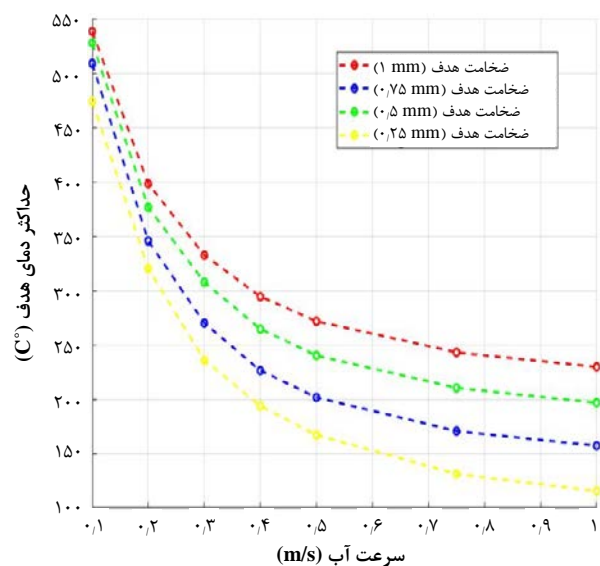


شکل ۹. تغییرات دمای بیشینه‌ی آب برحسب سرعت آب ورودی.

برای طراحی قسمت عایق ورودی ولتاژ بالا می‌توانیم از لوله آلومینا و یا از لوله کوارتز استفاده نماییم که هر دو ماده عایق الکتریکی بسیار خوبی می‌باشند. در این‌جا به دلیل در دسترس بودن از لوله کوارتز استفاده شده است. برای قسمت رسانای ورودی ولتاژ بالا از لوله‌ی مسی استفاده شده است. به دلیل گرمای بیش از حد هدف و نیاز به خنک‌کاری و حفظ دمای هدف در زیر دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، مجبور به استفاده از لوله‌ی مسی برای انتقال آب دی یونیزه و همچنین انتقال ولتاژ بالا از داخل ورودی ولتاژ بالا می‌باشیم. با توجه به شرایط کاری مولد نوترون طراحی شده که شامل حداکثر ولتاژ ۴۰ کیلو ولت و حداکثر جریان ۱۰ میلی آمپر و حداکثر دمای کاری ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، مواد و ابزارهای مورد استفاده به شرح زیر می‌باشد:

- لوله‌ی کوارتز با قطر خارجی ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر به طول ۸۰ سانتی‌متر.
- لوله‌ی آلومینا به قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۹ میلی‌متر به طول ۲۰ سانتی‌متر.
- لوله‌ی مسی به قطر خارجی ۳ میلی‌متر به طول ۲ متر.
- چسب رزین اپوکسی^۱ ولتاژ بالای آرالدیت^۲ (D) به همراه سخت‌شونده^۳ ۹۵۶.
- پودر آلومینا به همراه آب مخصوص به مقدار ۳۰۰ گرم.

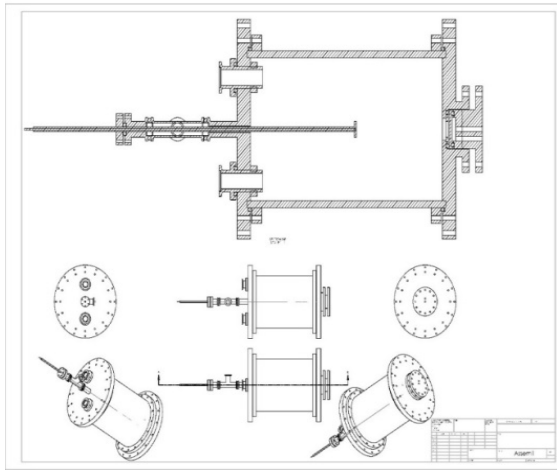
برای یافتن حد سرعت آب ورودی، به گونه‌ای که دمای هدف بیش‌تر از ۲۰۰ درجه‌سانتی‌گراد نشود، نمودار دمای بیشینه سطح هدف برای سرعت‌های مختلف آب در شکل ۸ رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش سرعت آب دمای سطح هدف کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار می‌توان دریافت که برای این‌که هدف در دمای کم‌تر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد باقی بماند بایستی برای ضخامت‌های ۰٫۲۵ mm، ۰٫۵ mm و ۰٫۷۵ mm به ترتیب سرعت‌های آب ورودی برابر ۰٫۳۷۵ m/s، ۰٫۵ m/s و ۰٫۹۵ m/s باشد. برای ضخامت ۱ mm بایستی سرعت آب به بیش از ۱ m/s برسد. نمودار دمای بیشینه آب بر حسب سرعت نیز در شکل ۹ رسم شده است. در این نمودار نیز با افزایش سرعت از دمای بیشینه آب کاسته می‌شود. با استفاده از داده‌های نمودار می‌توان دریافت که برای نگه داشتن دمای آب به زیر ۱۰۰ درجه‌سانتی‌گراد، لازم است که سرعت آب برای ضخامت‌های مختلف، از ۰٫۷۵ m/s بیش‌تر باشد. لذا در این هدف طراحی شده، برای تمام ضخامت‌های ذکر شده، لازم است که سرعت آب ورودی از ۱ m/s بیش‌تر باشد.



شکل ۸. تغییرات دمای بیشینه هدف برحسب سرعت آب ورودی.

1. Epoxy Resin
 2. Araldite D
 3. Hardener HY 956
 Journal of Nuclear Science and Technology
 Vol. 101, No 4, 2022, P 113-123

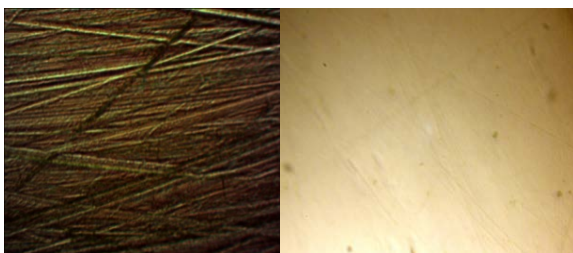




شکل ۱۰. اجزای طراحی شده‌ی محافظه با نرم سالیدورکس.



شکل ۱۱. پولک‌های مسی را قبل و بعد از عملیات پرداخت و صیقلی کردن.



شکل ۱۲. تصویر سطح پولک مسی قبل و بعد از عملیات صیقلی که با میکروسکوپ با بزرگنمایی ۴۰۰ گرفته شده است.

از دستگاه کندوپاش آزمایشگاه برهم کنش پلاسما با مواد پژوهشگرده پلاسما و گداخت هسته‌ای به منظور لایه‌نشانی استفاده شد. ۴ عدد هدف به روش کند و پاش با ضخامت ۱-۰/۵ میکرومتر، در آزمایشگاه لایه‌نشانی شدند. شکل ۱۳ نمونه‌ای از هدف‌های تیتانیومی ساخته شده را نشان می‌دهد. هدف‌های شماره ۱ و ۲ تیتانیوم بر روی زیرلایه‌ای از جنس مس نشانداده شده است در صورتی که هدف شماره ۳ ابتدا بر روی مس تنگستن به‌عنوان لایه میانی و سپس تیتانیوم با روش لایه نشانی کند و پاش قرار گرفته است.

۳.۲ طراحی محافظه خلأ

به منظور آزمون هدف‌های خنک‌شونده، محافظه‌ای برای انجام این فرایند باید طراحی شود. این دستگاه شامل یک محافظه خلأ است که نمونه‌ها جهت آزمون در داخل آن قرار می‌گیرد. برخی از اجزای آن عبارت است از: (۱) ورودی پمپ خلأ (۲) محل اتصال فشارسنج خلأ (۳) ورودی گاز و الکتروند آند (۴) ورودی ولتاژ بالا و خنک‌کننده (۵) درپوش‌های دو طرف محافظه شیشه‌ای. تمامی اجزای این دستگاه با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس^۱ طراحی شد. اجزای طراحی شده‌ی محافظه با نرم‌افزار سالیدورکس در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۳. ساخت

پس از طراحی مجموعه هدف، سامانه خنک‌کننده، ورودی ولتاژ بالا و محافظه خلأ، هدف‌های موردنظر با مشخصات تا حدودی متفاوت با استفاده از لایه‌نشانی کندوپاش ساخت شدند.

۱.۳ ساخت مجموعه هدف و سامانه خنک‌کننده

با استفاده از ورقه‌های مسی در کارگاه، پولک‌های از مس به ضخامت ۳ میلی‌متر و به قطر ۵ سانتی‌متر ساخته شد. وجود روغن ناشی از شرایط کارگاهی و ناهمواری سطح پولک‌ها سبب نایکنواخت شدن ضخامت لایه نشانداده شده می‌شوند. بنابراین پیش از لایه‌نشانی، سطح آن‌ها باید صاف و صیقلی شود. به این منظور ابتدا هر دو طرف سطح پولک با سنباده‌های نرم و بسیار نرم ساییده شد تا سطح آن به خوبی صاف شود و هیچ‌گونه فرورفتگی و یا برجستگی در آن نباشد. سپس سطح پولک مسی با نمک و پودر آلومینیوم پرداخته و خمیر جلاسنج صیقلی شد. به منظور چربی‌زدایی از زیرلایه و تمیز کردن نهایی آن از الکل استفاده کردیم. شکل ۱۱ پولک‌های مسی را قبل و بعد از عملیات پرداخت و صیقلی کردن نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲ تصویر سطح پولک‌ها را قبل و بعد از صیقلی نمودن نشان می‌دهد که توسط میکروسکوپ با بزرگنمایی ۴۰۰ گرفته شده است.



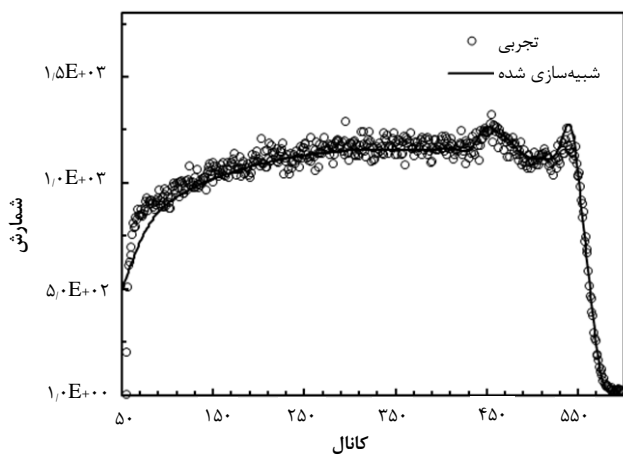
مرز مشترک مس و تیتانیوم وجود دارد که ناشی از آلودگی‌های موجود در دستگاه کند و پاش می باشد. به منظور جهت خنک‌کاری هدف از آب دیونیزه به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شد. شکل ۱۶ تجهیزات مورد استفاده جهت ساخت سامانه خنک‌کاری و سوار شده بر روی هدف را نشان می‌دهد.



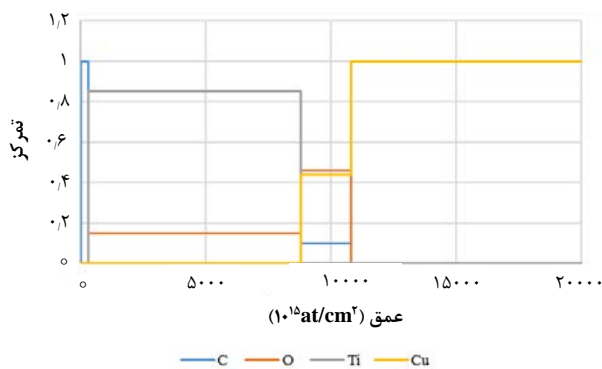
شکل ۱۳. نمونه‌های از هدف‌های تیتانیومی ساخته شده.

جدول ۱. نتایج تعیین ضخامت با استفاده از روش RBS برای ۲ هدف تیتانیومی

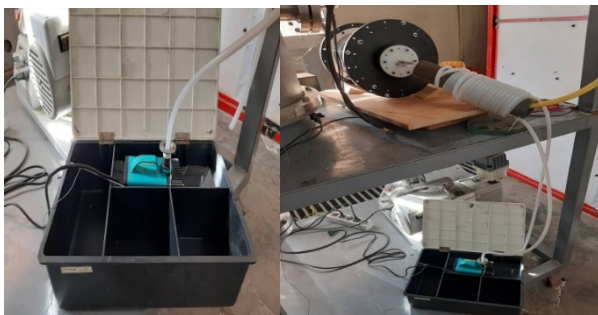
شماره هدف	ضخامت اندازه‌گیری شده با روش RBS برحسب میکرومتر
۱	۱٫۵
۲	۱٫۴
۳	۱٫۱



شکل ۱۴. نتایج آنالیز RBS هدف شماره ۱.



شکل ۱۵. چگالی یون‌های تیتانیوم و مس هدف شماره ۱.



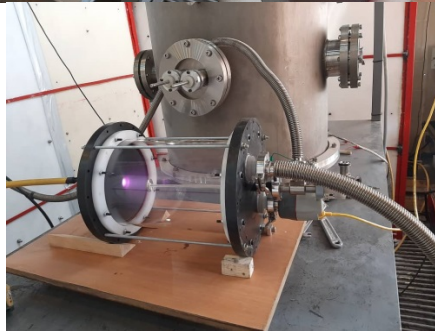
شکل ۱۶. سامانه خنک‌کاری ساخته شده

ضخامت لایه تیتانیومی با استفاده از آنالیز RBS^۱ در آزمایشگاه فیزیک ذرات باردار پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. با آنالیز به کمک پرتابه پروتون ۲٫۲ MeV و یک آشکارساز سد سطحی تحت زاویه پراکندگی ۱۶۵° انجام شد. با تحلیل طیف ثبتي می‌توان جرم هسته هدف و عمق آن را تعیین نمود. شبیه‌سازی طیف پس پراکندگی رادرفورد به کمک نرم‌افزار SIMNRA ۷٫۰۲ و با استفاده از رابطه توان توقف Zigler/Biersack و مدل تفرق Chu&Yang انجام شده است [۱۳]. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، سطح مقطع پراکندگی پروتون از روی هسته‌های تیتانیوم، اکسیژن و کربن بر اساس داده‌های ارزیابی شده و برای مس رادرفورد در نظر گرفته شدند. هر چه اتم هدف کوچک‌تر و عمقی که برخورد در آن انجام می‌شود بیشتر باشد، انرژی ذره برگشتی کم‌تر است. چون پرتابه با توجه به توان توقف ماده، مقدار از انرژی خود را از دست می‌دهد در نتیجه انرژی برگشتی از سطح با انرژی برگشتی از ذراتی که عمق هستند، متفاوت خواهد بود و در نهایت پهنای قله مربوط می‌شود. با محاسبه پهنای و در نظر گرفتن قدرت جداکنندگی آشکارساز مقدار عمق تعیین می‌گردد. با این روش اندازه‌گیری عمق در حد میکرون امکان‌پذیر است و حساسیت آن برای عناصر سنگین بهتر است. در جدول ۱ نتایج تعیین ضخامت با استفاده از روش RBS برای ۲ هدف آورده شده است.

شکل ۱۴ نتایج آنالیز RBS هدف شماره ۱ که با پرتابه پروتون ۲٫۲ MeV که در زاویه آشکارسازی ۱۶۵° انجام شده است را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ میزان غلظت اتم‌های تیتانیوم و مس را در هدف شماره ۱ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است میزان کمی ناخالصی اکسیژن و کربن در

1. Rutherford Backscattering Spectrometry





شکل ۱۸. دستگاه آزمون هدف در حین کار.

جدول ۲. داده‌های مربوط به بمباران دوتریومی هدف ساخته شده

هدف	ولتاژ (kV)	جریان (mA)	شمارش (n/s)	خطای اندازه‌گیری
هدف مسی	۲۵	۲۰	$3,45 \times 10^5$	۱۰٪
هدف تیتانیومی با ضخامت ۱٫۵ میکرومتر	۲۵	۲۰	$6,28 \times 10^5$	۳٪
هدف تیتانیومی با ضخامت ۱٫۴ میکرومتر	۲۵	۲۰	$5,67 \times 10^5$	۵٪
هدف تیتانیومی با ضخامت ۱٫۱ میکرومتر	۲۵	۲۰	$5,19 \times 10^5$	۶٪

۵. نتیجه‌گیری

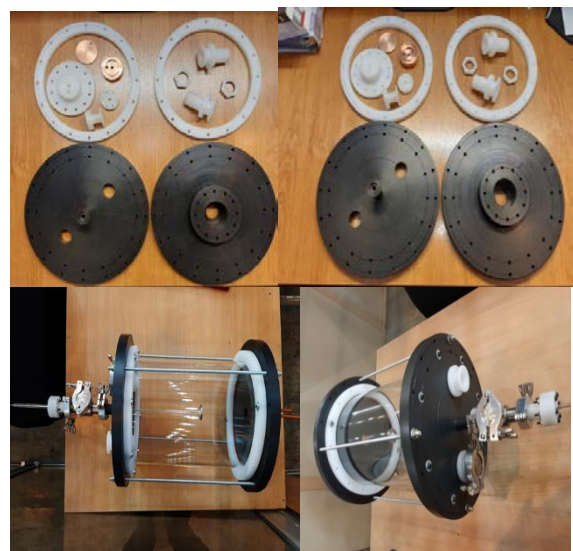
با توجه به موفقیت‌آمیز بودن آزمایش‌ها و عملکرد قابل قبول بخش‌های مختلف و هم‌چنین نتایج خوب به دست آمده، می‌توان اطمینان داشت که روش‌های به کار برده شده برای تعیین پارامترهای مؤثر در طراحی هدف و سامانه خنک‌کننده و نحوه عایق‌کاری آن‌ها، روش‌های مناسبی می‌باشند. نتایج ما نشان داد که برای ساخت هدف جامد مولد نوترون ۴۰۰ وات، هرچه ضخامت هدف کم‌تر باشد دمای هدف از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کم‌تر خواهد شد و دمای بیشینه‌ی هدف کاهش پیدا می‌کند. اما از طرفی کاهش ضخامت هدف، منجر به ازدیاد دمای آب به بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خواهد شد. هم‌چنین به دلیل آن‌که هدف در تماس مستقیم با آب قرار دارد بایستی ضخامت هدف را طوری در نظر گرفت که فشار آب تأثیری بر اعوجاج و خمیدگی بر روی سطح هدف نداشته باشد. لذا با توجه به مقادیر به دست آمده برای بیشینه دمای هدف و آب می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ضخامت هدفی برابر با یک میکرومتر که در آن سرعت آب ورودی برابر با $0,95 \text{ m/s}$ در نظر گرفته شده باشد، بهترین گزینه برای خنک‌کاری هدف می‌باشد. هم‌چنین

۲.۳ ساخت محفظه خلأ

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، به منظور آزمون هدف‌ها، محفظه‌ای طراحی و نقشه‌های فنی آن ارایه گردید. در شکل ۱۷ بخش‌های مختلف ساخته شده و مونتاژ آن‌ها، نمایش داده شده است.

۴. انجام آزمایش و داده‌گیری

پس از نصب هدف در محل محفظه خلأ، در هر آزمایش، سیستم توسط پمپ توربو پرخشی موجود در آزمایشگاه تحت خلأ قرار گرفت. برای هر آزمایش جریان تا حدود ۲۰ میلی‌آمپر تنظیم و ولتاژ تا حدود ۲۵ کیلو ولت تغییر یافت و تعداد نوترون‌های تولید شده توسط نوترون پروب LB۶۴۱۱ ثبت شد. ابتدا هدف مسی خالص با ضخامت ۳ میلی‌متر را جهت اندازه‌گیری بهره نوترونی نصب کردیم و سیستم را تحت خلأ قرار دادیم. مشاهده گردید که با کاهش فشار و پس از تزریق گاز دوتریوم پس از چند ثانیه اولین نوترون توسط آشکارساز ثبت گردید. شکل ۱۸ دستگاه ساخته شده را حین کار زمانی که پلاسما تشکیل می‌شود نشان می‌دهد. سپس هدف‌های تیتانیومی ساخته شده را در محل نگه‌دارنده هدف محفظه خلأ جایگزین کردیم. داده‌های مربوط به بمباران دوتریومی هدف‌های ساخته شده در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۷. بخش‌های مختلف ساخته شده و مونتاژ محفظه خلأ.



6. R.W. Bussard, *Waste Transmutation by High Flux DT Fusion Neutrons from Inertial Electrostatic Fusion (IEF) Systems*, *Global 1993 International Conference and Technology Exhibition on Future Nuclear Systems*, Sep. 12-17, (1993).
7. K.N. Leunga, J.K. Leung, G. Melville, *Feasibility study on medical isotope production using a compact neutron generator*, *Appl. Radiat. Isot.*, **137**, 23 (2018).
8. K.N. Leung, et al., *A High Intensity Multi-Purpose DD Neutron Generator for Nuclear Engineering Laboratories*, *REPORT: No. DOE/ID/14606*. University of California at Berkeley, (2005).
9. K. Bergaoui, et al., *Development of a new deuterium-deuterium (D-D) neutron generator for prompt gamma-ray neutron activation analysis*, *Appl. Radiat. Isot.*, **94**, 319 (2014).
10. J. Csikai, *CRC Handbook of Fast Neutron Generators*, *CRC Press, Boca Raton* (1987).
11. R. Bowden-Reid, et al., *Evidence for surface fusion in inertial electrostatic confinement devices*, *Phys. Plasmas*, **25**, 112702 (2018).
12. J. Csikai, et al., *Production of solid deuterium targets by ion implantation*, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, **397**, 75 (1997).
13. M. Mayer, *SIMNRA, a Simulation Program for the Analysis of NRA, RBS and ERDA*, In: J.L. Duggan, I.L. Morgan (Eds.), *Proceedings of the 15th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry*, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, **475**, 541 (1999).
14. COMSOL, *COMSOL Multiphysics Heat Transfer Module User's Guide version 5.3a* (2017).

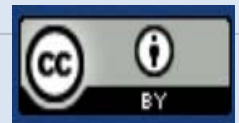
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بهره نوترون با افزایش ضخامت هدف افزایش می‌یابد. در واقع هدف با ضخامت بیش‌تر قادر به جذب مقدار بیش‌تری از دوتریوم است که همین امر موجب افزایش بهره نوترون نسبت به هدف‌های دیگر شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پدیده گداخت سطحی موجب افزایش نرخ نوترون تولیدی در دستگاه مولد نوترون صنعتی می‌شود.

مراجع

1. J.M. Elizondo-Decanini, et al., *Novel Surface-Mounted Neutron Generator*, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **40**, 2145 (2012).
2. J. Reijonen, et al., *D-D neutron generator development at LBNL*, *Appl. Radiat. Isot.*, **63**, 757 (2005).
3. B.A. Ludewigt, R.P. Wells, J. Reijonen, *High-yield D-T neutron generator*, *Nucl Instrum Meth B*, **261**, 830 (200).
4. D. Totsuka, et al., *Performance test of Si PIN photodiode line scanner for thermal neutron detection*, *Nucl Instrum Meth A*, **659**, 399 (2011).
5. K. Yoshikawa, et al., *Research and development of a compact discharge-driven D-D fusion neutron source for explosive detection*, *Nucl Instrum Meth B*, **261**, 299 (2007).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

آمنه کارگریان، مریم قبانوری، مرتضی صداقت، علیرضا اصل زعییم، علی باقری (۱۴۰۱)، طراحی و ساخت هدف جامد به‌همراه سامانه خنک‌کننده جهت بررسی پدیده گداخت سطحی، ۱۰۱، ۱۱۳-۱۲۳

DOI: 10.24200/nst.2022.1453

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1453.html

