

طراحی، ساخت و مشخصه‌یابی لایه نازک تیتانیوم قابل کاربرد در هدف دوتریومی

INC29-1151

مریم کریمی، علیرضا گرائیلی*، مجید مجتهدزاده

پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران- ایران

چکیده:

در این مقاله، لایه نازک تیتانیوم قابل کاربرد در هدف دوتریومی، به منظور تولید شار نوترونی با استفاده از شتاب‌دهنده الکتروستاتیک، طراحی و ساخته شد. هدف متشکل از لایه و زیرلایه می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های رسانایی حرارتی بالا، اقتصادی بودن و دسترسی آسان، مس به عنوان زیرلایه انتخاب شد. ضخامت کلی زیرلایه مسی 2 mm تعیین شد و با توجه به ابعاد نگهدارنده هدف، قطر پولک $5/31\text{ mm}$ در نظر گرفته شد. همچنین، به دلیل بازده نوترونی بالاتر، لایه از جنس تیتانیوم انتخاب شد. برای جلوگیری از انحراف جزئی مرکز باریکه دوتریومی از مرکز هدف، قطر لایه تیتانیوم 25 mm انتخاب شد. علاوه بر این، با استفاده از نرم‌افزار سریم ضخامت مناسب برای لایه محاسبه شد. همچنین، از روش جرمی به منظور تعیین ضخامت لایه استفاده شد که ضخامت لایه انباشت شده $1/97\text{ میکرون}$ به دست آمد. پس از طراحی و ساخت هدف، طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس جهت بلورنگاری نمونه ساخته شده و زیرلایه به کار برده شد.

کلیدواژه‌ها: هدف دوتریومی، تیتانیوم، سریم، طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس، شار نوترونی

Design, fabrication and characterization of titanium thin film applicable in deuterium target

M. Karimi, A.R.Grayeli*, Majid Mojtahedzadeh

Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran

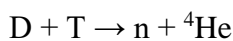
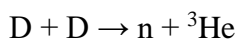
Abstract:

In this article, the titanium thin film applicable to the deuterium target was designed and manufactured in order to produce a neutron flux using an electrostatic accelerator. This target consists of a layer and substrate. Due to its high thermal conductivity, economy and easy access, copper was chosen as the substrate. The overall thickness of the copper substrate was chosen to be 2 mm, and according to the dimensions of the target holder, the diameter of the flakes was considered to be 31.5 mm. Also, due to the higher neutron efficiency, the titanium was chosen as a layer. In order to prevent the partial deviation of the deuteron beam center from the target center, the diameter of the titanium layer was chosen to be 25 mm. In addition, using SRIM software, the appropriate thickness for the layer was calculated. Also, the mass method was used to determine the thickness of the layer, and the thickness of the accumulated layer was obtained as $1.97\text{ }\mu\text{m}$. After designing and manufacturing the target, X-ray diffraction spectroscopy was used for crystallography of the target sample and the substrate.

Keywords: Deuterium target, Titanium, SRIM, X-ray diffraction spectroscopy, neutron flux.

۱. مقدمه

نوترون نقش مهمی در پژوهش‌های بنیادی و کاربردی در علوم و فنون هسته‌ای دارد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای نوترون، قابلیت تسریع شکافت عناصر ناپایدار برای تولید انرژی الکتریکی است. نوترون‌ها بر اساس قدرت چشمه نوترون، در زمینه‌های متعددی از جمله پزشکی، امنیت، تحقیقات، تسلیحات اتمی، زیست‌شناسی، علم مواد، آشکارسازی مواد منفجره و مین‌های دفن‌شده، آشکارسازی سلاح‌های شیمیایی، شکافت و همجوشی، ژئوفیزیک، اکتشاف نفت، اکتشاف اورانیوم کاربرد دارند. با وجود این‌که راکتورهای اتمی بزرگ‌ترین منابع تولید نوترون هستند ولی اندازه، پیچیدگی و قیمت بالای آن‌ها استفاده‌های صنعتی آن‌ها را محدود کرده است. به‌طور کلی برای تولید نوترون از چشمه‌هایی چون راکتورهای هسته‌ای (چشمه‌های حاصل از شکافت)، شتاب‌دهنده‌ها، ژنراتورهای نوترون و چشمه‌های رادیوایزوتوپی استفاده می‌شود. یک راه بسیار مناسب برای تولید نوترون انرژی دادن به یون‌های گاز با کمک شتاب‌دهنده ذرات است. گاز مناسب برای این منظور دوتریوم یعنی هیدروژنی است که هسته‌ی آن شامل یک پروتون و یک نوترون به‌جای تنها یک پروتون است و به نام هیدروژن سنگین شناخته شده است. دوتریوم به خاطر بار کم و اندازه کوچک آن می‌تواند به داخل هسته عناصر بمباران شونده نفوذ کند و نوترون‌ها را آزاد کند. بنابراین همان‌طور که ذکر شد اساس کار تولید نوترون در شتاب‌دهنده‌ها برخورد یک باریکه از ذرات باردار به یک هدف و در نتیجه تولید نوترون می‌باشد. مولدهای نوترون، چشمه‌های نوترونی هستند که بر اساس واکنش‌های زیر کار می‌کنند.



این گروه از مولدهای نوترون شامل چشمه تولید یون با امواج فرکانس بالا، عدسی، سیستم شتاب‌دهنده، هدف و منبع تغذیه (چشمه ولتاژ سیم‌لوله، چشمه ولتاژ کانونی‌کننده، چشمه ولتاژ شتاب‌دهنده) می‌باشند. این مولدها همچنین شامل محفظه خلاء، پمپ روتاری، پمپ توربومولوکولار، فشارسنج‌های خلاء، اپتیک استخراج یون دوتریوم از پلاسما، سیستم تزریق گاز به چشمه یون، تارگت تیتانیوم، غلاف الکترونی، سیستم جفت‌شدگی پلاسما، مدار چرخش آب برای سیستم خنک‌کننده مولد امواج رادیویی و کوئل القا برای ایجاد پلاسما و محفظه پلاسمایی می‌باشند [۳-۱]. یکی از اجزای اصلی استفاده شده در مولدهای نوترون، هدف است. هدف استفاده‌شده در این‌گونه مولدهای نوترون به‌طور معمول لایه نازک فلزی است که بر روی زیر لایه‌ای که به‌طور عمده از جنس مس یا اسکاندیوم و یا تیتانیوم است، لایه نشانی شده است. ضخامت هدف به نوع استفاده از آن بستگی دارد هر چه به بهره نوترونی بالاتری نیاز باشد باید ضخامت لایه جاذب را افزایش داد. بازده نوترون تولید شده اغلب به جنس لایه، میزان گیراندازی دوتریوم و تریتیوم و همچنین توان توقف آن ماده، وابسته است. هرچه مقدار دوتریوم و تریتیوم گیر افتاده بیشتر باشد، احتمال وقوع واکنش همجوشی هسته‌ای بیشتری بین یون‌های ورودی و هسته‌های هدف وجود دارد [۴-۶].

در این مقاله هدف طراحی و ساخت هدف جامد دوتریومی متشکل از لایه و زیرلایه جهت تولید شار نوترونی با استفاده از شتاب‌دهنده الکتروستاتیک می‌باشد. در این راستا برای طراحی مجموعه هدف، از نرم‌افزار سریم استفاده شده است. انباشت لایه نازک با استفاده از دستگاه کندوپاش یونی و مخلوطی از گازهای آرگون و دوتریوم با خلوص بالا انجام شده است. همچنین، مشخصه‌یابی مجموعه هدف ساخته شده با استفاده از طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس انجام شده است.

۲. روش کار

زیرلایه به‌عنوان نگهدارنده لایه عمل می‌کند. رسانایی حرارتی بالا یکی از ویژگی‌های اجتناب‌ناپذیر برای انتخاب زیرلایه می‌باشد. علاوه بر این، اقتصادی بودن و دسترس به مراتب آسان‌تر به جنس زیرلایه با درجه خلوص بالا، باعث شد تا مس به‌عنوان زیرلایه انتخاب شود [۷]. با استفاده از عملیات تراشکاری، زیرلایه مسی به صورت پولکی با قطر ۳۱/۵ میلی‌متر ساخته شد که ابعاد و هندسه پولک با توجه به ابعاد موقعیت نگهدارنده هدف در شتاب‌دهنده الکتروستاتیک مورد استفاده انتخاب شد. شکل ۱ تصویر پولک مسی ساخته شده را نشان می‌دهد. ضخامت کلی پولک ۲ میلی‌متر

انتخاب شد تا ضمن تحمل تغییر فشار ناشی از خلا در دو سطح آن حین فرآیندهای بمباران و انباشت، انتقال حرارتی مناسب نیز امکان‌پذیر باشد. حال آن‌که این ضخامت باید ملزومات فنی و امکان‌پذیری در دستگاه‌های تراشکاری را نیز داشته باشد.



شکل ۱. زیرلایه مسی تراشکاری شده

بر اساس محاسبات نظری و نتایج تجربی، عناصری مانند تیتانیوم و زیرکونیوم بیشترین توانایی را در تولید هیدریدهای فلزی دارند. این هدف‌ها تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار هستند و نسبت اتم‌های هیدروژن جذب شده به اتم‌های فلزی نزدیک به ۱/۵ دارند. در مقایسه با زیرکونیوم، تیتانیوم دارای دانسیته کمتر است لذا برد ذرات باردار در هدف‌های تیتانیومی بیشتر است. همچنین، به دلیل توان توقف اتمی کمتر تیتانیوم، هدف‌های تیتانیوم دارای بازده نوترونی بالاتری نسبت به هدف‌های زیرکونیومی هستند [۸]. بنابراین، در این پروژه، هدف از جنس تیتانیوم انتخاب شده است. با توجه به اینکه قطر باریکه دوترونی مولد نوترون مورد استفاده برابر ۲۰ میلی‌متر می‌باشد، قطر لایه تیتانیوم به اندازه ۲۵ میلی‌متر انتخاب شد تا در صورت انحراف جزئی مرکز باریکه از مرکز هدف، باریکه از محدوده تیتانیومی مجموعه هدف خارج نشود. به منظور انتخاب ضخامت لایه، دانستن برد دوترون در تیتانیوم اهمیت دارد. برد دوترون با انرژی E در تیتانیوم با استفاده از نرم‌افزار سریم محاسبه شد. کد سریم متشکل از گروهی از برنامه‌ها است که نفوذ و پراکندگی یون‌ها را برای مواد با استفاده از روابط مکانیک کوانتوم محاسبه می‌نماید. روش شبیه‌سازی مورد استفاده در این کد بر اساس روش مونت کارلو است. توزیع عمق نفوذ، انرژی و نیز توزیع زاویه‌ای یون‌ها از نتایج توسعه‌یافته برنامه است. با کمک برنامه سریم و تنها با مشخص کردن نوع و انرژی ذره فرودی، چگالی و نوع محیط تحت بمباران، می‌توان به راحتی میزان نفوذ ذره شتاب داده شده را در مواد گوناگون، در انرژی‌های مختلف به دست آورد. این میزان نفوذ با عنوان برد در برنامه سریم به دست می‌آید و در حقیقت بیان‌کننده میزان نفوذ ذره فرودی قبل از توقف کامل و از دست دادن انرژی است. نکته فنی مهم دیگر در طراحی هدف‌های جامد انتقال حرارت و خنک‌کاری آن می‌باشد. برخورد باریکه دوترون به سطح هدف، باعث بالا رفتن دمای هدف می‌شود. برخورد دوترون‌ها با انرژی ۱۵۰ keV و جریان ۲۰۰ μA به سطح دایره‌ای از هدف به قطر ۲۵ mm باعث انتقال ۶/۱۲ w/cm² انرژی به هدف می‌شود که در مقایسه با دمای ذوب بالای تیتانیوم (۱۶۶۸ °C) تغییر حالتی در هدف ایجاد نخواهد کرد و گرمای تولید شده به راحتی از طریق زیرلایه مسی به آبی که به عنوان خنک‌کننده در پشت هدف جاری است منتقل می‌گردد [۹]. فرآیند انباشت تیتانیوم بر روی زیرلایه مسی توسط دستگاه کندوپاش یونی انجام می‌شود که چگالی با انرژی ۵-۲ keV و حداکثر جریان پرتوی ۵-۱۰ mA پرتودهی می‌کند. شکل ۲ دستگاه مورد استفاده جهت انباشت لایه هدف را نشان می‌دهد. این دستگاه از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

- چشمه یونی
- چشمه اتمی (چشمه پراکنش یونی)
- چشمه الکترونی
- سیستم خلاء و تغذیه گاز
- سیستم پایه چرخان و اندازه‌گیری پرتو

• سیستم خنک‌کننده

• منابع تغذیه و سیستم اندازه‌گیری و کنترل نیرو

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی و تمیز شدن با استفاده از روش آلتراسونیک، داخل محفظه دستگاه و روی نگهدارنده زیرلایه، که یک گرم‌کن برای تنظیم دمای زیرلایه در آن تعبیه شده است، قرار داده می‌شوند. دمای زیرلایه به وسیله یک ترموکوپل متصل به نگهدارنده کنترل می‌شود. پس از راه‌اندازی سیستم و ایجاد خلاء اولیه تا 10^{-3} میلی‌بار به وسیله پمپ‌های روتاری، پمپ‌های دیفیوژن که به طور سری به پمپ‌های روتاری و محفظه خلاء متصل‌اند، روشن می‌شوند. پس از ایجاد خلاء 10^{-6} میلی‌بار و بالا رفتن دمای زیرلایه تا اندازه موردنظر، گازها به سمت چشمه‌های کافمن هدایت شده و بعد از یونیزه شدن داخل چشمه و تشکیل پلاسما، یون‌ها با ولتاژ شتاب‌دهنده $2/2kV$ به سمت هدف شتاب‌دار می‌شوند. جریان بین چشمه و هدف که در اثر انتقال یون‌ها به سمت هدف ایجاد می‌شود در $20mA$ ثابت نگه داشته می‌شود. در این فرآیند آرگون و دوتریوم به ترتیب به عنوان گاز کاری و گاز واکنشی در نظر گرفته شده‌اند. برخورد یون‌های شتاب‌دار آرگون با هدف تیتانیومی منجر به پراکنش اتم‌های تیتانیوم می‌شود. ذرات پراکنده شده از سطح هدف و همچنین یون‌های دوتریوم موجود در محفظه خلا به سمت زیرلایه حرکت می‌کنند و امکان انجام واکنش بین اتم‌های تیتانیوم کنده شده و یون‌های دوتریوم و در نتیجه امکان تشکیل لایه هدف بر روی بسترهای مسی فراهم می‌شود. شکل ۳ تصویری از مجموعه هدف ساخته شده را نشان می‌دهد.



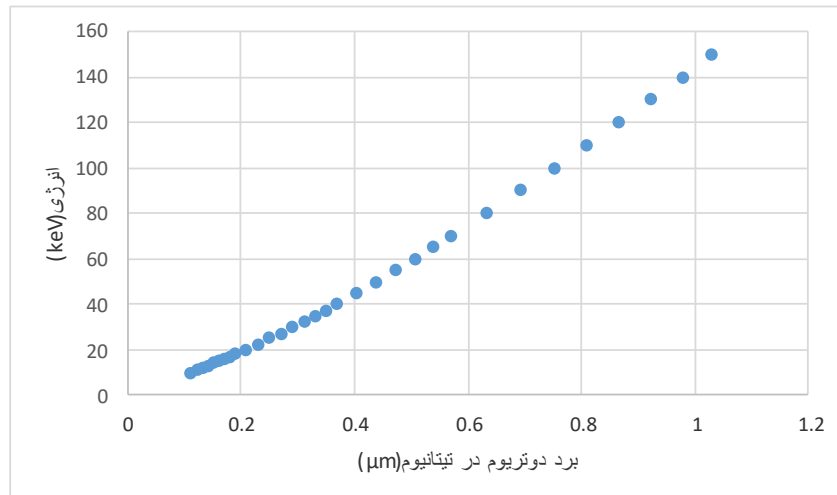
شکل ۳. نمونه هدف شامل لایه تیتانیوم بر زیرلایه مسی



شکل ۲. تصویر سیستم MBM-100

۳. نتایج

انتخاب ضخامت بهینه لایه هدف، نکته اساسی به منظور دستیابی به طول عمر مناسب و ماکزیمم بهره نوترونی می‌باشد. در این پروژه به منظور انتخاب ضخامت لایه هدف با توجه به اینکه هدف از جنس تیتانیوم انتخاب شده است میزان عمق نفوذ یون‌های دوتریوم در تیتانیوم بر حسب انرژی یون دوتریوم با استفاده از نرم‌افزار سریم محاسبه شد. نمودار حاصل در شکل ۴ نشان داده شده است. جدول ۱ نیز برد دوتریوم با انرژی‌های مختلف در تیتانیوم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر انرژی دوترون‌های فرودی از ۹۰ تا ۱۵۰ کیلو الکترون‌ولت، طول توقف کامل دوترون‌ها در تیتانیوم از $0/692$ تا $1/03$ میکرومتر تغییر می‌کند. بنابراین ضخامت لایه تیتانیوم باید بیشتر از بیشینه عمق نفوذ ذره فرودی باشد.

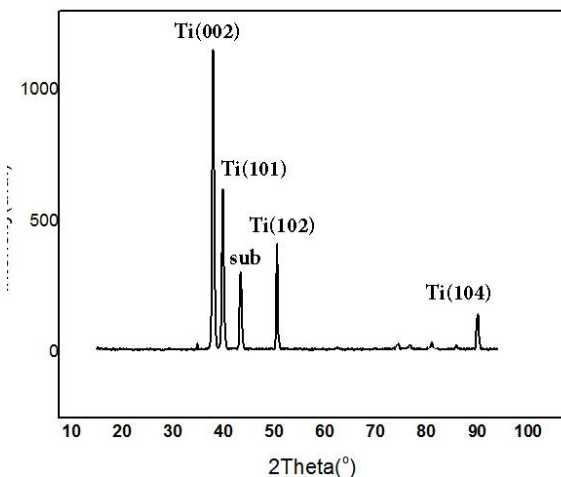


شکل ۴. برد دوتریوم در تیتانیوم برحسب انرژی دوتریوم

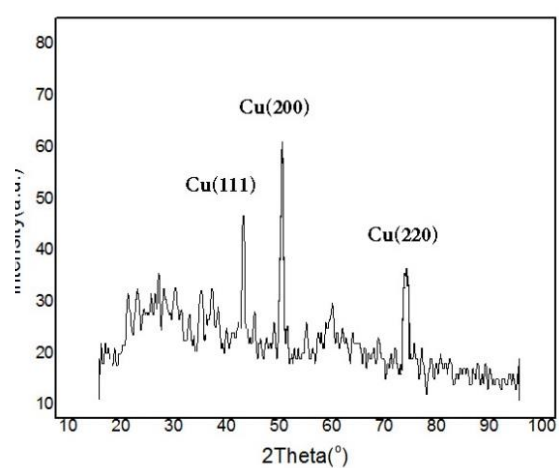
جدول ۱. برد دوتریوم در تیتانیوم با انرژی‌های مختلف.

انرژی دوتریوم (keV)	برد دوتریوم (μm)
۱۵۰	۱/۰۳
۱۴۰	۰/۹۷۷
۱۳۰	۰/۹۲۱
۱۲۰	۰/۸۶۵
۱۱۰	۰/۸۰۸
۱۰۰	۰/۷۵۱
۹۰	۰/۶۹۲

یکی از روش‌های اندازه‌گیری ضخامت لایه هدف، روش جرمی است. در این روش ابتدا وزن پولک‌های مسی با ضخامت ۲mm، قبل (۱۱/۱۴۷۱ گرم) و بعد از لایه‌نشانی (۱۱/۱۵۲۴ گرم) با استفاده از یک ترازو با دقت چهار رقم اعشار اندازه‌گیری شد. اختلاف این دو اندازه‌گیری برابر با وزن تیتانیوم لایه نشانی شده می‌باشد. با داشتن چگالی تیتانیوم ($4/45 \text{ g/cm}^3$) حجم لایه تیتانیوم که به شکل استوانه است به دست می‌آید. با توجه به قطر لایه تیتانیوم (۲۵ mm) و با محاسبه حجم استوانه ($\pi r^2 h$) می‌توان h یا ضخامت لایه تیتانیوم را تخمین زد که $1/97 \mu\text{m}$ به دست آمد. بنابراین ضخامت لایه انباشت شده در بازه پیش‌بینی شده کد سریم قرار گرفت.



شکل ۶. طیف بلورنگاری مربوط به مجموعه هدف



شکل ۵. طیف بلورنگاری مربوط به زیرلایه مسی

پس از طراحی و ساخت هدف، بلورنگاری نمونه هدف ساخته شده و زیرلایه، مورد بررسی و تحلیل پراش پرتو ایکس قرار گرفتند. طیف مربوط به زیرلایه مسی و هدف ساخته شده در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از طیف پراش زیرلایه مسی مشخص است، این طیف دارای سه پیک با جهت‌گیری‌های $\text{Cu}(111)$ ، $\text{Cu}(200)$ و $\text{Cu}(220)$ به ترتیب در زوایای $43/31^\circ$ و $50/45^\circ$ و $74/12^\circ$ درجه می‌باشد. طیف پراش نمونه هدف، دارای چهار پیک با جهت‌گیری‌های $\text{Ti}(002)$ ، $\text{Ti}(101)$ ، $\text{Ti}(102)$ و $\text{Ti}(104)$ به ترتیب در زوایای $38/42^\circ$ ، $40/17^\circ$ ، $53/00^\circ$ و $92/73^\circ$ درجه می‌باشد. همچنین یک پیک ($\text{Cu}(111)$) مربوط به زیرلایه در طیف پراش هدف قابل مشاهده است که دلیل آن نفوذ پرتوهای ایکس به عمق نمونه است. با توجه به ضخامت لایه هدف و این موضوع که عمق نفوذ پرتوهای ایکس در فلزات بین ۳ تا ۵ میکرون است نفوذ پرتو ایکس به زیرلایه و ثبت صفحات مس محتمل می‌باشد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری:

در این مقاله به منظور طراحی هدف دوتریومی، از دستگاه کندوپاش یونی با فشار پایه 10^{-6} میلی‌بار و گازهای آرگون و دوتریوم با خلوص بالا برای انجام فرآیند انباشت لایه نازک استفاده شده است. به این ترتیب در شرایط خلأ مناسب ایجاد شده و حذف ناخالصی‌های موجود در محفظه، لایه تیتانیوم بر روی زیرلایه مسی با ضخامت حدود ۲ میکرون انباشت شده است. با استفاده از محاسبات روش جرمی، ضخامت لایه انباشت شده، $1/97$ میکرون به دست آمد. حال آن‌که با استفاده از کد سریم بازه توقف دوترون‌ها در تیتانیوم $0/692$ تا $1/03$ میکرومتر پیش‌بینی شده بود. آنالیز بلورنگاری برای مشخصه‌یابی نمونه‌های انباشت شده، پیک‌های مختلف تیتانیوم با جهت‌گیری غالب $\text{Ti}(002)$ را در زاویه $38/42^\circ$ درجه برای لایه نازک انباشت شده، نشان داد. همچنین طیف نمونه انباشت شده، پیک $\text{Cu}(111)$ در زاویه $43/31^\circ$ را که مربوط به زیرلایه است، را نیز نشان می‌دهد.

۵. مراجع:

- [1] N. Kardjilov, R. Woracek and I. Manke, Neutron Imaging, in Nanotechnologies and Nanomaterials for Diagnostic, Conservation and Restoration of Cultural Heritage, Elsevier, 2019, ch. 3, pp. 47–59.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] C. Monnin, A. Ballanger, E. Sciora, A. Steinbrunn, P. Alexandre, G. Pelcot, "Characterization of deuteride titanium targets used in neutron generators" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 453, (2000), 493-500.
- [5] V.M. Bystritsky, G.N. Dudkin, M. Filipowicz, Yu.Zh. Tuleushev, E.A. Zhakanbaev, "Targets of deuterides TiD_2 , ZrD_2 , NbD , and CrD_2 with different structures used in experiments on the study of pd and dd reactions at astrophysical energies", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 810, (2016), 80–85.
- [6] 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, (2014)0319-326.

- [7] M .Mehrabi,S. Vosoughi,aN. Salek, M. Ghapanvari,cInvestigation of geometric effects on fast neutron radiography using IECF, Annals of Nuclear Energy, 181 (2023) 109547.
- [8] J. Csikai, S. Szegedi, L. Olah, S.M. Ibrahim, A.M. El-Megrab, N.I. Mollad, M.M. Rahmand, R.U. Miahd, F. Habbani, I. Shaddad, Production of solid deuterium targets by ion implantation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 397 (1997) 75-80
- [9] P.Tayyebi, F.Abbasi Davani, Design and Construction of Deuterium Target for Fast Neutron Production, International Workshop on Real Time Measurement, Instrumentation & Control [RTMIC] 2010