بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده مهندسی هسته‌ای

رشته مهندسی هسته‌ای- گرایش کاربرد پرتوها

پایان نامه کارشناسی ارشد

**عنوان:**

# بررسی تغییرات نوترون‌دهی دستگاه پلاسمای کانونی با قرار دادن هدف دوتریومی داخل دستگاه

نـگارش:

زهرا شهبازی راد

اساتید راهنما:

دکتر مجید شهریاری

دکتر فریدون عباسی دوانی

تیر ماه ۱۳۹۰

# «تشکر و قدردانی»

«سپاس خدای را بر آن چه از وجود مبارکش به ما شناسانده، و بر آن چه از شکرش به ما الهام فرموده، و بر آن در های دانش که به پروردگاریش بر ما گشوده و به اخلاص در توحید و یگانگی اش ما را راهنمون شده، چنان سپاسی که با آن در زمره ی سپاسگزارانش زندگی کنیم.» (صحیفه سجادیه)

خداوند را به خاطر نعمت وجود پدر و مادری مهربان سپاسگزارم که مرا در مسیر شناخت او قرار دادند و همواره در این مسیر پشتیبان و یاور من بودند.

چگونه می توان تقدیر کرد مقام استاد فرزانه ای چون **شهید دکتر مجید شهریاری** را که نه تنها با علم و تواضع و اخلاقش راهنما بود، بلکه با نثار خونش بهترین درس ها را به ما آموخت.

صمیمانه از زحمات و راهنمایی های پدرانه استادگران قدر جناب آقای **دکتر عباسی** که همواره در این مسیر کمک ها و حمایت هایشان رو شکر راه بوده است، تشکر و قدردانی می کنم.

از زحمات همه اساتیدی که در این مدت افتخار شاگردیشان را داشتم به ویژه سرکار خانم مهندس قاسمی که صبوری اشان و حضورشان بعد از شهادت دکتر شهریاری همواره برای ما دلگرم کننده و امید بخش و درس آموز بود، سپاسگزارم.

از جناب آقای مهندس شیرانی و سرکار خانم مهندس دارستانی که از ابتدای پایان نامه تا پایان آن همواره از کمک ها و همراهی هایشان استفاده کردم، صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می نمایم.

از همه دوستان و عزیزانی که در طول انجام پروژه به هر نحو مرا یاری دادند به ویژه سرکار خانم مهندس شبان آزاد که در بخش های مهندسی مواد از راهنمایی هایشان استفاده کردم و هم چنین سرکار خانم مهندس طیبی، سرکار خانم مهندس رستگار مقدم، سرکار خانم مهندس زارعی و سرکار خانم محمد طهرانی بسیار متشکر و سپاسگزارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه متعلق به دانشگاه شهید بهشتی
می‌باشد.

**به نام خدا**

**نام و نام خانوادگی: زهرا شهبازی راد**
**عنوان پایان نامه: بررسی تغییرات نوترون‌دهی دستگاه پلاسمای کانونی با قرار دادن هدف دوتریومی داخل دستگاه**
**اساتید راهنما: دکتر مجید شهریاری، دکتر فریدون عباسی دوانی**

اینجانب **زهرا شهبازی راد** تهیه کننده پایان نامه کارشناسی ارشد حاضر خود را ملزم به حفظ امانت داری و قدردانی از زحمات سایر محققین و نویسندگان بنا بر قانون Copyright می‌دانم. بدین وسیله اعلام می‌نمایم که مسئولیت کلیه مطالب درج شده با اینجانب می‌باشد و در صورت استفاده از اشکال؛ جداول، و مطالب سایر منابع، بلافاصله مرجع آن ذکر شده و سایر مطالب از کار تحقیقاتی اینجانب استخراج گشته است و امانت داری را به صورت کامل رعایت نموده‌ام. در صورتی که خلاف این مطلب ثابت شود، مسئولیت کلیه عواقب قانونی با شخص اینجانب می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: زهرا شهبازی راد

امضاء و تاریخ:

تقدیم به

روح بزرگ مرد تاریخ:

# حضرت روح الله

که هر آن چه از عزت و خودباوری و پشتکار داریم مرهون زحمات و هدایت های پدرانه اوست.

و

تقدیم به استاد فرزانه ام:

# شهید دکتر مجید شهریاری

که با علم و اخلاق و تواضعش همواره چراغ راه بود.

## چکیده

**نام و نام خانوادگی:** زهرا شهبازی راد

**عنوان پایان نامه:** بررسی تغییرات نوترون‌دهی دستگاه پلاسمای کانونی با قرار دادن هدف دوتریومی داخل دستگاه

**اساتید راهنما** : دکتر مجید شهریاری

دکتر فریدون عباسی دوانی

| | |
|---|---|
| درجه تحصیلی : کارشناسی ارشد | تاریخ فراغت از تحصیل : ۹۰/۴/۲۹ |
| رشته : مهندسی هسته‌ای | گرایش : کاربرد پرتوها |
| **دانشگاه** : شهید بهشتی | **دانشکده:** مهندسی هسته‌ای |

کلید واژه‌ها : گداخت، نوترون، پلاسمای کانونی،شمارنده فعال‌سازی نقره، هدف دوتریوم

**چکیده:** در این پایان‌نامه تغییرات نوترون‌دهی دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر با مشخصات (E=۳ kJ، kV V=۲۴و C=۱۰/۴ F) با نام"SBUMTPF1" مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل اول به معرفی گداخت، پلاسما و پارامترهای مربوط به آن پرداخته شده است. در ادامه فصل دستگاه پلاسمای کانونی و نحوه عملکرد آن بیان گردیده و در انتهای فصل دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF1 معرفی شده است. در فصل دوم ساز و کارتولید نوترون و یون در دستگاه پلاسمای کانونی و پارامترهای مؤثر بر نوترون‌دهی دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم تحقیقات مرتبط صورت گرفته در روی یون‌ها و نوترون‌های دستگاه پلاسمای کانونی ذکر گردیده است. در فصل چهارم ابزارهای اندازه‌گیری جریان تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی، آشکارسازهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری نوترون‌های دستگاه و ابزارهای مورد نیاز برای آنالیز سطح نمونه‌های آلومینیوم بیان شده است. در فصل پنجم اندازه‌گیری‌های یونی انجام شده و پرتودهی نمونه‌های آلومینیوم به ازای گازهای آرگون و هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته و در انتهای فصل نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها و آزمایش‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. در فصل ششم اندازه‌گیری‌های نوترونی انجام گرفته ذکر شده است و تغییرات نوترون‌دهی دستگاه به ازای قرار گرفتن هدف‌های دوتریومی داخل دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است و در انتهای فصل نتایج آزمایش‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است.

در این تحقیق ابتدا در شرایط بهینه عملکرد دستگاه با گاز آرگون، امکان تعیین توزیع مکانی چگالی یونی با استفاده از نمونه‌های آلومینیوم مورد تأیید قرار گرفت. سپس برای تعیین توزیع مکانی چگالی یون‌های دوتریوم به علت عدم دسترسی آسان به گاز دوتریوم از گاز هیدروژن به اضافه ۱٪ حجمی گاز کریپتون به دلیل نزدیک بدون عدد جرمی هیدروژن به آن، برای پرتودهی نمونه‌ها استفاده شد. ولتاژ و فشار بهینه دستگاه به ازای گاز هیدروژن به اضافه ۱٪ کریپتون به ترتیب kV ۲۳ و mabr ۵ به دست آمد. با پرتودهی نمونه‌های آلومینیوم در ارتفاع‌های مختلف، توزیع مکانی چگالی یونی به ازای هر ارتفاع به دست آمد. سپس با تزریق گاز دوتریوم به داخل دستگاه ولتاژ و فشار بهینه به‌ترتیب برابر kV ۲۴ و mabr ۱/۵ به دست آمد. هدف‌های دوتریومی ساخته شده در مکان بیشترین چگالی یونی در ارتفاع‌های مختلف داخل دستگاه قرار داده شد. قرار دادن این هدف‌ها داخل دستگاه توسط نگه‌دارنده کاهش نوترون‌دهی دستگاه پلاسمای کانونی را نشان داد. تست ERD نشان داد که هدف‌ها فاقد دوتریوم هستند که این امر خود دلیلی بر عدم افزایش نوترون‌دهی دستگاه است. امکان دوتریوم‌دار کردن هدف‌ها از طریق دستگاه پلاسمای کانونی مورد بررسی قرار گرفت که امکان این مسئله مورد تأیید قرار گرفت.

## فهرست مطالب

**فصل اول: معرفی گداخت، پلاسما و دستگاه پلاسمای کانونی.....۱**

۱-۱ مقدمه..... ۲

۱-۲ گداخت (همجوشی) هسته‌ای ..... ۳

۱-۳ گداخت هسته‌ای کنترل شده..... ۷

۱-۴ معرفی پلاسما و ویژگی‌های آن ..... ۸

۱-۴-۱ تعریف پلاسما ..... ۸

۱-۴-۲ پارامترهای پلاسما..... ۹

۱-۴-۲-۱ دما..... ۹

۱-۴-۲-۲ حفاظ دبای ..... ۹

۱-۴-۲-۳ پارامتر پلاسما ..... ۱۰

۱-۴-۳ معیارهای پلاسما ..... ۱۰

۱-۵ معرفی دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۳

۱-۵-۱ نحوه عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۴

۱-۵-۲ فازهای دینامیکی دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۵

۱-۵-۲-۱ فاز شکست ..... ۱۶

۱-۵-۲-۲ فاز شتاب محوری ..... ۱۶

۱-۵-۲-۳ فاز شعاعی..... ۱۷

۱-۶ کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۸

۱-۶-۱ کاربردهای مبتنی بر تولید نوترون ..... ۱۹

۱-۶-۱-۱ استفاده از چشمه نوترون دستگاه پلاسمای کانونی در درمان به روش BNCT ..... ۱۹

۱-۶-۱-۲ آشکارسازی آب با استفاده از پراکندگی نوترون تولیدی از دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۹

۱-۶-۱-۳ استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی در رادیوگرافی نوترون ..... ۲۰

۱-۶-۱-۴ استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی در سیستم ایمنی فرودگاه‌ها..... ۲۱

۱-۶-۲ کاربردهای مبتنی بر تولید یون ..... ۲۲

۱-۶-۲-۱ اصلاح سطح آلومینیوم به روش پرتودهی با یون کربن ..... ۲۲

۱-۶-۲-۲ تشکیل نانوذرات آهن بر روی زیرلایه کوارتز با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی .....۲۲
۱-۶-۲-۳ فعال‌سازی هدف‌های جامد برای تولید رادیو ایزوتوپ‌های $^{12}C(d,n)^{13}N$ .....۲۲
۱-۶-۲-۴ آمورفیزه کردن کریستال سیلیکون .....۲۳
۱-۶-۳ کاربردهای مبتنی بر تولید الکترون .....۲۳
۱-۶-۳-۱ دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان چشمه باریکه الکترونی برای لایه‌نشانی فیلم نازک.....۲۳
۱-۶-۳-۲ لیتوگرافی به‌وسیله‌ی بیم الکترونی .....۲۴
۱-۶-۴ کاربردهای مبتنی بر تولید اشعه ایکس .....۲۵
۱-۶-۴-۱ میکرو لیتوگرافی به‌وسیله‌ی اشعه‌ی ایکس.....۲۵
۱-۶-۴-۲ میکرو ماشین کاری به‌وسیله‌ی اشعه‌ی ایکس تولید شده با پلاسمای کانونی .....۲۵
۱-۶-۴-۳ عکس برداری فوق سریع از اجسام فلزی متحرک به‌وسیله‌ی اشعه‌ی ایکس سخت تولید شده با پلاسمای کانونی .....۲۵
۱-۶-۴-۴ رادیوگرافی با دز پایین توسط اشعه‌ی ایکس سخت تولید شده با پلاسمای کانونی .....۲۶
۱-۷ معرفی دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر SBUMTPF1.....۲۶
**فصل دوم: ساز و کارتولید نوترون و یون در دستگاه پلاسمای کانونی و پارامترهای مؤثر بر نوترون‌دهی دستگاه.....۳۰**
۲-۱ مقدمه.....۳۲
۲-۲ سازوکار تولید نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی .....۳۴
۲-۳ محاسبه بهره نوترونی دستگاه پلاسمای کانونی.....۳۹
۲-۴ ضریب ناهمسانگردی .....۴۱
۲-۵ پارامترهای مؤثر بر میزان نوترون‌دهی دستگاه پلاسمای کانونی .....۴۳
۲-۵-۱ انرژی بانک خازنی.....۴۳
۲-۵-۲ فشار گاز پرکننده .....۴۵
۲-۵-۳ طول آند .....۴۶
۲-۵-۴ طول عایق .....۴۷
۲-۵-۵ شکل سر آند.....۴۸
۲-۵-۶ جنس الکترودها و عایق .....۴۹

۲-۵-۷ گاز افزودنی ..... ۵۲
۲-۵-۸ پیش یونیزاسیون ..... ۵۵
۲-۵-۹ آلودگی عایق ..... ۵۷
۲-۵-۱۰ قرار دادن هدف دوتریومی درون دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۵۹
۲-۶ سازوکار تولید یون در دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۶۰
**فصل سوم: مروری بر تحقیقات مرتبط صورت گرفته بر روی یون‌ها و نوترون‌های دستگاه پلاسمای کانونی ..... ٦٤**
۳-۱ مقدمه ..... ۶۵
۳-۲ تحقیقات مرتبط صورت گرفته بر روی یون‌های دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۶۵
۳-۲-۱ اندازه‌گیری چگالی و انرژی یونی دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۶۵
۳-۲-۲ اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای و ناهمسانگردی دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۷۸
۳-۲-۳ اندازه‌گیری توزیع مکانی یون‌ها و بررسی اثرات برخورد یون‌ها بر روی فلز آلومینیوم ..... ۸۴
۳-۳ تحقیقات مرتبط صورت گرفته بر روی نوترون‌های دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۹۳
۳-۳-۱ قرار دادن هدف‌های دوتریومی داخل دستگاه ..... ۹۳
**فصل چهارم: سیستم‌های تشخیصی ..... ۹۸**
۴-۱ مقدمه ..... ۹۹
۴-۲ ابزارهای اندازه‌گیری جریان تخلیه ..... ۱۰۰
۴-۲-۱ پیچه رگوفسکی ..... ۱۰۰
۴-۲-۱-۱ معرفی پیچه رگوفسکی ..... ۱۰۰
۴-۲-۱-۲ فواید استفاده از پیچه رگوفسکی ..... ۱۰۱
۴-۲-۱-۳ اساس کار پیچه رگوفسکی ..... ۱۰۲
۴-۲-۱-۴ ساختار انتگرالگیر ..... ۱۰۶
۴-۲-۲ کالیبراسیون پیچه رگوفسکی ..... ۱۰۷
۴-۲-۳ طراحی پیچه رگوفسکی ..... ۱۰۸
۴-۲-۴ حفاظ مغناطیسی برای پیچه رگوفسکی ..... ۱۱۰
۴-۳ ابزارهای اندازه‌گیری نوترون ..... ۱۱۱

۴-۳-۱ ابزارهای اندازه‌گیری نوترون مستقل از زمان در دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۱۱
۴-۳-۱-۱ شمارنده فعال‌سازی نقره ..... ۱۱۱
۴-۳-۱-۲ طراحی و ساخت شمارنده فعال‌سازی نقره ..... ۱۱۳
۴-۳-۱-۳ کالیبراسیون شمارنده فعال‌سازی نقره ..... ۱۲۰
۴-۳-۲ ابزارهای اندازه‌گیری نوترون وابسته به زمان در دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۲۳
۴-۳-۲-۱ آشکارساز سوسوزن پلاستیک ..... ۱۲۴
۴-۳-۲-۲ ساختار سوسوزن پلاستیک NE102 ..... ۱۲۶
۴-۳-۲-۳ طیف‌نگاری نوترون با استفاده از روش زمان – پرواز ..... ۱۲۸
۴-۴ روش‌های آنالیز سطح ..... ۱۲۹
۴-۴-۱ میکروسکوپ روبشی الکترون (SEM) ..... ۱۳۰
۴-۴-۱-۱ نحوه عملکرد میکروسکوپ روبشی الکترون (SEM) ..... ۱۳۱
۴-۴-۱-۲ آماده‌سازی نمونه ..... ۱۳۴
۴-۴-۱-۳ آشکارساز مورد استفاده در روش تصویربرداری SEM ..... ۱۳۴
۴-۴-۲ طیف‌نگاری پاشندگی انرژی اشعه ایکس (EDX) ..... ۱۳۶
۴-۴-۲-۱ آشکارساز مورد استفاده در طیف‌نگاری پاشندگی انرژی اشعه ایکس (EDX) ..... ۱۳۶
۴-۴-۲-۲ تحلیل اطلاعات حاصل از طیف‌نگاری به روش EDX ..... ۱۳۷
۴-۴-۳ روش اندازه‌گیری سختی مواد ..... ۱۳۸
۴-۴-۳-۱ روش سختی‌سنجی مقاوم در برابر دندانه ..... ۱۳۸
۴-۴-۳-۱ روش سختی‌سنجی ویکرز ..... ۱۳۹
۴-۴-۳-۲ تست میکروسختی ویکرز ..... ۱۳۹
۴-۴-۴ روش اندازه‌گیری عمق نفوذ یون با استفاده از آشکارسازی ذرات پس زده‌ی کشسان ..... ۱۴۰
**فصل پنجم: اندازه‌گیری‌های یونی و تحلیل نتایج ..... ۱۴۲**
۵-۱ مقدمه ..... ۱۴۲
۵-۲ آماده‌سازی دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۴۳
۵-۲-۱ تمیز کردن دستگاه PF ..... ۱۴۴
۵-۲-۲ خلأ کردن دستگاه PF ..... ۱۴۵

۵-۲-۳ تزریق گاز ..... ۱۴۶
۵-۲-۴ شارژ خازن ..... ۱۴۷
۵-۲-۵ تریگ کردن گاف جرقه به منظور تخلیه خازن روی آند و کاتد ..... ۱۴۷
۵-۲-۶ نوسان‌نما ..... ۱۴۸
۵-۳ اندازه‌گیری با استفاده از پیچه رگوفسکی ..... ۱۴۸
۵-۳-۱ چیدمان آزمایش طراحی و ساخت پیچه رگوفسکی مناسب ..... ۱۴۸
۵-۳-۲ اندازه‌گیری جریان تخلیه و انتخاب پیچه رگوفسکی مناسب ..... ۱۴۹
۵-۴ آزمایش با گاز کاری آرگون ..... ۱۵۰
۵-۴-۱ تعیین ولتاژ و فشار بهینه گاز آرگون ..... ۱۵۰
۵-۴-۲ چیدمان آزمایش ..... ۱۵۳
۵-۴-۳ پرتودهی نمونه‌های آلومینیوم ..... ۱۵۵
۵-۴-۴ تعیین مورفولوژی سطح با استفاده از SEM ..... ۱۵۹
۵-۴-۵ تحلیل عنصری با استفاده از EDX ..... ۱۶۱
۵-۴-۶ تحلیل نتایج مربوط به آزمایش‌های با گاز آرگون ..... ۱۶۲
۵-۵ آزمایش‌های با گاز کاری هیدروژن ..... ۱۶۵
۵-۵-۱ تعیین ولتاژ و فشار بهینه برای هیدروژن خالص ..... ۱۶۵
۵-۵-۲ اضافه کردن گاز افزودنی کریپتون به گاز هیدروژن ..... ۱۶۹
۵-۵-۳ تعیین ولتاژ و فشار بهینه دستگاه پلاسمای کانونی به ازای گاز هیدروژن+۱٪ گاز کریپتون ..... ۱۷۴
۵-۵-۴ پرتودهی نمونه‌های آلومینیومی با استفاده از گاز هیدروژن + ۱٪ حجمی گاز کریپتون ..... ۱۷۷
۵-۵-۵ تعیین مورفولوژی سطح با استفاده از SEM ..... ۱۸۰
۵-۵-۶ تحلیل عنصری ورقه‌های آلومینیوم با استفاده از EDX ..... ۱۸۱
۵-۵-۷ تست ERD نمونه‌های آلومینیوم پرتودیده توسط یون‌های گاز هیدروژن+۱٪ گاز کریپتون ..... ۱۸۲
۵-۵-۸ سختی سنجی نمونه‌های آلومینیوم پرتودهی شده با یون‌های گاز هیدروژن+۱٪ کریپتون ..... ۱۸۵
۵-۵-۹ تحلیل نتایج مربوط به آزمایش‌های با گاز هیدروژن ..... ۱۸۶
**فصل ششم: اندازه‌گیری‌های نوترونی و تحلیل نتایج ..... ۱۹۱**
۶-۱ مقدمه ..... ۱۹۱

۶-۲ کالیبراسیون آشکارسازها ..... ۱۹۲
۶-۲-۱ کالیبراسیون آشکارسازهای فعال‌سازی نقره و نتایج ..... ۱۹۲
۶-۳ تعیین فشار و ولتاژ بهینه دستگاه پلاسمای کانونی به ازای گاز دوتریوم خالص ..... ۱۹۵
۶-۴ اندازه‌گیری بهره نوترونی و ضریب ناهمسانگردی ..... ۱۹۸
۶-۵ ساخت هدف‌های دوتریومی ..... ۱۹۹
۶-۵-۱ معرفی هدف ..... ۱۹۹
۶-۵-۲ معرفی دستگاه مورد نیاز برای دوتریوم‌دار کردن هدف‌ها ..... ۲۰۲
۶-۵-۳ روش دوتریوم‌دار کردن هدف‌های تیتانیومی ..... ۲۰۴
۶-۵-۴ انجام تست ERD بر روی هدف‌های دوتریومی ساخته شده ..... ۲۰۶
۶-۵-۵ دوتریوم‌دار کردن هدف‌های جدید ..... ۲۰۹
۶-۶ بررسی نوترون‌دهی دستگاه پلاسمای کانونی با حضور نگهدارنده ..... ۲۱۰
۶-۷ بررسی نوترون‌دهی دستگاه پلاسمای کانونی با حضور نگه‌دارنده و هدف دوتریومی ..... ۲۱۳
۶-۸ بررسی تغییرات نوترون‌دهی دستگاه با حضور هدف‌های دوتریومی داخل دستگاه پلاسمای کانونی ۲۱۵
۶-۹ بررسی امکان نفوذ یون دوتریم داخل هدف ..... ۲۱۷
۶-۱۰ محاسبه زاویه انحراف یون‌های دوتریوم در دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۲۱۸
۶-۱۱ اندازه‌گیری‌های وابسته به زمان نوترون ..... ۲۱۹
۶-۱۱-۱ چیدمان آشکارساز سوسوزن NE102 ..... ۲۱۹
۶-۱۱-۲ پالس خروجی آشکارساز سوسوزنNE102 ..... ۲۲۰
۶-۱۱-۳ محاسبه زمان – پرواز (TOF) برای اندازه‌گیری انرژی نوترون ..... ۲۲۱
۶-۱۲ محاسبه اثر پراکندگی نوترون از دو آشکارساز فعال‌سازی نقره ..... ۲۲۲
۶-۱۳ تحلیل نتایج ..... ۲۲۴
**پیشنهادها و کارهای آتی ..... ۲۲۷**
**مراجع ..... ۲۲۹**

# فهرست شکل‌ها

شکل ۱– ۱: نمای دستگاه پلاسمای کانونی، الف) نوع مدر، ب) نوع فیلیپوف ..... ۱۴
شکل ۱– ۲: الف) رفتار دینامیکی لایه جریان در دستگاه پلاسمای کانونی، ب) سیگنال ولتاژ و جریان متناظر با فازهای مختلف تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۱۵
شکل ۱– ۳: چیدمان اولیه برای آشکارسازی آب با استفاده از پراکندگی نوترون ..... ۲۰
شکل ۱– ۴: از چپ به راست، تصاویر نوری، اشعه ایکس، و نوترونی یک بار الکتریکی ۵۰ اهم ..... ۲۱
شکل ۱– ۵: از چپ به راست تصاویر نوری، اشعه ایکس و نوترونی یک بطری پر شده توسط آب ..... ۲۱
شکل ۱– ۶: الف) دستگاه پلاسمای کانونی نوع NX2 با ابزارهای تشخیصی الکترون و اشعه ایکس. ب ) اتاق لایه‌نشانی فیلم نازک که در انتهای پایین دستگاه پلاسمای کانونی قرار گرفته است ..... ۲۴
شکل ۱– ۷: رادیوگرافی از یک قطعه با استفاده از اشعه ایکس سخت ..... ۲۶
شکل ۱– ۸: خازن دستگاه SBUMTPF1 ..... ۲۸
شکل ۱– ۹: الف) سوئیچ گاف جرقه و نحوه اتصال آن به خازن، ب) صفحه پایینی گاف جرقه ..... ۲۹
شکل ۱– ۱۰: نحوه اتصال صفحه کاتد و میله آند به سوئیچ گاف جرقه و خازن ..... ۲۹
شکل ۲– ۱: الف) ساختار دوپالسی نوترون به دست آمده برای دستگاه پلاسمای کانونی kJ ۵۰۰ اندازه گرفته شده با آشکارساز سوسوزن ب) ساختار چگالی پلاسما برای این دو فاز..... ۳۶
شکل ۲– ۲: نمایش مدل GPM در تولید نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۳۹
شکل ۲– ۳: تغییرات بهره نوترونی با افزایش بانک انرژی در یک دستگاه پلاسمای کانونی با فشار گاز دوتریوم ۰/۸۴ torr ..... ۴۳
شکل ۲– ۴: تغییرات نوترون‌دهی دستگاه‌های پلاسمای کانونی به ازای تغییرات انرژی ..... ۴۴
شکل ۲– ۵: ضریب ناهمسانگردی به صورت تابعی از بانک انرژی به ازای فشار گاز ۰/۸۴ torr ..... ۴۵
شکل ۲– ۶: تغییرات بهره نوترون در فشارهای مختلف (مقیاس محور عمودی، $۱۰^{۷}$ است.) ..... ۴۶
شکل ۲– ۷: بهره نوترون و فشار بهینه در اثر تغییر طول آند برای یک دستگاه پلاسمای کانونی kJ ۲/۳ ..... ۴۷
شکل ۲– ۸: شکل‌های مختلف سر آند ..... ۴۹
شکل ۲– ۹: نمودار تغییرات بهره نوترونی به صورت تابعی از درصد گاز افزودنی کریپتون به گاز اصلی ..... ۵۵

شکل ۲- ۱۰: تغییرات در شار نوترونی الف) محوری، ب) شعاعی به ازای فشارهای مختلف گاز دوتریوم با و بدون حضور چشمه بتازا ..... ۵۶

شکل ۲- ۱۱: تغییرات بهره نوترونی دستگاه با و بدون حضور چشمه بتازا به ازای فشارهای مختلف ..... ۵۶

شکل ۲- ۱۲: تغییرات بهره نوترونی دستگاه با و بدون حضور چشمه آلفازا به ازای فشارهای مختلف ..... ۵۷

شکل ۲- ۱۳: سیگنال پروب ولتاژ بالا به ازای الف) عایق بدون آلودگی، ب) عایق با آلودگی ..... ۵۸

شکل ۲- ۱۴: تغییرات بهره‌ی نوترونی بر حسب تعداد شات از زمانی که بهره نوترونی شروع به خراب شدن می‌کند ..... ۵۹

شکل ۲- ۱۵: تغییرات شمارش‌های نوترون $y_d$(با حضور هدف دوتریومی) و $y_c$ (بدون حضور هدف دوتریومی و فقط با حضور نگهدارنده‌ی مسی) به صورت تابعی از فاصله از نوک آند ..... ۶۰

شکل ۲- ۱۶: توزیع زاویه‌ای دوترون‌های سریع دستگاه پلاسمای کانونی الف) PGN با مشخصات: P= ۵torr، V=۴۰ kV و E=۳/۶ kJ، ب) PF-360 با مشخصات: P=۱۰ torr، V=۳۰ kV و E=۱۲۶ kJ .... ۶۱

شکل ۲- ۱۷: پالس‌های یونی وابسته به زمان تصویربرداری شده با استفاده از دوربین روزنه سوزنی در دستگاه پلاسمای کانونی PF-360 ..... ۶۲

شکل ۳- ۱: سیگنال خروجی فنجان فارادی..... ۶۶

شکل ۳- ۲: چگالی باریکه یونی بر حسب فشار گاز ..... ۶۷

شکل ۳- ۳: تصویر مجموعه‌ای از میکروباریکه‌ها بر روی آشکارساز CR-39 ..... ۶۷

شکل ۳- ۴: چیدمان آزمایش ..... ۶۸

شکل ۳- ۵: چگالی طیف انرژی باریکه یونی دستگاه پلاسمای کانونی به ازای گاز متان ..... ۶۹

شکل ۳- ۶: چیدمان آزمایش ..... ۷۰

شکل ۳- ۷: الف) سیگنال‌های مشتق جریان و سیگنال یونی، ب) تغییرات انرژی یون‌های نئون تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر حسب فشار گاز ..... ۷۱

شکل ۳- ۸: الف) شدت یون‌ها بر حسب زمان، جریان یون بر حسب ارتفاع‌های مختلف FC ..... ۷۱

شکل ۳- ۹: الف) تصویر میکروسکوپ نوری یک نمونه CR-39 ، ب) شمارش ردپاها بر حسب درصد به صورت تابعی از قطر ردپاها. ..... ۷۲

شکل ۳- ۱۰: منحنی واپاشی مخلوط $^{11}C$ و $^{15}O$ ..... ۷۳

شکل ۳- ۱۱: منحنی توزیع بهره‌های یونی به ازای $^{11}C$ و $^{15}O$ بر حسب انرژی دوترون‌ها ..... ۷۴
شکل ۳- ۱۲: توزیع بهره $^{13}N$ به ازای انرژی‌های مختلف دوترون ..... ۷۴
شکل ۳- ۱۳: چیدمان آزمایش تعیین ویژگی‌های یون ..... ۷۵
شکل ۳- ۱۴: شمای دوربین روزنه سوزنی، تصویر مشاهده شده در دوربین روزنه سوزنی ..... ۷۶
شکل ۳- ۱۵: شمایی از دوربین روزنه سوزنی در مرکز و خارج از مرکز ..... ۷۶
شکل ۳- ۱۶: تصاویر دوربین روزنه سوزنی در مرکزو خارج از مرکز ، الف) برای یون‌های کم انرژی بدون فیلتر، ب) برای یون‌های پرانرژی با فیلتر آلومینیومی ..... ۷۷
شکل ۳- ۱۷: طیف انرژی پروتون‌ها ..... ۷۸
شکل ۳- ۱۸: چیدمان آزمایش اندازه‌گیری نوزیع زاویه‌ای گسیل یون از PF به ازای گاز متان ..... ۷۹
شکل ۳- ۱۹: طیف انرژی ترکیبات مختلف باریکه‌ی یونی به ازای یون‌های $H^+$، $C^{+4}$ و $C^{+5}$ ..... ۷۹
شکل ۳- ۲۰: تغییرات زاویه‌ای چگالی یونی برای ترکیبات مختلف باریکه‌ی یونی ..... ۸۰
شکل ۳- ۲۱: چیدمان آشکارسازهای رد هسته‌ای در داخل دستگاه پلاسمای کانونی برای اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای یون‌ها ..... ۸۰
شکل ۳- ۲۲: چیدمان آزمایش: ۱- خازن،۲- سوئیچ، ۳- پورت خلأ برای محفظه اصلی، ۴- کولیماتور، ۵- پورت خلأ برای اتاقک رانش، ۶- پیچه رگوفسکی، ۷- آشکارساز اشعه ایکس، ۸- نظاره‌گر بار خازنی، ۹- فنجان فارادی ..... ۸۲
شکل ۳- ۲۳: نمای شماتیک از، الف) فنجان فارادی، ب) نظاره‌گر جریان خازنی ..... ۸۳
شکل ۳- ۲۴: شماتیک روش اندازه‌گیری زمان پرواز با استفاده از CCM و فنجان فارادی ..... ۸۳
شکل ۳- ۲۵: سیگنال‌های، ۱- مشتق جریان، ۲-اشعه ایکس سخت، ۳- CCM و ۴- FC ..... ۸۴
شکل ۳- ۲۶: الگوی شکست نمونه‌های آلومینیوم در نمونه‌ی پرتوندیده، نمونه‌ی پرتودیده توسط یون آرگون و نمونه پرتودیده توسط یون نیتروژن ..... ۸۵
شکل ۳- ۲۷: تصاویر SEM نمونه‌های آلومینیوم: الف) پرتودهی نشده، ب) پرتودهی شده با نیتروژن، ج) پرتودهی شده با یون آرگون ..... ۸۷
شکل ۳- ۲۸: میکروذارت مس مشاهده شده بر روی سطح نمونه با روش : الف) SEM، ب)EDX ..... ۸۸
شکل ۳- ۲۹: تصاویر دوربین روزنه سوزنی برای، الف) یون $D_2$ و ب) یون $D_2 + 2\%Kr$ ..... ۸۹

شکل ۳- ۳۰: نمونه‌های آلومینیوم پرتودهی شده توسط یون‌های $D_2$(سمت چپ) و $D_2+2\%Kr$ (سمت راست) ..... ۸۹

شکل ۳- ۳۱: ساختار سطح نمونه‌های پرتودیده توسط یون، الف) $D_2$ ، ب) $D_2+2\%Kr$ بعد از ۲۰۰ شات ۹۰

شکل ۳- ۳۲: تغییرات سختی نمونه بر حسب فاصله شعاعی از مرکز نمونه ..... ۹۱

شکل ۳- ۳۳: عمق نفوذ یون‌های دوتریوم (سمت چپ) و کریپتون (سمت راست) ..... ۹۱

شکل ۳- ۳۴: هدف‌های آلومینیومی، انحراف از محور الکترودها به ازای گازهای مختلف: الف)دوتریوم، ب) هلیم و ج) نئون ..... ۹۲

شکل ۳- ۳۵: شماتیک دستگاه پلاسمای کانونی ..... ۹۴

شکل ۳- ۳۶: متوسط شمارش‌های نوترون $y_c$ و $y_d$ به صورت تابعی از فاصله نسبت به گیره‌ی مسی و هدف دوتریومی ..... ۹۵

شکل ۳- ۳۷: تغییرات در شمارش‌های نوترون با و بدون حضور نوترون($y_{bt}$) و تغییرات به ازای یک سانتی متر از گاز دوتریوم ( $y_{bg}$) ..... ۹۶

شکل ۳- ۳۸: تغییرات در شمارش‌های نوترون $Y_c$ و $Y_d$ تک شات به صورت تابعی از مکان به ترتیب به ازای هدف مسی و هدف دوتریومی، ب) تغییرات در شمارش‌های نوترون ناشی از اندرکنش باریکه- هدف $Y_{bt}$ و به ازای ۱ cm گاز بر حسب فاصله از نوک آند ..... ۹۷

شکل ۴- ۱: نمایی از روش القای جریان در پیچه..... ۱۰۲

شکل ۴- ۲: مدار معادل پیچه رگوفسکی ..... ۱۰۴

شکل ۴- ۳: ساختار پیچه رگوفسکی و انتگرال‌گیر ..... ۱۰۶

شکل ۴- ۴: مدار انتگرال‌گیرRC ..... ۱۰۶

شکل ۴- ۵: مدار معادل پیچه به همراه انتگرال‌گیر فعال در فرکانس‌های بالا..... ۱۰۹

شکل ۴- ۶: **یک نمونه از مشتق** سیگنال جریان ..... ۱۱۰

شکل ۴- ۷: نقشه پلی اتیلن مورد استفاده به عنوان کند کننده ..... ۱۱۴

شکل ۴- ۸: نوترون‌های حرارتی بر حسب ضخامت کند کننده (واحد محور عمودی، اختیاری است)..... ۱۱۴

شکل ۴- ۹: استوانه پلی اتیلنی ساخته شده برای دستگاه SBUMTPF1 ..... ۱۱۵

شکل ۴- ۱۰: برگه نقره مورد استفاده در اطراف آشکارساز گایگر مولر .....۱۱۶
شکل ۴- ۱۱: آشکارساز گایگر مولر دیواره نازک .....۱۱۶
شکل ۴- ۱۲: شمارنده فعال‌سازی نقره با آشکارساز گایگر مولر دیواره نازک .....۱۱۷
شکل ۴- ۱۳: مبدل‌های آشکارساز گایگر مولر به همراه منبع تغذیه و نوسان‌نمای متصل به آن .....۱۱۸
شکل ۴- ۱۴: نمای صفحه اصلی نرم افزار Counter 2655.....۱۱۹
شکل ۴- ۱۵: سیگنال ثبت شده توسط سوسوزن NE102 (۵ اینچی) در فاصله ۴ متری از محل تولید نوترون .....۱۲۵
شکل ۴- ۱۶: آشکارساز سوسوزن پلاستیک آلی: ۱) سوسوزن پلاستیک، ۲) محفظه‌ی آشکارساز، ۳) شیلد آلومینیومی، ۴) لامپ تکثیرکننده فوتون، ۵) مقسم ولتاژ .....۱۲۵
شکل ۴- ۱۷: طیف تابشی NE 102A.....۱۲۸
شکل ۴- ۱۸: نمایی از اجزاء و نحوه عملکرد میکروسکوپ روبشی الکترون.....۱۳۲
شکل ۴- ۱۹: نمایشی از گسیل الکترون‌ها و اشعه ایکس از نمونه .....۱۳۲
شکل ۴- ۲۰: دستگاه تصویربرداری SEM.....۱۳۳
شکل ۴- ۲۱: تصاویر SEM نمونه‌ای آلومینیوم پرتودهی شده توسط یون‌های هیدروژن داخل دستگاه PF با بزرگنمایی ۱۰۰۰.....۱۳۳
شکل ۴- ۲۲: نمایشی از عمق نفوذ الکترون در داخل نمونه بسته به انرژی و تولید سیگنال‌های مختلف. ..۱۳۵
شکل ۴- ۲۳: طیف EDX برای آلیاژ MP35N .....۱۳۷
شکل ۴- ۲۴: دندانه‌ساز هرمی الماس نوع ویکرز .....۱۳۹
شکل ۴- ۲۵: دندانه‌ساز هرمی الماس نوع ویکرز .....۱۴۰
شکل ۴- ۲۶: سیستم ERD .....۱۴۱
شکل ۴- ۲۷: هندسه‌ی آزمایش ERD .....۱۴۱
شکل ۵- ۱: تصویر شکستن عایق بر اثر ورود آلودگی‌های در آن و کاهش استحکام آن در طول آزمایش‌ها.۱۴۴
شکل ۵- ۲: یکی از میله‌های کاتد قبل و بعد از تمیز کردن .....۱۴۵
شکل ۵- ۳: پمپ دیفیوژن در اتصال سری با پمپ روتاری.....۱۴۶

شکل ۵- ۴: محفظه دستگاه به همراه لوله رابط برای ترکیب دو یا چند گاز .....۱۴۷

شکل ۵- ۵: سوئیچ گاف جرقه .....۱۴۸

شکل ۵- ۶: پیچه رگوفسکی شماره (۱)، (۲)، (۳) قرار گرفته در اطراف آند و (۴) قرار گفته در اطراف یکی از کابل‌های کاتد .....۱۴۹

شکل ۵- ۷: الف) مشتق جریان تخلیه در لحظه وقوع تنگش به ازای ۴ پیچه، ب) طیف فرکانسی جریان تخلیه در لحظه وقوع تنگش به ازای ۴ پیچه .....۱۴۹

شکل ۵- ۸: منحنی فاصله زمانی مرکز رویداد تنگش تا بیشینه جریان(۲/۵μs) –(Tpm) .....۱۵۲

شکل ۵- ۹: نمونه‌های آلومینیوم .....۱۵۳

شکل ۵- ۱۰: اولین نگهدارنده طراحی شده برای قرار دادن آلومینیوم در فضای بالای آند در PF.....۱۵۴

شکل ۵- ۱۱: نقشه‌ی طراحی شده برای گیره‌ی نگهدارنده.....۱۵۴

شکل ۵- ۱۲: نگهدارنده نمونه‌های آلومینیوم.....۱۵۵

شکل ۵- ۱۳: نمونه‌های آلومینیوم پرتودیده توسط یون‌های گاز آرگون در ارتفاع: الف) ۱ cm، ب) ۴ cm، ج) ۱۰ cm از سر آند .....۱۵۶

شکل ۵- ۱۴: مقایسه نمونه‌های آلومینیوم پرتودیده توسط یون‌های گاز آرگون به ترتیب از چپ به راست در ارتفاع ۱cm، ۴cm، و ۱۰cm از سر آند.....۱۵۶

شکل ۵- ۱۵: نمونه‌های آلومینیوم پرتودهی شده با یک شات در ارتفاع‌های، ۱)۱cm، ۲) ۲cm، ۳) ۳cm، ۴) ۴ cm، ۵) ۵cm و ۵) ۱۰ cm از سر آند .....۱۵۷

شکل ۵- ۱۶: بررسی اثرات برخورد یون‌های آرگون به ازای تک شات بر روی نمونه‌های (۱)، (۲) و (۳) و به ازای ۸ شات بر روی نمونه شماره (۴).....۱۵۸

شکل ۵- ۱۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه قبل از پرتودهی.....۱۵۹

شکل ۵- ۱۸: تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های آلومینیوم پرتودیده با یون‌های آرگون به ترتیب در ارتفاع‌های، الف) ۱ cm، ب) ۴ cm ، ج) ۱۰ cm از سر آند به ازای ۸ شات .....۱۶۰

شکل ۵- ۱۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه آلومینیوم پرتودیده با یون‌های آرگون در ارتفاع ۱cm به ترتیب در الف) مرکز پرتودهی، ب) با فاصله کم از مرکز پرتودهی، ج) با فاصله زیاد از مرکز پرتودهی .....۱۶۱

شکل ۵- ۲۰: طیف‌نگاری پاشندگی اشعه ایکس (EDX) بر روی نمونه‌های آلومینیوم، الف) پرتودهی نشده، ب) پرتودهی شده با یون‌های آرگون .....۱۶۲

شکل ۵- ۲۱: محاسبه الف) برد، ب) عمق نفوذ یون‌های آرگون با انرژی ۲۰۰ keV داخل نمونه آلومینیوم .۱۶۴

شکل ۵- ۲۲: فاصله زمانی بین وقوع تنگش و بیشینه جریان تخلیه به ازای گاز هیدروژن .....۱۶۶

شکل ۵- ۲۳: سیگنال‌های مشتق جریان تخلیه به ازای فشارهای ۱، ۳، ۵، ۷ و mabr ۹ گاز هیدروژن.....۱۶۸

شکل ۵- ۲۴: نمایشی از الف) محفظه گاز اصلی و محفظه گاز افزودنی به طور مجزا، ب)اتصال محفظه گاز اصلی و محفظه گاز افزودنی و روابط حاکم بر آن‌ها .....۱۷۰

شکل ۵- ۲۵: گاز افزودنی و اتصال آن به محفظه اصلی با استفاده از شیر خلأ .....۱۷۳

شکل ۵- ۲۶: الف) تغییرات فاصله‌ی زمانی وقوع تنگش و بیشینه جریان تخلیه بر حسب تغییرات در ولتاژ و به ازای فشارهای مختلف در گستره mbar ۶-۱ برای گاز هیدروژن +۱٪ گاز کریپتون، ب) تغییرات فاصله‌ی زمانی وقوع تنگش و بیشینه جریان تخلیه بر حسب تغییرات در فشار و به ازای ولتاژهای مختلف در گستره kV ۲۴-۲۰ برای گاز هیدروژن +۱٪ گاز کریپتون.....۱۷۶

شکل ۵- ۲۷: نمونه‌های آلومینیوم پرتودهی شده توسط یون‌های گاز هیدروژن+۱٪ کریپتون قرار گرفته در ارتفاع‌های، الف) ۱cm، .....۱۷۸

شکل ۵- ۲۸: نمونه‌های آلومینیوم پرتوداده شده توسط یون‌های هیدروژن+۱٪ کریپتون قرار داده شده در ارتفاع‌های مختلف، الف)۱cm، ب) ۲cm ، ج)۳cm و د) ۴cm از سر آند به ازای ۱ شات خوب .....۱۷۹

شکل ۵- ۲۹: نمونه‌های آلومینیوم پرتوداده شده توسط یون‌های هیدروژن+۱٪ کریپتون قرار داده شده در ارتفاع‌های مختلف، ه)۵cm، و) ۷cm ، ز)۹ cm و ح) ۱۲cm از سر آند به ازای ۱ شات خوب .....۱۷۹

شکل ۵- ۳۰: تصاویر میکروسکوپ روبشی الکترون به ازای نمونه‌های آلومینیوم قرار داده شده در ارتفاع‌های، الف)۱ cm، ب)۴ cm و ج) ۱۰ cm از سر آند، پرتو داده شده توسط یون‌های هیدروژن+۱٪ کریپتون .....۱۸۰

شکل ۵- ۳۱: تصاویر SEM نمونه‌های آلومینیوم قرار داده شده در ارتفاع ۱ cm و پرتودهی شده به ازای، الف) ۸ شات، ب) ۱ شات خوب به ازای یون‌های گاز هیدروژن+۱٪ کریپتون .....۱۸۱