

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد هسته‌ای

دزیمتری پرتوهای ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شاهرود در ولتاژ و فشارهای مختلف

نگارنده: رعنا نوری

اساتید راهنما

دکتر حسین توکلی عنبران

دکتر مهدی مومنی

شهریور ۹۸

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

ماحصل آموختہ ہایم را تقدیم می کنم بہ آنان کہ مہر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

بہ استوارترین تکیہ کاہم، دستان پر مہر پدرم

بہ سبزترین مچاہ زندگیم، چشمان سبز مادرم

کہ ہرچہ آموختم در مکتب عشق شما آموختم و ہرچہ بگو شتم قہر و ای از دیای بی کران مہربانیتان را پاس توانم بگویم.

امروز، ہستی ام بہ امید شماست و فردا گلید باغ بہستم رضای شما

را آوردی کران سنگ ترا ز این ارزان نہاشتم تا بہ خاک پایتان نہار کنم، باشد کہ حاصل تلاشم نسیم کونہ غبار محبتیتان را بزوداید.

بوسہ بر دستان پر مہرمان

شکر و قدردانی

بدینوسیله قدردانی می‌کنم از پدر و مادر فداکارم، دو سروقامتی که گوهر وجودشان، نسیم کلامشان و باران محبتشان را همواره بی هیچ منت و ادعا مرهمی نمودند بر خستگی‌هایم، آنان که راستی قامت در شکستگی قامتشان تجلی یافت و ققنوس جوانیشان به پای روشنایی حیات من سوخت. در وجود گرامیشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم و با دلی مملو از عشق و محبت بر دستان پر مهرشان بوسه می‌زنم.

از برادر عزیزم، همراه واقعی زندگی، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌کنم.

از اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر حسین توکلی عنبران و جناب آقای دکتر مهدی مومنی که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را به عهده داشته و نیز باعث ایجاد انگیزه و جسارت برای ادامه راه در وجود من می‌شدند، کمال تشکر را دارم.

تهدنامه

اینجانب رعنا نوری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه دزیمتری پرتوهای ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شاهرود در ولتاژ و فشارهای مختلف تحت راهنمایی دکتر حسین توکلی عبران متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

حکیده

یکی از منابع مناسب جهت جایگزینی سوخت‌های فسیلی، انرژی ناشی از واکنش‌های هم‌جوشی می‌باشد. به منظور دستیابی به این انرژی و ایجاد شرایط مناسب برای انجام این واکنش‌ها، دستگاه‌های پلاسمای کانونی ساخته شدند. این دستگاه‌ها امروزه منبع بسیار خوبی برای تولید پالس اشعه ایکس، الکترون‌ها، یون‌ها و نوترون‌ها می‌باشد. دستگاه‌های پلاسمای کانونی به دلیل گسیل اشعه ایکس به صورت پالسی، کاربردهای فراوانی در صنعت، پزشکی و... دارند.

هدف اصلی از انجام این پایان‌نامه، دزیمتری اشعه ایکس گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شاهرود (SHUPF)، با استفاده از گاز کاری نیتروژن در فشارها و ولتاژهای مختلف توسط دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD)، به دو روش تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد. آزمایشات تجربی به روش مونت کارلو و توسط کد MCNPX شبیه‌سازی شدند.

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها نتیجه حاصل شد که بیشترین مقدار دز جذبی توسط دزیمترها، در ارتفاع بالای سر آند که محل قرار گرفتن پینچ است، می‌باشد. بنابر نتایج تجربی، بیشترین مقدار دز جذبی در بازه ارتفاع مربوط به تغییر مسیر حرکت الکترون‌ها پس از تشکیل پینچ و همین‌طور در زوایای قرار گرفتن بازوهای دستگاه می‌باشد. همچنین دز جذبی اشعه ایکس در زاویه‌های مختلف به صورت ناهمسانگرد بوده و این دز در بیرون محفظه تخلیه عملاً برابر با صفر بود و در بیرون محفظه فقط تابش زمینه وجود داشت. تفاوت نتایج حاصل از تجربه و شبیه‌سازی این‌گونه توجیه می‌شود که در تجربه میدان الکترومغناطیسی حاصل از حرکت بارها، سرعت الکترون‌ها و به دنبال آن شتاب آن‌ها را تحت تاثیر قرار داده و در نتیجه تغییر در حرکت الکترون‌ها، اشعه ایکس تولید شده توسط تابش ترمزی متغیر می‌باشد. اما در شبیه‌سازی با توجه به کد استفاده شده، امکان تعریف میدان الکترومغناطیسی وجود نداشته و لذا نتایج تئوری بدون در نظر گرفتن میدان متغیر الکترومغناطیسی حاصل شده‌اند.

کلمات کلیدی: پلاسمای کانونی، شبیه‌سازی مونت کارلو، کد MCNPX، دزیمترهای

ترمولومینسانس، دز جذبی،

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- " مطالعه دز جذبی اشعه ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شاهرود توسط شبیه سازی به روش مونت کارلو و اثر تغییرات فشار و ولتاژ بر روی زمان تشکیل پینچ ". رعنا نوری، مهدی مؤمنی، حسین توکلی عنبران، حمیدرضا بردبار. هفتمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما. دانشگاه صنعتی شاهرود. تیر ۱۳۹۸

فهرست مطالب

ح	فهرست جداول
خ	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مفاهیم اولیه.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ معرفی اشعه ایکس و تاریخچه آن.....
۴	۳-۱ ویژگی های اشعه ایکس.....
۴	۴-۱ منابع اشعه ایکس.....
۶	۵-۱ معرفی پلاسما.....
۸	۶-۱ پارامترهای پلاسما.....
۸	۱-۶-۱ دما.....
۹	۲-۶-۱ حفاظ دمای.....
۱۰	۳-۶-۱ فرکانس پلاسما.....
۱۱	۷-۱ ویژگی های پلاسما.....
۱۲	۸-۱ انواع شمارشگرها.....
۱۲	۹-۱ آشکارسازهای سوسوزنی (سنتیلاسیون).....
۱۳	۱۰-۱ دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD).....
۱۸	۱۱-۱ محصورسازی پلاسما.....
۲۰	۱-۱۱-۱ محصورسازی مغناطیسی.....
۲۱	۲-۱۱-۱ محصورسازی لختی.....

فصل ۲: دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر و گسیل اشعه ایکس از آن ۲۳

۱-۲ معرفی دستگاه پلاسمای کانونی..... ۲۴

۲-۲ اصول عملکرد و دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی..... ۲۸

۱-۲-۲ فاز شکست..... ۲۹

۲-۲-۲ فاز رانش محوری..... ۳۰

۳-۲-۲ فاز شعاعی..... ۳۱

۳-۲ کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی..... ۳۵

۴-۲ فرایندهای گسیل..... ۳۷

۱-۴-۲ تابش ترمزی..... ۳۷

۲-۴-۲ تابش باز ترکیبی..... ۳۸

۳-۴-۲ تابش مقید-مقید..... ۳۸

۵-۲ برهم کنش های پرتوهای گاما و ایکس با ماده..... ۳۹

۱-۵-۲ اثر فوتوالکتریک..... ۳۹

۲-۵-۲ اثر کامپتون..... ۴۰

۳-۵-۲ تولید زوج..... ۴۱

۶-۲ ضریب تضعیف کل..... ۴۲

فصل ۳: تجهیزات آزمایش و تکنیک های اندازه گیری ۴۵

۱-۳ مقدمه..... ۴۶

۲-۳ توصیف ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود..... ۴۶

۳-۳ مشخصات کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود..... ۴۷

۱-۳-۳ محفظه تخلیه الکتریکی و خلا..... ۴۷

۲-۳-۳ سیستم تخلیه و تزریق گاز و فشارسنجی..... ۴۹

۳-۳-۳ سیستم تغذیه الکتریکی ۵۱

۳-۳-۴ سیستم تشخیصی ۵۵

۳-۴ سیستم خوانش کارت دزیمتر ترمولومینسانس ۵۹

۳-۴-۱ خواندن قرص TLD ۶۰

فصل ۴: شبیه سازی به روش مونت کارلو ۶۳

۴-۱ مقدمه ۶۴

۴-۲ تاریخچه ۶۴

۴-۳ ساختار فایل ورودی ۶۴

۴-۴ کارت های مورد نیاز کد ۶۵

۴-۴-۱ کارت سلول ۶۵

۴-۴-۲ کارت سطوح ۶۵

۴-۴-۳ کارت داده ۶۶

۴-۴-۴ کارت چشمه ۶۶

۴-۴-۵ کارت مواد ۶۶

۴-۴-۶ کارت تالی ۶۷

۴-۵ روش کار ۶۷

۴-۶ محاسبه درصد وزنی عناصر ۶۹

۴-۷ نتایج شبیه سازی ۷۴

فصل ۵: آزمایش های تجربی و نتیجه گیری ۸۱

۵-۱ مقدمه ۸۲

۵-۲ انجام آزمایش ها ۸۲

۵-۳ نتایج تجربی ۸۴

۱-۳-۵ دز جذبی در فشار ثابت و ولتاژهای متفاوت ۸۴

۲-۳-۵ دز جذبی در ولتاژ ثابت و فشارهای متفاوت ۸۶

۳-۳-۵ دز جذبی در فاصله 2 cm از محور Z در فشار ثابت و ولتاژهای مختلف ۸۹

۴-۳-۵ دز جذبی در فاصله 4 cm از محور Z در فشار ثابت و ولتاژهای مختلف ۹۱

۵-۳-۵ دز جذبی در فاصله 6 cm از محور Z در فشار ثابت و ولتاژهای مختلف ۹۳

۶-۳-۵ دز جذبی در فاصله 2 cm از محور Z در ولتاژ ثابت و فشارهای مختلف ۹۵

۷-۳-۵ دز جذبی در فاصله 4 cm از محور Z در ولتاژ ثابت و فشارهای مختلف ۹۷

۸-۳-۵ دز جذبی در فاصله 6 cm از محور Z در ولتاژ ثابت و فشارهای مختلف ۹۹

۴-۵ بحث و نتیجه گیری ۱۰۲

۱۰۴

مراجع

فهرست جداول

جدول ۱-۱: انواع مختلف از دزیمترهای ترمولومینسانس..... ۱۶

جدول ۱-۴: مشخصات عمده عناصر تشکیل دهنده پیرکس..... ۶۹

جدول ۲-۴: عناصر تشکیل دهنده فولاد ضد زنگ و درصد اتمی آن‌ها..... ۷۱

جدول ۳-۴: عناصر تشکیل دهنده هوا و درصد وزنی آن‌ها..... ۷۳

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمونه‌ای از تابش ترمزی ۵
- شکل ۲-۱: نمونه‌ای از تابش سینکروترونی ۵
- شکل ۳-۱: حفاظ دبای ۱۰
- شکل ۴-۱: شماتیکی از پدیده ترمولومینسانس ۱۵
- شکل ۵-۱: فرایند گداخت هسته‌ای ۱۹
- شکل ۶-۱: نمایی از محفظه توکامک ۲۱
- شکل ۷-۱: نمایی از محصورسازی به روش لختی ۲۱
- شکل ۱-۲: نمایی شماتیکی از دستگاه پلاسمای کانونی در دو نوع مدر و فیلیپوف ۲۶
- شکل ۲-۲: نیروی لورنتز وارد شده به ستون پلاسما و نقطه تشکیل پینچ ۳۱
- شکل ۳-۲: اثر فوتوالکتریک ۴۰
- شکل ۴-۲: اثر کامپتون ۴۱
- شکل ۵-۲: تولید زوج ۴۲
- شکل ۱-۳: ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود ۴۶
- شکل ۲-۳: محفظه تخلیه الکتریکی و خلا ۴۸
- شکل ۳-۳: نمایی از آند، کاتد، عایق و صفحه پایه دستگاه ۴۹
- شکل ۴-۳: نمایی از پمپ روتاری دو مرحله‌ای مدل $VE\ 280N$ ۵۰
- شکل ۵-۳: گنج فشارسنج پیرانی و نمایشگر دیجیتال ۵۰
- شکل ۶-۳: گاز نیتروژن و گاز آرگون ۵۱
- شکل ۷-۳: سیستم شارژ خازن دستگاه ۵۲
- شکل ۸-۳: نمایی از بانک خازنی دستگاه ۵۳
- شکل ۹-۳: اسپارک گپ ۵۴
- شکل ۱۰-۳: سیستم اتصال به زمین ۵۵
- شکل ۱۱-۳: اسپلسکوپ مدل $GPS - 1204C$ ۵۶
- شکل ۱۲-۳: نمایی از پیچه رگوفسکی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود ۵۷
- شکل ۱۳-۳: نمایی از شماتیک پروب ولتاژ ۵۸
- شکل ۱۴-۳: منحنی تابانی TLD قرار گرفته در دستگاه قرائت‌گر ۵۹
- شکل ۱۵-۳: دستگاه قرائت‌گر (TLD) و سیستم متصل به آن ۶۰
- شکل ۱-۴: نمایی از طرح کلی آزمایش ۶۹
- شکل ۲-۴: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr ۷۴

- شکل ۴-۳: دز جذبی درزاویه ۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۷۵
- شکل ۴-۴: دز جذبی درزاویه ۳۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۷۶
- شکل ۴-۵: دز جذبی درزاویه ۶۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۷۶
- شکل ۴-۶: دز جذبی درزاویه ۹۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۷۶
- شکل ۴-۷: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) در زاویه‌های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۷۷
- شکل ۴-۸: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) در زاویه‌های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۷۸
- شکل ۴-۹: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) در زاویه‌های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۷۸
- شکل ۵-۱: نمایی از قرص‌های چسبانده شده به بدنه محفظه خلا..... ۸۳
- شکل ۵-۲: صفحه نمایش اسیلسکوپ پس از یک بار شات زدن..... ۸۳
- شکل ۵-۳: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در فشار ۰/۶ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۸۵
- شکل ۵-۴: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در فشار ۰/۸ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۸۵
- شکل ۵-۵: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در فشار ۱ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۸۶
- شکل ۵-۶: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در ولتاژ ۹ kV و فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۸۷
- شکل ۵-۷: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در ولتاژ ۱۰ kV و فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۸۷
- شکل ۵-۸: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در ولتاژ ۱۱ kV و فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۸۸
- شکل ۵-۹: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۸۹
- شکل ۵-۱۰: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۹۰
- شکل ۵-۱۱: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۱ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۹۰
- شکل ۵-۱۲: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۹۱
- شکل ۵-۱۳: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۹۲
- شکل ۵-۱۴: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۱ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۹۲
- شکل ۵-۱۵: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۹۳
- شکل ۵-۱۶: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۹۴
- شکل ۵-۱۷: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۱ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV..... ۹۴
- شکل ۵-۱۸: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۹۵
- شکل ۵-۱۹: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۹۶
- شکل ۵-۲۰: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr..... ۹۶

- ۹۶..... ۱ torr
 شکل ۵-۲۱: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و
- ۹۷..... ۱ torr
 شکل ۵-۲۲: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و
- ۹۸..... ۱ torr
 شکل ۵-۲۳: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و
- ۹۸..... ۱ torr
 شکل ۵-۲۴: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و
- ۹۹..... ۱ torr
 شکل ۵-۲۵: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و
- ۱۰۰..... ۱ torr
 شکل ۵-۲۶: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و
- ۱..... ۱ torr

فصل ۱: مفاهیم اولیه

۱-۱ مقدمه

باتوجه به محدودیت منابع انرژی کنونی، استفاده از منابع جایگزین جدید به منظور تامین انرژی مورد نیاز جهان از مسایل پر اهمیتی محسوب می‌شود که پژوهشگران را در سراسر دنیا به تحقیقات بسیاری در این زمینه واداشته است. یکی از این پژوهش‌ها، کار بر روی راکتورهای گداخت هسته‌ای به منظور استفاده از انرژی حاصل از فرآیندهای گداخت هسته‌ای می‌باشد. به علت پاک بودن منابع حاصل از فرآیند گداخت هسته‌ای، توجه ویژه‌ای به این منابع شده است که یکی از نتایج پژوهش‌های انجام شده در سراسر جهان به این منظور، طراحی و ساخت دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد.

دستگاه پلاسمای کانونی به دلیل سادگی ساختار، ارزان بودن و قابلیت تولید پلاسمای با دمای بالا ($1-2\text{keV}$) و چگال ($10^{19}-10^{20}\text{cm}^{-3}$) و با نیمه عمر کوتاه ($20-50\text{ns}$)، در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی بسیار پرکاربرد است [۱-۲]. یکی از مزایای استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی، گسیل اشعه ایکس به صورت پالسی توسط این دستگاه است و همین امر موجب فراوانی کاربردهای آن شده است. درک درست از دینامیک پلاسمای ایجاد شده، نقش بسیار مهمی در بهینه کردن پلاسما به منظور کاربردهای خاص دارد.

در فصل اول این پایان‌نامه به معرفی اشعه ایکس، پلاسما، دزیمترهای TLD و روش‌های محصورسازی پلاسما پرداخته شده است.

۱-۲ معرفی اشعه ایکس و تاریخچه آن

اشعه ایکس کاربردهای متنوعی دارد که یکی از آن‌ها آگاهی از ماهیت و ساختار درونی اجسام و نیز بررسی آن‌ها می‌باشد. از سال ۱۸۹۵ که تابش‌های کوتاهی، صفحه فسفرسانسی را که در آزمایشگاه نیمه تاریک مربوط به بررسی اشعه کاتدیک رونگتن قرار داشت سیاه نمودند، دانشمندان و فیزیکدانان

بسیاری بر آن داشته شدند که در خصوص این تابش‌ها و کاربردهای آن‌ها تفکر و تامل کنند و طی پژوهش‌های بسیار به ماهیت این تابش‌ها پی ببرند. حدود دو ماه بعد از این اتفاق، اولین دستگاه عکسبرداری اشعه ایکس ساخته شد و اولین عکسی که توسط این دستگاه گرفته شد، مربوط می‌شود به دست همسر آقای رونتگن که هم اکنون در موزه‌ای در مونیخ از آن نگهداری می‌شود.

درواقع از سال ۱۸۵۸ می‌دانستند که در طی زمان تخلیه الکتریکی، دیواره‌های لامپ فسفرسانس می‌درخشند. در سال ۱۸۷۸ آقای "ویلیام کروکس" پرتوهای کاتدی این پدیده را به عنوان یک "جریان مولکول‌های در حال پرواز" توصیف کرد که امروزه می‌دانیم پرتوهای کاتدی، درواقع جریانی از الکترون‌هاست که از آند به سمت کاتد گسیل می‌شوند و ضربه حاصل از برخورد این الکترون‌ها به دیواره لامپ، باعث خاصیت فسفرسانسی می‌شود. در سال ۱۸۹۲ هاینریش رادولف هرتر^۲ نشان داد که پرتوهای کاتدی از صفحات نازک فلزی عبور می‌کنند. دو سال بعد فیلیپ لنارد^۳، لامپ‌های تخلیه‌ای ساخت که منافذ آلومینیومی نازکی داشتند و پرتوهای کاتدی را به بیرون لامپ منتقل می‌کردند و در آن‌جا بود که می‌توانستند این پرتوها را براساس نوری که بر صفحه‌ای از فلورسانس ایجاد می‌کردند، مشاهده کنند. بعد از این آزمایش مشخص شد که در فشارهای معمولی خارج لامپ، این پرتوها ۲ یا ۳ سانتی‌متر بیشتر دوام نمی‌آورند. رونتگن در پی یافتن پاسخ این پرسش که آیا می‌شود پرتوهای کاتدی را از یک لامپ تمام شیشه‌ای (لامپی که هیچ منفذی نداشته باشد) که کروکس استفاده کرده بود عبور داد یا نه؟ یک لامپ پرتو کاتدی را با یک مقوای سیاه رنگ پوشانید و یک صفحه فسفرسانسی را در مقابل آن قرار داد و اتاق را تاریک کرد، در این حین درخشش یک نور ضعیف از مقوا نظرش را جلب نمود. رونتگن که از سالم بودن مقوا و تاریک بودن اتاق مطمئن بود، به سرعت کبریتی افروخت و منشا این نور مرموز را در صفحه فسفرسانسی مشاهده نمود که در فاصله یک متری روی میز بود و به عنوان آشکار ساز می‌خواست از آن استفاده کند. وی بعد از چند هفته سکوت و تلاش، کار خود را در تاریخ ۲۸ دسامبر سال ۱۸۹۵ در مقاله‌ای به عنوان "مکتوبی اولیه در مورد

نوعی پرتوی جدید" در دانشگاه ورتزبرگ^۴ چاپ کرد. رونتگن در آن زمان به دلیل مجهول بودن ماهیت این پرتو، آن را تحت عنوان اشعه ایکس نام گذاری کرد[۳-۴۶].

۳-۱ ویژگی های اشعه ایکس

اما امروزه می دانیم که در واقع پرتوی ایکس، یک نوع تابش الکترومغناطیسی با طول موج حدود 0.1 تا 20 نانومتر می باشد که معادل انرژی بین 100 الکترون ولت تا 200 کیلو الکترون ولت است[۴۸]. پرتوهای اشعه ایکس بر خلاف پرتوهای کاتدی، تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار نمی گیرند و اغلب مواد برای آن ها حکم ماده شفاف قابل عبوری را دارند. پرتوی ایکس می تواند تکفام (یعنی فقط دارای یک طول موج مشخص) و یا پیوسته (یعنی دارای طول موج بین λ_1 و λ_2 باشد). ناحیه طیفی پرتو ایکس در طیف الکترومغناطیسی بین محدوده اشعه گاما و پرتو فرابنفش قرار دارد.

۴-۱ منابع اشعه ایکس

امروزه بنا به احتیاجات صنعت مبنی بر داشتن اشعه ایکس^۵ با بازده و انرژی بالاتر به منظور کاربردهای صنعتی، توجه بیشتری به گسترش منابع اشعه ایکس با انرژی بالاتر شده است. به طور کلی اشعه ایکس به دو روش اساسی تولید می شود که عبارت هستند از [۴]:

^۱William crookes

^۲Heinrich Rudolf Hertz

^۳Phillips Lenard

^۴Wurzburg

^۵X ray

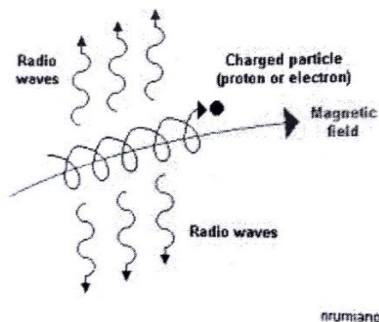
۱- شتاب‌دار کردن ذرات باردار (اغلب منظور از این ذرات باردار الکترون‌هاست)

۲- تغییر تراز اتمی (یا یونی) الکترون‌ها از سطح انرژی بالاتر به سطح انرژی پایین‌تر

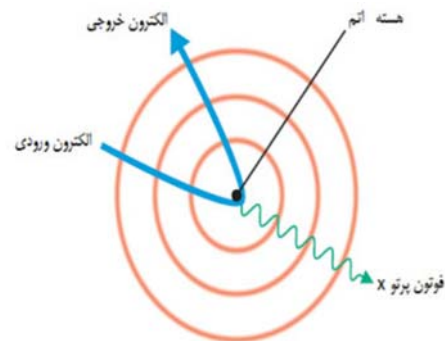
تابش ترمزی که طی آن سرعت الکترون‌ها به علت برخورد با ذرات باردار سنگین کاهش پیدا می‌کند، و همچنین تابش‌های سینکروترونی که طی آن حرکت ذرات باردار نسبیتی در مسیرهای دایروی شکل بر اثر میدان مغناطیسی اتفاق می‌افتد، مثال‌هایی برای تولید اشعه ایکس به روش اول هستند. در تولید اشعه ایکس توسط این روش، یک طیف پیوسته از اشعه ایکس گسیل می‌شود که به آن اشعه ایکس سفید نیز می‌گویند. البته گاهی ممکن است یک سری خطوط تکفام از دستگاه مشاهده شود.

در شکل ۱-۱ و ۲-۱ نمونه‌هایی از تابش ترمزی و تابش سینکروترونی نشان داده شده‌است.

در روش دوم برای تولید اشعه ایکس، ذکر این مطلب ضروری است که اشعه ایکس در این روش زمانی ساطع می‌شود که الکترون‌ها با یک هدف فلزی با عدد اتمی پایین برخورد کنند و یا این‌که پلاسمای کانونی ایجاد شده، از موادی با عدد اتمی پایین تشکیل شده باشد که در این صورت یک طیف گسسته از اشعه ایکس را خواهیم داشت.



شکل ۲-۱: نمونه‌ای از تابش سینکروترونی



شکل ۱-۱: نمونه‌ای از تابش ترمزی

فرآیندهای دیگری [۵] از قبیل تابش‌های عبوری^۶ (وقتی که یک ذره باردار، سطح مشترک دو ماده را طی می‌کند درحین عبور از خود اشعه ایکس گسیل می‌کند) و تابش‌های کانالی^۷ (هنگامی رخ می‌دهد که یک ذره درامتداد کانال‌های تشکیل شده توسط صفحات موجود در یک کریستال، حرکت کند) نیز می‌توانند از خود اشعه ایکس گسیل کنند. اما به علت محدودیت در کاربرد و منابع تولید کننده، خیلی مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

در حالت کلی چشمه‌های تولیدکننده اشعه ایکس را می‌توان به چهار گروه زیر تقسیم نمود:

۱- سینکروترون

۲- منابعی که دارای یک هدف فلزی هستند.

۳- پلاسما

۴- لیزرهای اشعه ایکس

قدرت تولید اشعه ایکس در منابع ذکر شده متفاوت است و ما در انجام این پایان‌نامه از پلاسما برای تولید اشعه ایکس بهره برده‌ایم.

۱-۵ معرفی پلاسما

در دهه ۱۹۲۰، شخصی به نام ایروین لانگمویر^۸ که یک شیمیدان و مهندس جوان بود، در حالی که در شرکت جنرال الکتریک مشغول به کار بود متوجه پدیده تخلیه الکتریکی روی گازها شد و برای

^۶Transition radiation

^۷Channeling radiation

اولین بار نام پلاسما را روی این گازهای تغییر شکل یافته نهاد. در علم پزشکی پلاسما ماده‌ای ناپایدار است که تقریباً عمر و رفتار آن شبیه به مواد یونیزه شده است [۶].

پلاسما به حالت چهارم ماده بعد از مایع، جامد و گاز گفته می‌شود که به دلیل افزایش دما، انرژی بین مولکول‌ها افزایش یافته و اتم‌های اولیه به یون‌های مثبت و الکترون‌ها تجزیه شده‌اند. در واقع پلاسما در ابتدا به صورت یک گاز بوده که با افزایش دما، به صورت مخلوطی از الکترون‌ها و یون‌های مثبت و ذرات باردار که در آن آزادانه حرکت می‌کنند در آمده است.

پلاسما گاز شبه خنثایی متشکل از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود ارائه می‌دهند. شبه خنثی بودن پلاسما یعنی آن‌قدر خنثی که بتوان به طور تقریبی چگالی یون‌ها، چگالی الکترون‌ها و چگالی پلاسما را یکسان در نظر گرفت ($n=n_e=n_i$) و نه آن‌قدر خنثی که تمام نیروهای الکترومغناطیسی مورد توجه حذف شوند. وقتی گفته می‌شود پلاسما رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد، منظور از رفتار جمعی حرکاتی است که نه تنها به شرایط موضعی، بلکه به حالت پلاسما در نقاط دور نیز بستگی دارند [۷].

نیروهای وارد بر یک مولکول، مثلاً مولکول هوا را در نظر بگیرید. چون مولکول خنثی است، هیچ

نیروی الکترومغناطیسی خالصی بر آن وارد نمی‌شود و نیروی ثقل قابل چشم‌پوشی است. این مولکول بدون مزاحمت حرکت می‌کند تا به مولکول‌های دیگر برخورد کند، همین برخوردها هستند که حرکت ذره را کنترل می‌کنند. در پلاسما وضعیت کاملاً متفاوت است. پلاسما دارای ذرات باردار است که این بارها با حرکت خود می‌توانند توده‌های متمرکزی از بارهای مثبت یا منفی را به طور موضعی به وجود آورند و بدین ترتیب سبب پیدایش میدان‌های الکتریکی شوند. با حرکت بارها جریان و در نتیجه

^۱Irving langmuir

میدان‌های مغناطیسی به وجود می‌آیند. این میدان‌ها بر حرکت سایر ذرات که در نقاط دورتر واقع شده‌اند، اثر می‌گذارند. به این علت می‌گویند که پلاسما رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد [۷].

گفته می‌شود که ۹۹٪ ماده موجود در طبیعت به صورت پلاسماست. این تخمین هرچند ممکن است خیلی دقیق نباشد ولی تخمین معقولی است از این واقعیت که درون ستارگان و جو آن‌ها، ابرهای گازی و اغلب هیدروژن فضای بین ستارگان به صورت پلاسما هستند. وقتی ما جو زمین را ترک می‌کنیم بلافاصله با پلاسمایی مواجه می‌شویم که شامل کمربندهای تشعشعی وان آلن و بادهای خورشیدی است. همچنین در زندگی روزمره‌مان با چندین نمونه محدود از پلاسما مواجه می‌شویم مثل رعد و برق، تابش ملایم شفق قطبی، گازهای داخل یک لامپ فلورسانس یا چراغ نئون و یونش مختصری که در گازهای خروجی یک موشک دیده می‌شود [۷].

۱-۶ پارامترهای پلاسما

البته که هر گاز یونیزه شده‌ای را نمی‌توان پلاسما نامید. پلاسما مشخصاتی دارد که آن را از یک گاز یونیزه شده متمایز می‌کند که در ادامه به این مشخصات اشاره خواهیم کرد.

۱-۶-۱ دما

همان گونه که می‌دانیم، دما به انرژی جنبشی ذرات و در نتیجه به سرعت آن‌ها وابسته است. برای یک گاز در سه بعد داریم :

$$E_{av} = \frac{3}{2}KT \quad (1-1)$$

با توجه به این که رابطه بین دما و انرژی یک رابطه خطی است، در فیزیک پلاسما رایج است که دما را بر حسب انرژی بیان کنند.

$$KT = \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (2-1)$$

$$\text{eV} = 11600^0 \text{ K} \quad (3-1)$$

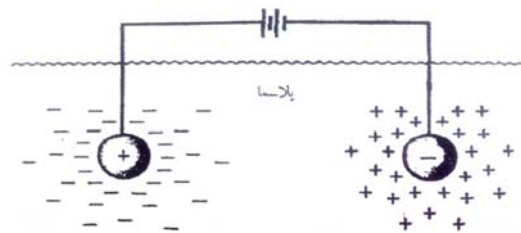
جالب است بدانیم که پلاسما ممکن است در عین حال دارای چندین دما باشد. اغلب این اتفاق زمانی رخ می دهد که یون ها و الکترون ها دارای توزیع ماکسولی جداگانه ای با دماهای مختلف T_e و T_i باشند. یعنی میزان برخورد بین خود یون ها و خود الکترون ها با یکدیگر بیشتر از میزان برخورد یک یون و یک الکترون است. در نتیجه هرکدام از این انواع (یون ها و الکترون ها) می توانند در تعادل حرارتی مخصوص به خودشان باشند ولی شاید پلاسما آن قدر باقی نماند تا این دو دما با هم برابر شوند [7]. بنابراین مشخص است که دمای پلاسما مقدار بالایی می باشد ولی این مقدار صرفا دلیل بر گرمای بالای آن نیست بلکه باید چگالی را نیز در نظر گرفت.

۱-۶-۲ حفاظ دمای

یکی از مشخصات اساسی رفتار پلاسما، توانایی آن برای ایجاد حفاظ در مقابل پتانسیل های الکتریکی است که از خارج به آن اعمال می شوند. این خاصیت به دلیل رفتار جمعی الکترون ها و یون هاست.

فرض کنید بخواهیم با وارد کردن دو گلوله باردار که به یک باتری وصل شده اند، یک میدان الکتریکی داخل پلاسما به وجود آوریم. پس از وارد شدن به محیط پلاسما هر کدام از این گلوله ها، بارهای مخالف خود را جذب می کنند و تقریبا بلافاصله، ابری از یون ها اطراف گلوله منفی و ابری از الکترون ها اطراف گلوله مثبت را فرا می گیرد. اگر پلاسما سرد باشد و هیچ گونه حرکت حرارتی وجود نداشته باشد، تعداد بار ابر برابر تعداد بار گلوله می گردد، در این صورت حفاظ کامل می شود و هیچ میدان

الکتریکی در حجم پلاسما در خارج از ناحیه ابرها وجود نخواهد داشت. اما چنانچه دما معین و محدود باشد، ذراتی که در لبه ابر قرار گرفته‌اند یعنی جایی که میدان الکتریکی ضعیف است انرژی حرارتی کافی برای فرار از چاه پتانسیل الکترواستاتیکی پیدا می‌کنند. در این صورت لبه ابر در شعاعی واقع می‌شود که در آن انرژی پتانسیل تقریباً برابر با انرژی حرارتی KT ذرات است، و حفاظ کامل نیست [۷].



شکل ۱-۳: حفاظ دبای

ضخامت تقریبی این ابر را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد :

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۴-۱)$$

λ_D طول دبای نامیده می‌شود [۷].

۱-۶-۳ فرکانس پلاسما

در صورتی که الکترون‌ها در داخل یک توزیع یکنواخت یونی جابجا شوند، میدان‌های الکتریکی به وجود خواهند آمد که جهت این میدان‌ها در جهتی است که با کشاندن الکترون‌ها به سر جای اولشان، دوباره خنثی بودن پلاسما را برگردانند. الکترون‌ها به علت لختی جلو می‌روند و حول مکان‌های تعادل خودشان با بسامد مشخصی که بسامد پلاسما نامیده می‌شود نوسان می‌کنند [۷].

۷-۱ ویژگی‌های پلاسما

برای این که یگ گاز را پلاسما بنامیم باید دارای چند ویژگی خاص باشد که در این بخش به معرفی این ویژگی‌ها می‌پردازیم:

شرط اول: اگر ابعاد سیستم گازی و یونیده‌ای را که در اختیار داریم L در نظر بگیریم، زمانی می‌توان این سیستم را پلاسما در نظر گرفت که آن قدر چگال باشد که λ_D خیلی کوچک‌تر از L شود $(\lambda_D \ll L)$.

شرط دوم: تعریفی که در شرط اول ذکر شد زمانی معتبر است که ذرات در ابر باردار به تعداد کافی وجود داشته باشند. بدیهی است که اگر در ناحیه غلاف فقط یک یا دو ذره وجود داشته باشد، حفاظ دبابی از نظر آماری مفهوم معتبری نخواهد بود. با استفاده از رابطه (۴-۱) می‌توان تعداد ذرات را در کره دبابی محاسبه کرد:

$$N_D = \frac{4}{3} n \pi \lambda_D^3 \quad (۵-۱)$$

بنابراین علاوه بر شرط اول، خاصیت رفتار جمعی ایجاب می‌کند که: $(N_D \gg 1)$

شرط سوم: این شرط مربوط به برخوردهاست. اگر ω بسامد نوعی نوسان‌های پلاسما و τ زمان متوسط بین برخوردها با اتم‌های خنثی باشد، برای آن که گاز مانند پلاسما (و نه یک گاز خنثی) رفتار کند لازم است که شرط $\omega\tau \gg 1$ برقرار باشد [۷].

۸-۱ انواع شمارشگرها

به دلیل آن که هیچ یک از حواس پنج‌گانه انسان توانایی اندازه‌گیری تابش هسته‌ای را ندارد، آشکارساز به عنوان حس ششم به کار می‌رود. آشکارساز هم‌چنین می‌تواند وجود مقادیری از ماده، بسیار کوچک‌تر از آنچه که می‌تواند به وسیله آزمایش‌های شیمیایی تشخیص داده شود را آشکار سازد. نوع آشکارساز به کار رفته بستگی به ذرات مورد مشاهده، الکترون‌ها، پرتوهای گاما، نوترون‌ها، یون‌هایی مانند پاره‌های شکافت یا ترکیبات آن‌ها دارد. در این‌جا چند نمونه از انواع آشکارسازها را به اختصار نام می‌بریم:

۱- شمارشگرهای گازی

۲- آشکارسازهای نوترون

۳- شمارشگرهای سوسوزنی (سنتیلاسیون)

۴- آشکارسازهای حالت جامد

ما در انجام این پایان‌نامه از نوعی آشکارساز سوسوزنی بهره برده‌ایم. بنابراین در ادامه به معرفی این نوع آشکارسازها می‌پردازیم.

۹-۱ آشکارسازهای سوسوزنی (سنتیلاسیون)^۹

نام این آشکارساز از این حقیقت ناشی می‌شود که برهمکنش یک ذره با بعضی از مواد به سوسوزنی یا جرقه نور منجر می‌گردد. پدیده بنیادی شناخته شده این است که بسیاری از مواد هنگام قرار گرفتن

^۹Scintillation

در معرض نور فرابنفش می‌توانند به نور دادن به طور مرئی برانگیخته شوند. مولکول‌های موادی که به عنوان فسفرها طبقه بندی می‌شوند، به وسیله تابشی از ذرات باردار برانگیخته می‌شوند و به دنبال آن پالس‌هایی از نور گسیل می‌کنند. مواد به کار رفته شده در آشکارساز سوسوزنی معدنی، از قبیل یدید سدیم یا یدید لیتیم، یا آلی، در یکی از اشکال گوناگون بلوری، پلاستیک، مایع یا گاز می‌باشند.

مقدار نور آزاد شده هنگام برخورد یک ذره به یک فسفر با انرژی برجای مانده متناسب است، و از این رو آشکارساز را به ویژه برای تعیین انرژی ذرات مفید می‌سازد. چون ذرات باردار دارای برد محدودی هستند، قسمت اعظم انرژی آن‌ها در ماده ظاهر می‌شود. پرتوهای گاما نیز از طریق پس‌زنی الکترون هم در اثر فوتوالکتریک و هم در پراکندگی کامپتون و از طریق فرآیند نابودی- تولید زوج انرژی به جا مانده را افزایش می‌دهند [۹].

دزیمتره‌های ترمولومینسانس یک نمونه از آشکارسازهای سوسوزنی می‌باشند که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است. در ادامه به معرفی این نوع آشکارسازها می‌پردازیم.

۱-۱۰ دزیمتره‌های ترمولومینسانس (TLD)^{۱۰}

۱-۱۰-۱ تاریخچه

گسیل نور از برخی مواد پدیده جالب و پیچیده‌ای است که از دیرباز مورد توجه قرار گرفته و دارای کاربردهای متنوع می‌باشد. در سال ۱۶۶۳ رابرت بویل^{۱۱} از پیشگامان علم شیمی، از روشنایی عجیبی

^{۱۰}Thermoluminescence

^{۱۱}Robert Boyle

که هنگام گرم کردن الماس در تاریکی مشاهده کرد، خبر داد. هنری بکرل^{۱۲} در سال ۱۸۸۳ در طی تحقیقات پیرامون طیف مادون قرمز اثر ترمولومینسانس را توصیف کرد و این نکته را بیان کرد که تابش پرتو مادون قرمز بر روی ماده فسفرسانس همان اثر افزایش دما را دارد.

ماری کوری^{۱۳} در سال ۱۹۰۴ در رساله دکتری خود به پدیده ترمولومینسانس اشاره کرد. همچنین در سال ۱۹۲۵، پس از کشف پرتو ایکس، ویک در مورد اثر پرتو ایکس در ایجاد ترمولومینسانس مقاله‌ای ارائه کرد و نشان داد که ترمولومینسانس در موادی که زمان بیشتری در معرض تابش ایکس بوده‌اند، نسبت به مواد مشابه بیشتر است.

راندل و ویلکینز و گارلیک و گیسون نخستین کسانی بودند که منحنی‌های تابش ترمولومینسانس را به صورت تئوری توصیف کردند [۴۷-۸].

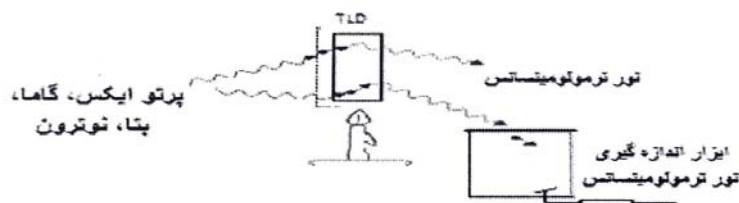
۱-۱۰-۲ پدیده ترمولومینسانس

برخی از مواد نیمه هادی یا عایق در صورتی که ابتدا پرتو دهی و سپس گرمادهی شوند، از خود نور مرئی منتشر می‌کنند که به آن نور ترمولومینسانس می‌گویند. بنابراین ترمولومینسانس انتشار نور مرئی از ماده پرتو دهی شده (ماده نیمه هادی یا عایق) در اثر تحریک گرمایی می‌باشد. موادی که دارای این خاصیت باشند را مواد ترمولومینسانس می‌نامند. هنگامی که این مواد پرتو دهی می‌شوند، انرژی پرتو در اثر فرآیندهای فیزیکی در ماده جذب می‌شود و باعث برانگیختگی الکترون‌ها می‌شود. الکترون‌های برانگیخته شده به ترازهای انرژی بالاتر منتقل می‌شوند و به دلیل ناپایداری در زمان کوتاهی به حالت قبلی باز می‌گردند که در مسیر بازگشت در دام‌های الکترونی که به واسطه ناخالصی و نقایص ذاتی در ماده ایجاد شده به دام می‌افتند. این الکترون‌ها تا زمانی که مجدداً انرژی دریافت

^{۱۲}Antoine Henri Becquerel

^{۱۳}Marie Curie

نکنند در دام باقی می‌مانند. به این ترتیب پرتوی برخوردی در ماده ذخیره می‌شود. در صورتی که به وسیله گرما دوباره به ماده انرژی داده شود الکترون‌ها از دام آزاد می‌شوند و انرژی اضافی خود را با انتشار فوتون ترمولومینسانس از دست می‌دهند [۴۷].



شکل ۱-۴: شماتیکی از پدیده ترمولومینسانس [۸]

۱-۳ کاربردهای ترمولومینسانس

مهم‌ترین کاربردهای مواد ترمولومینسانس، استفاده از آن‌ها برای اهداف دزیمتری و عمرسنجی می‌باشد. تاریخ استفاده از پدیده ترمولومینسانس برای اهداف دزیمتری، به دهه ۱۹۵۰ بازمی‌گردد. تا این زمان، دزیمتری عمدتاً با استفاده از فیلم‌های حساس به پرتوهای مختلف صورت می‌گرفت. که این فیلم‌ها دارای محدودیت‌هایی از جمله محوشدگی و حساسیت به عوامل محیط است. بنابراین در اوایل دهه ۱۹۵۰، اقدامات جدی برای یافتن جانشین مناسب‌تر آغاز شد. به دنبال آن دزیمترهای رادیوفوتولومینسانس در ابعاد وسیع تولید و به منظور اهداف نظامی بکار گرفته شد، که عمده آن‌ها توسط کیرک در سال ۱۹۵۷ صورت گرفت. در سال ۱۹۶۱ کارون و همکارانش با ادامه تحقیقات دانیلز در سال ۱۹۵۳ در خصوص ماده لیتیم فلوئورید و با افزایش ناخالصی‌های منیزیم و تیتانیوم به عنوان فعال‌ساز موفق به ساخت دزیمتری شد که امروزه نیز به طور وسیع تحت عنوان $TLD-100$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با گسترش استفاده از مواد ترمولومینسانس به منظور دزیمتری پرتوهای

مختلف، دو نمونه دیگر از ترکیبات لیتیم فلوئوراید تحت عناوین $TLD - 600$ و $TLD - 700$ با درصد تغییر ایزوتوپ 6Li و 7Li در ترکیب طبیعی و برای اندازه‌گیری هم‌زمان دز پرتوهای گاما، بتا و نوترون عرضه گردید [۸-۴۵-۴۷].

دزیمترهای ترمولومینسانس دارای انواع مختلف با ترکیب شیمیایی و نام تجاری متفاوت می‌باشد که در جدول ۱-۱ نشان داده شده‌است.

جدول ۱-۱: انواع مختلف از دزیمترهای ترمولومینسانس [۴۷]

Dosimeter	Peak Temp(°C)	Sensitivity	Z eff	Dosimetry Application
LiF:Mg, Ti (TLD-۱۰۰)	۲۱۰	۱	۸/۳	X, γ, β
6Li F:Mg,Ti (TLD-۶۰۰)	۲۱۰	۱	۸/۳	X, γ, β, n
7Li F:Mg,Ti (TLD-۷۰۰)	۲۱۰	۱	۸/۳	X, γ, β
LiF:Mg, Cu, P (GR-۲۰۰)	۲۲۰	۲۵	۸/۳	X, γ, β
$Li_2B_4O_7$:Cu	۲۰۵	۸	۷/۴	X, γ, β
$CaSO_4$:Dy	۲۲۰	۲۵	۱۵/۳	X, γ, β
CaF_2 :Dy	۲۱۵	۱۵	۱۶/۳	X, γ, β

عموماً یک TLD قطعه‌ای از یک ماده ترمولومینسانس است که در معرض پرتو مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. پس از توقف پرتودهی در شرایط کنترل شده‌ای TLD را گرما می‌دهند و شدت نور را بر حسب تابعی از دما اندازه می‌گیرند. نتیجه این اندازه‌گیری نموداری است که منحنی تابش خوانده می‌شود. منحنی‌های تابش بیش از یک قله دارند که این قله‌ها مربوط به دام‌های با انرژی‌های مختلف هستند. دامنه قله‌ها متناسب با تعداد حامل‌هایی است که در دام‌های مربوطه گیر افتاده‌اند. دز نور جذب شده را می‌توان یا از کل نور گسیل شده از منحنی تابش و یا از ارتفاع یک یا چند قله آن تعیین کرد. اگر TLD را به مدت کافی گرما بدهیم تا تمام دام‌ها خالی شوند و سپس آن را به حال خود بگذاریم تا به دمای اتاق برسد، دوباره پخته می‌شود یعنی به حالت اولیه‌اش برمی‌گردد. اندازه‌گیری

نور از منحنی تابانی و بازپزی متعاقب آن، با ابزارهایی انجام می‌شود که معمولاً قرائتگر نامیده می‌شوند و به صورت تجاری قابل تهیه هستند.

مواد ترمولومینسانس متعددی وجود دارند اما آن‌هایی که برای دزسنجی مفیدند باید دارای ویژگی‌های زیر باشند [۹]:

۱- نگهداری حامل‌های به دام افتاده برای دوره‌های بلند مدت در دماهای محیط پرتوگیری

۲- نور خروجی زیاد

۳- پاسخ در گستره‌ی وسیعی از دز

۴- باز پزی کامل برای استفاده‌های پی در پی

۵- پایداری زیاد و محوشدگی پایین

۱-۴-۱۰ مزایا و معایب دزیمترهای ترمولومینسانس

این دزیمترها، یک سری مزایا و همچنین یک سری معایب نسبت به دزیمترهای دیگر دارند. از مزایای آن‌ها می‌توان به حساسیت در دامنه وسیعی از دز (دزیمترهای TLD - 100 که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، به اشعه ایکس‌هایی که در سرتاسر طیف انرژی بیشتر از 5 keV دارند حساس است [۱۱])، عدم حساسیت به میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، کالیبراسیون آسان، استفاده مجدد ساده، اندازه‌های فیزیکی کوچک، عدم نیاز به ولتاژ بالا یا کابل و... اشاره کرد [۱۲]. همچنین کریستال‌های TLD در بسیاری از اندازه‌ها و شکل‌های مختلف مثل میله‌ها، نوارها، گلوله‌ها و کریستال‌های تک در دسترس هستند [۱۰].

با توجه به حساسیت دزیمترهای TLD - 100 به گستره‌ای از طیف انرژی، این آشکارساز ابزار تشخیصی مفیدی برای مطالعه اشعه ایکس در دستگاه‌های پلاسمای کانونی می‌باشد [۱۲].

همان‌گونه که ذکر شد، این دزیمترها معایبی هم دارند که چند مورد از آن‌ها را نام می‌بریم:

۱- TLD ها فقط می‌توانند یک بار خوانده شوند زیرا reading آن‌ها پاک می‌شود. بنابراین هیچ ثبت دائمی از دز وجود ندارد و اشتباهات در فرآیند اندازه‌گیری ممکن است reading را از دست بدهد.

۲- محوشدگی سیگنال ذخیره شده ممکن است اتفاق بیفتد که این مورد به فاصله زمانی بین دریافت و نمایش آن سیگنال بستگی دارد.

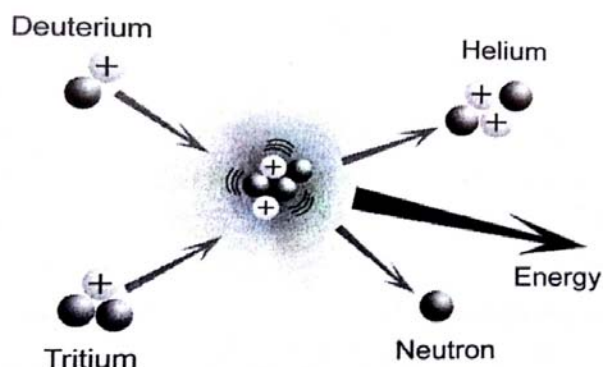
۳- دقت خواندن، به نور، میزان حساسیت قرائتگر TLD و میزان گرمای TLD بستگی دارد. اما حفظ ثبات کافی برای قرائتگر کار دشواری است.

۴- TLD ها اطلاعات زیادی درباره انرژی تابش رخ داده، به عنوان فیلم و دزیمترهای نوری تحریک شده ترمولومینسانس ارائه نمی‌دهند [۱۰].

۱۱-۱ محصورسازی پلاسما

همجوشی یا همان گداخت هسته‌ای، همان‌طور که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است به معنای این است که دو هسته بسیار سبک مثل هیدروژن، دوتریم و تریتیم آن‌قدر به یک‌دیگر نزدیک می‌شوند تا در فاصله نیروی جاذبه هسته‌ای قوی قرار بگیرند، سپس هسته‌ای با جرم بیشتر تشکیل می‌شود و مقداری انرژی آزاد می‌گردد. انرژی آزاد شده در این فرآیند تفاوت انرژی بستگی هسته سنگین و هسته‌های سبک‌تر است. منشا انرژی خورشید و دیگر ستاره‌ها واکنش‌های گداخت هسته‌ای است. این فرآیند می‌تواند تا زمانی که هسته نهایی سنگین‌تر از $A=60$ نباشد، انرژی آزاد کند. این عمل در واقع عکس فرآیند شکافت هسته‌ای است [۱۳]، ولی به دلیل محدودیت‌های مهم ناشی از سد کولنی، همجوشی هرگز نمی‌تواند مانند فرآیند شکافت به صورت یک فرآیند طبیعی روی کره زمین اتفاق بیفتد. با غلبه کردن بر سد کولنی، همجوشی خیلی محتمل می‌شود زیرا دو هسته روی هم افتاده به

سرعت به یک حالت کمینه انرژی می‌رسند. لذا درک و توضیح فرآیندهای همجوشی به طور قابل ملاحظه‌ای آسان‌تر از فرآیندهای شکافت است.



شکل ۱-۵: فرایند گداخت هسته‌ای

اولین گام برای دستیابی به واکنش گداخت هسته‌ای، این است که گرمایش اتم‌های واکنش دهنده پلاسما تا دمای 10^8 درجه کلوین باشد و محصورسازی آن به مدت کافی و با دما و چگالی بالا انجام شود. شرط ذکر شده را می‌توان به صورت رابطه (۱-۶) که به معیار لاوسون^{۱۴} معروف است، بیان کرد:

$$N\tau > 10^{20} \frac{s}{m^3} \quad (۱-۶)$$

در این رابطه N چگالی پلاسما و τ مدت زمان محصورسازی است. بدیهی است که در چنین دماهای بالایی محصورسازی توسط دیواره‌های مادی امکان پذیر نمی‌باشد، بنابراین بکارگیری دیگر روش‌های محصورسازی لازم و ضروری است. در واقع در محیط پلاسما برای افزایش احتمال برخورد بین یون‌ها و در نتیجه افزایش بازده، پلاسما باید سه شرط زیر را داشته باشد:

۱- چگالی زیاد، به طوری که احتمال برخورد ذرات زیاد شود.

^{۱۴}Lawson Criterion

۲- دمای زیاد، T در گستره 10^8 کلوین که احتمال نفوذ ذرات را در سد پتانسیل مقابل زیاد کند.

۳- زمان محصورسازی طولانی که در خلال آن باید بالا بودن دما و چگالی حفظ شود [۱۳].

محصورسازی در فرآیند واکنش گرما هسته‌ای کنترل شده، فرآیند جلوگیری از برخورد پلاسما با دیواره‌های ظرفی که در آن جای دارد نامیده می‌شود.

اولین هدف عملی در محصورسازی، افزایش دمای پلاسما تا دمای 10^8 کلوین و دومین هدف این است که پلاسمای با دمای بالا در فضای محدودی محصور شود. بنابراین با توجه به این که چنین محفظه‌ای وجود ندارد، از دو روش محصورسازی مغناطیسی (MCF^{15}) و محصور سازی لختی (ICF^{16}) برای پلاسما استفاده می‌شود.

۱-۱۱-۱ محصورسازی مغناطیسی

می‌دانیم که پلاسما از ذرات باردار تشکیل شده‌است. این ذرات نمی‌توانند خطوط میدان مغناطیسی را قطع کنند، اما حول این خطوط می‌چرخند. این نکته، خلاصه‌ای از مبنای فکری طرح محصورسازی پلاسما توسط خطوط میدان مغناطیسی را تشکیل داده‌است. در پدیده همجوشی از طریق محصورشدگی مغناطیسی، پلاسمای سوخت توسط میدان‌های مغناطیسی محصور و فشرده می‌شود که این محصور شدن سوخت در مدت زمان طولانی از مرتبه یک ثانیه با چگالی پایین از مرتبه 10^{14} بر سانتی متر مکعب اتفاق می‌افتد.

¹⁵Magnetic Confinement Fusion

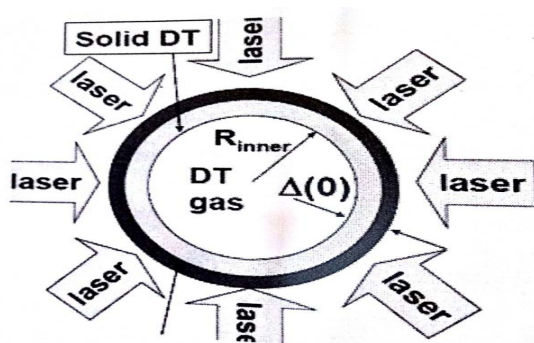
¹⁶Inertial Confinement Fusion

از جمله دستگاه‌هایی که به طریق محصورشدگی مغناطیسی عمل همجوشی را انجام می‌دهند می‌توان به توکامک و دستگاه پلاسمای کانونی اشاره کرد. توکامک در اوایل دهه ۱۹۶۰ اختراع شد و انستیتو "کورچاتف" اولین توکامک به نام را ساخت.

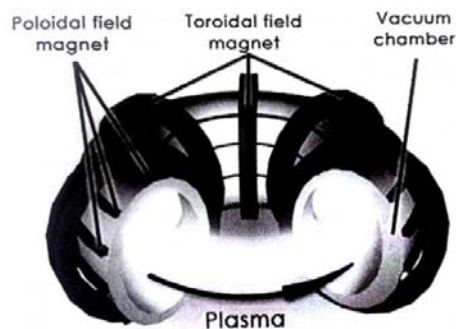
۱-۱۱-۲ محصورسازی لختی

در روش محصور شدگی لختی (اینرسی)، واکنش همجوشی در زمان کوتاهی از مرتبه 10^{-10} ثانیه با چگالی بالا از مرتبه 10^{26} بر سانتی متر مکعب اتفاق می‌افتد. در این روش سوخت دوتریم - تریتم در یک هدف با هندسه مشخص، متشکل از لایه‌های مختلف قرار داده می‌شود. وقتی یک باریکه لیزری یا یونی یکنواخت با شدت به اندازه کافی بالا، در حدود $10^{14} - 10^{15} \text{ w/cm}^2$ به هدف تابیده می‌شود، انرژی باریکه فرودی جذب شده و موجب ایجاد پلاسمای همجوشی می‌شود. در شکل ۱-۶ نمای از

روش محصور سازی به روش لختی را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱-۷: نمای از محصورسازی به روش لختی



شکل ۱-۶: نمای از محفظه توکامک

فصل ۲: دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدروکسیل اشعه ایکس از آن

۲-۱ معرفی دستگاه پلاسمای کانونی

در سال ۱۹۶۵ در راستای تحقیقات و پژوهش‌هایی روی همجوشی هسته‌ها و به منظور دستیابی به یک منبع انرژی پاک و جدید، "دستگاه پلاسمای کانونی" ساخته شد. هدف اصلی برای ساخته شدن این دستگاه، استفاده از آن به عنوان منبعی برای دسترسی به نوترون‌های سریع و پر انرژی بود (البته در صورت استفاده از گاز کاری دوتریم). پس از انجام آزمایشات متعددی، به چند منظوره بودن این دستگاه پی برده شد و متوجه شدند که دستگاه پلاسمای کانونی علاوه بر چشمه‌ی نوترونی می‌تواند به عنوان منبع خوبی برای یون‌ها و الکترون‌های پر انرژی و همچنین اشعه ایکس نرم (پرتویی که طول موج آن بین ۷ تا ۲۰ نانومتر است) و اشعه ایکس سخت (پرتویی که طول موج آن بین ۱ تا ۷ نانومتر است)، مورد استفاده قرار بگیرد. اشعه ایکسی که از این دستگاه گسیل می‌شود به صورت پالسی بوده و کاربردهای متفاوت و زیادی دارد. به همین علت دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان منبعی قوی و سودمند برای تولید اشعه ایکس، مورد توجه دانشمندان قرار گرفت. انتشار شدید اشعه ایکس به حالت بهینه کانونی شدن بستگی دارد [۱۶]. کانونی شدن پلاسما صد در صد گسیل اشعه ایکس را به دنبال خواهد داشت که بازه زمانی این تابش می‌تواند حدود چند تا چند صد نانوثانیه باشد. طیف تابش پلاسمای کانونی دامنه‌ای از کمتر از 1keV تا بیش از 500keV دارد. نوع گاز کاری و فشار پرکننده قوی‌ترین تاثیر را بر روی خصوصیات انتشار اشعه ایکس دارد [۱۱-۱۲]. علاوه بر فشار پرکننده محفظه و نوع گاز کاری، شکل آند و همچنین طول و ماده تشکیل دهنده آند به کار رفته شده در دستگاه پلاسمای کانونی و همچنین ولتاژ اعمال شده به دستگاه (که از طریق آن الکترون‌ها به سمت بالا حرکت می‌کنند) نیز در ساختار و شدت اشعه ایکس تولید شده توسط دستگاه تاثیر گذارند [۱۲-۱۴].

در حال حاضر هیچ مشکلی در ساخت و طراحی این دستگاه‌ها وجود ندارد، اما توصیف نظری آن‌ها بسیار پیچیده است و مدل مناسبی برای توضیح تمام مراحل کار آن‌ها وجود ندارد [۲].

دستگاه پلاسمای کانونی، یک دستگاه از خانواده Z پینچ‌هاست (به این علت که پینچ روی محور دستگاه که در واقع منطبق بر محور Z هاست و در بالای الکتروود مرکزی اتفاق می‌افتد) که ظرفیت تولید پلاسمایی با چگالی بالاتر از 10^{20} cm^{-3} و با دمای بالاتر از 500 eV را دارد. به علت ساختار ساده، هزینه پایین تولید، اندازه جمع و جور و قابل حمل بودن این دستگاه‌ها در مقایسه با سایر دستگاه‌های تحقیقاتی همجوشی و نگهداری آسان این دستگاه با گاز کاری نجیب، به عنوان منبع خوبی برای تولید اشعه ایکس و همچنین دستگاه مناسبی جهت مطالعه انواع پدیده‌های پلازما به شمار می‌آید [۲-۱۲-۱۴].

قاعده اصلی عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی در تبدیل انرژی ذخیره شده در بانک خازنی به شتاب الکترومغناطیسی و فشرده‌سازی کوتاه مدت پلاسمایی که منبع اشعه ایکس و همچنین منبع ذرات باردار و نوترون‌های همجوشی هسته‌ای (زمانی که از گاز کاری دوتریم استفاده می‌شود)، خلاصه می‌شود [۱۰-۱۴].

ذکاالله و همکارانش انتشار اشعه ایکس و پرتو یونی از یک دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی کم (2.3 kJ) با استفاده از سه شکل مختلف آند و با استفاده از آرگون به عنوان گاز کاری، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ساختار اشعه ایکس و قدرت اشعه ایکس حاصل از آن، تحت تاثیر شکل آند و فشار گاز پر شده است. حبیبی و همکارانش شدت اشعه ایکس سخت تابشی توسط یک دستگاه پلاسمای کانونی 4 kJ با انواع مختلف آند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که بیشترین و کمترین شدت اشعه ایکس سخت، به ترتیب با استفاده از آند تنگستن مخروطی و آند آلومینیومی مسطح مشاهده می‌شود. رابطه بین دز اشعه ایکس و گازهای مختلف در شرایط متفاوت در دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی کم (12 kJ) و با استفاده از دزیمترهای $500 - \text{TLD}$ توسط الارگی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که توانایی تبدیل انرژی جنبشی الکترون به انرژی پرتو اشعه ایکس، به عدد اتمی مواد هدف و ولتاژ که از طریق آن الکترون‌ها به سمت بالا حرکت می‌کنند، بستگی دارد. پائوز و همکارانش توزیع اشعه ایکس در یک دستگاه کوچک و جمع

و جور (0.4kJ) با گاز کاری هیدروژن را توسط دزیمترهای TLD-100 مورد بررسی قرار دادند.

اندازه‌گیری‌های آن‌ها یک تابش مخروطی شدید از اشعه ایکس را نشان می‌دهد [۱۲].

این دستگاه برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ به طور جداگانه و با ساختار هندسی متفاوت در اتحاد جماهیر شوروی سابق توسط فیلیپوف^{۱۷} [۱۷] و ایالات متحده آمریکا توسط مدر^{۱۸} [۱۸] ساخته شد.

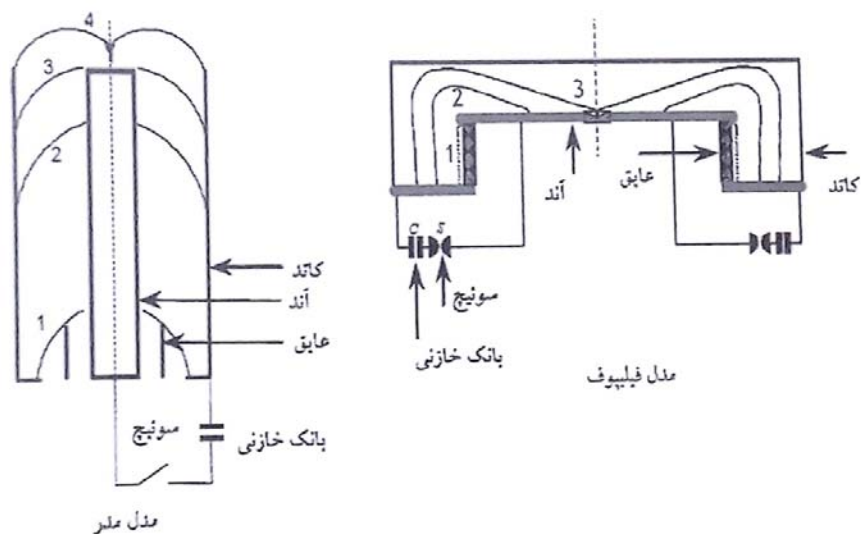
اساس کار این دستگاه در هر دو مدل یکسان می‌باشد و اختلاف اساسی در این دو مدل، ابعاد الکترودها و نسبت قطر به طول الکتروود داخلی (معمولا آند) است. در نوع فیلیپوف این نسبت بزرگ‌تر از ۵

(باقطر الکتروود داخلی ۵۰ تا ۲۰۰ سانتی متر) است و در نوع مدر این نسبت کوچک‌تر از ۰/۲۵ (با

الکتروود داخلی به قطر ۲ الی ۲۲ سانتی متر) می‌باشد. تفاوت در نسبت آند و کاتد در این دو مدل،

سبب ایجاد تفاوت در شکل لایه جریان آن‌ها می‌شود [۱۰].

شکل ۱-۲ نمایی از دستگاه پلاسمای کانونی در دو مدل مدر و فیلیپوف را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ : نمایی شماتیکی از دستگاه پلاسمای کانونی در دو نوع مدر و فیلیپوف

^{۱۷}Filippove

^{۱۸}Mather

همان طور که گفته شد، اساس کار این دستگاه در هر دو مدل یکسان است، یعنی در هر دو مدل انرژی ذخیره شده در بانک خازنی^{۱۹} توسط سوئیچ سریع به الکتروود مرکزی انتقال می‌یابد. در هر دو سیستم تخلیه‌ی الکتریکی ابتدا روی سطح خارجی عایق استوانه‌ای هم محور با الکتروود مرکزی ایجاد می‌شود و آن را فاز شکست می‌گویند (قسمت ۱ نشان داده شده در شکل ۲-۱). لایه پلاسمایی ایجاد شده در اطراف عایق به علت وجود نیروی لورنتز از موقعیت شماره ۱ به ترتیب به موقعیت‌های ۲ و ۳ نشان داده شده در همان شکل حرکت می‌کند که این مرحله را فاز محوری می‌نامند. در فاز شعاعی، لایه‌ی جریان در نهایت به محور تقارن دستگاه (موقعیت ۳ در نوع فیلیپوف و ۴ در نوع مدر) می‌رسد. به منظور بهینه کردن عملکرد دستگاه، باید ابعاد (طول و قطر الکتروودها) را طوری انتخاب کرد که در فشار بهینه، زمانی که لایه به محور تقارن دستگاه می‌رسد، جریان لایه ماکزیمم شود. در این حالت رشته‌ای از پلاسمای داغ (تنگیده) در مقابل الکتروود داخلی (معمولاً آند) شکل می‌گیرد. بعد از مدت زمان کوتاهی، در طی این فاز تابش‌هایی از قبیل اشعه ایکس نرم و سخت، نوترون‌های پر انرژی (در صورت استفاده از گاز کاری دوتریم)، الکترون‌ها و یون‌های پر انرژی و... تولید می‌شوند [۱۹-۲۰]. در هر دو مدل دستگاه پلاسمای کانونی، الکتروودهای آند و کاتد به صورت هم محور قرار گرفته‌اند و به وسیله‌ی یک عایق که اطراف الکتروود مرکزی را احاطه کرده‌است، از هم جدا می‌شوند. معمولاً الکتروود مرکزی آند و الکتروود خارجی کاتد است. الکتروود بیرونی می‌تواند به صورت ۶ تا ۲۴ عدد میله‌ی مسی که به طور متقارن در اطراف الکتروود داخلی قرار گرفته‌اند، باشد. عایق اطراف الکتروود مرکزی از جنس پیرکس یا آلومینیوم و یا سرامیک می‌باشد.

^{۱۹}Capacitor Bank

۲-۲ اصول عملکرد و دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی

دستگاه پلاسمای کانونی به طور کلی از سه بخش تشکیل شده است:

۱- بانک خازنی که منبع تامین انرژی به منظور ایجاد تخلیه الکتریکی در گاز پر شده داخل محفظه دستگاه می باشد.

۲- محفظه تخلیه الکتریکی (چمبر) که شامل دو الکتروستوانه‌ای هم محور و عایق بین آن‌هاست.

۳- اسپارک گپ^{۲۰} که کلید ولتاژ بالای سریع است که بانک خازنی را به الکترودها وصل می کند.

همان گونه که گفته شد، دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی در هردو مدل این دستگاه تقریباً یکسان است، ولی در نوع فیلپیوف یک مرحله حذف شده است. به علت آن که در این پایان نامه از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) که یک دستگاه از نوع مدر است استفاده شده، بنابراین به شرح دینامیک مربوط به دستگاه‌های نوع مدر می پردازیم.

به طور کلی دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی را می توان به سه مرحله مجزا تقسیم بندی کرد که عبارت هستند از : ۱- فاز شکست^{۲۱} ۲- فاز شتاب گیری محوری^{۲۲} ۳- فاز شعاعی^{۲۳}

^{۲۰}Espark Gap

^{۲۱}Breakdown phase

^{۲۲}Axial acceleration phase

^{۲۳}Radial phase

۲-۲-۱ فاز شکست

ابتدا فضای بین دو استوانه را تخلیه کرده و خلا نسبی در آن ایجاد می‌کنند، سپس محفظه را با گاز کاری مورد نظر و فشار معین پر می‌کنند. در این میان بانک خازنی توسط اسپارک گپ به آند و کاتد متصل می‌شود. بنابراین با عمل کردن اسپارک گپ یک اختلاف پتانسیلی بین آند و کاتد ایجاد شده و همین اختلاف پتانسیل باعث می‌شود که گاز کاری پر شده در داخل محفظه دچار یک تخلیه الکتریکی با تقارن محوری بین الکترودها و روی سطح خارجی عایق شود. این تخلیه الکتریکی را فاز شکست الکتریکی می‌نامند که باعث تشکیل پلاسمایی می‌شود که از طریق جریان تخلیه می‌تواند شارش یابد. ایجاد تخلیه الکتریکی با جریان بالا در دستگاه پلاسمای کانونی به شرایط اولیه گاز [۲۱-۲۲-۲۴]، پارامترهای هندسی الکترودها [۲۱-۲۳] و جنس و ارتفاع عایق و قطبش الکترودها [۲۱-۲۲-۲۴] وابسته است.

چگونگی تشکیل لایه‌ی جریان را می‌توان به صورت زیر شرح داد: بعد از اعمال اختلاف پتانسیل بین الکترودها، با یک تاخیر زمانی حدود چند ده نانوثانیه مرحله شکست روی سطح عایق [۲۱] مشاهده می‌شود. در این مدت الکترون‌هایی در اثر نشر میدانی از لبه‌ی فلزات و یونیزاسیون گاز اطراف ایجاد می‌شود که این الکترون‌ها در راستای خطوط میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و به سمت سطح عایق یا الکترودهای داخلی و یا الکترودهای خارجی بسته به پلاریته آن حرکت می‌کنند. در دستگاه پلاسمای کانونی معمولاً پلاریته الکترودهای داخلی مثبت است و در نتیجه الکترون‌ها به سمت الکترودهای داخلی حرکت کرده و به سطح عایق می‌چسبند و سطح عایق را دارای بار منفی می‌کنند. به علت نیروی لورنتز، لایه ایجاد شده به سمت بالا حرکت می‌کند و وقتی این لایه به انتهای عایق می‌رسد، دو الکترودها را به هم متصل می‌کند. لایه‌ی ایجاد شده از سطح عایق جدا می‌شود. بعد از گذشت زمانی حدود ۵۰ تا ۵۰۰ نانوثانیه رسانش لایه‌ی ایجاد شده به اندازه کافی زیاد می‌شود و در نتیجه تخلیه الکتریکی به لایه‌ی پلاسمایی تبدیل می‌شود. این‌جا مرحله‌ی شکست به پایان می‌رسد و ساختار

پلازما وارد مرحله‌ی جدیدی (یعنی همان فاز رانش محوری) می‌شود.

۲-۲-۲ فاز رانش محوری

در این مرحله لایه‌ی جریان به علت وجود میدان مغناطیسی و جریان ناشی از شارش و در نتیجه نیروی لورنتز به سمت باز الکتروود مرکزی حرکت می‌کند. لایه جریان شکل گرفته در انتهای فاز شکست، از طریق نیروی لورنتز $F_z = J_r \times B_\theta$ به سمت انتهای باز الکتروود داخلی شتاب می‌گیرد. مولفه شعاعی نیروی لورنتز، لایه جریان را به سمت الکتروود خارجی سوق می‌دهد. مولفه محوری این نیرو در نزدیکی آند قوی‌تر است (به دلیل وابستگی چگالی جریان و میدان مغناطیسی به عکس فاصله از محور). در نتیجه‌ی این امر، سرعت پوسته‌ی جریان در فواصل نزدیک‌تر به سطح الکتروود مرکزی بیشتر شده و این اختلاف سرعت سبب می‌شود که شکل لایه‌ی جریان به صورت سهمی درآید.

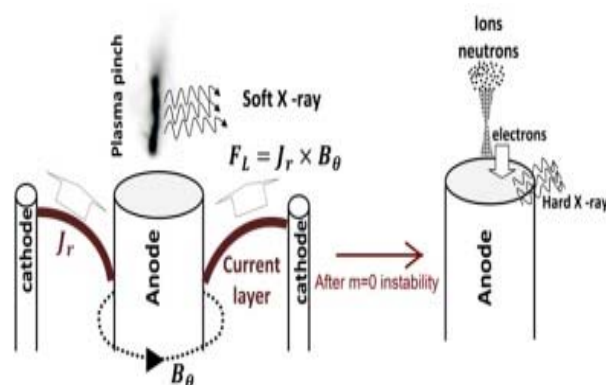
در انتهای فاز محوری، یک طرف لایه‌ی جریان (سمت درونی)، طرف باز آند را جاروب می‌کند و انتهای دیگر لایه‌ی جریان به طور پیوسته در امتداد لوله حرکت کرده و به این شکل قسمت بزرگی از پلازما روی هم انباشته می‌شود و در جهت محوری جاروب خواهد شد. تنها کسری از لایه پلازما در انتهای فاز شتاب‌گیری محوری در تنگش‌نهایی تاثیر خواهد داشت. مدت زمان این فاز حدود ۱ الی ۴ میکروثانیه است.

در نوع مدر حرکت لایه جریان از سطح عایق تا رسیدن به محور تقارن آند در طی دو مرحله انجام می‌شود.

مرحله اول: حرکت رانشی (محوری) است که در جهت محور آند (محور Z) اعمال می‌شود و با رسیدن به لبه آند خاتمه می‌یابد. در این مرحله با توجه به این که جریان شعاعی J_r و میدان مغناطیسی B_θ نیروی لورنتس $F_z = J_r \times B_\theta$ را در راستای محور تقارن ایجاد می‌کنند. لذا لایه

جریان به سمت بالا رانده می‌شود.

مرحله دوم: مرحله حرکت شعاعی می‌باشد، با فرض این که لایه جریان بین آند و کاتد در راستای محور Z حضور دارد و میدان مغناطیسی سمتی است. نیروی لورنتس $F_r = J_z \times B_\theta$ در راستای شعاعی و سمتی وارد می‌شود که باعث جمع شدن لایه جریان در راستای شعاع و به اصطلاح تنگش شعاعی می‌شود.



شکل ۲-۲: نیروی لورنتز وارد شده به ستون پلاسما و نقطه تشکیل پینچ

۲-۲-۳ فاز شعاعی

در انتهای فاز محوری، لایه‌ی جریان پلاسما انتهای الکتروود مرکزی را جاروب کرده و در نتیجه به علت نیروی لورنتز ($F_r = J_z \times B_\theta$) رو به داخل (محور الکتروودها) باعث تشکیل پلاسمای متراکم در مدت زمان ۵۰ الی ۲۰۰ نانوثانیه (بسته به مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی) می‌شود. فاز شعاعی که باعث تشکیل پلاسمایی با چگالی بالا می‌شود، به دلیل مشخصه‌هایی از قبیل گسیل اشعه ایکس، تولید ذرات باردار پر انرژی و هم‌چنین گسیل نوترون‌های پر انرژی (در صورت استفاده از گاز کاری دوتریم)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در هنگام فاز شعاعی، تغییرات اندوکتانس باعث تولید

میدان الکتریکی قوی در ستون پلاسما می‌شود. چون جریان تخلیه در این مرحله ثابت است در نتیجه میدان الکتریکی از رابطه (۱-۲) به دست می‌آید:

$$E = I \frac{dl}{dt} \quad (۱-۲)$$

که در رابطه بالا I جریان تخلیه و $\frac{dl}{dt}$ میزان تغییرات زمانی اندوکتانس را نشان می‌دهد.

فاز شعاعی را بر اساس مشاهدات تجربی به چهار گروه زیر تقسیم‌بندی کرده‌اند که عبارت هستند از:

۱- فاز تراکم^{۲۴} ۲- فاز شبه آرام^{۲۵} ۳- فاز ناپایدار^{۲۶} ۴- فاز فروپاشی^{۲۷} [۲۵]

۲-۲-۳-۱ فاز تراکم

این فاز از فروریزش ناگهانی لایه‌ی جریان با تقارن شبه استوانه‌ای (قیفی شکل) به سمت محور الکترودها به دلیل تاثیر نیروی لورنتز آغاز می‌شود. در این فاز لایه جریان به طور شعاعی آند را جاروب کرده و با تقارن سمتی در هم می‌رود و به کمینه شعاع خود می‌رسد. این حرکت انفجاری هنگامی که شعاع ستون پلاسما به کمترین مقدار خود و چگالی آن به بیشترین مقدار خود ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) برسد، پایان می‌یابد.

بازه سرعت لایه‌ی جریان در فاز فروریزش ناگهانی در محدوده ۷ الی ۶۰ سانتی متر بر میکروثانیه قرار دارد که به شرایط گاز کاری و شکل هندسی الکترودها و چگالی جریان و ساختار لایه جریان بستگی

^{۲۴}Compression phase

^{۲۵}Quiescent phase

^{۲۶}Decay phase

^{۲۷}Collaps phase

دارد [۲۶].

در پایان این مرحله، میدان مغناطیسی خیلی سریع به داخل ستون پلاسما نفوذ خواهد کرد. پخش سریع میدان به درون پلاسما، باعث تشکیل مقاومت غیرعادی قوی‌ای در پلاسما خواهد شد. هم‌چنین اندوکتانس (هنگامی که جریان از یک سیم‌پیچ عبور می‌کند، انرژی به صورت میدان مغناطیسی در آن ذخیره می‌شود. زمانی که شدت جریان تغییر می‌کند میدان مغناطیسی متغیر با زمان، یک ولتاژ را در هادی تولید می‌کند و به تبع آن یک جریان تولید می‌شود که این جریان با تغییرات جریان اصلی مخالفت می‌کند. به این خاصیت مدارها اندوکتانس یا خود القایی گفته می‌شود). پلاسما افزایش خواهد یافت [۲۷]. دمای نهایی الکترون‌ها تا حدود ۱ الی ۲ کیلو الکترون ولت افزایش خواهد یافت. اغلب از رابطه تعادلی بنت (رابطه ۲-۲)، برای تخمین دمای ناحیه تنگش استفاده می‌شود. طبق این رابطه دمای نهایی تنها به جریان I و چگالی N وابسته است.

$$T \sim \frac{I^2}{N} \quad (2-2)$$

برای به دست آوردن کمینه شعاع تنگش در این مرحله از مدل‌های کامپیوتری استفاده می‌کنند که البته با نتایج تجربی نیز سازگار است.

۲-۳-۲ فاز شبه آرام

این فاز با آغاز حرکت ستون پلاسمای متراکم شده شروع می‌شود. دمای الکترون‌ها در این فاز تا ۶۰۰ الی ۸۰۰ الکترون ولت کاهش می‌یابد. دمای یون‌ها حدود ۷۰۰ الکترون ولت برآورد شده است [۲۸]. هم‌چنین چگالی پلاسما تا حدود 10^{18} cm^{-3} کاهش پیدا می‌کند [۲۸]. در طی این فاز ستون پلاسما در جهت محوری بدون هیچ گونه مانعی و به صورت فواره‌وار گسترش می‌یابد.

تغییر شدید در اندوکتانس پلاسما که در فاز فشرده‌سازی آغاز شد، باعث القای میدانی الکتریکی در ستون پلاسما می‌شود. این میدان الکتریکی باعث شتاب گرفتن الکترون‌ها و یون‌ها در دو جهت مخالف هم می‌شود. سرعت سوقی نسبی بین الکترون‌ها و یون‌ها افزایش می‌یابد و به طور تقریبی با سرعت حرارتی الکترون‌ها برابر می‌شود. این موضوع شرطی برای شروع ناپایداری‌های ریز از قبیل سیکلوترونی الکترون و شکل‌های مختلفی از ناپایداری باریکه-پلاسما است. در انتهای فاز آرام، ناپایداری سوسیسی به علت افزایش ناگهانی دمای الکترون‌ها آغاز می‌شود. ستون پلاسما دوباره متراکم خواهد شد و این متراکم شدگی به علت حضور ناپایداری‌ها است. با استفاده از این نتیجه می‌توان مدت زمان تنگش پلاسما t_p را به عنوان زمان بین اولین تراکم و زمان آغاز ناپایداری تعریف کرد [۲۹]. ارتفاع و شعاع پلاسمای تنگیده (پینچ) به شعاع الکتروود مرکزی (آند) وابسته است [۳۰-۳۱].

۲-۳-۳ فاز ناپایدار

این فاز به دلیل مکانیزم‌هایی مانند تولید اشعه ایکس سخت و نرم، یون‌ها و الکترون‌های سریع و هم-چنین گسیل نوترون‌ها و دوترون‌ها در واکنش $D-D$ ، به عنوان مهم‌ترین مرحله از عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی به شمار می‌رود. به دلیل رشد ناپایداری‌ها میدانی الکتریکی القایی افزایش می‌یابد. این میدان الکترون‌ها و یون‌ها را وادار می‌کند که در خلاف جهت هم شتاب بگیرند. در این شتاب‌گیری الکترون‌ها به سمت الکتروود مرکزی (آند) و یون‌ها به سمت کاتدها حرکت می‌کنند [۳۲]. چگالی پلاسما در ناحیه‌ی تنگش دوباره تا 10^{19} cm^{-3} افزایش می‌یابد. مقدار زیادی ناخالصی در اثر بمباران الکترون‌های گسیل یافته به سمت آند وارد محیط پلاسما می‌شود. از هم گسیختگی پلاسما تا زمانی که کل ستون پلاسما از بین برود، ادامه می‌یابد.

۲-۳-۴ فاز واپاشی

آخرین مرحله از فاز شعاعی یا به عبارتی آخرین مرحله از دینامیک پلاسمای کانونی فاز واپاشی می-باشد. در هنگام تنگش وقتی که چگالی پلازما به کمتر از $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ رسید این فاز شروع می-شود.

در طی فاز واپاشی ابر پلاسمایی نازک و داغ و بزرگ به دلیل از بین رفتن ستون پلازما تشکیل می-شود. این ابر مقدار زیادی اشعه ایکس نرم در اثر فرآیند تابش ترمزی گسیل می-کند. اشعه ایکس نرم خیلی سریع در طول این فاز گسیل می-شود.

۲-۳ کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی

همانطور که قبلاً اشاره شد، دستگاه پلاسمای کانونی یک منبع خوب و مناسب برای نوترون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های پر انرژی می‌باشد. و همچنین این دستگاه به عنوان یک منبع قوی برای تولید اشعه ایکس سخت و نرم کاربرد دارد. به واسطه ویژگی‌های خاص پرتوهای گسیل شده، این دستگاه کاربرد وسیعی در فیزیک بنیادی و فیزیک کاربردی دارد. همچنین دستگاه پلاسمای کانونی ابزار مناسبی برای آموزش و انجام مطالعات در زمینه‌های مختلف به ویژه پلازما، اسپکتروسکوپی، الکترومغناطیس، فیزیک هسته‌ای و فیزیک اتمی می‌باشد و مراحل مختلف شکل‌گیری پلازما و پینچ‌شدگی آن و همچنین انواع تابش‌های آن مورد بررسی و تحقیق پژوهشگران قرار گرفته است.

بنابراین از این دستگاه در زمینه‌های مختلفی همچون آموزشی، صنعتی و کاربردی می‌توان استفاده کرد. در ادامه به چند مورد از کاربردهای این دستگاه در زمینه‌های مختلف اشاره خواهیم کرد.

کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه نوترون: همانطور که گفته شد، در صورت استفاده از گاز کاری دوتریم، یکی از خروجی‌های دستگاه پلاسمای کانونی نوترون خواهد بود. از موارد استفاده

از این نوترون‌های آزاد شده توسط دستگاه می‌توان به فعال‌سازی نوترونی در آنالیز مواد و همچنین تولید رادیو ایزوتوپ‌ها اشاره کرد [۲۵].

کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه الکترونی: الکترون‌های پر انرژی یکی دیگر از خروجی‌های دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد. این الکترون‌های پر انرژی تولید شده در لیتوگرافی استفاده می‌شوند [۳۴]. از این الکترون‌ها همچنین در لایه نشانی [۳۵] و پردازش سطوح مواد [۳۶] استفاده می‌شود.

کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه یونی: یون‌ها یا به عبارتی پروتون‌هایی که از دستگاه پلاسمای کانونی خارج می‌شوند، دارای انرژی بیشتر از 3 MeV هستند با این انرژی در شمار یون‌های پر انرژی قرار می‌گیرند [۳۷]. بنابراین دستگاه پلاسمای کانونی را همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، می‌توان بعنوان یک منبع قوی برای یون‌های پر انرژی به شمار آورد. از این یون‌ها برای تهیه فیلم‌های نازک بر روی زیر لایه‌ها، آمورفیزه کردن کریستال سیلیکون و همچنین برای کاشت یونی استفاده می‌شود. در سالهای اخیر، از یون‌های تولید شده توسط این دستگاه به منظور پردازش مواد استفاده شده است [۳۸-۳۹].

کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان چشمه اشعه ایکس: از دیگر کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی، استفاده از اشعه ایکس گسیل شده از آن می‌باشد. از اشعه ایکس خروجی از این دستگاه برای میکرولیتوگرافی [۴۰]، رادیوگرافی نمونه‌های زیستی [۴۱] و میکرو ماشین‌های صنعتی استفاده می‌شود. همچنین به دلیل این‌که اشعه ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی به صورت پالسی می‌باشد، لذا از این دستگاه می‌توان برای عیب شناسی اجسام سریع^{۲۸} نیز استفاده نمود [۴۲].

^{۲۸}Defectoscopy

۲-۴ فرایندهای گسیل

فرایندهایی که طی آن‌ها پلاسما گسیل پیوسته دارد عبارت هستند از فرایند تابش ترمزی و فرایند باز ترکیب که در ادامه به توضیح هریک از این فرایندها خواهیم پرداخت. اگر الکترون‌های مقیدی انرژی خود را در اثر گذار از تراز بالا به تراز پایین از دست بدهند، در این صورت تابش به صورت خطی یا گسسته خواهد بود. برای پلاسماهایی که از موادی با عدد اتمی بالا تشکیل شده‌اند، تابش‌های پیوسته غالب هستند. در حالی که برای پلاسماهایی که از موادی با عدد اتمی پایین تشکیل شده‌اند تابش‌های گسسته یا خطی غالب هستند. بنابراین شدت‌های نسبی گسیل‌های پیوسته و گسسته به چگونگی تشکیل پلاسما بستگی دارد.

۲-۴-۱ تابش ترمزی

دمای پلاسما در اثر از دست دادن انرژی کاهش پیدا می‌کند، قسمت اعظم انرژی از دست رفته از طریق تابش ترمزی است. الکترون‌ها به عنوان بخشی از پلاسما سرعت‌های حرارتی بالایی دارند که در صورت برخورد با یون‌ها (هسته‌ها) فوراً شتاب گرفته و امواج الکترومغناطیس تابش می‌کنند. به این امواج تابش یافته، تابش ترمزی و یا تابش آزاد-آزاد می‌گویند [۴۰].

نظریه پیش‌بینی می‌کند که یک بار شتاب‌دار با شدتی متناسب با مربع شتابش انرژی تابش می‌کند. اگر ذره بارداری با بار ze و جرم M را در نظر بگیریم که در ماده‌ای با عدد اتمی Z حرکت می‌کند. نیروی کولنی بین این ذره و یک هسته از ماده $F \sim zeZe/r^2$ است که در آن r فاصله بین دو بار است. شتاب ذره‌ی باردار فرودی عبارت است از $a = F/M \sim zZe^2/M^2$. بنابراین شدت تابش گسیل

شده عبارت خواهد بود از:

$$I \propto a^2 \sim \left(\frac{zZe^2}{M}\right)^2 \sim \frac{z^2 Z^2}{M^2} \quad (۳-۲)$$

این رابطه نشان می‌دهد که:

- ۱- برای دو ذره که در یک محیط حرکت می‌کنند، ذره‌ی سبک‌تر مقدار بیشتری تابش ترمزی نسبت به ذره‌ی سنگین‌تر گسیل می‌کند. البته این در صورتی است که کمیت‌های دیگر برابر باشند.
- ۲- اگر ذره در محیطی با عدد اتمی بالا حرکت کند، نسبت به زمانی که در محیطی با عدد اتمی پایین حرکت می‌کند، تابش ترمزی بیشتری گسیل می‌شود [۹].

۲-۴-۲ تابش باز ترکیبی

یک الکترون آزاد می‌تواند توسط تراز مقید یونی جذب شود. در نتیجه باعث کاهش بار یون به اندازه‌ی واحد می‌گردد. انرژی اضافی الکترون ممکن است به صورت فوتون‌هایی گسیل می‌شود که آن را تابش مقید-آزاد یا تابش باز ترکیبی می‌نامیم. طیف تابشی گذار مقید-آزاد به صورت پیوسته می‌باشد. شکل خطوط طیف به توزیع الکترون‌های آزاد و همچنین سطح مقطع جمع آوری به درون تراز مقید، وابسته است [۲۵].

۲-۴-۳ تابش مقید-مقید

هنگامی که یک الکترون در اتم گذاری از تراز با انرژی بالاتر به تراز با انرژی پایین‌تر انجام دهد، در این صورت یک فوتون گسیل می‌شود. تابش‌های ایجاد شده ممکن است با دیگر مولفه‌های پلاسما برهمکنش کرده و یا ممکن است دوباره جذب و یا نشر شود. این موضوع باعث تغییر یافتن شکل خطوط طیفی هم می‌شود. بدین ترتیب با استفاده از نمای این خطوط می‌توان اطلاعات زیادی در مورد پلاسما به دست آورد. در درماهای خیلی بالا مواد به طور کامل یونیده می‌شوند و در نتیجه تابش مقید-مقید کمتر اتفاق می‌افتد [۲۵].

۲-۵ برهمکنش‌های پرتوهای گاما و ایکس با ماده

پرتوهای ایکس یا پرتوهای گاما تابش الکترومغناطیسی هستند. اگر آن‌ها را به صورت ذره در نظر بگیریم، وقتی با سرعت C حرکت می‌کنند، جرم سکون و بار آن‌ها صفر است. نام مشترک برای پرتوهای گاما و پرتوهای ایکس وقتی که به صورت ذره در نظر گرفته می‌شوند، فوتون است. در واقع تمایز روشنی بین پرتوهای ایکس و پرتوهای گاما وجود ندارد. معمولاً فوتون‌های با $E < 1\text{MeV}$ را پرتو ایکس و فوتون‌های با $E \geq 1\text{MeV}$ پرتو گاما می‌نامند.

تولید پرتوهای ایکس عموماً در اثر گذارهای اتمی مثل برانگیزش و یونش صورت می‌گیرد. پرتوهای گاما در گذارهای هسته‌ای گسیل می‌شوند. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، فوتون‌ها از تابش ترمزی و ذرات باردار با شتاب مثبت یا منفی نیز تولید می‌شوند که این فوتون‌ها دارای طیف انرژی پیوسته هستند. در حالی که پرتوهای ایکس یا گامایی که از هسته‌ها یا اتم‌ها گسیل می‌شوند، تک انرژی می‌باشند.

۲-۵-۱ اثر فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک برهمکنشی بین یک فوتون و یک الکترون اتمی مقید می‌باشد. که در اثر این برهمکنش، فوتون ناپدید شده و یکی از الکترون‌های اتمی به صورت یک الکترون آزاد به نام فوتوالکترون به بیرون رانده خواهد شد. انرژی جنبشی این الکترون از طریق رابطه (۲-۴) به دست می‌آید:

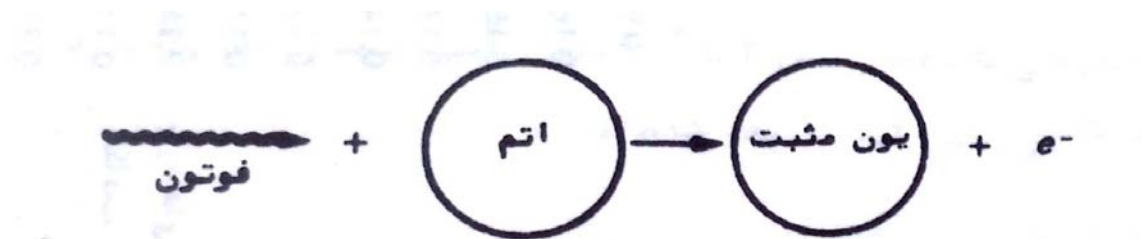
$$T = E_{\gamma} - BE \quad (2-4)$$

که در رابطه بالا E_{γ} انرژی فوتون و BE انرژی بستگی الکترون می‌باشد.

احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک را سطح مقطع فوتوالکتریک یا ضریب فوتوالکتریک می‌نامند. که به طور تقریبی از رابطه (۲-۵) به دست می‌آید:

$$\tau(m^{-1}) \propto aN \frac{Z^n}{E_\gamma^m} \quad (5-2)$$

که در این رابطه τ احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک بر واحد راهی که فوتون پیموده a یک ضریب ثابت مستقل از Z و E_γ و N چگالی اتمی در واحد حجم ماده می باشد. همان گونه که از رابطه (5-2) پیداست، اثر فوتوالکتریک با عدد اتمی (Z) رابطه مستقیم دارد. بنابراین این پدیده برای موادی با عدد اتمی بالاتر، محتمل تر خواهد بود.



شکل ۲-۳: اثر فوتوالکتریک

۲-۵-۲ اثر کامپتون

اثر کامپتون در واقع برخوردی بین یک فوتون و یک الکترون آزاد است. البته در شرایط متعارفی، تمام الکترون های موجود در یک محیط آزاد نیستند. با این حال اگر انرژی فوتون از مرتبه keV یا بیشتر باشد، در حالی که انرژی بستگی الکترون از مرتبه eV است، الکترون را می توان آزاد انگاشت.

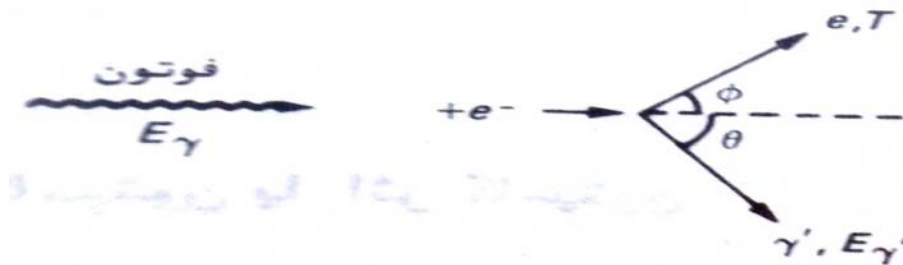
پس از یک پراکندگی کامپتون، فوتون ناپدید نمی شود. فقط راستای حرکت و انرژی آن تغییر می کند. در واقع انرژی فوتون به مقدار معینی کاهش می یابد و همین مقدار انرژی به الکترون منتقل می شود. بنابراین از پایستگی انرژی و با فرض این که الکترون پیش از برخورد ساکن است خواهیم داشت:

$$T = E_\gamma - E_{\gamma'} \quad (6-2)$$

با استفاده از تعدادی فرمول ساده که در این قسمت مدنظر ما نیست، می‌توان نشان داد که انرژی کمینه‌ی فوتون پراکنده بزرگتر از صفر است. بنابراین در اثر کامپتون غیر ممکن است که تمامی انرژی فرودی به الکترون داده شود. انرژی داده شده به الکترون در فاصله‌ای برابر با برد الکترون در داخل ماده از دست می‌رود. فوتون پراکنده نیز ممکن است فرار کرده و به سرعت از ماده دور شود. احتمال رخداد پراکندگی کامپتون را اصطلاحاً ضریب کامپتون یا سطح مقطع کامپتون می‌نامند. این ضریب را می‌توان از رابطه (۷-۲) به دست آورد:

$$\sigma(m^{-1}) = NZf(E_{\gamma}) \quad (7-2)$$

که در رابطه (۷-۲)، σ احتمال رخداد برهمکنش کامپتونی بر واحد راه پیموده و $f(E_{\gamma})$ تابعی پیچیده از انرژی فوتون است.



شکل ۲-۴: اثر کامپتون

۲-۵-۳ تولید زوج

تولید زوج برهمکنشی بین یک فوتون و یک هسته می‌باشد. بر اثر این برهمکنش، فوتون ناپدید شده و یک زوج الکترون-پوزیترون به وجود می‌آید. هرچند که بر اثر این برهمکنش هسته دستخوش هیچ تغییری نمی‌شود ولی حضور آن برای وقوع تولید زوج ضروری است. زیرا در فضای تهی با ناپدید شدن یک پرتو گاما یک زوج الکترون-پوزیترون تولید نخواهد شد. پایستگی انرژی معادله (۸-۲) را برای

انرژی جنبشی الکترون و پوزیترون می‌دهد:

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_\gamma - (mc^2)_{e^-} - (mc^2)_{e^+} = E_\gamma - 1.022 \text{ MeV} \quad (۸-۲)$$

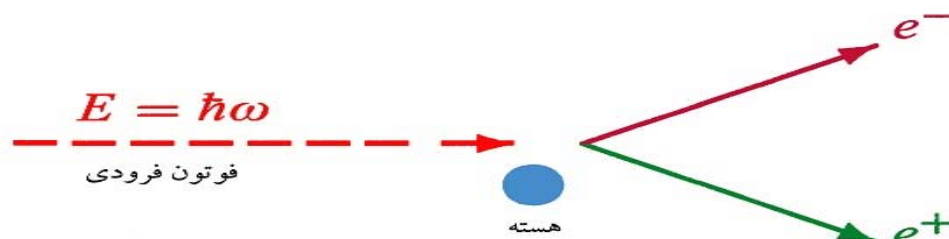
انرژی جنبشی حاصل برابر با انرژی فوتون منهای 1.022 MeV است که این انرژی برای تولید دو جرم سکون مورد نیاز است. برای تمام منظوره‌های علمی، الکترون و پوزیترون انرژی جنبشی حاصل را به تساوی بین خود تقسیم می‌کنند:

$$T_{e^-} = T_{e^+} = \frac{1}{2}(E_\gamma - 1.022 \text{ MeV}) \quad (۹-۲)$$

احتمال رخداد پدیده تولید زوج، به نام ضریب تولید زوج یا سطح مقطع تولید زوج، تابع پیچیده‌ای از انرژی فوتون فرودی و عدد اتمی هسته است [۹]. این احتمال را می‌توان از طریق رابطه $(۱۰-۲)$ به دست آورد:

$$k(m^{-1}) = NZ^2 f(E_\gamma, Z) \quad (۱۰-۲)$$

k در رابطه فوق احتمال رخداد تولید زوج بر واحد راه پیموده را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲: تولید زوج

۲-۶ ضریب تضعیف کل

هنگامی که یک فوتون در داخل ماده حرکت می‌کند، ممکن است از طریق هریک از سه برهمکنش عمده‌ای که در بخش قبل توضیح داده شد، برهمکنش نماید. برهمکنش‌های دیگری هم وجود دارند که به آن‌ها اشاره‌ای نمی‌کنیم زیرا در آشکارسازی پرتوهای گاما دارای اهمیت نیستند. اهمیت نسبی

سه برهمکنش یاد شده زمانی تعیین می شود که E_γ و z تغییر می کند [۹].

احتمال کل برهمکنش μ که اصطلاحاً ضریب تضعیف خطی کل نامیده می شود، برابر با حاصل جمع

سه احتمال است:

$$\mu(m^{-1}) = \tau + \sigma + k \quad (۱۱-۲)$$

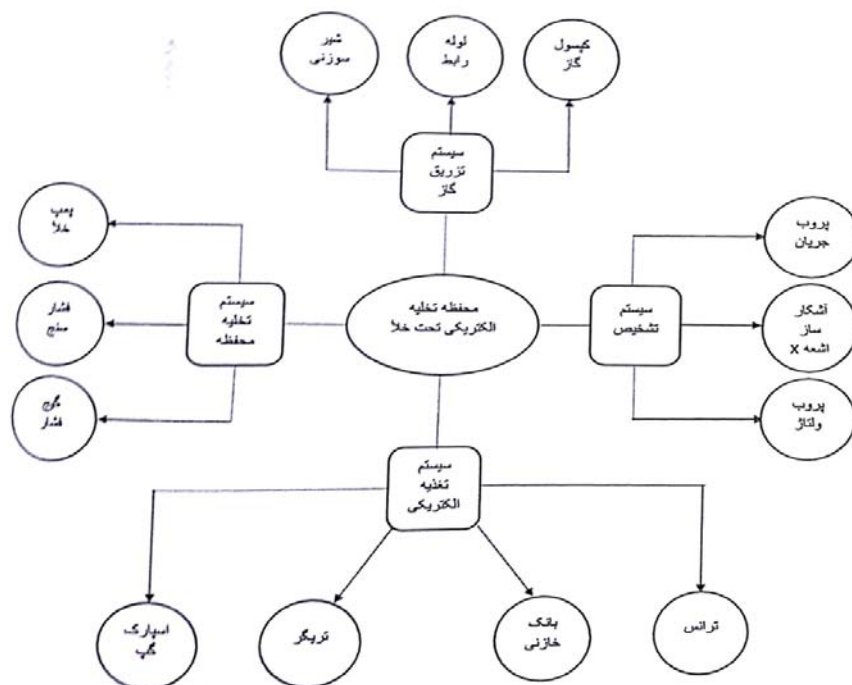
فصل ۳: تجهیزات آزمایش و تکنیک های اندازه گیری

۳-۱ مقدمه

در روند انجام این پایان‌نامه، برای بررسی دز اشعه ایکس ساطع شده از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) که یک نمونه دستگاه پلاسمای کانونی از نوع مدر است، از دزیترهای ترمولومینسانس استفاده شده است. از آنجایی که شناخت دقیق ابزار کار و مواد و پارامترهای مورد استفاده در یک پژوهش مسئله مهمی است، در این فصل به بررسی جزئیات دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود، آشکارسازهای مورد استفاده و همچنین دستگاه قرائت‌گر این آشکارسازها می‌پردازیم.

۳-۲ توصیف ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود

ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود شامل هفت بخش اساسی می‌باشد که در شکل ۳-۱ به صورت شماتیک‌وار به تصویر کشیده شده است. البته ذکر این نکته ضروری است که سیستم تشخیصی این دستگاه با توجه به هدف آزمایش تعیین خواهد شد.



شکل ۳-۱: ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود

۳-۳ مشخصات کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود

دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود، یک دستگاه پلاسمای با انرژی پایین و از نوع مدر است. این دستگاه دارای خازنی به ظرفیت $C_0 = 16\mu F$ و اندوکتانس $L_0 = 200nH$ با ماکزیمم ولتاژ $V_0 = 12kV$ می‌باشد. ماکزیمم انرژی ذخیره شده در بانک خازنی این دستگاه طبق رابطه $E = \frac{1}{2}CV^2$ برابر با $1.15kJ$ برآورد می‌شود. شعاع آند برابر با $10mm$ و طول آن $60mm$ و شعاع کاتدها $5mm$ و طول آن‌ها $60mm$ می‌باشد. ضخامت عایق مورد استفاده در این دستگاه $2mm$ و طول آن $40mm$ بوده و امپدانس دستگاه طبق رابطه $Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 0.111$ محاسبه می‌شود.

۳-۳-۱ محفظه تخلیه الکتریکی و خلا

محفظة تخلیه الکتریکی، یکی از مهم‌ترین اجزای دستگاه PF است که طی انجام فرآیند تخلیه الکتریکی در این محفظه، پلاسمای داغ و چگال در داخل محفظه و بالای آند دستگاه تشکیل می‌شود. این محفظه یک استوانه از جنس استیل ضد زنگ به ارتفاع $250mm$ ، قطر $160mm$ و ضخامت $4mm$ می‌باشد که دورتادور الکترودها را پوشش می‌دهد. محفظه خلا دارای چهار بازو است که دو به دو و به طور متقارن روبروی هم قرار گرفته‌اند. از دو بازوی مقابل هم، جهت سایه نگاری لیزری و از دو بازوی دیگر جهت اندازه‌گیری انرژی اشعه ایکس و همچنین برای اندازه‌گیری و آشکارسازی تمام محصولات خروجی از دستگاه استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۳-۲ مشخص است در قسمت بالایی استوانه مرکزی، دو دهانه باریک به شکل استوانه وجود دارد که از یکی جهت تخلیه گاز و از دیگری جهت تزریق گاز استفاده می‌شود. فشار داخل محفظه توسط یک فشارسنج پیرانی اندازه گرفته می‌شود.



شکل ۳-۲ : محفظه تخلیه الکتریکی و خلا

همان‌گونه که در شکل ۳-۳ مشخص است، الکترودها بر روی یک صفحه پایه قرار می‌گیرند. در قسمت مرکزی، آند از جنس مس قرار دارد که می‌توان آن را با آندی دیگر از جنس‌های مختلف جایگزین کرد. در اطراف آند، یک عایق باطول و ضخامت ذکر شده قرار گرفته که طول و جنس آن قابلیت تعویض دارد. دورتادور آند و به فاصله 3cm شش عدد کاتد از جنس برنج، دو به دو روبروی هم قرار گرفته‌اند. این کاتدها روی یک صفحه دایره‌ای شکل از جنس برنج ثابت شده‌اند که این صفحه برنجی بر روی صفحه پایه قرار دارد. قسمت پایینی محفظه خلا به طور متقارن از طریق ۱۲ کابل هم-محور به قطب منفی خازن (زمین) وصل شده است و به عبارتی بدنه محفظه خلا به زمین متصل است. از این رو صفحه برنجی که کاتدها روی آن ثابت شده‌اند، به زمین متصل بوده و دارای بار منفی می‌باشد و از این جهت می‌تواند نقش کاتد را ایفا کند.



شکل ۳-۳: نمایی از آند، کاتد، عایق و صفحه پایه دستگاه

قسمت پایینی آند، در خارج از محفظه خلا قرار دارد که توسط پلاستیک‌هایی عایق‌بندی شده و با ۱۲ عدد کابل به اسپارک گپ متصل است.

۳-۳-۲ سیستم تخلیه و تزریق گاز و فشارسنجی

برای دست یافتن به پینچ مطلوب در دستگاه پلاسمای کانونی، نیاز به ایجاد یک خلا اولیه می‌باشد. دستگاه پلاسمای کانونی در فشارهای پایین (حدوداً چند تور) کار می‌کند و برای دستیابی به این محدوده فشار، از یک پمپ روتاری (چرخشی) دو مرحله‌ای مدل $VE\ 280N$ استفاده می‌شود. محفظه خلا توسط این پمپ تخلیه می‌شود تا به فشار مطلوب برسد. پمپ روتاری استفاده شده در این دستگاه، توسط برق شهر تغذیه می‌شود و آهنگ تخلیه‌ای حدود $226 \frac{L}{min}$ دارد که با این نرخ تخلیه می‌توان به خلایی در محدوده $10^{-3} Torr$ دست یافت. در شکل ۳-۴، نمایی از پمپ روتاری به کار رفته در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: نمایی از پمپ روتاری دو مرحله‌ای مدل VE 280N

همان‌گونه که در قسمت قبل اشاره شد، فشار داخل محفظه را می‌توان توسط یک فشارسنج پیرانی اندازه‌گیری کرد. فشار اندازه‌گیری شده توسط این فشارسنج، بر روی یک نمایشگر دیجیتالی قابل رویت است. در شکل ۳-۵ نمایی از این فشارسنج و نمایشگر دیجیتالی نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۵: گیج فشارسنج پیرانی و نمایشگر دیجیتال

سیستم تزریق گاز به داخل محفظه خلا، مجموعه‌ای از یک کپسول گاز، یک شیر فشارشکن و یک شیر سوزنی مدل swage lock می‌باشد. برای کنترل مقدار گاز ورودی به داخل محفظه از این شیر سوزنی استفاده می‌شود. شیر سوزنی از یک طرف به محفظه خلا و از طرف دیگر به وسیله لوله نازک مسی به ریگلاتور سر کپسول گاز متصل است. گاز مورد استفاده پس از عبور از تنظیم کننده فشار، به داخل لوله نازک مسی هدایت می‌شود و توسط آن مقدار گاز تزریق شده به سیستم کنترل می‌شود. در این پژوهش از گاز کاری نیتروژن با خلوص ۹۹۹/۹۹۵٪ استفاده شده‌است. البته در دستگاه پلاسمای کانونی می‌توان از گازهای دیگری نظیر، آرگون، نئون، دوتریم و... استفاده کرد.



شکل ۳-۶: گاز نیتروژن و گاز آرگون

۳-۳-۳ سیستم تغذیه الکتریکی

انرژی الکتریکی مورد نیاز برای عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی، از طریق این سیستم تامین می‌شود. در این روند بانک خازنی شارژ شده و این انرژی از طریق اسپارک گپ به محفظه تخلیه منتقل می‌شود و از این طریق ولتاژهای مورد نظر میان کاتد و آند اعمال می‌شود. در ادامه به معرفی قسمت‌های مختلف این سیستم خواهیم پرداخت.

۱-۳-۳-۳ سیستم شارژ خان

سیستم شارژ خازن دستگاه پلاسمای کانونی شامل یک سیم پیچ ولتاژ بالا و یکسوکننده‌هایی است که برق متناوب ۲۲۰ ولت شهری را به برق مستقیم ۱۲ کیلو ولت تبدیل می‌کنند. البته قابل ذکر است که ولتاژ خروجی قابل تغییر می‌باشد. ترانسی که در این دستگاه استفاده می‌شود، همواره در دراخل روغن مخصوص ولتاژ بالا نگهداری می‌شود.



شکل ۳-۷: سیستم شارژ خازن دستگاه

۲-۳-۳-۳ بانک خازنی

همان‌گونه که در ابتدای این فصل گفته شد، خازن دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود، خازنی با ولتاژ بالا با ظرفیت $16\mu F$ می‌باشد. ماکزیمم ولتاژ اعمالی برای این خازن $12kV$ بوده و با توجه به رابطه $E = \frac{1}{2}CV^2$ ، انرژی مربوط به این دستگاه $1.15kJ$ برآورد می‌شود. در این رابطه C ظرفیت خازن و V اختلاف پتانسیل دو سر خازن است.

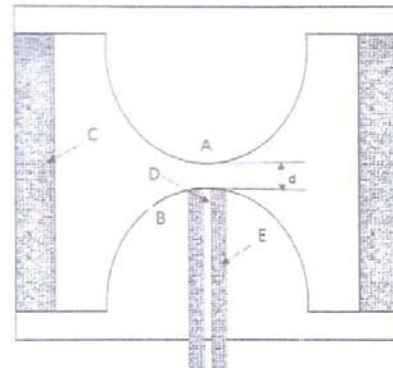


شکل ۳-۸ : نمایی از بانک خازنی دستگاه

۳-۳-۳-۳ اسپارک گپ (گاف جرقه)

از اسپارک گپ (سوییچ سریع) برای انتقال سریع انرژی ذخیره شده در بانک خازنی، در یک لحظه به دو سر کاتد و آند استفاده می‌شود. سیستم اسپارک گپ از دو صفحه موازی جهت انتقال جریان بالا با اندوکتانس پایین تشکیل شده است. این کلید توانایی تحمل ولتاژهای بالا و قدرت انتقال جریان تا چند صد کیلو آمپر را دارد. با یونیزه شدن هوای موجود در بین دو صفحه، جریان اعمالی در داخل اسپارک گپ برقرار می‌شود. اسپارک گپ استفاده شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود از نوع تریگاترون می‌باشد. این نوع اسپارک گپ متشکل از دو الکترود A و B بوده که در فاصله d نسبت به هم قرار گرفته‌اند. این الکترودها یا بدون محافظ هستند و یا اینکه توسط پوشش C که عموماً از جنس یک ماده عایق مانند تفلون می‌باشد، در یک محفظه بسته نگه داشته می‌شوند. الکترود سوم D، تریگر است. نقش آن ایجاد شکست در هوای بین الکترودها و شروع تخلیه بوده و محل قرار گرفتن آن به طراحی اسپارک گپ بستگی دارد. ولتاژ لازم به وسیله سیستم تریگر، به الکترود D منتقل می‌شود. بنابراین فاصله d باید به گونه‌ای انتخاب شود که قبل از رسیدن شارژ خازن به ولتاژ مورد نظر، عمل

تخلیه الکتریکی و شکست رخ ندهد. در واقع لازم است که این فاصله طوری باشد که عمل تخلیه الکتریکی به صورت کاملاً کنترل شده آغاز شود. در ساختار اسپارک گپ تریگاترون، الکتروود تریگر در داخل یکی از الکتروودها قرار می‌گیرد و به وسیله عایق E از آن الکتروود جدا می‌شود. نمایی از ساختار اسپارک گپ به کار رفته در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود در شکل ۳-۹ نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۹: اسپارک گپ

۳-۳-۴ تریگر

برای آن که جریان با ولتاژ بالا از یک قطب اسپارک گپ به قطب دیگر آن منتقل شود، از سیستم تریگر استفاده می‌شود. با استفاده از تریگر یک پالس منفی (حدود $40kV$) به الکتروود میانی (D) اسپارک گپ اعمال می‌شود. تریگر به دو روش دستی و اتوماتیک کار می‌کند. از آن جایی که خازن بعد از مدتی باید شارژ و دشارژ شود، و از طرفی باید بین هر دو تخلیه الکتریکی زمانی را برای تخلیه دستگاه در نظر بگیریم، از این رو بهتر است که برای تریگ کردن از مد دستی استفاده شود.

۳-۳-۵ اتصال به زمین

در واقع سیستم اتصال به زمین، پس از عمل تریگ و تخلیه الکتریکی، دو سر خازن را به هم متصل می‌کند و باقیمانده انرژی ذخیره شده در خازن را تخلیه می‌کند و بعد از آن خازن به طور کامل تخلیه

می‌شود. این سیستم از یک آهنربا تشکیل شده به طوری که با اتصال کلید مربوطه، اهرم مربوط به اتصال زمین از مکان اولیه‌اش جدا شده و بالا می‌رود یا بعبارتی با اعمال ولتاژ دو سر خازن را از هم جدا می‌کند. در هنگام شارژ کردن خازن لازم است که این سیستم روشن باشد تا خازن با اعمال ولتاژ شارژ شود و پس از عمل تریگ و دشارژ خازن، باید بلافاصله این سیستم خاموش شود تا باقیمانده انرژی ذخیره شده در خازن تخلیه شود. در غیر این صورت خازن دچار آسیب می‌گردد.



شکل ۳-۱۰ : سیستم اتصال به زمین

۳-۳-۴ سیستم تشخیصی

به منظور آشکارسازی تابش‌های حاصل از ذرات و امواج الکترومغناطیسی و همچنین برای اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی، می‌توان از این سیستم نمود. سیستم تشخیصی شامل قسمت‌های مختلفی است که در ادامه به معرفی این قسمت‌ها خواهیم پرداخت.

به طور کلی سیستم تشخیصی به کار رفته در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود شامل چهار قسمت است که عبارت هستند از: ۱- پیچ رگوفسکی. ۲- پروب ولتاژ. ۳- آشکارساز مورد استفاده. ۴- سیستم داده‌گیری.

۳-۴-۱ سیستم داده گیری

از طریق یک اسیلسکوپ چهار کاناله 200MHZ، جریان و مشتق جریان قابل نمایش است. همچنین می توان این سیگنال ها را توسط کابل USB ذخیره نمود. اسیلسکوپ در واقع یک دستگاه در تجهیزات آزمایشگاهی است که امکان مشاهده ولتاژ را فراهم می کند. در شکل ۳-۱۱ انمایی از اسیلسکوپ استفاده شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱: اسیلسکوپ مدل GPS-1204C

۳-۴-۲ پیچه رگوفسکی

پیچه رگوفسکی یکی از ابزارهای اندازه گیری جریان است و بر مبنای قانون آمپر عمل می کند. این پیچه به صورت یک سیم پیچ چمبره ای می باشد که دارای یک سطح مقطع دایره ای شکل است. از این پیچه جهت اندازه گیری جریان انتقال یافته به ستون پلاسمای و نیز به منظور اندازه گیری مستقل جریان الکتریکی استفاده می شود. همان طور که گفته شد، پیچه رگوفسکی یک سیم پیچ چمبره ای است که به شکل یک حلقه در می آید و سیم برگشتی از مرکز آن عبور می کند. جریان عبوری از سیم برگشتی که در مرکز سیم پیچ قرار گرفته، باعث از بین رفتن نویز ایجاد شده می شود و همچنین تغییرات جریان را اندازه گیری می کند. پیچه رگوفسکی که در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود استفاده شده، دارای قطر اصلی 16cm و قطر فرعی 1cm می باشد. قطر سیم استفاده شده در این پیچه، 1.5mm و تعداد

دوره‌های 280 می‌باشد. در این حالت ضریب کالیبراسیون ولتاژ نشان داده شده در اسیلسکوپ

$$U = \frac{1}{4} \frac{V}{kA} \text{ است. به عبارتی، ماکزیمم دامنه خروجی در اسیلسکوپ را باید در عدد 0.25 ضرب کرد}$$

تا جریان عبوری از پلاسما بر حسب کیلوآمپر حاصل شود.

طریقه عملکرد پیچه رگوفسکی را بر اساس قانون آمپر به صورت زیر می‌باشد:

$$\Phi = NBA \quad (۱-۳)$$

$$V_0 = \frac{-d\Phi}{dt} \quad (۲-۳)$$

از ترکیب دو رابطه بالا داریم:

$$V_0 = \frac{-\mu_0 NA}{2\pi r} \frac{dI}{dt} \quad (۳-۳)$$

با توجه به رابطه فوق، ولتاژ القا شده متناسب با تغییرات جریان بر حسب زمان می‌باشد. بنابراین مقدار

کل جریان تخلیه را می‌توان از اندازه‌گیری و سپس انتگرال گیری ولتاژ خروجی به دست آورد.

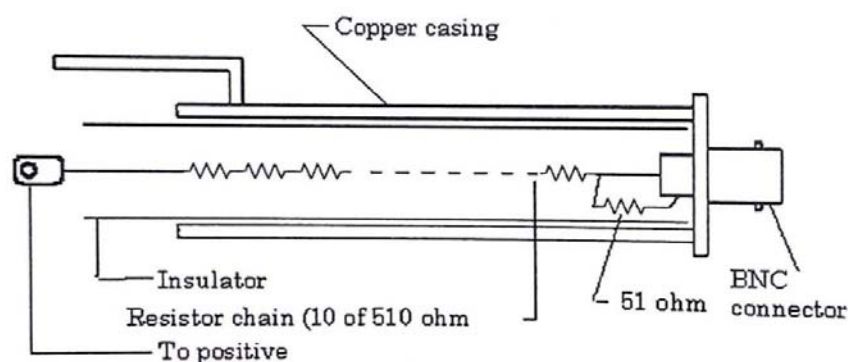
سیگنالی که بر روی صفحه اسیلسکوپ نمایش داده می‌شود.



شکل ۳-۱۲: نمایی از پیچه رگوفسکی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود

۳-۴-۳-۳ پروب ولتاژ

مقدار اختلاف پتانسیل بین دو قسمت ولتاژ بالای دستگاه پلاسمای کانونی (آند) و زمین (کاتد) را اندازه‌گیری می‌کند. پروب ولتاژ به صورت تقسیم‌کننده ولتاژ از نوع مقاومتی^{۲۹} می‌باشد. این پروب قابلیت آن را دارد که مقدار ولتاژ را تا صد برابر کاهش دهد. در شکل ۳-۱۳ نمای شماتیک وار از آن نشان داده شده‌است. در این شکل اجزای تشکیل دهنده پروب یعنی ۱۰ عدد مقاومت ۵۱۰ اهمی که به صورت سری به هم متصل شده‌اند و یک مقاومت شنت^{۳۰} ۵۱ اهمی نشان داده شده‌است. این تقسیم‌کننده توسط یک لوله مسی پوشیده می‌شود. این لوله می‌تواند بعنوان کاهنده میزان نویز هم عمل کند. پروب ولتاژ مستقیماً به آند دستگاه متصل است و سیگنال‌های به دست آمده از این پروب در بررسی و تحلیل داده‌ها نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند.



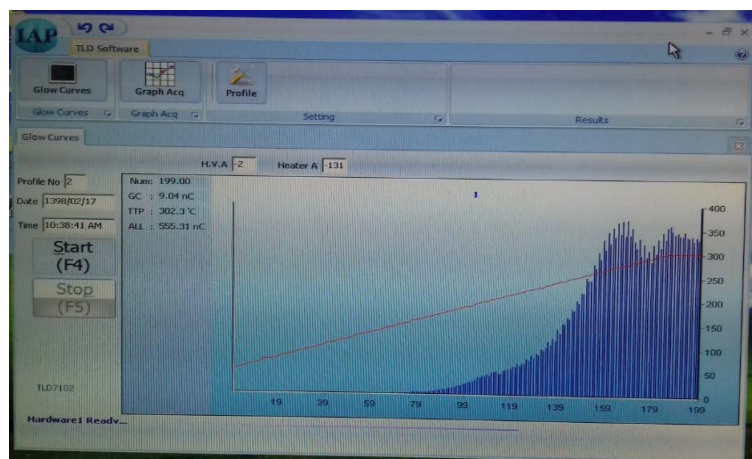
شکل ۳-۱۳ : نمایی از شماتیک پروب ولتاژ

^{۲۹}Resistive voltage divider

^{۳۰}Shunt

۳-۴ سیستم خوانش کارت دزیمتر ترمولومینسانس

سیستم خوانش دزیمتر TLD دارای چندین قسمت اصلی شامل المان حرارت‌دهی، لامپ تکثیرکننده فوتونی، نمایشگر منحنی تابانی، کامپیوتر داخلی و سایر بردهای الکترونیکی است. در شکل ۳-۱۴ منحنی تابانی مربوط به یکی از TLD های قرار گرفته در داخل قرائت‌گر نشان داده شده‌است. سیستم‌های جدید خوانش دزیمتر TLD، بسیار پیشرفته می‌باشند. در این سیستم‌ها، حرارت‌دهی دزیمتر از طریق گاز داغ انجام می‌شود. به طور کلی دخالت عوامل انسانی در فرآیند خوانش دزیمتر با هدف افزایش دقت و عدم پیدایش خطا در دزیمتری حذف شده‌است. این دستگاه از نرم‌افزار قرائت‌گر TLD مدل ۷۱۰۳ تحت ویندوز XP اجرا شده و دارای چندین صفحه برای عملیات مربوط به گرم کردن و خواندن کارت‌های چهار قرصه ساخت شرکت هارشا می‌باشد. قبل از قرائت قرص‌های TLD باید پروفایل دمایی متناسب با آن قرص انتخاب شود. لازم به ذکر است که پروفایل شماره ۱۰ مربوط به اندازه‌گیری نور زمینه و نور مرجع می‌باشد [۴۷].



شکل ۳-۱۴: منحنی تابانی TLD قرار گرفته در دستگاه قرائت‌گر



شکل ۳-۱۵: دستگاه قرائت گر (TLD) و سیستم متصل به آن

۳-۴-۱ خواندن قرص TLD

خواندن قرص TLD شامل مراحل زیر است:

- ۱- تنظیم پارامترهای پروفایل حرارتی با استفاده از صفحه profile
 - ۲- با فشار کلید کشویی، کشوی حاوی پلانچت بیرون می آید.
 - ۳- با فشار مجدد کلید کشویی، کشوی حاوی پلانچت داخل رفته و در محل قرائت قرار می گیرد.
 - ۴- با کلیک روی کلید start روی صفحه Glow Curves عملیات مربوط به خواندن قرص آغاز می گردد. این عملیات شامل چند مرحله است که به قرار زیر می باشد:
- شروع عملیات گرمادهی متناسب با پروفایل انتخاب شده، به منظور دیدن پروفایل و چگونگی تنظیم پارامترهای پروفایل حرارتی به صفحه profile رجوع می کنیم.
 - نمایش منحنی دما و روشنایی در محل های مربوطه.

- ذخیره منحنی‌های دما و روشنایی درون فایلی که مسیر آن توسط کاربر در صفحه profile مشخص شده است و همچنین نام آن نیز بر حسب تاریخ و زمان قرائت کارت می‌باشد. این فایل در فرمت اکسل مایکروسافت بوده و به راحتی توسط نرم‌افزار اکسل باز می‌شود.

در دستگاه قرائت‌گر شدت فوتون‌های انتشار یافته بر حسب دما رسم می‌شود. منحنی به دست آمده را منحنی تابانی یا منحنی درخشندگی ماده ترمولومینسانس می‌نامند. سطح زیر منحنی درخشندگی متناسب با مقدار دز پرتوهای است که به ماده برخورد نموده‌است. این پدیده جالب باعث شده تا موادی که این رفتار را از خود نشان می‌دهند، به عنوان آشکارساز و یا دزیومتر پرتوهای یون‌ساز مانند ایکس، گاما، بتا و نوترون مورد استفاده قرار بگیرند و آن‌ها را دزیومتر ترمولومینسانس با علامت اختصاری TLD می‌نامند.

فصل ۴: شبیه سازی به روش مونت کارلو

۴-۱ مقدمه

کد *MCNPX* یکی از قوی‌ترین کدهای محاسباتی هسته‌ای است که بر اساس روش مونت کارلو کار می‌کند. این کد در طراحی نوترونی راکتورهای هسته‌ای و بررسی ایمنی آن‌ها، طراحی حفاظ، طراحی آشکارسازها، پرتوپزشکی و.. کاربردهای بسیاری دارد. در این فصل ضمن معرفی مختصر کد *MCNPX* و مطالعه کارتهای مورد استفاده در این کد، اقدام به شبیه‌سازی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (*SHUPF*) و دزیمترهای ترمولومینسانس (*TLD*) که به منظور بررسی دز اشعه ایکس خروجی از دستگاه به بدنه آن متصل کرده‌ایم، می‌کنیم. هم‌چنین با استفاده از کد *MCNPX* به انجام دزیمتری اشعه ایکس حاصل از پلاسمای کانونی می‌پردازیم.

۴-۲ تاریخچه

این کد برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ در آزمایشگاه لوس آلاموس^{۳۱}، تحت عنوان *MCS* تهیه شد و در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار به نام *MCNP* ارائه گردید و در ادامه نسخه‌های ۴A و ۴B، که تنها ذرات نوترون و فوتون را در نظر می‌گرفت، ارائه شد. در سال ۲۰۰۰ ذره الکترون به نسخه قبلی آن اضافه شد و با نام *MCNP 4C* به بازار آمد. بعد از آن نسخه‌های *X*، ۵ و ۶ ارائه گردید که دارای قابلیت‌های فراوانی می‌باشند، از جمله این‌که می‌توان حداقل ۳۵ نوع ذره مختلف را در آن‌ها در نظر گرفت.

۴-۳ ساختار فایل ورودی

برای استفاده از این کد باید یک فایل ورودی، شامل اطلاعات مسئله از جمله هندسه، مواد، چشمه پرتو، خروجی‌های مورد نظر و... تهیه شود. این فایل، یک فایل متنی است که می‌توان با استفاده از هر

^{۳۱}Los Alamos National Laboratory

نرم افزار ویرایش فایل های متنی نوشته شود. هر فایل ورودی شامل سه قسمت اصلی است که هر قسمت با یک خط خالی از قسمت قبلی و بعدی جدا می شود. اولین قسمت اصلی، بخشی است که شامل تعریف سلول های مسئله می باشد. دومین قسمت فایل ورودی، شامل تعریف سطوحی است که در مسئله استفاده می شود. سومین و آخرین قسمت اصلی فایل ورودی شامل داده های مسئله مثل چشمه، مواد، نوع خروجی و... می باشد.

در پایان برنامه هم می توان یک خط خالی درج نمود. به طور کلی چهار خط خالی در برنامه وجود دارد که قسمت های مختلف را از هم جدا می کند.

۴-۴ کارت های مورد نیاز کد

کارت های مورد استفاده در این کد عبارتند از:

۴-۴-۱ کارت سلول

سلول هر ناحیه ای از فضا است که توسط سطح یا سطوحی محدود می شود. کارت سلول شامل شماره سلول، شماره ماده، چگالی ماده و شماره سطوح است. برای تعریف یک سلول در فایل ورودی به هر سطح یک عدد نسبت می دهیم و به کمک آن عدد با علامت منفی یا مثبت سلول مورد نظر را تعریف می کنیم.

۴-۴-۲ کارت سطوح

سطوح مختلفی در این کد قابل تعریف و استفاده است که شامل سطوح کروی، صفحه، استوانه، مکعب و... می باشد. با استفاده از این کارت می توان شکل های مختلف و پیچیده را تعریف نمود. به هر سطح یک عدد حداکثر پنج رقمی نسبت داده می شود که در ستون یک تا پنج درج می شود.

۴-۴-۳ کارت داده

این کارت دارای سه قسمت کارت چشمه، کارت مواد و کارت تالی‌ها می‌باشد که در ادامه به توضیح هریک از آن‌ها می‌پردازیم.

۴-۴-۴ کارت چشمه

هرفایل ورودی دارای حداقل یک چشمه ذرات است که برای تعریف آن در کد با استفاده از دستور *SDEF* در قسمت داده تعریف می‌شود. پارامترهای قابل تعریف برای چشمه عبارتند از نوع ذره، انرژی، مکان، جهت گسیل ذرات و...

۴-۴-۵ کارت مواد

هر ماده‌ای که سلولی را پر کرده‌است و یا برای محاسبات تالی استفاده می‌شود، باید در قسمت کارت داده‌ها تعریف شود. هر ماده در قسمت داده‌ها به صورت دستور *Mn* شماره‌گذاری می‌شود که n یک عدد درست و حداکثر پنج رقمی است که ماده مورد نظر به کمک این عدد شناسایی و فراخوانی می‌شود. برای تعریف هر ماده باید چگالی و درصد وزنی یا اتمی عناصر تشکیل دهنده آن معلوم باشد. از آن‌جا که این اطلاعات تاثیر بسزایی در نتیجه محاسبات دارد، لازم است که از مرجع مناسبی استفاده شود.

۴-۵-۱ تعریف یک ماده معمولی

یک ماده ممکن است ترکیبی از چند ایزوتوپ و یا به صورت یک ایزوتوپ خالص باشد. یک ایزوتوپ A_ZX به صورت یک عدد درست، که آن را *ZAID* آن ایزوتوپ می‌نامیم، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$${}^A_Z X = (100 \times Z) + A$$

که در این رابطه Z عدد اتمی و A عدد جرمی است.

برای تعریف یک ماده باید ایزوتوپ‌های تشکیل دهنده آن و درصد وزنی یا اتمی آن‌ها در ماده مورد نظر را مشخص کنیم. یک ماده به طور کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Mn \quad ZAID_1 \quad f_1 \quad ZAID_2 \quad f_2 \dots$$

که در آن f_1 درصد وزنی یا اتمی آن ایزوتوپ است. درصد وزنی را با علامت منفی و درصد اتمی را با علامت مثبت و یا بدون علامت درج می‌کنیم.

۴-۵-۲ تعریف آلیاژ

اگر ماده مورد نظر ترکیبی از چند ماده باشد و سهم هر یک از مواد در آلیاژ معلوم باشد، آنگاه با کمی محاسبه می‌توان درصد اتمی یا وزنی ایزوتوپ‌های موجود در آلیاژ را بدست آورد.

۴-۴-۶ کارت تالی

به کمک تعریف تالی‌ها در برنامه می‌توان کمیت‌های مختلف از جمله جریان، شار، انرژی تخلیه شده و کمیت‌های دیگر را محاسبه کرد. یک تالی با تعیین نوع آن و نوع ذره، به صورت $Fn : pl$ تعریف می‌شود که در آن pl ، معرف نوع ذره است و n ، یک عدد صحیح و حداکثر سه رقمی است که رقم آخر آن نوع تالی را مشخص می‌کند. اضافه کردن ستاره (*) به صورت Fn^* باعث ضرب تالی در انرژی و در نتیجه تغییر یکای تالی می‌گردد.

۴-۵ روش کار

در این پایان‌نامه، محاسبات توسط کد شبیه سازی $MCNPX$ 2.6 انجام شده است. شبیه سازی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود که شامل یک استوانه هم‌محور با Z و چهار استوانه عمود بر راستای

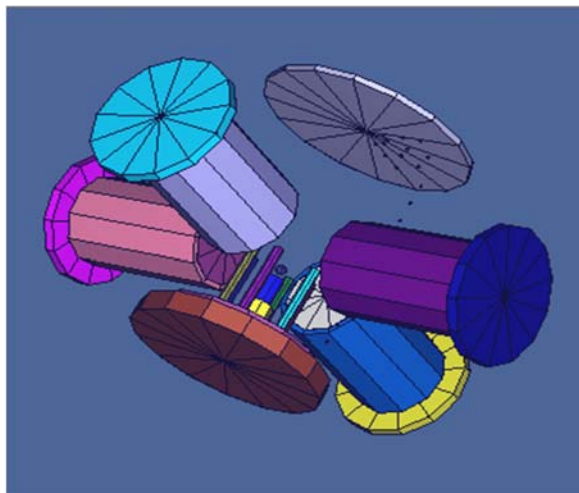
Z می‌باشد، شبیه سازی شد. جنس این استوانه‌ها استیل ضد زنگ می‌باشد. همچنین آند مسی و شش عدد کاتد سوار بر پایه که همگی از جنس برنج هستند و عایق جداکننده آند و کاتدها که از جنس پیرکس می‌باشد، در داخل محفظه شبیه سازی شدند. محفظه خلا با گاز کاری نیتروژن پر شده و از پلاسمای کانونی تشکیل شده در بالای آند، به عنوان چشمه اشعه ایکس در شبیه سازی استفاده شد. چشمه یک سانتی‌متر بالاتر از ارتفاع آند و درست روی محور Z و به صورت یک کره با شعاع ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. توزیع انرژی چشمه با توجه به پژوهشی که قبلاً به منظور تعیین انرژی اشعه ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود انجام شده [۴۶]، از صفر تا ۱۶ keV در نظر گرفته شد. دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD - 100) به صورت قرص‌های بسیار کوچکی به قطر ۵/۴ میلی‌متر و ضخامت ۰/۹ میلی‌متر، از داخل روی بدنه محفظه خلا و با فاصله دو سانتی‌متر از یکدیگر، چسبانده شدند. همچنین تعدادی قرص از داخل روی صفحه بالایی محفظه در چهار زاویه ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و هر یک به فاصله دو سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند.

در برنامه MCNPX تالی F8* (بر حسب MeV) در فشارهای مختلف و به ازای تعداد یکسانی از ذرات ترابرد شدند. خروجی تالی F8* بر حسب MeV می‌باشد، که برای محاسبه دز جذبی بر جرم سلول تقسیم می‌شود که واحد آن بر حسب $\frac{MeV}{g}$ بدست آید. با تبدیل واحد گرم به کیلوگرم و

MeV به ژول، دز جذبی بر حسب $\frac{J}{kg}$ که معادل گری (Gy) می‌باشد، به دست می‌آید. در ادامه به

بررسی دز جذبی برای هریک از دزیمترها خواهیم پرداخت.

در شکل ۴-۱ هندسه شبیه سازی شده محفظه دستگاه و همچنین دزیمترها توسط کد MCNP نشان داده شده‌است.



شکل ۴-۱: هندسه شبیه سازی شده توسط کد MCNP

۴-۶ محاسبه درصد وزنی عناصر

در قسمت تعریف مواد در فایل ورودی شبیه سازی، ماده اول مربوط به آند است که از جنس مس

($^{63}_{29}Cu$) با چگالی $8.94 \frac{g}{cm^3}$ می باشد. با توجه به این که مس یک عنصر خالص می باشد، درصد وزنی

(یا اتمی) آن در فایل ورودی برابر با یک در نظر گرفته شد.

ماده دوم تعریف شده پیرکس است که نشان دهنده جنس عایق دستگاه است. چگالی این ماده،

$2.235 \frac{g}{cm^3}$ می باشد. جدول ۴-۱ نشان دهنده عمده عناصر تشکیل دهنده پیرکس و درصد وزنی آن-

ها می باشد.

جدول ۴-۱: مشخصات عمده عناصر تشکیل دهنده پیرکس [۴۳]

ماده	اکسید سیلیسیم	پراکسید سدیم	اکسید کلسیم	اکسید منیزیم
فرمول شیمیایی	SiO_2	Na_2O_2	CaO	MgO
درصد وزنی ماده	۷۷	۱۲	۸	۳
جرم ماده (g)	۶۰	۷۸	۵۶	۴۰

با توجه به درصدهای وزنی مواد داده شده، درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده را به صورت زیر محاسبه

خواهیم کرد:

$$M(\text{Ca}) = 40$$

$$M(\text{Na}) = 23$$

$$M(\text{Si}) = 28$$

$$M(\text{O}) = 16$$

$$M(\text{Mg}) = 24$$

$$W_f(\text{Si}) = 0.77 \left(\frac{M(\text{Si})}{M(\text{SiO}_2)} \right) = 0.77 \left(\frac{28}{60} \right) = 0.359$$

$$W_f(\text{O}) = 0.77 \left(\frac{2M(\text{O})}{M(\text{SiO}_2)} \right) + 0.12 \left(\frac{2M(\text{O})}{M(\text{Na}_2\text{O}_2)} \right) + 0.08 \left(\frac{M(\text{O})}{M(\text{CaO})} \right) + 0.03 \left(\frac{M(\text{O})}{M(\text{MgO})} \right) =$$

$$0.77 \left(\frac{32}{60} \right) + 0.12 \left(\frac{32}{78} \right) + 0.08 \left(\frac{16}{56} \right) + 0.03 \left(\frac{16}{40} \right) = 0.495$$

$$W_f(\text{Na}) = 0.12 \left(\frac{2M(\text{Na})}{M(\text{Na}_2\text{O}_2)} \right) = 0.12 \left(\frac{46}{78} \right) = 0.071$$

$$W_f(\text{Ca}) = 0.08 \left(\frac{M(\text{Ca})}{M(\text{CaO})} \right) = 0.08 \left(\frac{40}{56} \right) = 0.058$$

$$W_f(\text{Mg}) = 0.03 \left(\frac{M(\text{Mg})}{M(\text{MgO})} \right) = 0.03 \left(\frac{24}{40} \right) = 0.018$$

$$\sum W_f(i) = 0.359 + 0.495 + 0.071 + 0.057 + 0.018 = 1$$

ماده سوم تعریف شده، مربوط به کاتدها و صفحه پایه زیر آنها یعنی فلز برنج با چگالی $8.4 \frac{g}{cm^3}$

می‌باشد. این فلز از دو عنصر مس (Cu) با درصد وزنی ۶۳ و روی (Zn) با درصد وزنی ۳۷ تشکیل

شده است [۴۴].

$$W_f(\text{Cu}) = 0.63 \left(\frac{M(\text{Cu})}{M(\text{Cu})} \right) = 0.63$$

$$W_f(\text{Zn}) = 0.37 \left(\frac{M(\text{Zn})}{M(\text{Zn})} \right) = 0.37$$

ماده چهارم معرف جنس محفظه تخلیه و بازوهای متصل به آن، یعنی فولاد ضد زنگ می باشد که چگالی آن برابر با $8.037 \frac{g}{cm^3}$ است. جدول ۲-۴ عناصر تشکیل دهنده فولاد ضد زنگ و درصد وزنی آن ها را نشان می دهد.

جدول ۲-۴: عناصر تشکیل دهنده فولاد ضد زنگ و درصد اتمی آن ها

نام ماده	نیکل	کربن	کروم	آهن
درصد وزنی ماده	۹	۱	۱۴	۷۶

$$W_f (Ni) = 0.09 \left(\frac{M (Ni)}{M (Ni)} \right) = 0.09$$

$$W_f (C) = 0.01 \left(\frac{M (C)}{M (C)} \right) = 0.01$$

$$W_f (Cr) = 0.14 \left(\frac{M (Cr)}{M (Cr)} \right) = 0.14$$

$$W_f (Fe) = 0.76 \left(\frac{M (Fe)}{M (Fe)} \right) = 0.76$$

ماده پنجم گاز کاری مورد نظر یعنی نیتروژن ($^{14}_7N$) می باشد. به دلیل این که گاز نیتروژن به صورت یک عنصر خالص می باشد، درصد اتمی (یا وزنی) آن برابر با یک در نظر گرفته شد. برای بدست آوردن چگالی گاز نیتروژن موجود در محفظه دستگاه، ابتدا حجم استوانه اصلی محفظه و چهار بازوی متصل به آن به صورت جداگانه محاسبه شد. سپس مقادیر بدست آمده باهم جمع شده و حجم آند و کاتدها از آن کم شد. آن گاه مقدار بدست آمده در رابطه (۱-۴) قرار داده شد.

$$PV = NKT \quad (1-4)$$

در رابطه ۱-۴، فشار (P) مورد نظر جاگذاری شد و باتوجه به حجم بدست آمده (V) و ثابت بولتزمن (K) و در نظر گرفتن دمای آزمایشگاه (T)، جرم مولی (N) گاز نیتروژن بدست آمد. سپس با تقسیم

جرم مولی به عدد آووگادرو، تعداد مول گاز (n) موجود در محفظه محاسبه شد. با داشتن تعداد مول -ها، جرم (m) گاز موجود در محفظه تخلیه دستگاه بدست آمد. با داشتن حجم و جرم گاز و با توجه به رابطه (۲-۴) چگالی (ρ) گاز نیتروژن موجود در دستگاه به ازای هر فشار بدست آمد.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (۲-۴)$$

به عنوان نمونه چگالی گاز کاری نیتروژن برای فشار کاری 0.6 torr را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\text{طول بازو} = 14.75 \text{ cm}$$

$$\text{شعاع بازو} = 4 \text{ cm}$$

$$\text{ظول استوانه اصلی محفظه خلا} = 24.6 \text{ cm}$$

$$\text{شعاع استوانه اصلی محفظه خلا} = 7.75 \text{ cm}$$

$$\text{طول آند} = 7.4 \text{ cm}$$

$$\text{شعاع آند} = 0.85 \text{ cm}$$

$$\text{طول کاتد} = 8.2 \text{ cm}$$

$$\text{شعاع کاتد} = 0.45 \text{ cm}$$

$$\text{طول صفحه برنجی} = 0.85 \text{ cm}$$

$$\text{شعاع صفحه برنجی} = 7 \text{ cm}$$

$$V = 3.14 \times 4((4)^2(14.75)) + 3.14 \times ((7.75)^2(24.6)) - 3.14 \times ((0.85)^2(7.4)) - 3.14 \times 6((0.45)^2(8.2))$$

$$-3.14 \times ((7)^2(0.85)) = 3.14(2364.578) = 7424.77492 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ m}}{10^6 \text{ cm}^3} = 0.00742477492 \text{ m}^3$$

$$PV = NKT$$

$$P = 0.6 \text{ torr}$$

$$T = 295^0 \text{ K}$$

$$K = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}}$$

$$1 \text{ torr} = 133.32 \text{ Pa} = 133.32 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}^2}$$

$$(0.6)(133.32 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}^2})(0.00742477492 \text{ m}^3) = (N)(1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{kg.m}^2}{\text{s}^2.k})(295 \text{ K})$$

$$N = \frac{0.5939226}{407.1 \times 10^{-23}} = 14.5891 \times 10^{19}$$

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$n = \frac{14.5891 \times 10^{19}}{6.022 \times 10^{23}} \text{ mol} = 2.4226 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

جرم مولی نیتروژن به صورت تک اتمی برابر با $14.0067 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ می باشد. از آن جایی که گاز نیتروژن به

صورت دو اتمی می باشد، جرم مولی آن برابر با $28.0134 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ در نظر گرفته شد.

$$m = (2.4226 \times 10^{-4} \text{ mol})(28.0134 \frac{\text{g}}{\text{mol}}) = 67865.263 \times 10^{-7} \text{ g}$$

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{67865.263 \times 10^{-7} \text{ g}}{7424.77492 \text{ cm}^3} = 9.1404 \times 10^{-7} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

به همین روش، با تغییر مقدار فشار می توان چگالی گاز کاری نیتروژن را برای فشارهای مختلف محاسبه کرد.

ماده شماره شش در فایل ورودی شبیه سازی، هوای محیط آزمایشگاه تعریف شد. چگالی هوای اطراف

ما برابر با $0.0012 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ می باشد. جدول (۳-۴) عناصر تشکیل دهنده هوا و درصد وزنی هر یک از آن-

ها را نشان می دهد.

جدول ۳-۴: عناصر تشکیل دهنده هوا و درصد وزنی آنها

نام ماده	نیتروژن	اکسیژن	آرگون
درصد وزنی ماده	۷۸	۲۱	۰/۹۳

$$W_f(N) = 0.78 \left(\frac{M(N)}{M(N)} \right) = 0.78$$

$$W_f(O) = 0.21 \left(\frac{M(O)}{M(O)} \right) = 0.21$$

$$W_f(Ar) = 0.0093 \left(\frac{M(Ar)}{M(Ar)} \right) = 0.0093$$

حدود ۰/۰۷٪ از عناصر تشکیل دهنده هوا شامل نئون، هیدروژن، کریپتون و دی‌اکسیدکربن است که به علت ناچیز بودن درصد وزنی شان، در انجام محاسبات از در نظر گرفتن آنها صرف نظر شد.

ماده هفتم تعریف شده، مربوط به دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD) با چگالی $2.64 \frac{g}{cm^3}$ می‌باشد.

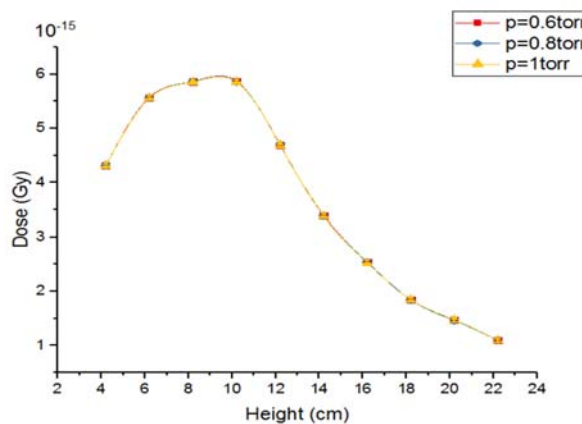
این دزیمترها از جنس لیتیم فلورید (LiF) می‌باشد. درصد فراوانی هریک از عناصر لیتیم و فلورین موجود در این دزیمترها را برابر با ۵۰٪ در نظر گرفتیم.

۴-۷ نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی به روش مونت کارلو توسط کد MCNPX در سه فشار انجام شد. شکل ۴-۲ دز جذبی در

ارتفاع‌های متفاوت روی بدنه محفظه خلا دستگاه را در سه فشار ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr نشان

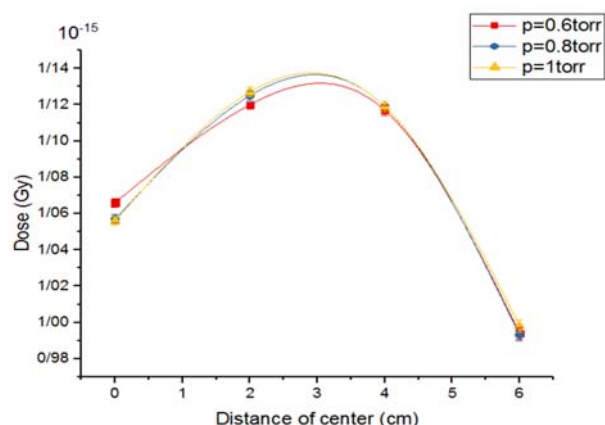
می‌دهد.



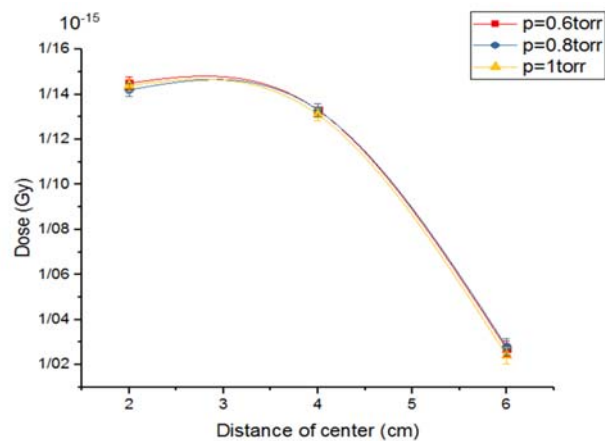
شکل ۴-۲: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

با توجه به این که برای شبیه سازی، مبدا مختصات لبه پایینی صفحه برنجی در نظر گرفته شد، هم-
 چنین با توجه به ارتفاع آند (۷/۴cm)، ضخامت صفحه برنجی (۸/۵mm) و ارتفاع پایه محفظه خلا
 (۲cm) که پایین تر از صفر محور Z در نظر گرفته شده، از شکل ۲-۴ مشخص می شود که بیشترین
 شدت دز جذبی اشعه ایکس در ارتفاع ۱۰cm یعنی دقیقا بالای سر آند و محل قرار گرفتن پینچ می-
 باشد.

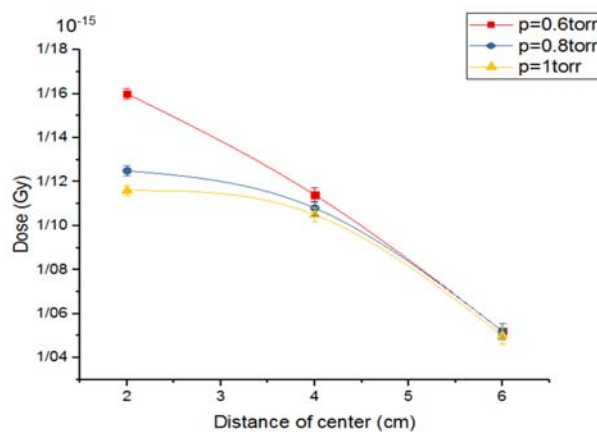
شکل های ۳-۴، ۴-۴، ۵-۴ و ۶-۴ دز جذبی توسط دزیمترهای قرار گرفته در صفحه بالایی محفظه
 خلا را به ترتیب در زاویه های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr را
 نشان می دهد.



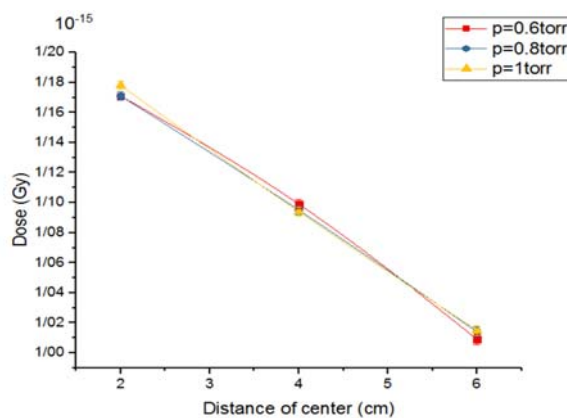
شکل ۳-۴: دز جذبی در زاویه ۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr



شکل ۴-۴: دز جذبی درزاویه ۳۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr



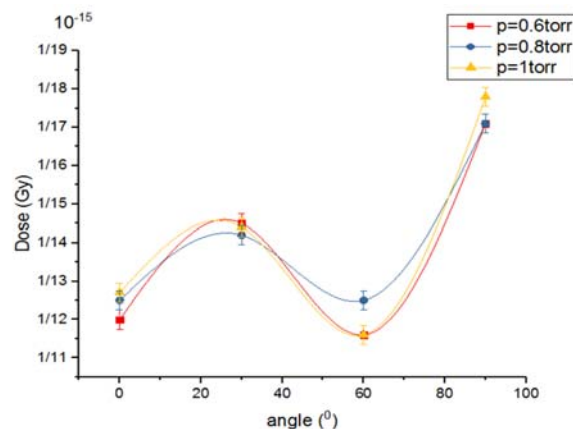
شکل ۴-۵: دز جذبی درزاویه ۶۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr



شکل ۴-۶: دز جذبی درزاویه ۹۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

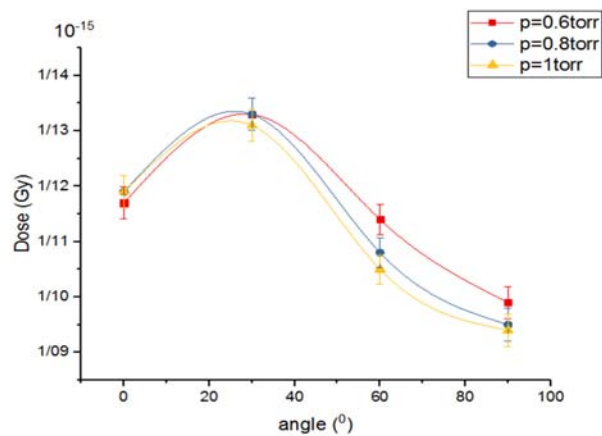
با توجه به شکل‌های ۴-۳، ۴-۴، ۴-۵ و ۴-۶ دز جذبی اشعه ایکس با دور شدن از محور Z ابتدا افزایش یافته و در فاصله ۲ سانتی‌متر از محور به بیشینه مقدار خود می‌رسد. پس از گذر از فاصله ۲ سانتی‌متر دز جذبی روندی نزولی دارد، به این معنا که نمودار دز جذبی هرچه به سمت دیواره‌های محفظه نزدیک‌تر می‌شود، مقدار کمتری را نشان می‌دهد. رفتار نمودار این‌گونه توجیه می‌شود که پس از فروپاشی ستون پلاسما، ذرات باردار به اطراف محفظه خلا حرکت می‌کنند. هرچه این ذرات به سمت دیواره‌های محفظه حرکت می‌کنند، از تراکم و سرعت آن‌ها کاسته می‌شود. بنابراین در اثر افت سرعت، انرژی الکترون‌ها کمتر شده و در نتیجه احتمال گسیل اشعه ایکس توسط آن‌ها کمتر می‌شود. همچنین چون تعداد ذرات در نزدیکی دیواره‌ها کمتر می‌شود، اشعه ایکس گسیلی ناشی از حرکت ذرات باردار نیز کمتر شده و نمودار سیر نزولی خواهد داشت.

شکل‌های ۴-۷، ۴-۸ و ۴-۹ دز جذبی را به ترتیب در فاصله‌های ۲، ۴ و ۶ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) در زاویه‌های ۶۰، ۳۰، ۰ و ۹۰ درجه و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr نشان می‌دهد.



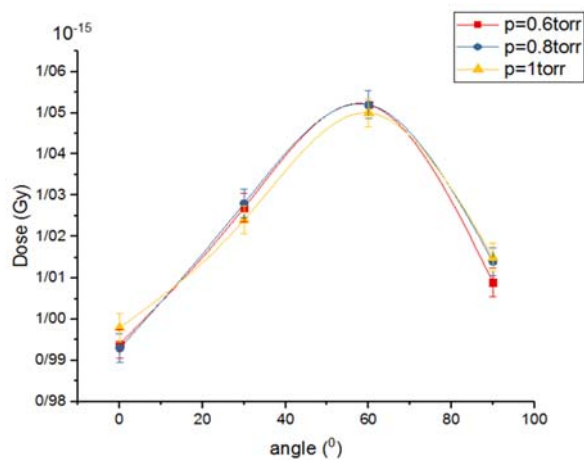
شکل ۴-۷: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) در زاویه‌های ۶۰، ۳۰، ۰ و ۹۰ درجه و

در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr



شکل ۴-۸: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی متر از مرکز (محور Z) در زاویه های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و

در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr



شکل ۴-۹: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز (محور Z) در زاویه های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و

در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

با توجه به شکل های ۴-۷، ۴-۸ و ۴-۹ مشخص می شود که توزیع زاویه ای دز اشعه ایکس از زاویه

صفر تا ۹۰ درجه به صورت ناهمسانگرد می‌باشد. با این معنا که به طور مثال در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز (محور Z)، دز اشعه ایکس در زاویه صفر درجه با مقدار دز در همین فاصله برای زاویه‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه متفاوت است.

در تمام نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی، رفتار دز جذبی در فشارهای مختلف مشابه بوده و تفاوت ناچیز مقادیر دز در فشارهای متفاوت، به دلیل تفاوت اندک مقدار فشارها می‌باشد.

شبیه‌سازی به همان روش قبل در سه فشار ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr برای دزیمترهای قرار گرفته بر روی بدنه بیرونی محفظه خلا انجام شد. دز حاصل از این شبیه‌سازی‌ها برابر با صفر به دست آمد. به عبارتی در خارج از محفظه تخلیه الکتریکی، گسیل اشعه ایکس از پلاسمای کانونی وجود نداشت.

فصل ۵: آزمایش‌های تجربی و نتیجه‌گیری

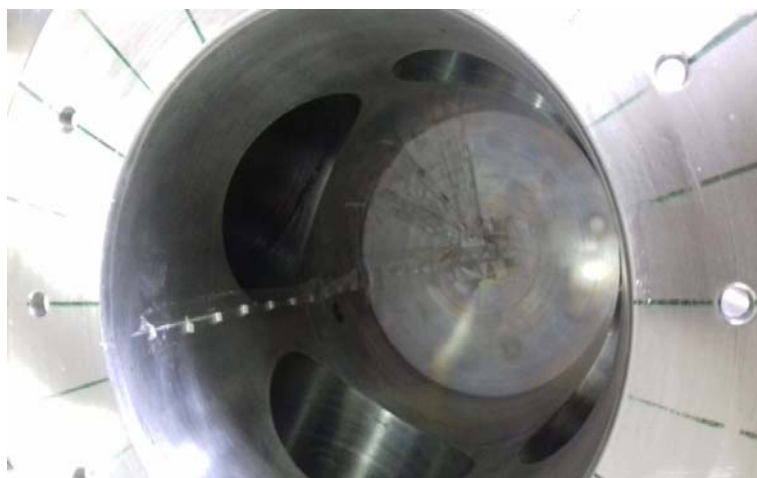
۵-۱ مقدمه

بعد از طراحی و شبیه‌سازی طرح کلی آزمایش و آماده سازی فایل ورودی، برنامه شبیه سازی اجرا شد و به ازای فشارهای مختلف گاز کاری نتایج تئوری بدست آمد. همچنین آزمایشات به طریقی که در این فصل شرح داده می‌شود انجام شدند. نتایج تجربی بدست آمده از آزمایشات در این فصل گزارش می‌شود. در انتهای این فصل به بحث درباره نتایج تجربی و تئوری پرداخته شده و نتیجه گیری کلی حاصل می‌شود.

۵-۲ انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایشات، ابتدا لازم است که دزیمترهای ترمولومینسانس کالیبره شوند. به این معنا که دز باقی‌مانده از آزمایشات قبلی توسط دزیمترها و همچنین اثر دز تابش زمینه در آنها از بین برود. با این کار دزیمترها به حالت خنثی رسیده و برای انجام آزمایشات جدید آماده می‌شوند. به این منظور، دزیمترهای $TLD-100$ یک ساعت در دمای 100°C درجه سانتی‌گراد و چهار ساعت در دمای 400°C درجه سانتی‌گراد در داخل کوره قرار داده‌شد. این حرارت باعث می‌شود الکترون‌هایی که در اثر تابش و بواسطه برانگیختگی الکترون‌ها در دزیمتر به دام افتاده‌اند، آزاد شوند و انرژی اضافی خود را با انتشار فوتون ترمولومینسانس از دست بدهند. به این ترتیب دزیمتر دوباره خنثی شده و برای انجام آزمایش و پرتوگیری جدید آماده می‌شود.

بعد از کالیبره شدن دزیمترها، آنها از داخل روی بدنه محفظه خلا با فاصله 2 سانتی‌متر از هم، و روی صفحه بالایی محفظه در چهار زاویه 0° ، 30° ، 60° و 90° به فاصله 2 سانتی‌متر از هم قرار داده‌شدند. شکل ۵-۱ نمایی از قرص‌های چسبانده شده بر روی بدنه و صفحه بالایی محفظه تخلیه الکتریکی دستگاه را نشان می‌دهند.



شکل ۵-۱: نمایی از قرص‌های چسبانده شده به بدنه محفظه خلا

پس از قرار دادن دزیمترها، به وسیله پمپ خلا محفظه تا فشار از مرتبه 10^{-2} torr تخلیه شد. سپس به تدریج گاز نیتروژن در داخل محفظه تزریق شد تا به فشار مورد نظر برسد. وقتی آهنگ تخلیه و تزریق گاز باهم برابر شد و فشار روی مقدار مورد نظر ثابت گردید، فشارسنج خاموش شده و با ولتاژ مورد نظر شات زده شد. برای هر فشار و ولتاژ مشخص، ۲۰ عدد شات زده شد. شکل ۵-۲ تصویری از صفحه نمایش اسیلوسکوپ پس از یک بار شات زدن می‌باشد. این تصویر نمایانگر آن است که در داخل محفظه خلا دستگاه، پلاسمای کانونی تشکیل شده است.



شکل ۵-۲: صفحه نمایش اسیلوسکوپ پس از یک بار شات زدن

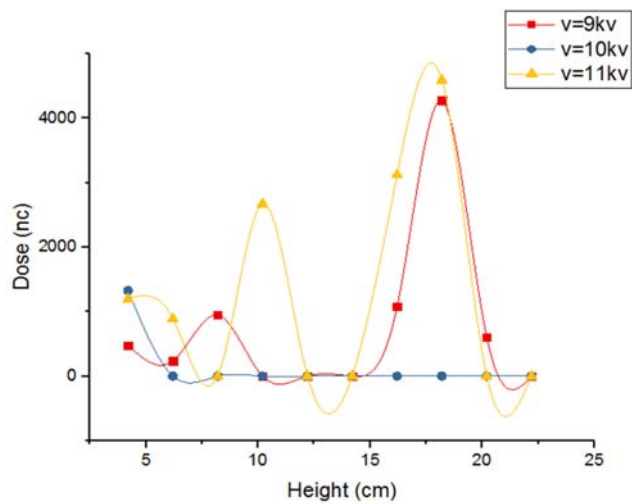
سپس محفظه خلا را باز کرده و دزیمرها از آن خارج شدند و دوباره سری دیگری از این دزیمرها به همان ترتیب و آرایش قبلی در داخل محفظه قرار گرفتند. طبق روال ذکر شده عمل شد و برای فشار و ولتاژ دیگری به همان تعداد شات زده شد. قرص‌های خارج شده از دستگاه، در داخل قرائت‌گر ترمولومینسانس قرار گرفتند تا به این ترتیب دز جذب شده توسط آن‌ها، با توجه به نمودار تابش مربوطه اندازه‌گیری شود.

۵-۳ نتایج تجربی

دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت برای فشارها و ولتاژهای متفاوت به دست آورده شد. همان‌گونه که توضیح داده شد، به ازای هر سری از دزیمرهای قرار گرفته در داخل دستگاه ۲۰ مرتبه شات زده شد.

۵-۳-۱ دز جذبی در فشار ثابت و ولتاژهای متفاوت

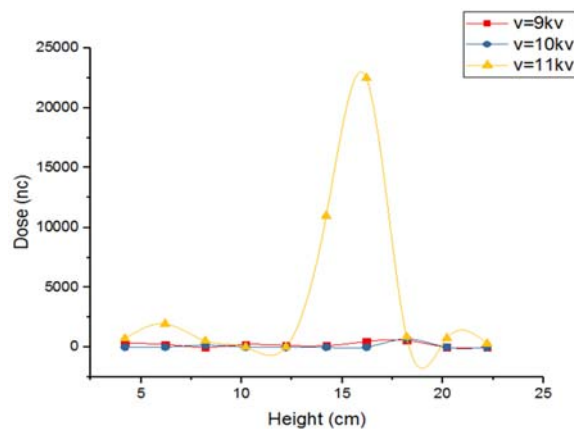
شکل‌های ۵-۳، ۵-۴ و ۵-۵ به ترتیب نشان دهنده دز جذبی توسط دزیمرها در فشار ثابت torr و ۰/۸ torr، ۰/۶ torr و ۱ torr و سه ولتاژ ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV می‌باشد. واحد گزارش دز جذبی در آزمایشات تجربی نانوکولن می‌باشد.



شکل ۳-۵: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در فشار ۰/۶ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV

۱۱ kV

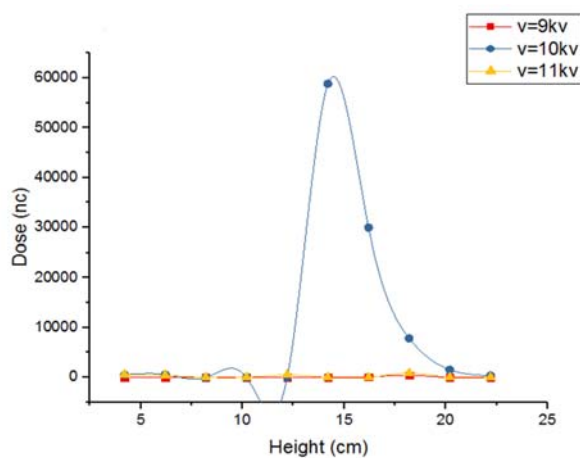
در فشار ۰/۶ torr، مقدار دز جذبی در ارتفاع حدود ۱۸ cm و در ولتاژ ۱۱ kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۴-۵: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در فشار ۰/۸ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV

در فشار ۰/۸ torr، مقدار دز جذبی در ارتفاع حدود ۱۷ cm و در ولتاژ ۱۱ kV به بیشترین مقدار

خود می‌رسد.



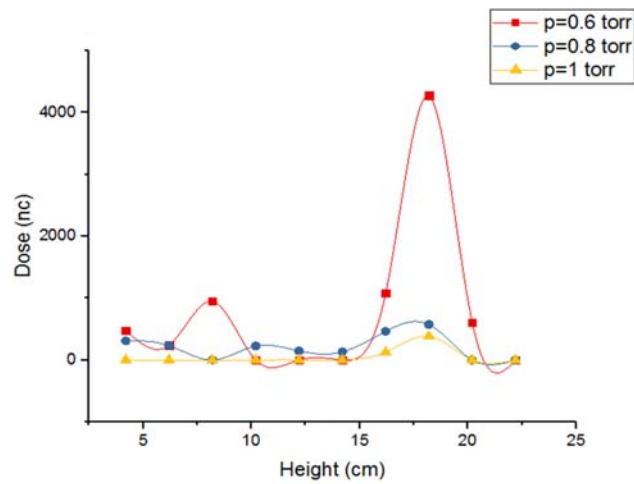
شکل ۵-۵: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در فشار ۱ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV

در فشار ۱ torr، مقدار دز جذبی در ارتفاع حدود ۱۴ cm و در ولتاژ ۱۰ kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

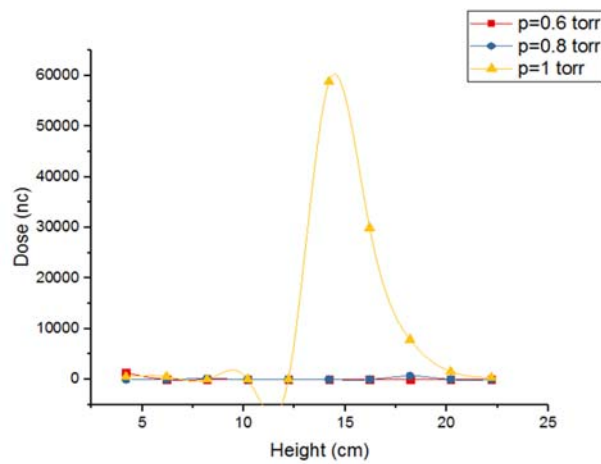
۵-۳-۲ دز جذبی در ولتاژ ثابت و فشارهای متفاوت

شکل‌های ۵-۶، ۵-۷ و ۵-۸ نشان دهنده دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در ولتاژ ثابت ۹ kV و سه فشار ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr می‌باشد.

باتوجه به شکل ۵-۶، در ولتاژ ۹ kV مقدار دز جذبی در ارتفاع حدود ۱۸ cm و در فشار ۰/۶ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۶: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در ولتاژ ۹ kV و فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

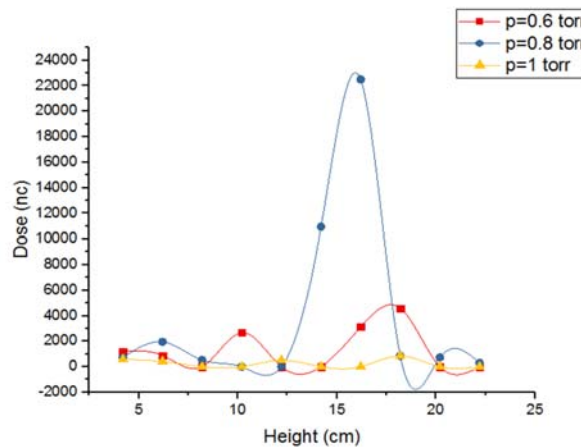


شکل ۵-۷: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در ولتاژ ۱۰ kV و فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

در ولتاژ ۱۰ kV مقدار دز جذبی در ارتفاع حدود ۱۴ cm و در فشار ۱ torr به بیشترین مقدار

خود می‌رسد.

باتوجه به شکل ۵-۸، در ولتاژ ۱۱kV مقدار دز جذبی در ارتفاع حدود ۱۷ cm و در فشار ۰/۸ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۸: دز جذبی در ارتفاع‌های متفاوت در ولتاژ ۱۱kV و فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

با توجه به نمودارهای ارائه داده شده، نتیجه حاصل می‌شود که دز جذبی در ارتفاع ۱۴ تا ۱۸ سانتی‌متر در تعدادی از نمودارها دارای پیک می‌باشد. با توجه به حرکت الکترون‌ها، از نقطه تشکیل پینچ به صورت آبشاری و فواره‌وار به سمت اطراف، در ارتفاع حدود ۱۴ تا ۱۸ سانتی‌متر الکترون‌ها به شکل سهمی وارون تغییر مسیر داده و این تغییر مسیر باعث تغییر سرعت و در نتیجه شتاب گرفتن الکترون‌ها می‌شود. در اثر این شتاب‌گیری دز اشعه ایکس حاصل از فرآیند تابش ترمزی توسط الکترون‌ها افزایش یافته و بدین ترتیب در این محدوده در تعدادی از نمودارها تجمع دز حاصل شده است. با این حال نمی‌توان نظم و قاعده خاصی برای توزیع دز جذبی در نظر گرفت. به این علت که فرآیند حرکت الکترون‌ها و گسیل اشعه ایکس توسط آن‌ها، فرآیندی نسبتاً رندوم بوده و حرکت ذرات یکنواخت نیست ولی در عین حال دارای یک غالبیت می‌باشد.

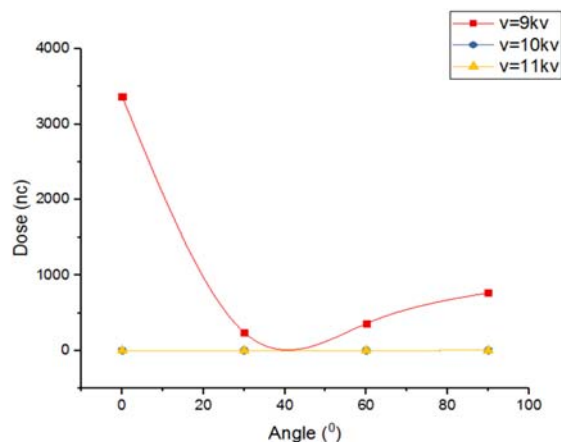
هم‌چنین با توجه به رندوم بودن نسبی حرکت ذرات باردار و نزدیک بودن مقادیر فشار و ولتاژی که دزیمتری اشعه ایکس در آن‌ها انجام شد (که این نزدیک بودن مقادیر به دلیل محدودیت‌هایی در

دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده می‌باشد)، نظم مشخصی در رفتار نمودار دز جذبی به ازای افزایش یا کاهش فشار و ولتاژ مورد نظر مشاهده نشد.

۳-۳-۵ دز جذبی در فاصله ۲ cm از محور Z در فشار ثابت و ولتاژهای

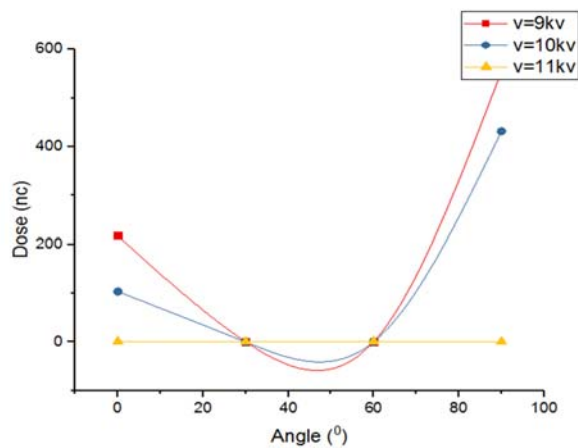
مختلف

شکل‌های ۵-۹، ۵-۱۰ و ۵-۱۱ به ترتیب دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) را در صفحه بالای محفظه تخلیه در فشار ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr و در ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV نشان می‌دهد.



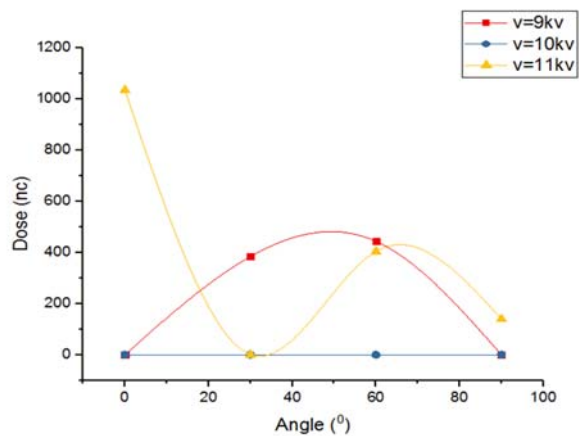
شکل ۵-۹: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV

در فاصله ۲ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در ولتاژ ۹ kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۱۰: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV

در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه ۹۰ درجه و در ولتاژ ۹ kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۱۱: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در فشار ۱ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV

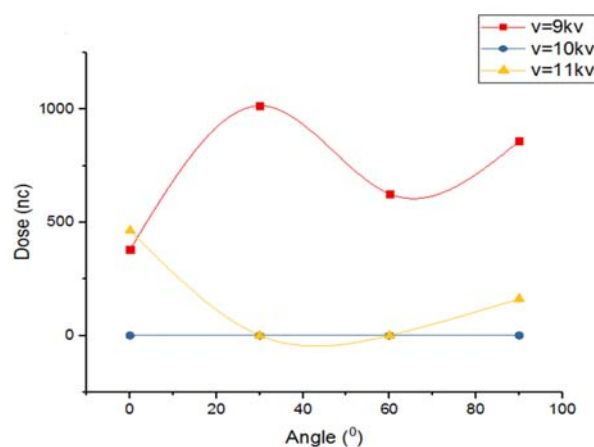
در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در فشار ۱ torr مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در ولتاژ

۱۱kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۴-۳-۵ دز جذبی در فاصله ۴ cm از محور z در فشار ثابت و ولتاژهای

مختلف

شکل‌های ۵-۱۲، ۵-۱۳ و ۵-۱۴ به ترتیب دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) را در صفحه بالای محفظه تخلیه در فشار ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr و در ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV نشان می‌دهد.



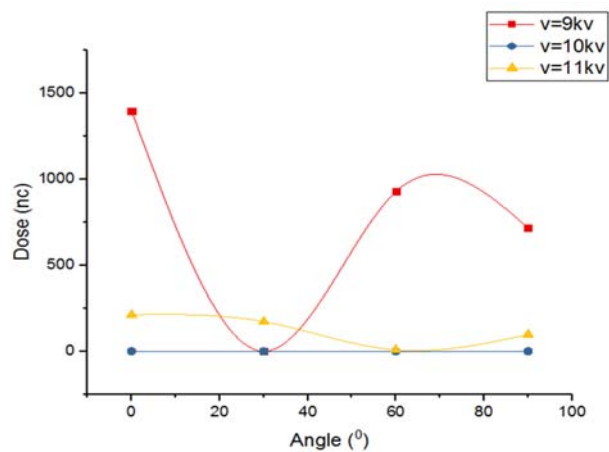
شکل ۵-۱۲: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr و ولتاژهای ۹ kV،

۱۰ kV و ۱۱ kV

در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه ۳۰ درجه و در ولتاژ ۹ kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

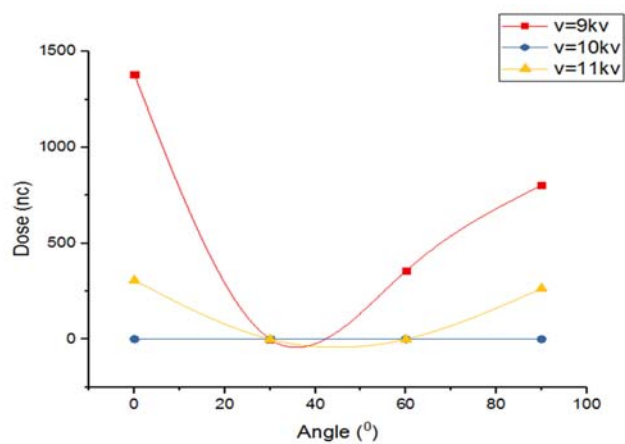
با توجه به شکل ۵-۱۳، در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr مقدار دز جذبی حدوداً در

زاویه صفر درجه و در ولتاژ ۹kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۱۳: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و

۱۱ kV



شکل ۵-۱۴: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در فشار ۱ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و

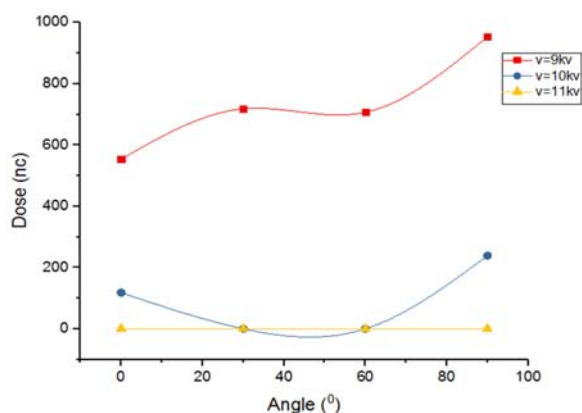
۱۱ kV

در فاصله ۴ سانتی متر از مرکز در فشار ۱ torr مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در ولتاژ ۹kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۵-۳-۵ دز جذبی در فاصله ۶ cm از محور Z در فشار ثابت و ولتاژهای

مختلف

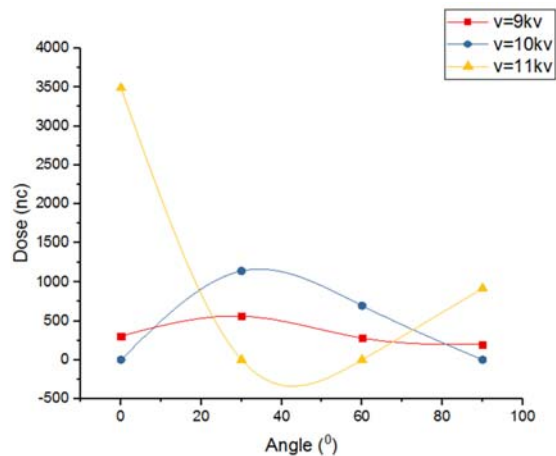
شکل‌های ۵-۱۵، ۵-۱۶ و ۵-۱۷ به ترتیب دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز (محور Z) را در صفحه بالای محفظه تخلیه در فشار ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr و در ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۵: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr و ولتاژهای ۹ kV

۱۱kV و ۱۰kV

در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در فشار ۰/۶ torr مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه ۹۰ درجه و در ولتاژ ۹kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

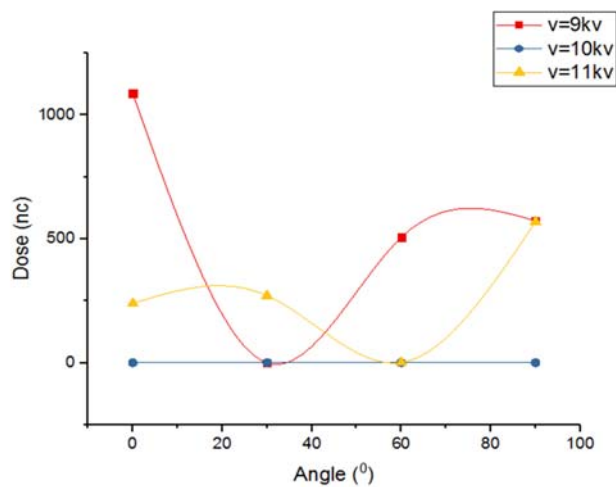


شکل ۵-۱۶: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و

۱۱ kV و

در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در فشار ۰/۸ torr مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در

ولتاژ ۱۱ kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۱۷: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در فشار ۱ torr و ولتاژهای ۹ kV، ۱۰ kV و

۱۱ kV و

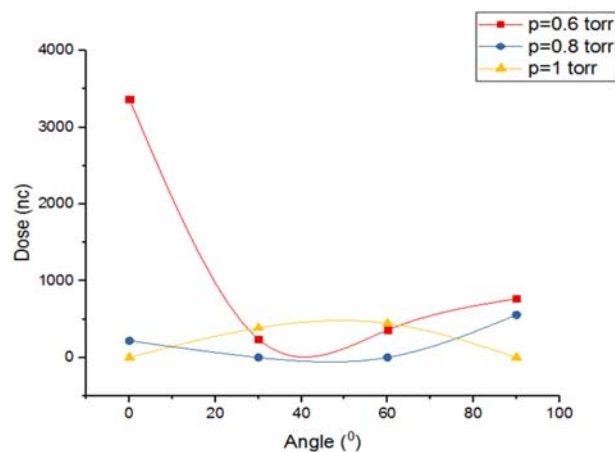
در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در فشار ۱ torr مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در ولتاژ ۱۱ kV به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۵-۳-۶ دز جذبی در فاصله ۲ cm از محور Z در ولتاژ ثابت و فشارهای

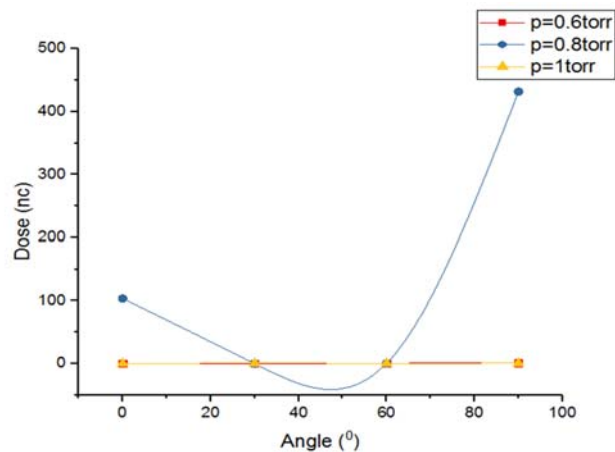
مختلف

شکل‌های ۵-۱۸، ۵-۱۹ و ۵-۲۰ به ترتیب دز جذبی در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز (محور Z) را در صفحه بالای محفظه تخلیه در ولتاژ ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr نشان می‌دهد.

با توجه به شکل شکل ۵-۱۸، در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در فشار ۰/۶ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۱۸: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV و در فشارهای ۰/۶ torr و ۰/۸ torr و ۱ torr



شکل ۵-۱۹: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV و در فشارهای ۰/۶ torr،

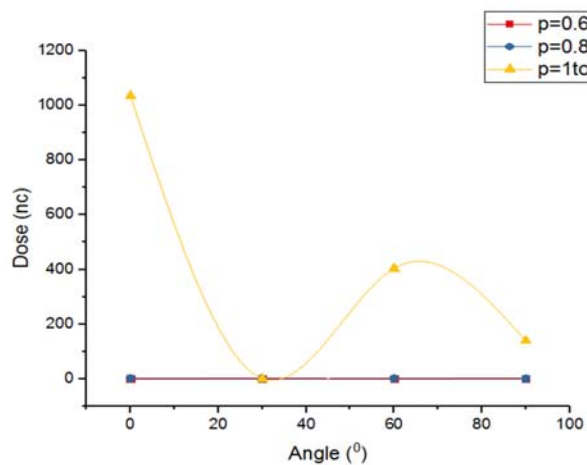
۰/۸ torr و ۱ torr

در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه ۹۰ درجه و در

فشار ۰/۸ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

با توجه به شکل ۵-۲۰، در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV مقدار دز جذبی حدوداً در

زاویه صفر درجه و در فشار ۱ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



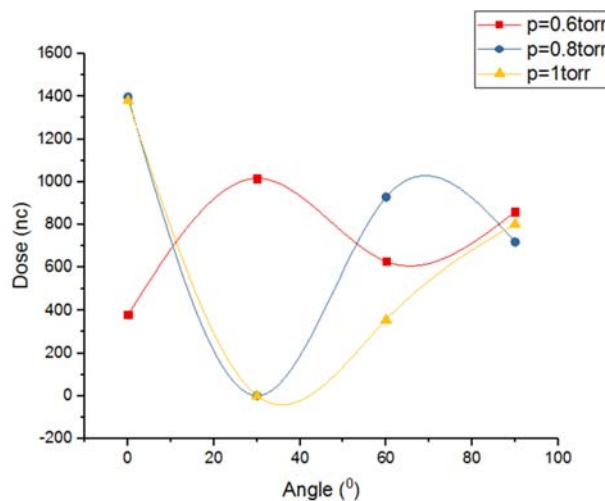
شکل ۵-۲۰: دز جذبی در فاصله ۲ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr،

۰/۸ torr و ۱ torr

۵-۳-۷ دز جذبی در فاصله ۴ cm از محور z در ولتاژ ثابت و فشارهای

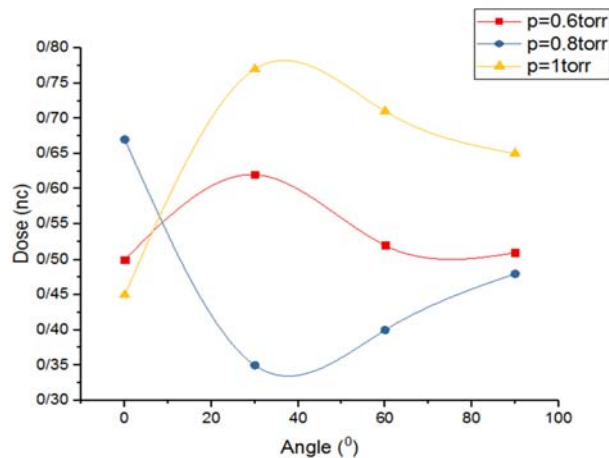
مختلف

شکل‌های ۵-۲۱، ۵-۲۲ و ۵-۲۳ به ترتیب دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) را در صفحه بالای محفظه تخلیه در ولتاژ ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۱: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

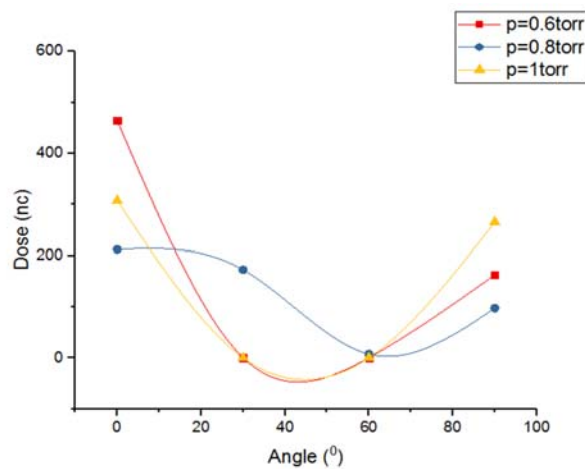
در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در دو فشار ۱ torr و ۰/۸ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۲۲: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV و در فشارهای ۰/۶ torr و ۰/۸ torr

۱ torr و ۰/۸

در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه ۳۰ درجه و در فشار ۱ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۲۳: دز جذبی در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr و ۰/۸ torr

۱ torr و ۰/۸ torr و ۰/۶

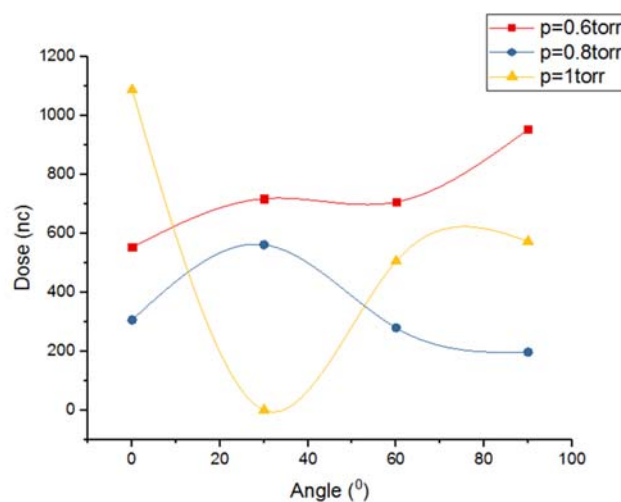
در فاصله ۴ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در

فشار ۰/۶ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۵-۳-۸ دز جذبی در فاصله ۶ cm از محور z در ولتاژ ثابت و فشارهای

مختلف

شکل‌های ۵-۲۴، ۵-۲۵ و ۵-۲۶ به ترتیب دز جذبی در فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز (محور Z) را در صفحه بالای محفظه تخلیه در ولتاژ ۹ kV، ۱۰ kV و ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr نشان می‌دهد.

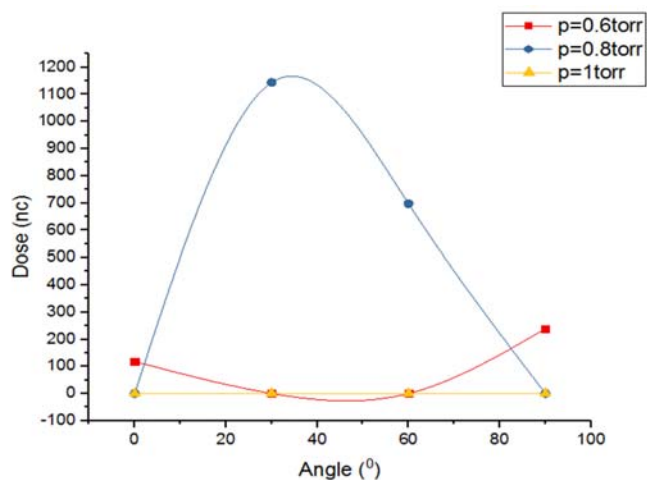


شکل ۵-۲۴: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV و در فشارهای ۰/۶ torr،

۰/۸ torr و ۱ torr

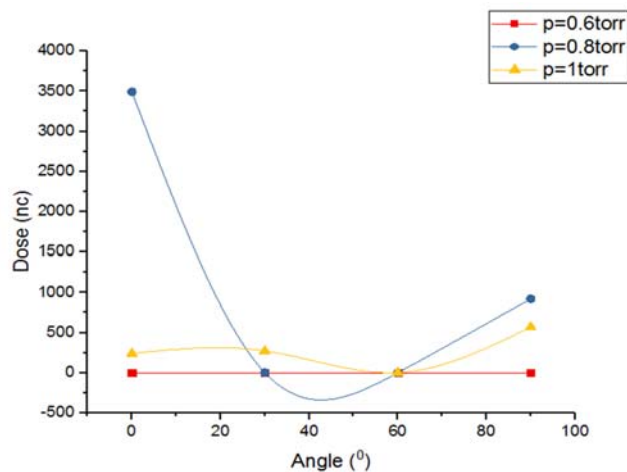
در فاصله ۶ سانتی‌متر از مرکز در ولتاژ ۹ kV مقدار دز جذبی حدوداً در زاویه صفر درجه و در فشار

۱ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۵-۲۵: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۰ kV مقدار دز جذبی حدودا در زاویه ۳۰ درجه و در فشار ۰/۸ torr به بیشترین مقدار خود می رسد.



شکل ۵-۲۶: دز جذبی در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV و در فشارهای ۰/۶ torr، ۰/۸ torr و ۱ torr

در فاصله ۶ سانتی متر از مرکز در ولتاژ ۱۱ kV مقدار دز جذبی حدودا در زاویه صفر درجه و در فشار ۰/۸ torr به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

با توجه به نمودارهای دز جذبی در فواصل مختلف از محور Z و در فشارها و ولتاژهای مختلف، غالبیت رفتار مربوط به نمودار توزیع دز بدین شکل است که در بیشتر نمودارها در زاویه صفر و نود درجه افزایش دز جذبی مشاهده می‌شود. این افزایش دز می‌تواند به دلیل حضور بازوها در زاویه ۰ و ۹۰ درجه باشد. امتداد یکی از بازوها به عنوان محور X در نظر گرفته شد و باتوجه به عمود بودن بازوها بر هم، بازوی مجاور در امتداد محور Y قرار خواهد داشت. این بازوها به نوعی توزیع یکنواخت ذرات را برهم می‌زنند. با توجه به این که بازوهای دستگاه به صورت توخالی هستند، ذرات و الکترون‌ها به داخل آن‌ها راه یافته و بعد از برخورد با بدنه این بازوها تغییر مسیر می‌دهند. در اثر این تغییر مسیر و در نتیجه تغییر سرعت، الکترون‌ها شتاب گرفته و مقدار بیشتری اشعه ایکس از تابش ترمزی ناشی از حرکت آن‌ها گسیل می‌شود. هم‌چنین فوتون‌ها در اثر برخورد با بدنه بازوها، دچار پراکندگی و پس پراکندگی شده و از این جهت اشعه ایکس تابشی در این دو زاویه را افزایش می‌دهند.

کنعانی و همکارانش [۱۴]، پس از بررسی شدت دز و توزیع فضایی اشعه ایکس سخت در یک دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از دزیمترهای ترمولومینسانس، گزارش کردند که دز جذبی در هر شعاع در بالای آند در زوایای ۳۶۰ درجه متقارن است اما توزیع اشعه ایکس رفتاری ناهمسانگرد دارد. با استناد به کار آن‌ها، اگر نیمساز در زاویه بین محور X و محور Y در نظر بگیریم، رفتار نمودار دز جذبی نسبت به این نیمساز تقریبا متقارن می‌باشد. بر این اساس انتظار می‌رود که رفتار هر یک از نمودارهای دز جذبی در زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه تقریبا مشابه باشد. البته به دلیل فرآیند رندوم حرکت ذرات باردار که قبلا ذکر شد، نمی‌توان گفت که رفتار هر یک از نمودارهای دز جذبی در این زاوایا کاملا شبیه به هم است.

هم‌چنین همان گونه که در قسمت قبل اشاره شد، با توجه به رندوم بودن نسبی حرکت ذرات باردار و نزدیک بودن مقادیر فشار و ولتاژی که دزیمتری اشعه ایکس در آن‌ها انجام شد (که این نزدیک

بودن مقادیر به دلیل محدودیت‌هایی در دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده می‌باشد)، نظم مشخصی در رفتار نمودار دز جذبی به ازای افزایش یا کاهش فشار و ولتاژ مورد نظر مشاهده نشد. آزمایشات برای فشار و ولتاژهای بیان شده برای دزیترهای خارج از محفظه تخلیه انجام شد. دزیترها با همان آرایش قبلی این بار از بیرون روی بدنه محفظه قرار گرفتند. با قرار دادن دزیترها در قرائت‌گر، نتیجه حاصل شد که دز جذبی اشعه ایکس در خارج از محفظه تخلیه الکتریکی تقریباً برابر با صفر است. قرائت‌گر دزیترها در این حالت دز جذبی توسط دزیترها را تقریباً برابر با تابش زمینه نشان داد.

۵-۴ بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی، بیشترین مقدار دز جذبی توسط دزیترها در ارتفاع بالای سر آند یعنی در محل قرار گرفتن پینچ می‌باشد. بنا بر نتایج حاصل از تجربه این‌گونه دریافت می‌شود که توزیع زاویه‌ای دز جذبی اشعه ایکس در زاویه‌های صفر تا ۹۰ درجه ناهمسانگرد است و مقدار آن در زاویه‌های صفر و یا ۹۰ درجه شدت می‌گیرد. علت این افزایش دز حضور بازوهای دستگاه پیش‌بینی می‌شود. هم‌چنین دز جذبی در ارتفاع بین ۱۴ تا ۱۸ سانتی‌متر در راستای موازی با محور Z ، که حرکت الکترون‌ها بعد از تشکیل پینچ دچار تغییر مسیر می‌شود، افزایش می‌یابد. در نهایت رفتار ذرات باردار در محیط پلاسما و در لحظه تشکیل پینچ و بعد از آن به صورت فرایندی رندوم بوده و به دنبال آن هیچ قطعیتی در مورد رفتار شدت دز جذبی وجود ندارد.

تفاوتی که در نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربه مشاهده می‌شود را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در انجام آزمایشات با توجه به حرکت ذرات باردار میدان الکتریکی و در نتیجه این میدان، جریان الکتریکی به وجود می‌آید. این جریان باعث تولید یک میدان مغناطیسی متغیر در محیط پلاسما شده و از این جهت سرعت حرکت ذرات باردار را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با تغییر حرکت ذرات باردار دز

اشعه ایکس حاصل از تابش ترمزی تغییر می‌کند. اما در شبیه‌سازی از کدی استفاده شده که قابلیت تعریف محیط پلاسما و میدان الکترومغناطیسی موجود در آن وجود ندارد. بنابراین تفاوتی در نتایج حاصل از تجربه و نتایج تئوری مشهود است. در واقع نتایج بدست آمده توسط شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن ولتاژ بالا که عامل به وجود آمدن میدان الکترومغناطیسی است، حاصل شده‌اند.

[۱] J.W. mather, "dense Plasma focus, methods of experimental physics"; academic press, pp.187. (1971)

[۲] M. Niknam Sharak, S. Goudarzi, A. Raeisdana, M. Jafarabadi, " Numerical Analysis of Amirkabir Plasma focus (APF) Device for Neon and Argon Gases". Energies. (2012)

[۳] رستمی فرد. د. د، تفرشی. م، نصیری. ع، "بررسی اشعه ایکس نرم دستگاه پلاسمای کانونی دنا با

استفاده از پردازش تصویر دوربین روزنه سوزنی"، کنفرانس فیزیک ایران، (۱۳۹۰)

[۴] L. Mahe, " soft x-rays from compact plasma focus", phd Thesis, NIE/NTU (2000)

[۵] Y. Yamada, Y. Kitagawa and Yokoyama, "High energy deuterons beam generated by a plasma focus device" J. Appl. Phys. , 58 , 188. (1985)

[۶] A.I. Morozov, "Introduction to plasma dynamics". (2012)

[۷] F.F. Chen, "Introduction to plasma physics and controlled fusion", plasma physics,. (1984)

[۸] www.partopayesh.com/abot-TLD.html.

[۹] نیکلاس سولفانی دیس، ۱۳۷۱، اندازه گیری و آشکارسازی تابش های هسته ای، رحیم کوهی،

انتشارات کتابستان مشهد

[۱۰] G. M. El- Aragi, "Detection of X-ray radiations from low energy focus plasma using thermoluminescence dosimeter TLD-500A", Journal Fusion energ. (2016)

- [۱۱] G.R. Etaati, R.Amrollahi, M. Habibi, Kh. Mohammadi, R. Baghdadi, A. Roomi, “Study of the soft and hard X-ray emitted by APF plasma focus device in different pressures”, Journal Fusion energ. (2010)
- [۱۲] M.D. Baharani, M. Habibi, Kh. Mohammadi, “Three dimensional angular distributions of X-rays in a 4kj plasma focus device for different anode tips using TLD-100 dosimeters”, Contrib. plasma phys. 54, no. 9, 749-755. (2014)
- [۱۳] کنت اس.کرین، ۱۳۷۹، فیزیک جدید، منیژه رهبر، بهرام معلمی، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران
- [۱۴] A. Kanani, M.N. Nasrabadi, B. Shirani and I. jabbari, “Hard X-ray dose intensity and spatial distribution in a plasma focus device using thermoluminescence dosimeters” Pramana journal of physics, vol. 85, No. 1, p.p. 149-159. (2015)
- [۱۵] <https://radiopaedia.org/articles/thermoluminescent-dosimeter>
- [۱۶] Y. Kato, S. H. Be,” Generation of soft x rays using a rare gas-hydrogen plasma focus and its application to x-ray lithography” American Institute of Physics. (1986)
- [۱۷] N.V. Filippov, T.I. Filippova. and V.P. Vinogradov, “Dense high-temperature plasma in a non-cylindrical Z-pinch compression” Nucl. Fusion, Suppl . (1962)
- [۱۸] J.W Mather, “Formation of a high-density deuterium plasma focus” The physics of fluids, 8, 2, pp 366-377. (1965)
- [۱۹] L. Michel, K. Schonbach and H. Fisher, “ Neutron emission from small 1-Kj plasma focus” Appl. Phys. Lett. , 24, 57. (1974)

- [٢٠] S. Lee, P. Lee, G. Zhang, A. Serban, L. Mahe, X. Feng, S.V. Springham, C. Selvam, V. Kudryashov and T. K. Wong, “application of plasma focus as a source of high energy electron” Singap. J. phys., 173, 276. (2003)
- [٢١] A. Donges, G. Herziger, H. Krompholz, F. Ruhal and K. Schonbach, “The breakdown phase in a coaxial plasma gun” phys. Lett. 76 A, 391. (1980)
- [٢٢] H. Krompholz, W. Neff, F. Ruhl, K. Schonbach and G. Herizger, “Formation of the plasma layer in a plasma focus device” phys. Lett. 77 A, 246. (1980)
- [٢٣] M. Zakaullah, I. Ahmad, A. Omar, G. murtaza and M.M. bag, “Effects of anode shape on plasma focus operation with argon” plasma source. Sci. Tech, 5, 544. (1980)
- [٢٤] J.N. Feuges, “ The influence of the insulator surface in the plasma focus behavior” J. Appl. Phys. 66, 3467. (1989)
- [٢٥] M.A. Mohammadi dorbash, “laser shadiwgraphic study on plasma focus device”, PhD thesis, (2009)
- [٢٦] H. Herold, A. Juzykiewicz , M. Sadowski and H. Schmidt, “Experiment whith Poseidon as a plasma focus facility” Nucl. Fusion, 29 1255. (1989)
- [٢٧] Y.H. chen and S.Lee, “coaxial plasma gun in mod 1 operation” International journal of Electronics, 35, 3, pp 341-352. (1973)
- [٢٨] A. Bernard, A. coudeville, A. Jolas, J. Launspach, and J. De Mascureau, “ Experimentan studies of the plasma focus and evidence for nonthermal processes” The physics of fluids, 18, 180. (1975)

- [۲۹] Serban, Adrian, PhD thesis, “ Anode geometry and focus characteristics”, Nanyang Technological University. (1995)
- [۳۰] S. Lee, “Energy balance and the radius of electromagnetically pinched plasma columns” plasma phys, 20, 571. (1983)
- [۳۱] T.Y. Tou, PhD thesis, Univ. of Malaya, Malayasia,. (1986)
- [۳۲] M. Habibi; “Two hump-shaped angular distributions of neutrons and soft X-rays in a small plasma focus device” Applied Radiation and Isotopes 133. 95-99. (2018)
- [۳۳] J.W. Shearer, “contraction of Zpinches actuated by radiation losses” phys. Fluids, 19, 1426. (1976)
- [۳۴] H.r. Yousefi. Y.n. , h. ito and K. masugata, “characteristic observation of the ion beams in the plasma focus device” plasma and fusion research: regular articles.vol. 2 : p.p.s 1084. (2007)
- [۳۵] H.Kellyy, A. leponey, A. M’arquezy, D. Lamasz and C. Oviedox, “coating on metallic samples produced by a small energy plasma focus” plasma sources Sci. technol. 5 704-709. Printed in the UK. (1996)
- [۳۶] M. Omrani, M. Habibi, R. Amrollaho and A. Khosravi, “improvement of corrosion and electrical conductivity of 3161 stainless steel as bipolar plate by tin nanoparticle implantation using plasma focus” international journal of hydrogen energy 37 14676-14686. (2012)
- [۳۷] R.L. Gullickson and R.H. Barlett, in “Advances in X-Ray Analysis”, edited by W.L. Pickles, vol. 18, p. 184, plenum press, New York, (1974)
- [۳۸] M.P. Srivastav. S.R. Mohanty, S. Annapoorni, and R.W. Rawata, “Diode like behavior of an ion irradiated polyaniline film” physics Letters A, 215, 1-2, pp 63-68. (1996)
- [۳۹] R.S. Rawata, M.P. Srivastava, S. Tandon and A. Mansingh, “Crystallization of an amorphous lead zirconate titanate thin film with a

debs-plasma-focus device” American physical society, 47, 9, pp 4858.
(1993)

[۴۰] D.J. Elliott microlithography, process technology for IC fabrication,
new York: mcgraw. Hill. (1986)

[۴۱] s. Hussian and et al (2004), “low energy plasma focus as an intense
Xray source for radiography” plasma science and technology, 6(3): p.
2296.

[۴۲] V. Raspa, et al (2004). “plasma focus as a powerfull hard X-ray source
for ultrafast imaging of moving metallic objects”. Scielo. P.1696-1699

[۴۳] م. خادم. ۲۳ آبان ۱۳۹۴، شیشه ضد آتش (پیرکس)، Javan-irani.blog.ir

[۴۴] <https://www.tala.ir>

[۴۵] <https://radiopaedia.org/articles/thermoluminescent-dosimeter>

[۴۶] ج. شریفزاده. " بررسی طول عایق‌ها بر انرژی اشعه ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای

کانونی " دانشگاه صنعتی شاهرود. شهریور ۱۳۹۴

[۴۷] الف. محمودی. "طراحی و ساخت فانتوم ژل پلیمر MAGIC و بررسی اثر چیدمان نانو ذرات

طلا بر دز جذبی پرتوهای گاما با انرژی کمتر از ۱ MeV " دانشگاه صنعتی شاهرود. شهریور ۱۳۹۷

Abstract

One of the best sources for fossil fuel replacement is the energy from fusion reactions .. Focus plasma devices were developed in order to achieve this energy and to provide the appropriate conditions for these reactions. these devices are a very good source for producing x - ray pulse, electrons, ion, and neutrons. Focal plasma devices have many applications in industry, medicine and so on due to pulsed X-rays .

The main purpose of this thesis is the dosimetry of x - ray emitted from the shahrood university plasma focus (SHUPF), using nitrogen gas at different pressures and voltages by thermoluminescence (TLD) dosimeters, in both experimental and simulated methods . the experimental experiments were simulated by monte carlo method and by MCNPX code.

After simulations, the results showed that the highest amount of absorbed dose by the dosimeters was higher in the height of the anode, where pinch was located. according to the experimental results, the maximum absorbed dose in the height range is related to the direction of movement of the electrons after the pinch formation as well as the angles of the device arms. also, the absorption dose of X-rays at different angles was anisotropic and the dose outside the discharge chamber was practically zero and there was only background radiation outside the chamber. The difference between the results of the experiment and the simulation is justified by the experience of the electromagnetic field the motion of the charge affects the velocity of the electrons and then their acceleration, and as a result of the change in the motion of the electrons, the X-rays produced by the radiation brake are variable. but in the simulation with regard to the code used, there is no possibility of defining the electromagnetic field, and so the theoretical results have been obtained without considering the field of electromagnetic variable.

Keywords: Focus plasma, Monte Carlo simulation, MCNPX code, Thermoluminescence dosimeters, Absorbed dose, X-ray



#Shahrood University of
#Technology

Faculty of Physics and nuclear engineering

M.Sc. Thesis in nuclear

X-Ray Dosimetry of Plasma Focus Device of Shahrood University of Technology at different pressures and voltages

By: Raana Noori

Supervisor:

Dr Hossein Tavakoli Anbaran

Dr Mehdi Momeni

September 2019