

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

تأثیر نوع گاز بر دزیمتری پرتوهای ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شاهرود

نگارنده: حمیدرضا بردبار

اساتید راهنما

دکتر حسین توکلی عنبران

دکتر مهدی مؤمنی

شهریور ۹۸

تقدیم اثر

سپاس و ستایش خدای را که آثار قدرت او بر چهره روز روشن تابان است. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم، به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند و همچنین برادرانم که در سختی‌های زندگی همواره یآوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند، تقدیم می‌نمایم. امیدوارم قادر به درک زیبایی‌های وجودشان باشم.

شکر و قدردانی

بدون شک مقام و منزلت معلم، بالاتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه او، با زبان قاصر و دست ناتوان چیزی بنگاریم. از اساتید صبور و شایسته، جناب آقای دکتر حسین توکلی عنبران و دکتر مهدی مؤمنی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از تمامی اساتید بزرگواری که در طی این سالیان، علم و انسانیت را به بنده آموختند و دوستانی که در این راه مایه دلگرمی و آسایشم بوده‌اند، تقدی و تشکر می‌نمایم و از خداوند منان سلامتی و موفقیت را برای آنان طلب می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب حمیدرضا بردبار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه تأثیر نوع گاز بر دزیمتری پرتوهای ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شاهرود تحت راهنمایی دکتر حسین توکلی عنبران 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

امروزه با توسعه علم، بشر به تکنیک‌های جدید برای تحقیق و تفحص نیاز دارد. از اشعه ایکس می‌توان به عنوان یک ابزار قدرتمند در زمینه‌های متنوعی از جمله پزشکی، مهندسی، نجوم، شیمی و ... استفاده کرد. اشعه ایکس نوعی تابش الکترومغناطیسی است که دانشمندان را به مطالعه و تحقیق در خصوص کاربردهای آن ترغیب و تشویق کرد. از این رو به بررسی تولید و خصوصیات اشعه ایکس می‌پردازیم. دستگاه پلاسمای کانونی یکی از منابع تولید اشعه ایکس می‌باشد. برای دستیابی به انرژی ناشی از واکنش‌های همجوشی هسته‌ای و ایجاد شرایط مناسب برای این واکنش‌ها نیاز به ساخت دستگاه‌های پلاسمای کانونی ایجاد شد که به عنوان یک مولد پالسی پرتو ایکس، نوترون و ذرات باردار سال‌هاست که در مراکز تحقیقاتی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تولید پرتو ایکس و نوترون در این دستگاه مستلزم وقوع پینچ در سیستم است. بهترین بهره از محصولات تولیدی دستگاه زمانی حاصل می‌شود که علاوه بر هم‌زمانی رخداد پینچ و بیشینه جریان، پینچی متقارن و تکین در سیستم ایجاد شود. این دستگاه و گسیل اشعه ایکس از آن مزیت‌هایی دارد که موجب فراوانی کاربردهای این دستگاه می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از بازده بالا، هزینه کم، نگهداری آسان و پالسی بودن گسیل اشعه ایکس از این دستگاه.

در این پژوهش به بررسی تأثیر نوع گاز بر دز پرتو ایکس انتشار یافته در دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از آشکارسازهای گرمایی (TLD) به صورت تجربی و نظری می‌پردازیم. همچنین پارامتر زمان پینچ در فشارها و ولتاژها و گازهای مختلف بررسی شد. تحلیل داده‌ها و نمودارها نشان از افزایش زمان پینچ با افزایش فشار و کاهش زمان پینچ با افزایش ولتاژ دارد. طبق داده‌های بدست آمده زمان پینچ در فشار و ولتاژ مشابه هنگام انجام آزمایش با گاز آرگون بیشتر از هنگام استفاده از گاز کاری نیتروژن ثبت شد.

اندازه‌گیری تجربی دز جذبی در نقاط مختلف و محاسبات دز جذبی آشکارسازها به صورت نظری به روش مونت‌کارلو با استفاده از کد MCNPX انجام شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که بیشترین پرتو ایکس انتشار یافته در محدوده ارتفاع نوک الکترودها می‌باشد که این پدیده با نتایج شبیه‌سازی در توافق است. همچنین دز پرتو ایکس گسیل شده هنگام استفاده از گاز نیتروژن بیشتر است که این نیز با نتایج شبیه‌سازی مطابقت دارد. تفاوت این نمودار با نمودار متناظر با داده‌های شبیه‌سازی در شدت افت دز پرتو با فاصله گرفتن از محدوده نوک الکترودها می‌باشد که این بدلیل عدم توانایی شبیه‌سازی نیروهای الکترومغناطیسی و پلازما در نرم‌افزار MCNPX است.

نتایج تجربی حاصل از بررسی توزیع زاویه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین پرتو ایکس در زاویه ۳۰ درجه و در فاصله ۶ سانتی متری از محور آند انتشار می‌یابد و مقدار دز ناهمسانگرد می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که با افزایش فاصله از چشمه، دز جذبی کاهش می‌یابد. همچنین مقدار دز

جذبی (تجربی) آشکارسازها در بیرون محفظه در حد تابش زمینه (نزدیک به صفر) و در شبیه‌سازی صفر ثبت شد.

کلمات کلیدی: دستگاه پلاسمای کانونی، زمان پینچ، پرتو ایکس، دز جذبی، TLD، شبیه‌سازی مونت کارلو

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- "مطالعه تأثیر نوع گاز کاری بر زمان تشکیل پینچ و شبیه-سازی دزیمتری پرتو ایکس به روش مونت-کارلو در دستگاه پلاسمای کانونی". حمیدرضا بردبار، مهدی مؤمنی، حسین توکلی عنبران، رعنا نوری. هفتمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما. دانشگاه صنعتی شاهرود. تیر ۱۳۹۸

فهرست مطالب

ز	فهرست جداول
ح	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: پلاسما و دستگاه پلاسمای کانونی
۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ معرفی پلاسما.....
۴	۳-۱ پارامترهای پلاسما.....
۴	۱-۳-۱ دما.....
۵	۲-۳-۱ حفاظ دبای.....
۶	۳-۳-۱ فرکانس پلاسما.....
۶	۴-۱ معیارهای پلاسما.....
۶	۵-۱ اثر تنگش.....
۸	۶-۱ پارامترهای تأثیرگذار بر تنگش.....
۸	۱-۶-۱ خازن.....
۹	۲-۶-۱ اثر ولتاژ.....
۹	۳-۶-۱ مشخصات گاز.....
۱۰	۴-۶-۱ مشخصات هندسی دستگاه.....
۱۲	۵-۶-۱ کاتد.....
۱۲	۶-۶-۱ عایق.....
۱۴	۷-۱ پارامتر رانش.....

- ۸-۱ ناپایداری ها ۱۴
- ۱-۸-۱ ناپایداری سوسیسی ($m=0$) ۱۵
- ۲-۸-۱ ناپایداری تابی ($m=1$) ۱۵
- ۳-۸-۱ ناپایداری ریلی- تیلور ۱۶
- ۴-۸-۱ ناپایداری ریز و توربولانس ۱۷
- ۹-۱ معرفی دستگاه پلاسمای کانونی ۱۷
- ۱۰-۱ اصول عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی ۱۹
- ۱۱-۱ کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی ۲۰
- ۱۲-۱ دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی ۲۱
- ۱-۱۲-۱ فاز شکست ۲۲
- ۲-۱۲-۱ فاز محوری ۲۲
- ۳-۱۲-۱ فاز شعاعی ۲۳
- ۱۳-۱ محصورسازی پلاسما ۲۵
- ۱۴-۱ تأثیر فشار و ولتاژ بر زمان پینچ ۲۷
- ۱-۱۴-۱ تأثیر فشار ۲۷
- ۲-۱۴-۱ تأثیر ولتاژ ۲۸
- فصل ۲: پرتو ایکس و آشکارسازی آن** ۲۹
- ۱-۲ همجوئی هسته ای ۳۰
- ۲-۲ تابش ۳۱
- ۳-۲ پرتوها ۳۱
- ۱-۳-۲ پرتوهای باردار ۳۱
- ۲-۳-۲ پرتوهای بدون بار ۳۱

۴-۲ دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان چشمه پرتو ایکس..... ۳۱

۵-۲ پرتو ایکس و خصوصیات آن..... ۳۲

۶-۲ گسیل پرتو ایکس از دستگاه پلاسمای کانونی..... ۳۴

۷-۲ برهم کنش فوتون با ماده..... ۳۶

۸-۲ ضرایب تضعیف..... ۳۷

۹-۲ آشکارسازهای تابش..... ۳۸

۱۰-۲ آشکارسازهای ترمولومینسانس..... ۳۹

۱-۱۰-۲ تاریخچه..... ۳۹

۲-۱۰-۲ پدیده ترمولومینسانس..... ۳۹

۳-۱۰-۲ کاربردهای ترمولومینسانس..... ۴۲

۱۱-۲ یکاهای دز تابش..... ۴۲

۱۲-۲ حفاظت در برابر پرتوها..... ۴۳

۱۳-۲ اثرات فاصله و حفاظ..... ۴۴

۱-۱۳-۲ حفاظ گذاری در برابر پرتوهای ایکس..... ۴۵

فصل ۳: چیدمان آزمایش و ابزار اندازه گیری ۴۷

۱-۳ مقدمه..... ۴۸

۲-۳ ساختار کلی و چیدمان آزمایش..... ۴۸

۳-۳ مشخصات دستگاه..... ۴۸

۴-۳ سیستم تخلیه و دمش..... ۴۹

۱-۴-۳ محفظه خلأ..... ۴۹

۲-۴-۳ پمپ خلأ..... ۵۱

۳-۴-۳ فشارسنج..... ۵۲

۵۲	..... ۴-۴-۳ کپسول گاز و شیر سوزنی
۵۳	..... ۵-۳ سیستم تغذیه الکتریکی
۵۴	..... ۱-۵-۳ ترانسفوماتور
۵۴	..... ۲-۵-۳ بانک خازنی
۵۵	..... ۳-۵-۳ اسپارک گپ
۵۶	..... ۴-۵-۳ تریگر
۵۷	..... ۵-۵-۳ اتصال به زمین
۵۷	..... ۶-۳ سیستم تشخیصی
۵۸	..... ۱-۶-۳ اسیلوسکوپ
۵۸	..... ۲-۶-۳ پیچه رگوفسکی
۵۹	..... ۳-۶-۳ پروب ولتاژ
۶۰	..... ۷-۳ آشکارساز
۶۱	..... ۸-۳ سیستم خوانش کارت دزیمتر ترمولومینسانس
۶۲	..... ۳-۸-۱ خواندن قرص TLD
۶۳	..... ۹-۳ ویژگی های یک دزیمتر ایده آل
۶۵	فصل ۴: طراحی و شبیهسازی دستگاه پلاسمای کانونی و دزیمتری پرتو ایکس
۶۶	..... ۱-۴ مقدمه
۶۶	..... ۲-۴ تاریخچه کد MCNP
۶۷	..... ۳-۴ اجزاء فایل ورودی
۶۷	..... ۱-۳-۴ کارت سلول
۶۸	..... ۲-۳-۴ کارت سطوح
۶۸	..... ۳-۳-۴ کارت داده

۴-۴ مواد و روش کار..... ۷۱

۴-۵ اندازه گیری دز پرتو ایکس..... ۷۲

۴-۵-۱ تأثیر ارتفاع بر دز پرتو ایکس درون محفظه..... ۷۲

۴-۵-۲ مقایسه دز پرتو ایکس در فواصل مختلف از محور آند درون محفظه..... ۷۳

۴-۵-۳ مقایسه دز پرتو ایکس در زوایای مختلف درون محفظه برای دو نوع گاز..... ۷۵

فصل ۵: تحلیل و نتایج دز تجربی ۷۷

۵-۱ مقدمه..... ۷۸

۵-۲ تأثیر فشار و ولتاژ بر زمان پینچ برای گاز آرگون..... ۷۹

۵-۲-۱ تأثیر فشار..... ۷۹

۵-۲-۲ تأثیر ولتاژ..... ۸۰

۵-۳ تأثیر فشار و ولتاژ بر زمان پینچ برای گاز نیتروژن..... ۸۱

۵-۳-۱ تأثیر ولتاژ..... ۸۲

۵-۴ تأثیر نوع گاز بر زمان پینچ..... ۸۲

۵-۴-۱ تأثیر نوع گاز بر زمان پینچ در فشارهای متفاوت..... ۸۳

۵-۴-۲ تأثیر نوع گاز بر زمان پینچ در ولتاژهای متفاوت..... ۸۴

۵-۵ اندازه گیری دز پرتو ایکس..... ۸۶

۵-۵-۱ مقایسه دز پرتو ایکس در ارتفاع های متفاوت درون محفظه برای دو نوع گاز..... ۸۶

۵-۵-۲ اندازه گیری و مقایسه دز پرتو ایکس در فواصل و زوایای مختلف برای دو نوع گاز

(درون محفظه)..... ۸۷

۵-۶ نتیجه گیری..... ۸۹

فهرست جداول

جدول ۱-۱ : دستگاه های گداخت.....	۲۷
جدول ۱-۲ : عوامل کیفیت.....	۴۳
جدول ۱-۳ : ویژگی های دستگاه پلاسمای کانونی.....	۴۹
جدول ۱-۴ : چگالی مواد در فایل ورودی.....	۶۷
جدول ۱-۵ : مشخصات گازها.....	۸۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ : حفاظ دبای ۵
- شکل ۲-۱ : ساختار انتهای آند ۱۲
- شکل ۳-۱ : ناپایداری سوسیسی ۱۵
- شکل ۴-۱ : ناپایداری تابی ۱۶
- شکل ۵-۱ : ناپایداری ریلی-تیلور ۱۷
- شکل ۶-۱ : دستگاه پلاسمای کانونی ۱۸
- شکل ۱-۲ : طیف الکترومغناطیسی تابش ۳۳
- شکل ۲-۲ : پینچ پلاسمای ۳۴
- شکل ۳-۲ : گذارهای آزاد-آزاد ۳۶
- شکل ۴-۲ : تابش آشکار ساز ۴۱
- شکل ۱-۳ : ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود ۴۸
- شکل ۲-۳ : محفظه خلأ ۵۰
- شکل ۳-۳ : الکترودها ۵۰
- شکل ۴-۳ : پمپ خلأ ۵۱
- شکل ۵-۳ : فشار سنج ۵۲
- شکل ۶-۳ : گیج پیرانی ۵۲
- شکل ۷-۳ : کپسولهای گاز مورد استفاده ۵۳
- شکل ۸-۳ : ترانسفورماتور ۵۴
- شکل ۹-۳ : بانک خازنی ۵۵
- شکل ۱۰-۳ : اسپارک گپ ۵۶
- شکل ۱۱-۳ : اتصال به زمین ۵۷
- شکل ۱۲-۳ : نمایی از اسیلوسکوپ مدل GPS-1204C ۵۸
- شکل ۱۳-۳ : ساختار پیچه روگوفسکی ۵۹
- شکل ۱۴-۳ : پروب ولتاژ ۶۰
- شکل ۱۵-۳ : قرصهای TLD مورد استفاده در آزمایش ها ۶۱
- شکل ۱۶-۳ : سیستم خوانش دزیمتر TLD در آزمایشگاه ۶۱
- شکل ۱۷-۳ : منحنی درخشندگی خروجی از سیستم قرائتگر ۶۳
- شکل ۱-۴ : ساختار فایل ورودی ۶۷
- شکل ۲-۴ : مدل شبیه سازی خروجی از کد MCNPX دستگاه در دو بعد ۷۱
- شکل ۳-۴ : مدل شبیه سازی خروجی از کد MCNPX دستگاه در سه بعد ۷۲

- شکل ۴-۴ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در ارتفاع های متفاوت ۷۳
- شکل ۵-۴ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه صفر درجه ۷۴
- شکل ۶-۴ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۳۰ درجه ۷۴
- شکل ۷-۴ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۶۰ درجه ۷۴
- شکل ۸-۴ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۹۰ درجه ۷۵
- شکل ۹-۴ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۲cm ۷۵
- شکل ۱۰-۴ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۴cm ۷۶
- شکل ۱۱-۴ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصل ۶ cm ۷۶
- شکل ۱-۵ : منحنی مشتق جریان ۷۸
- شکل ۲-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ثابت برای گاز آرگون ۷۹
- شکل ۳-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ثابت برای گاز آرگون ۸۰
- شکل ۴-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ثابت برای گاز نیتروژن ۸۱
- شکل ۵-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ثابت برای گاز آرگون ۸۲
- شکل ۶-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ۹ KV برای دو نوع گاز ۸۳
- شکل ۷-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ۱۰ KV برای دو نوع گاز ۸۴
- شکل ۸-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ۱۱ کیلوولت ۸۴
- شکل ۹-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ۸/۰ Torr برای دو نوع گاز ۸۵
- شکل ۱۰-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ۱ Torr برای دو نوع گاز ۸۵
- شکل ۱۱-۵ : نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ۲/۱ Torr برای دو نوع گاز ۸۵
- شکل ۱۲-۵ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در ارتفاع های متفاوت ۸۶
- شکل ۱۳-۵ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه صفر درجه ۸۷
- شکل ۱۴-۵ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۳۰ درجه ۸۷
- شکل ۱۵-۵ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۶۰ درجه ۸۸
- شکل ۱۶-۵ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۹۰ درجه ۸۸
- شکل ۱۷-۵ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۲cm ۸۸
- شکل ۱۸-۵ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۴cm ۸۹
- شکل ۱۹-۵ : نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصل ۶ cm ۸۹

فصل ۱ : پلاساود دستگاه پلاسامای کانونی

۱-۱ مقدمه

امروزه با توسعه علم، بشر به تکنیک‌های جدید برای تحقیق و تفحص نیاز دارد. یکی از مسائل مهم روز دنیا، آگاهی از ماهیت و ساختار درونی اجسام می‌باشد. از اشعه ایکس^۱ می‌توان به عنوان یک ابزار قدرتمند در این زمینه استفاده کرد. اشعه ایکس نوعی تابش الکترومغناطیسی است که دانشمندان را به مطالعه و تحقیق در خصوص کاربردهای آن ترغیب و تشویق کرد. امروزه از اشعه ایکس در زمینه های متنوعی از جمله پزشکی، مهندسی، نجوم، شیمی و ... استفاده می‌شود. از این رو به بررسی تولید و خصوصیات اشعه ایکس می‌پردازیم. دستگاه پلاسمای کانونی^۲ یکی از منابع تولید اشعه ایکس می‌باشد. این دستگاه و گسیل اشعه ایکس از آن مزیت‌هایی دارد که موجب فراوانی کاربردهای این دستگاه می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از هزینه کم، بازده بالا، نگهداری آسان و پالسی بودن گسیل اشعه ایکس از این دستگاه.

در فصل اول این پایان نامه به معرفی پلاسمای کانونی می‌پردازیم و در فصل دوم اشعه ایکس و خصوصیات آن و آشکارسازی و حفاظت در برابر این پرتو را بررسی می‌کنیم. در فصل سوم تجهیزات آزمایشگاهی را معرفی کرده و به توضیح نحوه انجام آزمایش خواهیم پرداخت. در فصل چهارم به توضیح جزئیات شبیه‌سازی به روش مونت کارلو^۳ پرداخته و متن فایل ورودی شرح داده شده است. فصل پنجم به تجزیه و تحلیل داده‌ها و نمودارها و تحلیل نتایج حاصل شده از آزمایش اختصاص دارد.

۱-۲ معرفی پلاسمای

پلاسمای به عنوان حالت چهارم ماده در واقع گازی شبه خنثی است که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد و تقریباً ۹۹٪ از جهان را احاطه نموده است. وقتی بدانیم که درون ستاره‌ها و جو آن‌ها و فواصل بین آن‌ها توسط ابرهایی گازی پر شده است، در آن صورت این بیان را دور از تصور نمی‌دانیم [۱]. پلاسمای در زندگی روزمره ما به چند نمونه محدود می‌شود: آذرخش، شفق‌های شمالی، گاز داخل لامپ فلئورسان و یونیدگی مختصری در گاز خروجی موشک به نظر می‌رسد که آن ۱٪ از جهان

X-ray^۱
Plasma Focus Device^۲
Monte Carlo Method^۳

هستی که پلاسما نیست زندگی ما را شامل می‌شود. دلیل این امر را از معادله ساها^۴ که میزان یونیدگی یک گاز در حال تعادل گرمایی را پیش‌بینی می‌کند می‌توان دریافت:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-\frac{U_i}{KT}} \quad 1-1$$

در اینجا n_i و n_n بترتیب چگالی (تعداد بر m^3) اتم‌های یونیده و اتم‌های خنثی، T دمای گاز بر حسب کلونین، K ثابت بولتزمن و U_i انرژی یونش گاز (یعنی انرژی لازم برای جدا کردن بیرونی‌ترین الکترون از اتم بر حسب erg است) است. یک محاسبه ساده برای هوا در دمای اتاق، میزان یونش نسبی را از مرتبه 10^{-122} که فوق‌العاده کوچک است و لذا پلاسمایی تشکیل نمی‌شود. برای داشتن پلاسما باید دما افزایش یابد و این مسأله را تأیید می‌کند که حیات نمی‌تواند با پلاسما، لافل پلاسمایی که مورد نظر ما است وجود داشته باشد. از طرفی می‌دانیم که یک گاز دارای انرژی‌های گرمایی گسترده‌ای می‌باشد و یک اتم هنگامی یونیده می‌شود که بطور تصادفی متحمل برخوردی شود که در آن انرژی به اندازه کافی زیاد باشد که یک الکترون از آن جدا شود. در یک گاز سرد این برخوردها به ندرت اتفاق می‌افتند و از طرفی دیگر وقتی اتمی یونیده می‌شود، تا زمانی که به الکترونی می‌رسد باردار باقی می‌ماند و سپس به احتمال زیاد با آن ترکیب شده و دوباره خنثی می‌شود. واضح است که آهنگ بازترکیب به چگالی الکترون‌ها که برابر با n_i است، بستگی دارد. لذا وجود پلاسما در محیط‌های میان ستاره‌ای نسبت به زمین، به علت کم بودن n_i و در نتیجه آهنگ کم بازترکیب، بیشتر است [۲].

از لحاظ تاریخی در دهه ۱۹۳۰ یک شیمیدان و مهندس جوان به نام ایروینگ لانگموئر^۵ در حالی که مشغول به کار در شرکت جنرال الکتریک بود، مجذوب پدیده تخلیه الکتریکی روی گازها شد و برای اولین بار نام پلاسما را از علم پزشکی قرض گرفت! زیرا پلاسما در علم پزشکی ماده‌ای است ناپایدار، که تقریباً عمر آن شبیه به مواد یونیزه شده است.

واژه پلاسما به حالت چهارم ماده بعد از حالت‌های جامد، مایع و گاز اشاره دارد که با افزایش دما به دلیل افزایش انرژی بین مولکولی، حالت ماده تغییر کرده و گازی از اتم‌ها شکل می‌گیرد که ذرات باردار، الکترون‌ها و یون‌های مثبت آزادانه در آن حرکت می‌کنند، این حالت از ماده را پلاسما می‌گویند [۳].

تعریف دیگری نیز برای پلاسما وجود دارد، پلاسما گاز شبه خنثی، متشکل از ذرات باردار و خنثی است که رفتار دسته جمعی از خود ارائه می‌دهد؛ شبه خنثی بودن پلاسما یعنی آنقدر خنثی که بتوان چگالی الکترون و یون و پلاسما را تقریباً با هم برابر در نظر گرفت ($n=n_n=n_i$) نه آنقدر خنثی که تمام

Saha equation^۴
Irving Langmuir^۵

نیروهای الکترومغناطیسی مورد توجه حذف شوند، و منظور از رفتار دسته جمعی حرکاتی است که نه تنها به شرایط موضعی بلکه به حالت پلاسما در مناطق دور نیز بستگی دارد.

نیروهای وارد بر یک گاز خنثی مثلاً هوا را در نظر بگیرید، چون مولکول‌های آن خنثی هستند هیچ نیروی الکترومغناطیسی خالصی بر آنها وارد نمی‌شود و مولکول‌ها بدون مزاحمت حرکت می‌کنند تا با مولکول دیگر برخورد کنند، همین برخوردها هستند که حرکت ذرات را تعیین می‌کند اما پلاسما دارای ذرات باردار است که با حرکتشان می‌توانند تجمع موضعی بارهای مثبت و منفی ایجاد کنند که موجب پیدایش میدان الکتریکی می‌شود و با حرکت بارها، جریان و در نتیجه میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود؛ این میدان‌ها بر روی حرکت ذرات باردار در نقاط دور نیز تاثیر می‌گذارد [۴]. پلاسماهای موجود را بر اساس منشأ تولید می‌توان به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم کرد:

- پلاسما طبیعی: تقریباً ۹۹٪ جهان را پلاسما تشکیل می‌دهد، بطور کلی برای پلاسمای طبیعی می‌توان بادهای خورشیدی، رعد و برق، کمر بند وان آلن اطراف کره زمین، نبولا (ابراهای عظیم مابین فواصل ستارگان راه شیری) و یونسفر زمین [۵] را نام برد.
- پلاسما مصنوعی: تولید و نگهداری پلاسما در آزمایشگاه و دستگاه‌های صنعتی کار چندان ساده‌ای نیست. بشر در تولید پلاسماهای آزمایشگاهی برای کاربردهای مختلف از جمله احتمال استفاده در همجوشی هسته‌ای، سنتز حرارتی هسته‌ای، علوم الکترونیک، لیزر و ... به موفقیت‌های چشمگیری دست یافته است. اکثر سخت افزارهای کامپیوتری و همچنین تلویزیون‌هایی با صفحه‌های بزرگ و بسیار نازک که امروزه بسیار مورد توجه مردم قرار گرفته‌اند بر اساس تکنولوژی پلاسما ساخته شده‌اند [۶].

۳-۱ پارامترهای پلاسما

۱-۳-۱ دما

همانطور که می‌دانیم دما به انرژی جنبشی ذرات و در نتیجه به سرعت آنها وابسته است. برای یک گاز در سه بعد می‌توان نوشت:

$$E_{av} = \frac{3}{2} kT \quad ۲-۱$$

با توجه به خطی بودن رابطه بین دما و انرژی در فیزیک پلاسما رایج است که دما را برحسب انرژی بیان کنند:

$$kT = 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

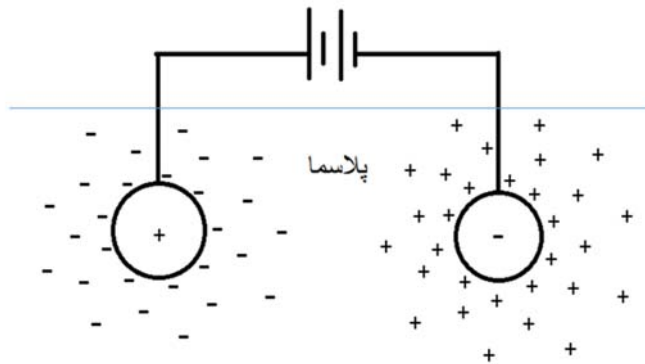
۳-۱

$$1 \text{ eV} \equiv 11600 \text{ K}$$

۴-۱

۱-۳-۲ حفاظ دبای

یکی از مشخصات اساسی رفتار پلاسما توانایی آن برای رفع پتانسیل‌های الکتریکی اعمال شده به آن است، این خاصیت به دلیل رفتار جمعی الکترون‌ها و یون‌ها است. با وارد کردن دو گلوله متصل به یک باتری، یک میدان الکتریکی درون پلاسما بوجود می‌آید. این گلوله‌ها بارهای مخالف خود را جذب می‌کنند و ابری از الکترون‌ها اطراف گلوله مثبت و ابری از یون‌ها اطراف گلوله منفی را می‌گیرند (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱: حفاظ دبای

اگر پلاسما سرد باشد و هیچ‌گونه حرکت حرارتی نداشته باشد مقدار بار ابر با مقدار بار گلوله برابر می‌شود و در این صورت حفاظ کامل خواهد بود؛ اما چنانچه دما متناهی باشد ذراتی که در لبه ابر قرار گرفته‌اند (جایی که میدان ضعیف است) انرژی لازم برای فرار از چاه پتانسیل الکتروستاتیک را بدست می‌آورند. پس لبه ابر در شعاعی قرار دارد که در آن انرژی پتانسیل تقریباً با انرژی حرارتی $k_B T$ ذرات برابر است در این صورت حفاظ کامل نیست. برای محاسبه ضخامت تقریبی این ابر از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_0 e^2} \right)^{1/2} \quad ۵-۱$$

λ_D طول دبای نامیده می‌شود.

۳-۳-۱ فرکانس پلاسما

اگر الکترون‌ها در یک توزیع یکنواخت یونی جابجا شوند میدان‌های الکتریکی در جهتی به وجود خواهند آمد که با کشاندن الکترون‌ها به مکان‌های نخستینشان خنثایی پلاسما را دوباره برگردانند، الکترون‌ها به دلیل لختی جلوتر می‌روند و حول مکان‌های تعادل خود با بسامد مشخصه‌ای که بسامد پلاسما نامیده می‌شود نوسان می‌کنند.

$$\omega_p = \frac{n_0 e^2}{m \epsilon_0} \quad ۶-۱$$

۴-۱ معیارهای پلاسما

برای اینکه یک گاز را پلاسما بنامیم باید دارای چندین ویژگی خاص باشد که در این بخش به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

شرط اول، اگر L ابعاد سیستم گازی و یونیده ما باشد، زمانی این سیستم می‌تواند پلاسما باشد که به قدر کافی چگال باشد که λ_D خیلی کوچکتر از L شود.

البته این تعریف زمانی معتبر است که ذرات در ابر باردار به تعداد کافی وجود داشته باشند واضح است که اگر دو یا چند ذره در محیط غلاف وجود داشته باشند، حفاظ دبابی از لحاظ آماری مفهوم معتبری نخواهد داشت. با استفاده از رابطه λ_D می‌توان تعداد ذرات را در کره دبابی محاسبه نمود:

$$N_D = \frac{4\pi n \lambda_D^3}{3} \quad ۷-۱$$

علاوه بر $L \gg \lambda_D$ ، رفتار جمعی ایجاب می‌کند که:

$$N_D \gg 1 \quad ۸-۱$$

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

۵-۱ اثر تنگش

تمایل یک جریان الکتریکی شدید به فشرده ماندن در جهت عرض، هنگام تخلیه پلاسما به اثر تنگش معروف است. عامل اصلی ایجاد تنگش برهم‌کنش جریان با میدان مغناطیسی خودش، یا به عبارت

دیگر نیروی جاذبه بین رشته‌های موازی جریان است. اثر تنگش اولین بار توسط بنت^۶ در سال ۱۹۳۲ مطرح شد. در یک دستگاه تخلیه الکتریکی شامل آند و کاتد و تقارن استوانه‌ای، با شروع تخلیه الکتریکی، جریان الکتریکی در امتداد محور استوانه به وجود می‌آید که چون محور را در امتداد z انتخاب کرده‌ایم چنین دستگاهی تنگش z نامیده می‌شود. جریانی که در این سیستم به وجود می‌آید تابع شعاع استوانه r است.

$$\mathbf{I}(\mathbf{r}) = 2\pi \int_0^r J_z r' dr' \quad 9-1$$

بنابراین جریان با دایره‌ای به شعاع r محصور شده است. J_z چگالی جریان محوری است که شکل متقارنی دارد. چنین جریانی میدان مغناطیسی سمتی مانند $B_\theta(r)$ القا می‌کند:

$$\mathbf{B}_\theta(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I(r)}{2\pi r} \quad 10-1$$

برهم‌کنش چگالی جریان J با میدان مغناطیسی سمتی، نیرویی شعاعی به سمت داخل ستون پلاسما تولید می‌کند:

$$\vec{\mathbf{F}} = \vec{\mathbf{J}} \times \vec{\mathbf{B}} \quad 11-1$$

که در دستگاه مختصات استوانه‌ای شکل آن به صورت زیر است:

$$\mathbf{F}_r = -J_z B_\theta \quad 12-1$$

این نیرو در نهایت ستون پلاسما را تا شعاع حداقل یا به عبارت دیگر شعاع تنگش متراکم می‌کند، بنابراین می‌توان گفت که شعاع پلاسما به شرطی که جریان از یک حد بحرانی بیشتر باشد تا یک شعاع حداقل که شعاع تنگش نامیده می‌شود کاهش می‌یابد. در اینجا می‌توان فشاری که به پلاسما وارد می‌شود را به روش زیر محاسبه نمود:

$$\mathbf{B}_\theta(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I(r)}{2\pi r} = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r' dr' \quad 13-1$$

از این معادله نتیجه می‌شود که:

$$\frac{\partial B}{\partial r} = -\frac{B(r)}{r} + \mu_0 J(r) \quad 14-1$$

از حذف $J(r)$ در معادلات بالا بدست می‌آوریم:

$$\mathbf{F} = \frac{B}{\mu_0} \frac{\partial B}{\partial r} - \frac{B^2}{\mu_0 r} \quad 15-1$$

برای این نیرو می توان یک فشار معادل، P_{eq} به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mathbf{F} = - \frac{\partial P}{\partial r} \quad ۱۶-۱$$

و سپس انتگرال بگیریم که منجر به رابطه زیر می شود:

$$P_{eq} = \frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{1}{\mu_0} \int_0^r \frac{B^2}{r} dr \quad ۱۷-۱$$

آنچه مخصوصاً مورد نظر ماست، فشار روی مرزهای عرض تخلیه است. به پیروی از پیشنهاد رزنبلات^۷ ما بررسی خود را به موردی که در آن رسانندگی زیاد است، یعنی موردی که در آن خطوط میدان مغناطیسی نمی توانند زیاد به داخل سیال رسانا نفوذ کنند، محدود می کنیم. در این مورد انتگرال بالا شامل هیچ سهمی از ناحیه تخلیه نیست. در مرز تخلیه $r=R$ فشار درست همان مقداری است که ما آن را فشار مغناطیسی P_m می نامیم.

$$P_m = \frac{B^2(r)}{2\mu_0} \quad ۱۸-۱$$

از معادله بالا واضح است که فشار مغناطیسی در ناحیه خارج یکنواخت ولی در داخل تخلیه صفر یا خیلی کوچک است. بنابراین اثر تنگش را می توان ناشی از ایجاد ناگهانی یک فشار مغناطیسی در ناحیه خارج از تخلیه دانست.

۶-۱ پارامترهای تأثیرگذار بر تنگش

مهم ترین پارامترهای قابل اندازه گیری در دستگاه پلاسمای کانونی جریان و ولتاژ مستقیم سیستم هستند. بررسی این سیگنال ها اطلاعات مفیدی در رابطه با دینامیک و عملکرد سیستم می دهد. کیفیت کانونی شدن در دستگاه پلاسمای کانونی با توجه به میزان فرورفتگی تنگش و شیب منفی آن در سیگنال مشتق جریان مشخص می شود. در ادامه مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر تنگش با تمرکز بر سیگنال جریان و مشتق آن مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد.

۱-۶-۱ خازن

اجزای هندسی دستگاه بر پایه میزان انرژی سیستم طراحی می شود. از ظرفیت، اندوکتانس و ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل خازن می توان به عنوان مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار بر انرژی سیستم و محاسبات

Marshal Rozenbluth^۱

مربوط به هندسه دستگاه نام برد. مطابق با رابطه زیر انتخاب خازنی با ظرفیت بالا و اندوکتانس پایین سبب افزایش جریان منتقل شده به ستون پلاسما می‌شود:

$$I = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad 19-1$$

با توجه به رابطه مستقیم جریان و ولتاژ اعمالی، استفاده از خازنی با ولتاژ کاری بالاتر سبب بهبود در عملکرد و بهره تابشی سیستم می‌شود. کاهش اندوکتانس سبب افزایش سرعت تخلیه انرژی و در نتیجه تخلیه‌ای همگن و یکنواخت می‌شود. برای کاهش اندوکتانس و یا افزایش ظرفیت خازن استفاده از چند خازن موازی مرسوم است. تنها مشکل در استفاده از این خازن‌ها هم‌زمانی تخلیه است [۹ و ۱۰].

۱-۶-۲ اثر ولتاژ

افزایش ولتاژ سبب افزایش دامنه جریان می‌شود. طبق رابطه بالا با ولتاژ در یک فشار مشخص، لایه جریان سریع‌تر طول آند را طی کرده و به بیشینه مقدار خود می‌رسد و زمان پینچ‌شدگی کاهش می‌یابد. افزایش ولتاژ سبب افزایش سرعت لایه جریان می‌شود. در ولتاژهای بالاتر، تنگش زودتر رخ می‌دهد (فاز محوری سریع‌تر به پایان می‌رسد) [۱۱ و ۱۲].

۱-۶-۳ مشخصات گاز

۱-۶-۳-۱ اثر فشار

برای بررسی اثر فشار بر زمان تنگش لازم است پارامترهای دیگر سیستم ثابت نگه داشته شود. با افزایش فشار، جریان تخلیه افزایش می‌یابد. در یک ولتاژ مشخص با افزایش فشار، اینرسی ناشی از جرم افزایش می‌یابد و بدین ترتیب سرعت حرکت لایه پلاسما کاهش پیدا می‌کند. کاهش سرعت لایه پلاسما از آهنگ افزایش اندوکتانس می‌کاهد و در نتیجه اندوکتانس سیستم نسبت به فشارهای پایین‌تر، کمتر خواهد بود و جریان سریع‌تر افزایش می‌یابد.

افزایش فشار سبب تأخیر در زمان وقوع فاز شعاعی خواهد شد به عبارت دیگر زمان فاز محوری افزایش می‌یابد، افزایش زمان فاز محوری و شعاعی بر اثر افزایش فشار با پارامتر حرکت قابل توضیح است. افزایش فشار سبب افزایش چگالی و در نتیجه کاهش پارامتر حرکت می‌شود. کاهش پارامتر حرکت

سبب کاهش سرعت پلاسما و در نهایت سبب افزایش زمان‌های مربوط به فاز محوری و شعاعی می‌شود.

افزایش ولتاژ سبب افزایش نیروی محرکه وارد بر ستون پلاسما می‌شود، در نتیجه پلاسما سریعتر حرکت می‌کند و زمان تنگش کاهش می‌یابد. افزایش فشار، افزایش اینرسی ناشی از جرم را به دنبال دارد و این امر سبب افزایش زمان پینچ می‌شود. در بیشینه جریان پیستون مغناطیسی قوی‌تر بوده و ستون پلاسما متراکم‌تر است [۱۳].

۱-۶-۳-۲ نوع گاز

با توجه به پارامتر حرکت در صورت ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، مهم‌ترین پارامتری که اثر نوع گاز را نشان می‌دهد، چگالی جرمی خواهد بود. حتی با یکسان گرفتن چگالی جرمی برای گازهای مختلف، باز هم در دینامیک دستگاه تفاوت‌هایی دیده خواهد شد، زیرا سایر ویژگی‌های گاز می‌توانند مؤثر واقع شوند.

۱-۶-۴ مشخصات هندسی دستگاه

۱-۶-۴-۱ طول آند

طول آند یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر تنگش پلاسما می‌باشد. بهترین تنگش‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که جریان در بیشینه مقدار خود باشد. از آنجا که لایه جریان برای رسیدن به سر آند باید طول آن را بپیماید، بهتر است فاز محوری در نزدیکی بیشینه جریان به پایان برسد. لذا برای محاسبه طول بهینه آند از زمان صعود پالس جریان استفاده می‌کنند. کوتاه بودن طول آند سبب می‌شود که تنگش خیلی زودتر از بیشینه جریان رخ دهد و انرژی کافی به پیستون مغناطیسی جهت تراکم مناسب ستون پلاسما منتقل نخواهد شد و اگر طول آند برای انرژی مشخص، بیشتر از طول بهینه باشد، تنگش بعد از بیشینه جریان رخ خواهد داد که در این حالت نیز انرژی کمتری به پیستون مغناطیسی منتقل خواهد شد.

۱-۶-۴-۲ شعاع آند

سرعت لایه جریان در فاز محوری و شعاعی به پارامتر حرکت و متناظر آن شعاع آند بستگی دارد. با افزایش پارامتر حرکت، میزان انرژی منتقل شده به ستون پلاسما نیز افزایش می‌یابد. پارامتر حرکت با شعاع آند رابطه عکس دارد و یکی از روش‌های انتقال انرژی بیشتر به پلاسما، کاهش شعاع آند است البته افزایش پارامتر حرکت، افزایش سرعت لایه جریان را بدنبال دارد اما برای سرعت لایه جریان در فاز شعاعی و محوری کران بالایی وجود دارد.

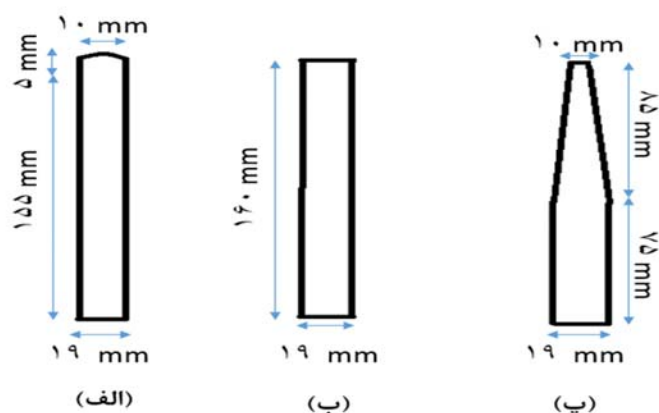
شعاع آند بر میزان تراکم شعاعی و کشیدگی محوری ستون پلاسما تاثیر می‌گذارد. بازه زمانی بین کمینه شعاع ستون پلاسما تا زمان بروز ناپایداری، زمان تنگش تعریف می‌شود. محاسبات و آزمایشات نشان می‌دهد زمان تراکم، زمان تنگش، کمینه شعاع ستون پلاسما و بیشینه کشیدگی ستون پلاسما به مقدار شعاع آند وابسته‌اند. شعاع آند یکی از پارامترهای مهم در وقوع و چگونگی تنگش است. پینچی مناسبتر است که بیشترین فشردگی و کشیدگی را داشته باشد. برای تراکم بیشتر ستون پلاسما باید شعاع آند را به حداقل ممکن رساند و از طرف دیگر برای افزایش کشیدگی و زمان تنگش، لازم است شعاع آند را افزایش داد که این دو شرط با هم محقق نمی‌شود. در نتیجه برای آند شعاع بهینه‌ای که توسط پارامتر حرکت مشخص می‌شود باید در نظر گرفت.

۱-۶-۴-۳ جنس آند

فشار بهینه دستگاه پلاسمای کانونی برای یک انرژی مشخص، به شدت به جنس مواد استفاده شده برای ساخت آند وابسته است. الکتروود مرکزی (آند) از جنس‌های متفاوتی چون گرافیت، آلومینیوم، تیتانیوم، آهن، مس، نقره و تنگستن ساخته می‌شود. در برخورد الکترون‌ها با سطح آند و همچنین به دلیل بالا بودن دما، ذرات از سطح آند کنده شده و بر سطح عایق نهشته می‌شود. این ناخالصی‌ها علاوه بر آنکه در تخلیه‌های بعدی وارد پلاسما می‌شوند، سبب افزایش جریان نشتی از سطح عایق خواهند شد. در بین الکتروودها آلومینیوم بیشترین و تنگستن کمترین جریان نشتی از سطح عایق را دارد. با توجه به هزینه‌های ساخت از مس برای ساخت الکتروودها استفاده می‌شود.

۱-۶-۴-۴ ساختار انتهای آند

آند مورد استفاده در دستگاه پلاسمای کانونی به صورت کلی به شکل‌های کروی، نیم مخروطی و تخت می‌باشد (شکل ۱-۲).



شکل ۲-۱: ساختار انتهای آند

پلازما در انتهای فاز شعاعی تشکیل می‌شود بنابراین پارامترهایی که در فاز شعاعی دخالت دارند در خصوصیات پلاسمای تشکیل یافته سهمیم هستند. تغییر در شکل آند، مشخصه‌های پلازما از جمله سرعت لایه جریان و شکل لایه را تغییر می‌دهد [۱۴ و ۱۵].

۱-۶-۵ کاتد

در یک دستگاه پلاسمای کانونی، پلاسمای حاصل از تخلیه در سرتاسر فازهای پینچ و حرکت محوری با الکترودها در تماس است. بررسی‌های انجام شده بر تأثیر ساختار کاتد بر پینچ نشان می‌دهد ساختار کاتد تأثیر بسزایی در اتلاف انرژی و جریان دارد. کاتد را معمولاً به صورت میله‌ای و یا صفحه استوانه-ای می‌سازند [۱۶ و ۱۷].

۱-۶-۶-۱ عایق

۱-۶-۶-۱-۱ طول عایق

طول عایق یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در رفتار دینامیکی دستگاه پلاسمای کانونی است [۱۸]. طول مؤثر عایق از بالای صفحه کاتد محاسبه می‌شود. در ابتدا تخلیه الکتریکی بر روی سطح عایق انجام می‌شود و فاز اولیه موسوم به فاز شکست شکل می‌گیرد. تشکیل پلاسمای چگال با دمای زیاد به فاز شکست وابسته است. کارایی پلاسمای کانونی برای تولید انواع تابش وابسته به شکل‌گیری لایه جریانی همگن در فاز شکست است [۱۹]. شکل‌گیری صحیح لایه جریان توسط بار موجود در فضای

نزدیک به سطح عایق صورت می‌گیرد و در این شکل‌گیری عواملی چون طول عایق، شکل لبه صفحه کاتد، پیش تخلیه مداوم و نهشت لایه فلزی بر سطح عایق مؤثر هستند. در واقع طول عایق دارای یک مقدار بهینه‌ای است که این طول بهینه سبب تشکیل لایه جریانی متقارن و همگن می‌شود. هنگامی که لایه جریان شکل می‌گیرد نیروی لورنتس آن را در راستای عایق حرکت می‌دهد و وقتی به انتهای عایق می‌رسد، الکترودها را به یکدیگر اتصال می‌دهد. مدت زمان فاز شکست حدود چند ده نانوثانیه است [۲۰]. طول بهینه عایق بر فشار بهینه سیستم و بهره نوترونی و ایکس اثر می‌گذارد. با افزایش و یا کاهش طول عایق، فشار گاز مورد نیاز برای داشتن حالت بهینه وقوع پینچ به ترتیب باید زیاد و کم شود.

۱-۶-۶-۲ شعاع عایق

زمان تکمیل فرآیند یونیزاسیون در فاز شکست و زمان اتمام فاز شکست به شعاع عایق وابسته است. برای کاهش زمان یونیزاسیون و افزایش چگالی جریان می‌توان شعاع عایق را کاهش داد. کاهش فشار و شعاع عایق تا جایی که در شرایط بهینه خللی وارد نکند برای کاهش زمان فاز شکست پیشنهاد می‌شود.

۱-۶-۶-۳ جنس عایق

در تحقیقات بسیاری اثر جنس‌های مختلف عایق بر نوع و میزان تابش‌های گوناگون حاصله از دستگاه پلاسمای کانونی بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها وابستگی فشار بهینه پینچ و متناظر با آن بهره نوترونی و ایکس را به جنس آند و عایق نشان می‌دهند. در دستگاه پلاسمای کانونی از عایق با جنس‌های مختلف پیرکس، تفلون، شیشه، کوارتز و آلومینا استفاده می‌شود. در دستگاه‌های پلاسمای کانونی با عایق‌های سرامیکی (شیشه، کوارتز و آلومینا) یکنواختی لایه جریان و با بکارگیری عایق‌های غیرسرامیکی، غیریکنواختی لایه جریان مشاهده می‌شود [۲۱].

۱-۶-۶-۴ اثر نهشت لایه فلزی بر عایق

با انجام تخلیه‌های الکتریکی در دستگاه پلاسمای کانونی، ذرات در اثر تبخیر و برخورد ذرات پراثرژی از سطح الکتروود مرکزی (آند) از جنس مس کنده شده و داخل سطح عایق نفوذ می‌کنند و شرایط وقوع شکست را بهبود می‌بخشند. نهشت کم لایه فلزی بر سطح عایق، موجب کاهش مقاومت عایق و شکل‌گیری فاز شکست و تشکیل لایه جریانی متقارن و یکنواخت می‌شود [۲۲].

۷-۱ پارامتر رانش

برای توصیف شدت نیروی رانش در پلاسمای کانونی مفهوم پارامتر رانش ابتدا توسط لی پیشنهاد شد. پارامتر رانش به صورت زیر است:

$$S = \frac{I}{a\sqrt{p}} \quad 20-1$$

این پارامتر به صورت تجربی برای اندازه‌گیری سرعت که دارای مقدار بهینه برای هر گازی می‌باشد، به کار برده شده است و همچنین از آن برای اندازه‌گیری فشار مغناطیسی بر واحد چگالی انرژی مغناطیسی بر واحد جرم استفاده می‌شود. پارامتر رانش به عنوان یک پارامتر با ارزش برای تخمین سریع حالت پلازما یا شرط مورد نیاز برای دیگر نیروهای رانش الکترومغناطیسی در سیستم پلازما شناخته شده است [۲۳].

۸-۱ ناپایداری‌ها

ناپایداری‌های پلازما یکی از موانع برای همجوشی هسته‌ای کنترل‌شده بشمار می‌رود. جریانی که توسط ستون پلازما ایجاد می‌شود باعث محصورسازی پلازما شده و آن را از دیواره‌ها جدا می‌کند. وجود ناپایداری‌های ریز که در بعضی از آزمایشات گزارش شده است باعث فروریزش ستون پلازما خواهد شد.

اگر تنگش می‌توانست به نحو پایداری منقبض شود، این عمل تا جایی ادامه می‌یافت که فشار مغناطیسی در ناحیه خارج با فشار شاره در داخل تخلیه برابر شود.

$$\frac{B^2(r)}{2\mu_0} = NKT \quad 21-1$$

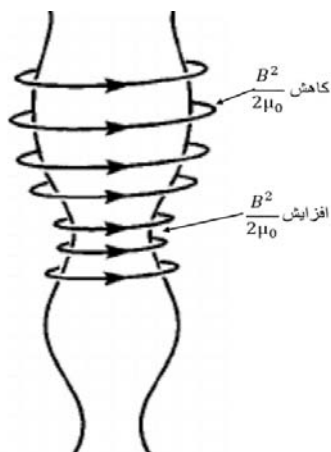
با توجه به اینکه تنگش پدیده‌ای ناپایدار است، فشار مغناطیسی روی مرز تخلیه به شعاع تخلیه و به جزئیات هندسی آن بستگی دارد. اگر تغییرات فشار ناشی از اختلالات کوچک چنان باشد که باعث افزایش آن‌ها شوند آن اختلالات رشد خواهند کرد و چین‌های کوچک روی سطح احاطه‌کننده تخلیه، همچنین تاب‌ها که جزء این گروه از اختلالات هستند باعث بوجود آمدن ناپایداری‌های موسوم به سوسیسی و تابی در پلاسمای تنگیده می‌شود [۲۸] که در زیر به طور مختصر به شرح آنها می‌پردازیم.

۱-۸-۱ ناپایداری سوسیسی ($m=0$)

هنگامی که جریان محوری در پلازما وجود دارد میدان مغناطیسی سمتی ناشی از این جریان باعث ایجاد فشار مغناطیسی شده و موجب تنگش ستون پلازما می‌شود، اگر ستون پلاسمایی به شکل استوانه باشد میدان مغناطیسی ناشی از جریان به صورت:

$$B_{\theta}(r) = \frac{\mu_0 I(r)}{2\pi r} \quad ۲۲-۱$$

خواهد بود. با توجه به رابطه ذکر شده با کاهش شعاع ستون پلازما میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. فشار مغناطیسی متناسب با مجذور میدان مغناطیسی است ($P_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$)، لذا با افزایش میدان مغناطیسی، فشار مغناطیسی نیز افزوده می‌شود و ستون پلازما بیش از پیش تنگیده می‌شود (شکل ۱-۳). اگر از ابتدا یک ناهمسانگردی جزئی مانند باریک‌شدگی وجود داشته باشد؛ رفته رفته این گلوگاه تنگ‌تر شده و در نهایت بریده می‌شود و در نتیجه جریان قطع می‌شود. ناپایداری سوسیسی را می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی محوری که قوی‌تر از میدان سمتی می‌باشد از بین برد [۲۹].

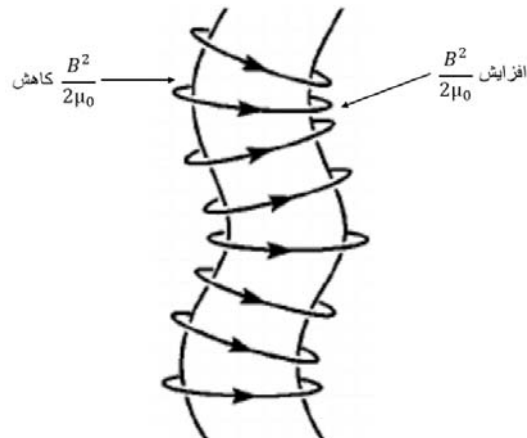


شکل ۱-۳: ناپایداری سوسیسی

۲-۸-۱ ناپایداری تابی ($m=1$)

اعمال میدان مغناطیسی محوری باعث رفع ناپایداری سوسیسی می‌شود. اما این خود باعث ایجاد یک ناپایداری دیگری به نام $m=1$ (ناپایداری تابی) می‌شود. هنگامی که یک انحنای در ستون پلازما وجود داشته باشد ناپایداری تابی خودش را نشان می‌دهد. خطوط میدان مغناطیسی در بخش داخلی قسمت خمیده دارای تراکم بیشتری می‌باشند و در قسمت خارجی خمش، چگالی این خطوط کمتر است. قسمت داخلی شار مغناطیسی بیشتری نسبت به بخش خارجی دارد. در نتیجه باعث می‌شود

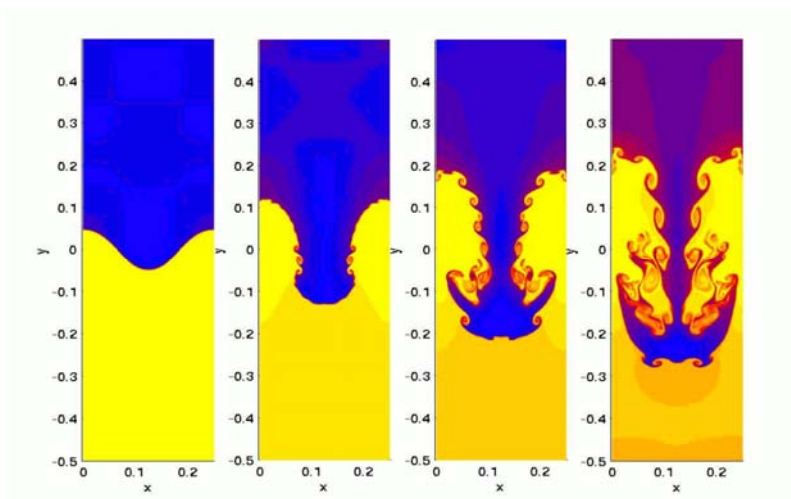
نیروی بیشتری به قسمت درونی وارد شود و سبب فروریزش ستون پلاسما شود (شکل ۴-۱). برای رفع ناپایداری $m=1$ یک میدان مغناطیسی در راستای محور ستون پلاسما به آن داده می‌شود. این میدان از لحاظ بزرگی باید بیش از میدان سمتی که عامل ناپایداری است، باشد [۲۹].



شکل ۴-۱: ناپایداری تابی

۳-۸-۱ ناپایداری ریلی-تیلور

پلاسما دارای گرادیان چگالی با یک مرز مشخص است، و از این رو یکنواخت نیست. به علاوه یک نیروی غیرالکترومغناطیسی خارجی بر پلاسما اعمال می‌شود، این نیرو ناپایداری را تحریک می‌کند. به عنوان تشبیه می‌توان یک لیوان آب واژگون را در نظر گرفت، اگرچه سطح مشترک آب و هوا در حال تعادل است زیرا هوا فشار ناشی از وزن آب را تحمل می‌کند اما این تعادل ناپایدار است، این نوع ناپایداری را ریلی-تیلور می‌نامند [۳۰]. در محصورسازی پلاسما، میدان مغناطیسی همانند سیال سبک عمل می‌کند (هوا) که سیالی سنگین (آب) مانند پلاسما را نگه داشته است؛ بنابراین سیال سنگین تمایل به تعویض جا با سیال سبک دارد که در نتیجه همانند شکل زیر ناپایداری در پلاسما را منجر می‌شود.



شکل ۱-۵: ناپایداری ریلی-تیلور

۱-۸-۴ ناپایداری ریز و توربولانس

این ناپایداری باعث شتاب گرفتن ذرات در هنگام تنگش می‌شود. اثرات ناپایداری ریز و توربولانس بر دینامیک لایه جریان در دستگاه پلاسمای کانونی در تعداد زیادی از آزمایشات مشاهده شده است؛ که می‌توان موارد زیر را نام برد [۳۱]:

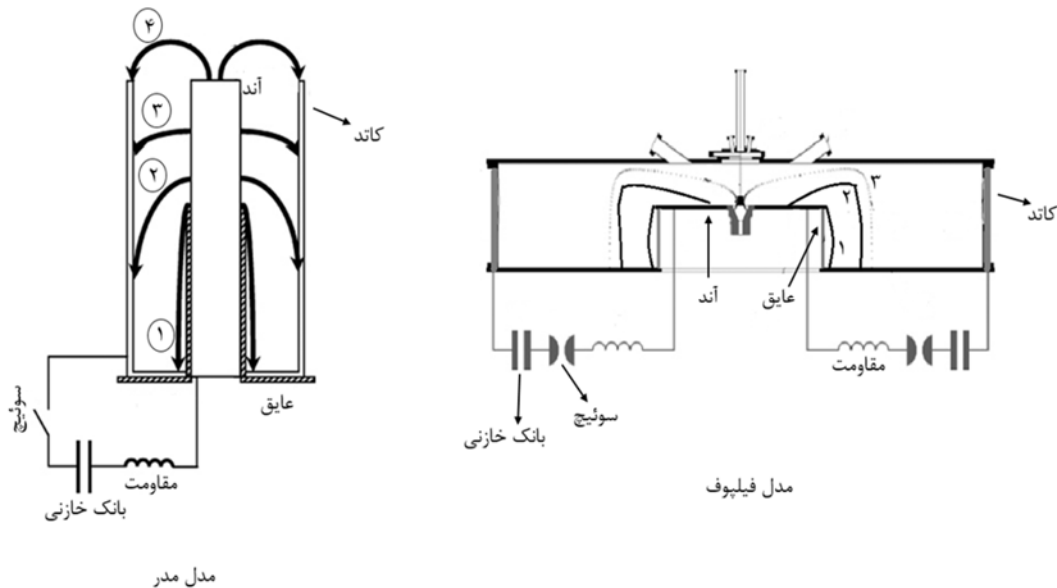
- پراکندگی غیرعادی نور لیزر هنگام مطالعه لایه جریان
- مقاومت غیرعادی در ستون پلاسما
- تابش غیر حرارتی در ناحیه میکروموج

۱-۹ معرفی دستگاه پلاسمای کانونی

دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان سیستمی از خانواده تنگش محوری بشمار می‌آید. در این دستگاه، پلاسما در محور و در بالای سطح الکتروود داخلی تشکیل می‌شود. برای اولین بار این دستگاه به طور مستقل و با هندسه‌ای متفاوت در سال ۱۹۶۵ در ایالات متحده آمریکا (USA) توسط مدر^۸[۳۶] و در اتحاد جماهیر شوروی سابق (USSR) توسط فیلیپوف^۹[۳۷] ساخته شد. از آن به بعد دستگاه‌های پلاسمای کانونی زیادی توسط مخترعان در تمامی جهان ساخته شده است ولی همه آن‌ها به گونه‌ای

Mather^۱
Filippoff

شبيه به يکي از اين دو مدلي بودند که توسط فيليپوف و مدر ساخته شده بودند. بنابر اين مي توان دستگاه هاي پلاسمای کانوني را به دو گروه اصلي مدل مدر و فيليپوف تقسيم نمود. نمايي شماتيکي از اين دو مدل در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱-۶: دستگاه پلاسمای کانوني

اصول کلی و اساسی کار دستگاه پلاسمای کانوني در هر دو مورد یکسان می باشد. در هر دو مدل، انرژی ذخیره شده در بانک خازنی توسط یک سوئیچ سریع به الکتروود مرکزی انتقال می یابد. در هر دو مدل فرآیند تخلیه الکتریکی در ابتدا روی سطح خارجی عایق استوانه ای شکل الکتروود مرکزی انجام می شود و آن را فاز شکست می گویند (قسمت ۱ نشان داده شده در شکل). لایه پلاسمای ایجاد شده پیرامون عایق بر اثر وجود نیروی لورنتس از موقعیت ۱ به ترتیب به موقعیت های ۲ و ۳ نشان داده شده در شکل حرکت می کند. این مرحله را فاز محوری می نامند. در نهایت لایه جریان در فاز شعاعی به محور تقارن دستگاه (موقعیت ۳ در نوع فيليپوف و موقعیت ۴ در نوع مدر) می رسد. برای بهینه کردن دستگاه باید ابعاد (طول و قطر الکتروودها) را به گونه ای انتخاب کرد که در فشار بهینه، زمانی که لایه به محور تقارن دستگاه می رسد، جریان لایه ماکزیمم شود. در این موقعیت رشته ای از پلاسمای داغ (تنگیده) در مقابل الکتروود داخلی (معمولاً آند) شکل می گیرد. بعد از مدت زمان کوتاهی در طی این فاز تابش هایی از قبیل اشعه ایکس نرم و سخت، نوترون های پرانرژی، الکترون ها و یون های پرانرژی و ... تولید می شوند [۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵].

اختلاف بنیادی در دو مدل مدر و فیلیپوف به ابعاد و نسبت ظاهری (طول\قطر) الکترودهای دستگاه مربوط می‌شود. الکترودها را اغلب از مس یا استیل ضد زنگ می‌سازند. الکتروود داخلی می‌تواند استوانه‌ای توپر یا لوله‌ای باشد. البته اگر بخواهند اشعه ایکس سخت را از بین ببرند و الکترون تولید کنند، الکتروود داخلی را لوله‌ای در نظر می‌گیرند [۳۸]. سیستم الکترودها به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمت اول مجموعه الکترودهای بیرونی می‌باشند که اغلب به عنوان کاتد در نظر گرفته می‌شوند و می‌توانند به تعداد ۶ الی ۲۴ میله باشند که روی یک صفحه هم جنس با آن بطور متقارن قرار می‌گیرند. در قسمت دوم یک الکتروود مرکزی قرار دارد که معمولاً به عنوان آند در نظر گرفته می‌شود و در مرکز الکترودهای کاتدی قرار گرفته و توسط یک عایق استوانه‌ای محیط می‌شود. عایقی که اطراف آند قرار می‌گیرد اغلب از جنس پیرکس یا آلومینیوم و یا سرامیک ساخته می‌شود. شباهت‌های بین این دو مدل در دینامیک لایه جریان، قوانین مقیاس‌بندی برای نشر نوترون‌ها [۳۹] و نشر الکترون‌ها و یون‌های پرانرژی، اشعه ایکس و سایر امواج گسیلی است.

می‌توان اهمیت استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی را به صورت زیر بیان کرد:

- توانایی تولید ترکیبی از پالس‌های پرشدت مثل پلاسمای داغ، نوترون، الکترون‌های سریع و پرتوهای یونی.
- زمان نسبتاً کم تولید پرتو در حدود 100 ns.
- اندازه نسبتاً کوچک چشمه تولید پرتو در ابعاد $(\text{mm})^3$ (چشمه‌های نقطه‌ای).
- ارزان قیمت‌تر و از نظر زیست محیطی تمیزتر در مقایسه با سیستم‌های مشابه [۴۰].

۱-۱۰ اصول عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی

دستگاه پلاسمای کانونی در حالت کلی از سه بخش زیر تشکیل شده است:

- بانک خازنی که منبع تامین انرژی برای ایجاد تخلیه الکتریکی در گاز می‌باشد.
- محفظه تخلیه که شامل دو استوانه هم محور و عایق بین آن‌هاست.
- اسپارک گپ که کلید ولتاژ بالای سریعی است که بانک خازنی را به الکترودها وصل می‌کند. ابتدا بین این دو استوانه را تخلیه کرده و خلأ نسبی ایجاد می‌کنند؛ سپس محفظه را با گاز مورد نظر و فشار دلخواه پر می‌کنند. بانک خازنی توسط کلید اسپارک گپ به آند و کاتد متصل است. بنابراین هنگامی که اسپارک گپ عمل می‌کند اختلاف پتانسیلی بین آند و کاتد به وجود می‌آید و باعث ایجاد میدان الکتریکی در فضای بین الکترودها می‌شود. با توجه به این که میدان الکتریکی با فاصله رابطه

عکس دارد این میدان در قسمت پایین الکترودها چون فاصله کمتر است، بیشتر بوده و باعث می‌شود یک تخلیه الکتریکی در قسمت پایین الکترودها درون گاز اتفاق بیفتد و گاز یونیزه شود و جریانی در نزدیکی سطح عایق شکل بگیرد.

این لایه جریان به اضافه آند را می‌توان شبیه به یک چنبره در نظر گرفت. در نتیجه میدان مغناطیسی درون این سیملوله شکل می‌گیرد که جهتش سمتی است. در اثر نیروی لورنتس $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ ، این میدان سمتی لایه جریان به همراه گاز کاری را نخست در راستای محور آند (در جهت +z) می‌راند. 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 $F_z = J_r B_\theta$ 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 همچنان سمتی است. نیروی لورنتس $F_r = J_z B_\theta$ در راستای شعاعی و سمتی وارد می‌شود که باعث جمع شدن لایه جریان در راستای شعاع و به اصطلاح تنگش شعاعی می‌شود.

۱-۱۱ کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی

دستگاه پلاسمای کانونی مولد نوترون (در صورت استفاده از گاز دوتریوم) [۴۱]، الکترون [۴۲]، یون [۴۳]، پرتو ایکس سخت و نرم [۴۴] و اشعه فرابنفش شدید [۴۵] است. از آنجایی که دستگاه پلاسمای کانونی مولد ذرات و تابش‌های پرانرژی است این دستگاه کاربردهای آموزشی، تحقیقاتی و صنعتی دارد.

این دستگاه همچنین ابزار آموزشی مناسبی برای درک مفاهیم بنیادی در زمینه‌های مختلف فیزیک به‌ویژه پلاسمای، ترمودینامیک، الکترومغناطیس، اسپکتروسکوپی، فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای می‌باشد. مراحل مختلف شکل‌گیری پلاسمای، پینچ و انواع تابش‌های شکل گرفته در این دستگاه، مورد مطالعه و پژوهش بسیاری از دانشجویان در مقاطع مختلف تحصیلی قرار گرفته است. در زیر به برخی از زمینه‌های کاربردی محصولات دستگاه پلاسمای کانونی می‌پردازیم:

- چشمه تولید یون: پروتون‌های سریع یا به عبارتی یون‌های تولید شده توسط دستگاه پلاسمای کانونی دارای انرژی بیشتر از 3 MeV هستند. از این یون‌ها برای کاشت یونی، تهیه فیلم‌های نازک بر روی زیر لایه‌ها و همچنین برای آمورفیزه کردن کریستال سیلیکون استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، پرتوهای یونی تولید شده توسط دستگاه‌های پلاسمای کانونی برای پردازش مواد مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴۶ و ۴۷].
 - چشمه تولید الکترون: یکی دیگر از خروجی‌های دستگاه پلاسمای کانونی الکترون‌های پرانرژی هستند که برای لیتوگرافی [۴۸]، لایه‌نشانی [۴۹] و پردازش سطوح مواد [۵۰] بکار گرفته می‌شود.
 - چشمه نوترون: همان‌طور که قبلاً بیان شد در صورتی که از گاز کاری دوتریوم استفاده شود دستگاه به عنوان چشمه نوترون کار می‌کند، که از آن می‌توان در فعال‌سازی نوترونی، آنالیز مواد و تولید رادیوایزوتوپ‌ها استفاده نمود [۵۱].
 - مشخصه پرتوهای ایکس گسیل شده از یک دستگاه پلاسمای کانونی، شدت بالا و گستردگی ناحیه طیفی آن است [۵۲]. تابش اشعه ایکس در دستگاه پلاسمای کانونی عمدتاً ناشی از تابش ترمزی، تابش بازترکیب و تابش خطی می‌باشد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که دستگاه پلاسمای کانونی قادر به تولید پرتو ایکس در ناحیه وسیعی از انرژی‌های کمتر از 1 keV تا بیش از 500 keV می‌باشد. از اشعه ایکس تولید شده در پلاسمای کانونی برای میکرولیتوگرافی [۵۳]، رادیوگرافی از نمونه‌های زیستی و فلزی [۵۴] و عیب‌یابی اجسام متحرک [۵۵] استفاده می‌شود.
- از آنجا که در این پایان‌نامه به مطالعه پرتو ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی می‌پردازیم، در ادامه مطالبی را در مورد پرتو ایکس بیان خواهیم نمود.

۱-۱۲ دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی

دینامیک پلاسمای کانونی در هر دو نوع مدل تقریباً یکسان و مشابه است و فقط در مدل فیلیپوف یک مرحله حذف شده است. در این پایان‌نامه به علت این که در روند آزمایش‌ها از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) که یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر می‌باشد، استفاده شده است لذا در این قسمت دینامیک مربوط به دستگاه‌های نوع مدر را تشریح می‌کنیم.

مطالعه دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی را می‌توان به سه مرحله مستقل تقسیم نمود که عبارتند از:

الف) فاز شکست

ب) فاز شتاب گیری محوری

ج) فاز شعاعی

۱-۱۲-۱ فاز شکست

در این فاز بانک خازن C که تا ولتاژ V_0 پر شده است از طریق سوئیچ سریع به آند وصل شده و پس از بسته شدن کلید، ولتاژ بین دو الکتروود ظاهر می‌شود. هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکتروودها در یک لحظه اعمال شود پدیده تخلیه الکتریکی با تقارن محوری بین الکتروودها رخ خواهد داد. این حالت به فاز شکست الکتریکی معروف است و باعث تولید پلاسمای اولیه از طریق تخلیه جریان می‌شود. ایجاد تخلیه الکتریکی و تولید پلاسمای اولیه در دستگاه پلاسمای کانونی به یک سری عوامل از قبیل شرایط گاز کاری، فشار و نوع گاز [۵۶]، خصوصیات الکتروودها [۵۷] و عایق [۵۸] وابسته است. چگونگی تشکیل لایه جریان را می‌توان بدین ترتیب بیان کرد که بعد از اعمال اختلاف پتانسیل بین الکتروودها، با تاخیر زمانی از مرتبه چند ده نانوثانیه، مرحله شکست روی سطح عایق آغاز می‌شود. در این مدت الکترون‌هایی که در اثر فشار نشر میدانی از لبه فلزات و یونیزه شدن گاز کاری ایجاد می‌شوند، در راستای خطوط میدان الکتریکی شتاب گرفته و به سمت سطح عایق الکتروود داخلی و یا الکتروود خارجی (با توجه به پلاریته آن) حرکت می‌کنند. در پلاسمای کانونی معمولاً پلاریته الکتروود داخلی مثبت است، در نتیجه الکترون‌ها به سمت عایق می‌چسبند و سطح عایق را باردار می‌کنند. سپس با رسیدن لایه ایجاد شده به انتهای عایق، دو الکتروود به هم وصل می‌شوند. به علت وجود نیروی لورنتس، لایه ایجاد شده از سطح عایق جدا می‌شود. پس از طی زمان ۵۰ الی ۵۰۰ نانو ثانیه، رسانش لایه به اندازه کافی زیاد شده و در نتیجه تخلیه الکتریکی به لایه پلاسمایی تبدیل می‌شود [۵۹].

۱-۱۲-۲ فاز محوری

پوسته جریان تشکیل شده در انتهای فاز شکست توسط نیروی لورنتس ($J \times B$) به سمت انتهای باز الکتروود مرکزی شتاب می‌گیرند. مؤلفه شعاعی نیروی لورنتس، پوسته جریان را به سمت الکتروود بیرونی هل می‌دهد و از سویی مؤلفه محوری این نیرو در نزدیکی آند (به علت تابعیت $1/r$ چگالی جریان J و میدان B) قوی‌تر است. این امر باعث می‌شود سرعت پوسته جریان در فواصل نزدیک‌تر به

سطح الکتروود مرکزی بیشتر شود و در نتیجه، این اختلاف سرعت شکل لایه جریان به صورت سهمی در می‌آید.

در ادامه به دو نکته اساسی برای داشتن پلاسمای پرچگال و با دمای بالا که باید در فاز شتاب‌گیری محوری مورد توجه قرار گیرد اشاره می‌شود. اول آنکه پوسته جریان پلازما باید تقریباً در زمانی که جریان تخلیه به نخستین پیک خود می‌رسد، به انتهای الکتروود مرکزی (محور دستگاه) برسد، البته برقراری این شرط موجب انتقال بهینه انرژی از بانک خازنی به ستون پینچ پلاسماست، در انتهای این فاز، یک انتهای پوسته جریان در اطراف نوک آند و انتهای دیگرش در امتداد محفظه حرکت می‌کند. تنها کسری از پلازما در انتهای فاز شتاب‌گیری محوری و آغاز فاز تراکم (فاز شعاعی) لایه جریان پلازما مؤثر است. مدت زمان این فاز در حدود ۱ الی ۴ میکروثانیه است [۲۳].

۱-۱۲-۳ فاز شعاعی

در انتهای فاز محوری لایه جریان انتهای الکتروود درونی را جاروب کرده و در نتیجه به علت نیروی لورنتس $J \times B$ رو به داخل (محور الکتروودها) باعث تشکیل پلاسمای متراکم در مدت زمان ۵۰ الی ۲۰۰ نانو ثانیه (بسته به مشخصات دستگاه) می‌شود. فاز شعاعی که باعث تشکیل پلاسمایی با چگالی بالا با مشخصه‌هایی از قبیل گسیل اشعه ایکس، تولید ذرات باردار پرانرژی و همچنین گسیل نوترون‌های پرانرژی (در صورت استفاده از گاز دوتریوم) می‌شود که از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. تغییرات سریع اندوکتانس در فاز شعاعی باعث تولید میدان الکتریکی قوی در ستون پلازما می‌شود. با توجه به این که جریان تخلیه در این مرحله ثابت است میدان الکتریکی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\mathbf{E} = \mathbf{I} \frac{dL}{dt} \quad ۲۳-۱$$

در رابطه فوق I جریان تخلیه و $\frac{dL}{dt}$ میزان تغییرات زمانی اندوکتانس است. فاز شعاعی را به چهار قسمت زیر تقسیم کرده اند:

(الف) فاز تراکم

(ب) فاز شبه آرام

(ج) فاز ناپایدار

(د) فاز فروپاشی

۱-۱۲-۳-۱ فاز تراکم

این فاز (اولین قسمت فاز شعاعی) از فروریزش ناگهانی لایه جریان با تقارن شبه استوانه‌ای (قیفی شکل) به سمت محور الکترودها به علت تأثیر نیروی لورنتس $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ آغاز می‌شود. این حرکت انفجاری وقتی شعاع پلازما به مینیمم مقدار و چگالی آن به مقدار ماکزیمم خود (10^{19} cm^{-3}) می‌رسد پایان می‌یابد.

۱-۱۲-۳-۲ فاز شبه آرام

این مرحله نشانگر آغاز گسترش ستون پلاسمای متمرکز است. دمای الکترون‌ها تا حدود ۶۰۰ الی ۸۰۰ الکترون‌ولت پایین می‌آید و دمای یون‌ها در حدود ۷۰۰ الکترون‌ولت برآورد شده است. چگالی پلازما همچنین تا حدود $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ پایین می‌آید. در طول این فاز ستون پلازما در هر دو جهت شعاعی و محوری گسترش می‌یابد. میزان بسط یافتگی در راستای شعاعی به علت وجود فشار مغناطیسی کندتر می‌باشد. پلازما در جهت محوری فواره‌وار بدون هیچ‌گونه مانعی گسترش می‌یابد. تغییر شدید در اندوکتانس پلازما (در فاز فشرده‌سازی آغاز شده) باعث ایجاد میدان الکتریکی در ستون پلازما می‌شود. این میدان الکتریکی باعث شتاب گرفتن یون‌ها و الکترون‌ها در دو سوی مخالف می‌شود. سرعت سوقی نسبی بین الکترون‌ها و یون‌ها افزایش می‌یابد و تقریباً با سرعت حرارتی الکترون‌ها برابر می‌باشد. این به عنوان شرطی برای آغاز ناپایداری‌های ریز از قبیل سیکلوترونی الکترون و شکل‌های مختلفی از ناپایداری باریکه-پلازما است. در انتهای فاز آرام ناپایداری $m=0$ به علت افزایش ناگهانی دمای الکترون‌ها آغاز می‌شود. ستون پلازما دوباره متراکم خواهد شد این متراکم‌شدگی به علت ناپایداری $m=0$ است. با استفاده از این نتیجه می‌توان مدت زمان پلازما t_p را به عنوان زمان بین اولین تراکم و زمان آغاز $m=0$ تعریف کرد.

۱-۱۲-۳-۳ فاز ناپایدار

فاز ناپایدار به علت تولید اشعه ایکس سخت و نرم، یون‌ها و الکترون‌های سریع و همچنین گسیل نوترون‌ها و دوترون‌ها در واکنش D-D غنی‌ترین و مهم‌ترین مرحله است. به علت رشد ناپایداری $m=0$ میدان الکتریکی القایی افزایش می‌یابد. این میدان باعث شتاب‌گیری الکترون‌ها به سمت آند و یون‌ها به سمت کاتد می‌شود. چگالی پلازما در ناحیه تنگش دوباره تا $(10^{19} \text{ cm}^{-3})$ افزایش می‌یابد. از هم‌گسیختگی پلازما تا زمانی که کل ستون از بین برود ادامه می‌یابد. چگالی پلازما کم می‌شود، سرعت سوق الکترون‌ها با استفاده از چگالی جریان در حدود m/s

2×10^7) است که از سرعت حرارتی الکترون‌ها یعنی (6×10^6 m/s) بیشتر است. با این توصیف انرژی قابل ملاحظه‌ای به درون پلاسما تزریق شده که باعث افزایش انرژی درونی پلاسما شده است. که از طریق تابش ترمزی نیز می‌توان نتیجه گرفت که دمای الکترون تا حدود ۵ الی ۶ الکترون‌ولت افزایش یافته است [۶۰].

۱-۱۲-۳-۴ فاز فروپاشی

آخرین مرحله از فاز شعاعی یا به عبارت دیگر آخرین مرحله از دینامیک پلاسمای کانونی فاز فروپاشی است. زمانی که چگالی پلاسما به کمتر از 2×10^{17} cm⁻³ برسد این فاز شروع می‌شود. در طول فاز فروپاشی ابر پلاسمایی نازک، داغ و بزرگی به علت از بین رفتن ستون پلاسما تشکیل می‌شود. این ابر مقدار زیادی اشعه ایکس نرم در اثر فرآیند تابش ترمزی گسیل می‌کند. اشعه ایکس نرم خیلی سریع در طول این فاز گسیل می‌شود. پیک اشعه ایکس نرم به عنوان اولین پیک بعد از پیک مربوط به تنگش است که دارای پهنای زمانی ۳۰۰ نانو ثانیه است. پالس نوترونی که از ابتدای فاز ناپایدار آغاز شد، در این فاز به اوج خود می‌رسد.

۱-۱۳ محصورسازی پلاسما

همجوشی (گداخت) هسته‌ای فرآیندی عکس شکافت هسته‌ای است که طی آن هسته‌های سبک مانند هیدروژن، دوتریوم و تریتیوم با یکدیگر وارد همجوشی هسته‌ای شده و هسته‌های سنگین‌تر و انرژی تولید می‌شود. محتمل‌ترین واکنش گداخت شناخته شده، واکنش بین هسته‌های دوتریوم و تریتیوم است که طی معادله زیر به وقوع می‌پیوندد [۲۴]:



وقتی مخلوط دوتریوم-تریتیوم تا دماهای زیاد گرم شود، اتم‌ها یونیده می‌شوند، گاز حاصل متشکل از ذرات داغ یونیده را پلاسما می‌نامند. برای افزایش احتمال برخورد بین یون‌ها و در نتیجه افزایش بازده، پلاسما باید سه شرط زیر را داشته باشد:

- چگالی زیاد، به طوری که احتمال برخورد ذرات زیاد شود.
- دمای زیاد، T در گستره 10^8 K که احتمال نفوذ ذرات را در سد پتانسیل کولنی متقابل زیاد کند.
- زمان محصورسازی طولانی که در خلال آن باید بالا بودن دما و چگالی حفظ شود [۲۵].

برای رسیدن به شرایط فوق، تاکنون دو روش مورد تحقیق قرار گرفته است:

➤ همجوشی از طریق محصورشدگی مغناطیسی (MCF)

➤ همجوشی از طریق محصورشدگی لختی (ICF)

اساس محصورسازی مغناطیسی اعمال میدان مغناطیسی جهت حرکت چرخشی ذرات باردار حول خطوط مغناطیسی و ایجاد فضاهایی برای به دام انداختن ذرات باردار پایه‌ریزی شده است. در محصورسازی لختی بدون اعمال میدان مغناطیسی، پلازما را از طریق یک موج ضربه قوی (Shock Wave) یا امواج ضربه پی در پی، در فضایی کروی داغ و متراکم می‌کنند.

مدت زمان لازم محصورسازی پلازما با τ نشان داده می‌شود. پلاسمای محصور شده انرژی حرارتی خود را از طریق تابش ترمزی از دست می‌دهد و با افت انرژی و دما روبرو می‌شود. برای پایداری شرایط مورد نیاز جهت واکنش گداخت هسته‌ای، لازم است اتلاف انرژی از طریق تابش ترمزی با گرمایش ایجاد شده توسط واکنش‌های گداخت هسته‌ای به تعادل برسند [۲۶]. طبق روابط نظری، این تعادل هنگامی برقرار می‌شود که شرط زیر که به عنوان معیار لاوسون شناخته می‌شود برقرار باشد.

$$N \tau > 1.5 \times 10^{20} \text{ s/m}^3 \quad ۲۵-۱$$

که n چگالی پلازما و τ زمان محصورسازی آن می‌باشد.

معیار لاوسون نشان می‌دهد که برای تولید انرژی توسط واکنش‌های گداخت، پلازما باید چگالی و دمای بالای خود را برای مدتی حفظ کند؛ بنابراین افزایش دمای پلازما تا دمای 10 keV به عنوان هدف عملی است و دومین هدف این است که پلازما با دمای بالا در فضای محدود محصور شود. در جدول ۱-۱ دستگاه‌های مختلف گداخت بر اساس روش‌های محصورسازی نمایش داده شده است [۲۷].

جدول ۱-۱ : دستگاه های گداخت

دستگاه	روش محصورسازی	آرایش میدان مغناطیسی	نوع عملکرد
توکامک	مغناطیسی	چنبره‌ای	شبه پیوسته
استرالاتور	مغناطیسی	چنبره‌ای	پیوسته
هلیترون	مغناطیسی	چنبره‌ای	پیوسته
θ پینچ	مغناطیسی	چنبره‌ای	پالسی
آینه‌ای	مغناطیسی	انتهای باز	پالسی
Z پینچ	مغناطیسی	انتهای باز	پالسی
پلاσμα کانونی	مغناطیسی	انتهای باز	پالسی
لیزر	لختی	ندارد	پالسی
پرتو الکترون نسبی	لختی	ندارد	پالسی
پرتو یون سنگین	لختی	ندارد	پالسی

۱-۱۴ تأثیر فشار و ولتاژ بر زمان پینچ

۱-۱۴-۱ تأثیر فشار

برای بررسی تأثیر فشار بر زمان پینچ باید تمامی پارامترهای دیگر آزمایش ثابت نگه‌داشته شوند. هر چه میزان گاز تزریقی به درون سیستم افزایش یابد، زمان پینچ افزایش می‌یابد که این روند را می‌توان توسط روابط و دینامیک دستگاه توجیه کرد.

از روابط سرعت در فازهای محوری و شعاعی، درمی‌یابیم که سرعت‌ها در دو فاز با چگالی و جرم مؤثر در هر فاز رابطه عکس دارند. به عبارت دیگر با افزایش (کاهش) چگالی و جرم، سرعت حرکت لایه جریان کاهش (افزایش) می‌یابد.

$$v_a = \left[\frac{\mu \ln c}{4\pi^2(c^2 - 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{f_c}{\sqrt{f_m}} \frac{(I_0/a)}{\sqrt{\rho}} \quad ۲۶-۱$$

$$v_r = \frac{[\mu(\gamma + 1)]^{\frac{1}{2}}}{4\pi} \frac{f_c}{\sqrt{f_{mr}}} \frac{(l/a)}{\sqrt{\rho}} \quad ۲۷-۱$$

از آنجا که چگالی با جرم رابطه مستقیم دارد با افزایش (کاهش) فشار، میزان جرم ورودی به سیستم افزایش می‌یابد. با توجه به این که سرعت با فاکتور جرم در مرحله شعاعی (f_{mr}) و محوری (f_m) نسبت عکس دارد، افزایش فشار سبب افزایش ρ و f_m و f_{mr} می‌شود و در نهایت سبب کاهش سرعت لایه جریان می‌شود و مدت زمان بیشتری لازم است تا لایه جریان طول آند را طی کند و به انتهای آن برسد و در نتیجه زمان پینچ افزایش خواهد یافت [۷۷ و ۷۸].

گودرزی و همکارانش [۷۹] تأثیر فشار بر زمان پینچ را برای دو گاز مختلف در دستگاه پلاسمای کانونی بررسی کردند و همچنین حبیبی و همکارانش [۸۰] زمان پینچ را برای درصدهای متفاوت ترکیب گازهای نیتروژن و نئون انجام دادند و نتیجه‌ای که ما در این بخش بدست آوردیم با نتایج آزمایش آن‌ها سازگاری دارد.

۱-۱۴-۲ تأثیر ولتاژ

برای بررسی تأثیر ولتاژ، فشار سیستم را ثابت نگه داشتیم. همزمان با افزایش ولتاژ زمان پینچ کاهش می‌یابد و این با توجه به دینامیک لایه جریان و رابطه ۱-۱۸ کاملاً قابل توجیه است. با توجه به رابطه مذکور، افزایش ولتاژ در دستگاه سبب افزایش جریان سیستم می‌شود. براساس رابطه‌های ۱-۲۶ و ۱-۲۷ سرعت لایه جریان با جریان نسبت مستقیم دارد. با افزایش (کاهش) جریان، لایه جریان سریع‌تر (کندتر) طول آند را طی می‌کند. بنابراین زمان پینچ‌شدگی کاهش (افزایش) می‌یابد [۷۷ و ۷۸].

فصل ۲: پرتو ایکس و آشکار سازی آن

۲-۱ همجوشی هسته‌ای

وقتی دو ذره هسته‌ای سبک با هم ترکیب می‌شوند یا به هم جوش می‌خورند، انرژی آزاد می‌شود، زیرا جرم هسته‌های محصول از جرم ذرات اولیه کمتر است. چنین واکنش‌های همجوشی می‌توانند با بمباران هدف‌ها با ذرات باردار، با استفاده از یک شتاب‌دهنده، یا با افزایش دمای گاز به یک مقدار به اندازه کافی بالا برای این‌که واکنش هسته‌ای به وقوع بپیوندد، ایجاد شوند.

بهترین محیطی که در آن انرژی‌های بالای ذره به دست آورده شده‌اند، پلازما می‌باشد. پلازما تشکیل شده است از یک گاز به شدت یونیزه شده در یک تخلیه الکتریکی ایجاد شده از طریق شتاب-دهی الکترون‌ها. تعداد مساوی از الکترون‌ها و ذرات باردار وجود دارد، که محیط را از نظر الکتریکی خنثی می‌سازند. پلازما غالباً "حالت چهارم ماده" نامیده می‌شود. با تزریق انرژی کافی به پلازما دمای آن می‌تواند افزایش یابد و ذراتی مانند دوترون‌ها به سرعت لازم برای موفقیت‌آمیز بودن همجوشی می‌رسند. اصطلاح گرما هسته‌ای برای واکنش‌های القا شده به وسیله انرژی گرمایی بالا به کار می‌رود، و ذراتی از یک توزیع سرعت مشابه با آن گاز پیروی می‌کنند. دمایی که پلازما باید به آن برسد، همان طور که می‌توانیم با بیان میانگین انرژی ذره بر حسب دما، با استفاده از رابطه:

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT \quad ۱-۲$$

مشاهده کنیم، بسیار بالا است. برای مثال حتی اگر انرژی 10 keV باشد دما برابر خواهد بود با 77000000 K که چنین دمایی به میزان زیادی از دمای سطح خورشید فراتر می‌رود، و بسیار فراتر از هر دمایی است که در آن مواد معمولی ذوب شده و تبخیر می‌شوند. پلازما بایستی تحت برخی محدودیت‌های اعمال شده به وسیله یک نیروی فیزیکی ایجاد و تا دمای لازم گرم شود. در ستارگان گرانش این نیرو را تأمین می‌کند، ولی گرانش بر روی زمین کافی نیست. تراکمی که از طریق واکنش از بین می‌رود، محصورسازی لختی (جرمی) نامیده شده است؛ مهار از طریق میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی محصورسازی مغناطیسی نام گرفته است. چنین نیروهایی بر روی پلازما برای اطمینان از این‌که انرژی گرمایی قبل از موقع تلف نشود، مورد نیازاند. علاوه بر این، پلازما برای این‌که واکنش‌های هسته‌ای زیادی انجام شوند، باید برای مدت به اندازه طولانی دست نخورده باقی بماند، که به دلیل ناپایداری ذاتی، یک چنین محیط به شدت باردار مشکل است. با یادآوری رابطه $PV =$

NkT توجه داریم که حتی اگر دما بسیار بالا باشد، چگالی ذره $\frac{N}{V}$ پایین است، که به فشار اجازه می-دهد قابل کنترل باشد [۶۱].

۲-۲ تابش

مطالعه اثر تابش بر انسان، فیزیک بهداشت نام دارد. فیزیک بهداشت غالباً به عنوان بهداشت پرتوشناختی آن، بخشی از مهندسی بهداشت محیط است که با حفاظت افراد در برابر خطرات تابش-های یوننده سروکار دارد. تابش‌هایی که ما در زندگی روزمره در معرض آن قرار می‌گیریم، هم از منابع طبیعی و هم منابع مصنوعی ایجاد می‌شوند [۸۱].

۲-۳ پرتوها

پرتو عبارت است از انرژی که به صورت امواج یا ذرات در خلأ یا در محیط مادی منتشر می‌شود. پرتوها با توجه به میزان انرژی، دارای قدرت نفوذ در ماده هستند. چشمه‌ها، رآکتور و شتاب دهنده‌ها منشأ پرتوها هستند. پرتوها به طور کلی دو دسته می‌باشند:

۲-۳-۱ پرتوهای باردار

یک ذره باردار به هنگام حرکت در ماده از طریق نیروهای کولنی با الکترون‌های منفی و هسته‌های مثبتی که اتم‌های آن ماده را تشکیل می‌دهد برهم‌کنش می‌کند. پرتوهای باردار به دو دسته یون‌های سبک ($A < 4$) و یون‌های سنگین ($A > 4$) تقسیم می‌شوند.

۲-۳-۲ پرتوهای بدون بار

پرتوهای بدون بار پرتوهای ایکس، گاما و نوترون هستند. تولید پرتوهای ایکس عموماً در اثر گذارهای اتمی مدل یونش و برانگیزش صورت می‌گیرد. پرتوهای گاما در اثر گذارهای هسته‌ای گسیل می‌شود [۸۲].

۲-۴ دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان چشمه پرتو ایکس

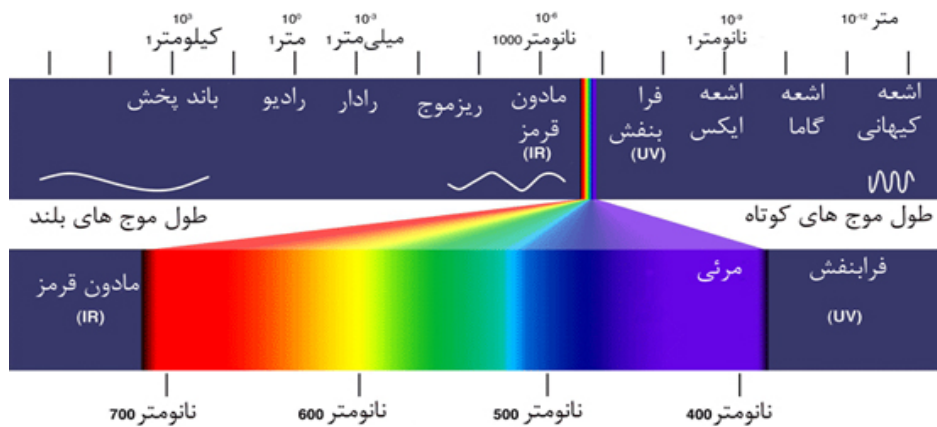
برای مدت زمان طولانی بعد از اختراع دستگاه پلاسمای کانونی، از آن اکثراً به عنوان دستگاهی برای همجوشی که از طریق هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن کار می‌کرد، استفاده می‌شد و توجه خیلی کمی به آن به عنوان چشمه اشعه ایکس می‌شد. در طی دهه‌ی اخیر توجه زیادی به پلاسمای کانونی به عنوان

چشمه اشعه ایکس نرم شده است. پلاسمای تنگیده شده با دمای الکترونی از چند صد الکترون‌ولت تا چند کیلو الکترون‌ولت و چگالی در حدود 10^{19} cm^{-3} به عنوان یک چشمه قوی برای نشر پرتو ایکس بشمار می‌آید. این دستگاه از سه طریق پرتو ایکس گسیل می‌کند که عبارتند از الف) تابش ترمزی ب) بازترکیب ج) بازتحریک. دو فرآیند اول باعث گسیل طیف پیوسته و فرآیند سوم باعث گسیل طیف گسسته‌ی اشعه ایکس از پلازما می‌شود. طیف تابشی انرژی در پلاسمای کانونی در ناحیه پرتو ایکس گسترده‌ی وسیعی را از حدود 1 KeV تا حدود 500 KeV را شامل می‌شود و طول عمر پرتو ایکس از چند نانوثانیه تا چند صد نانوثانیه به طول می‌انجامد. انتگرال انرژی نشان می‌دهد که کسر قابل توجهی از انرژی الکترومغناطیسی، در بانک خازنی دستگاه پلاسمای کانونی ذخیره می‌شود. فرآیندهای تابشی الکترومغناطیسی در دستگاه پلاسمای کانونی عبارتند از: "تابش‌های گرمایی شبه تعادلی" از پلاسمای ماکروسکوپی و تابش‌های مربوط به برهمکنش بین پرتوهای الکترونی با یک هدف غیر پلاسمایی (یعنی الکترودها) و یا با چگالی الکترون‌هایی که بطور تناوبی در حال حرکت هستند [۶۲]. برخورد پرتوهای الکترونی با انرژی غیر گرمایی بالا به سطح الکتروود مرکزی (آند) باعث گسیل پرتو ایکس سخت می‌شود. تابش پرتو ایکس سخت با تولید نوترون، زمانی که از گاز کاری دوتریوم استفاده می‌کنیم رابطه مستقیمی دارد، به گونه‌ای که هرچه تابش پرتو ایکس سخت بیشتر باشد مقدار نوترون بیشتری بدست می‌آید [۶۳]. جزئیات نشر پرتو ایکس به شدت به پارامترهای دستگاه پلاسمای کانونی از جمله فشار و ترکیب گاز کاری، انرژی ذخیره شده در بانک خازنی، جریان تخلیه، امیدانس دستگاه، جنس و هندسه الکترودها، ساختار و قطبیدگی الکتروود داخلی و ... بستگی دارد. در این میان ترکیب و فشار گاز کاری در دستگاه بیشترین تأثیر را در گسیل پرتو ایکس دارد. زمانی که از گاز کاری دوتریوم استفاده می‌شود، فشار بهینه برای بدست آوردن بیشترین نوترون گسیل شده یکی نیست [۶۴].

۲-۵ پرتو ایکس و خصوصیات آن

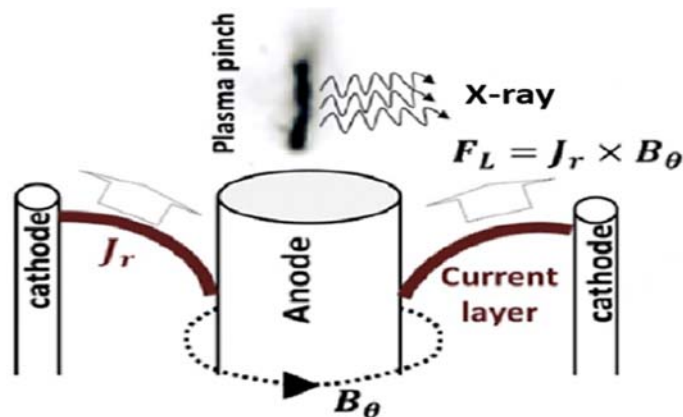
در سال ۱۸۹۵ دانشمند آلمانی "ویلهلم کنراد رونتگن" پرتوهای ایکس را بر حسب تصادف کشف کرد. او در تاریخ ۲۸ دسامبر سال ۱۸۹۵ در مقاله‌ای تحت عنوان "مکتوبی اولیه در مورد نوعی پرتوی جدید" در دانشگاه وورتسبورگ به چاپ رسانید. وی به علت شناخت ناکافی از آن پرتو، آن را "اشعه ایکس" نامید [۶۵].

پرتوهای ایکس برخلاف پرتوهای کاتدی تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار نمی‌گیرند. اغلب مواد برای آن‌ها شفاف و قابل عبور هستند. در واقع پرتوی ایکس یک نوع تابش الکترومغناطیسی است که طول موج آن حدود 0.1 تا 20 نانو متر می‌باشد که معادل انرژی بین 100 الکترون‌ولت تا 200 کیلو الکترون‌ولت است. ناحیه طیفی پرتو ایکس در طیف الکترومغناطیسی بین محدوده پرتو گاما و پرتوی فرابنفش قرار دارد. پرتوی ایکس می‌تواند تک فام (فقط دارای یک طول موج خاص) و یا پیوسته (دارای طول موج بین λ_1 و λ_2) باشد. قرار گرفتن محدوده اشعه ایکس در طیف الکترومغناطیسی را می‌توان در شکل زیر مشاهده نمود [۶۶].



شکل ۱-۲: طیف الکترومغناطیسی تابش

در سال ۱۹۶۵ در راستای انجام تحقیقات روی همجوشی هسته‌ای به منظور دستیابی به یک منبع انرژی پاک و جدید، "دستگاه پلاسما کانونی" ساخته شد. هدف اولیه و اصلی این دستگاه استفاده از آن به عنوان منبعی برای دسترسی به نوترون‌های سریع و پرانرژی بود (البته در صورت استفاده از گاز دوتریوم). بعد از انجام آزمایش‌های مختلف به چند منظوره بودن دستگاه پلاسمای کانونی پی برده شد و متوجه شدند که این دستگاه علاوه بر چشمه نوترونی، می‌تواند اشعه ایکس نرم (پرتویی که طول موج آن بین 7 تا 20 نانومتر است) و اشعه ایکس سخت (پرتویی که طول موج آن بین 1 تا 7 نانومتر است) را از خود گسیل کند و به علت پالسی بودن اشعه ایکس خروجی از دستگاه، می‌تواند کاربردهای زیادی داشته باشد. بنابراین دستگاه پلاسما کانونی در کانون توجهات دانشمندان قرار گرفت. کانونی شدن پلاسما حتماً نشر پرتو ایکس نرم را به دنبال خواهد داشت که بازه زمانی آن می‌تواند حدود چند تا چند صد نانوثانیه باشد.



شکل ۲-۲: پینچ پلاسما

انرژی بر پالس پرتو ایکس گسیل یافته از دستگاه‌های خانواده Z پینچ از سایر وسایلی که به عنوان پرتو ایکس به شمار می‌آیند، بیشتر است. دستگاه پلاسما کانونی، یک دستگاه از خانواده Z پینچ-هاست که ظرفیت تولید پلاسما با چگالی $N_e > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ و دمای $T_e > 500 \text{ eV}$ را داراست. به علت ساختار ساده، هزینه پایین تولید آن و نگهداری آسان این دستگاه با گاز کاری نجیب به عنوان یک منبع خوب برای تولید پرتو ایکس به حساب می‌آید. آزمایشات نشان می‌دهند که طیف تابشی پرتو ایکس در دستگاه پلاسما کانونی طیف وسیعی از انرژی‌ها را از حدود ۱ تا ۵۰۰ کیلو الکترون-ولت را پوشش می‌دهد و بازه زمانی نشر آن بین چند تا چند صد نانو ثانیه است [۲۹].

۲-۶ گسیل پرتو ایکس از دستگاه پلاسما کانونی

پلاسما در واقع مجموعه‌ای از الکترون‌ها و یون‌هایی است که از یونیزه شدن یک ماده تا دماهای بسیار بالا، تشکیل شده است. دمای مربوط به این فرایند در حدود $5 \times 10^5 - 10^7 \text{ K}$ یا $50 \text{ eV} - 1 \text{ KeV}$ می‌باشد. این چنین دماهایی به طور طبیعی در جو ستارگان وجود دارد. در زمین توسط انفجارهای هسته‌ای و یا به وسیله استفاده از روش‌های کنترلی از قبیل دستگاه‌های تنگش، توکامک‌ها، اسپارک‌ها و همچنین روش کانونی کردن پرتوی نور لیزر پالسی بر روی مواد جامد و یا گاز، به این دماها می‌توان دست یافت. در دمای T_e (دما بر حسب eV)، طول پیک مربوط به طیف تابشی جسم سیاه را می‌توان از رابطه زیر بر حسب آنگستروم بدست آورد:

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2500}{T_{eV}} \quad 2-2$$

رابطه فوق به "قانون جابجایی وین"^{۱۱} معروف است. برای دماهای ارائه شده در بالا، ناحیه طول موج در محدوده $\lambda_{\text{peak}} \sim 2.5 \text{ \AA} - 50 \text{ \AA}$ است که نشان دهنده ناحیه پرتو ایکس می‌باشد. فرآیندهایی که در طی آن پلاسماها گسیل پیوسته دارند عبارتند از تابش ترمزی (که در اثر برهم-کنش کولنی الکترون‌ها و یون‌ها ایجاد می‌شود) و فرآیند بازترکیب (که در آن الکترون‌های آزاد در اثر فرآیند بازترکیب با یون‌ها انرژی خود را از دست می‌دهند). اگر الکترون‌های مقیدی انرژی خود را در اثر گذار از تراز بالا به تراز پایین، از دست بدهند در این صورت تابش را به صورت خطی یا گسسته خواهیم داشت. شدت‌های نسبی مربوط به گسیل‌های پیوسته و گسسته به چگونگی تشکیل پلاسما بستگی دارد. برای پلاسماهایی که از موادی با عدد اتمی بالایی تشکیل شده‌اند، تابش‌های پیوسته غالب هستند در صورتی که برای پلاسماهایی که از موادی با عدد اتمی پایین تشکیل شده‌اند، تابش‌های گسسته یا خطی غالب هستند. توان مربوط به این گسیل‌ها با استفاده از روابطی که به شرایط پلاسما بستگی دارد، بدست می‌آید. در زیر فرآیندهای گسیلی به صورت کیفی توصیف شده است [۶۷].

• گذارهای مقید-مقید

زمانی 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. شکل طیفی خطوط به

الف) طول عمر تراز با انرژی بالاتر (پهن شدگی طبیعی)

ب) توزیع سرعت یون‌های گسیل کننده (پهن شدگی دوپلری)

ج) اختلالات ایجاد شده توسط برخوردها (پهن شدگی برخوردی)

د) اثرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اثرات اشتارک و زیمن)

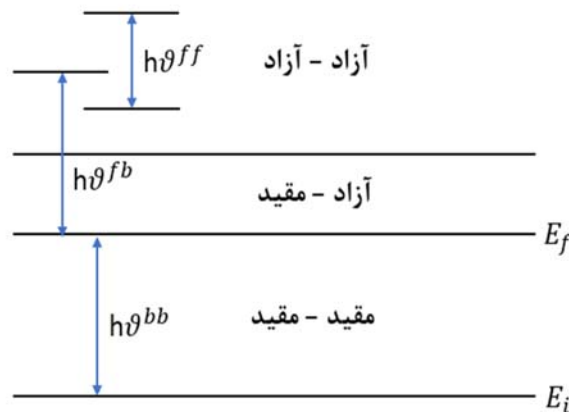
بستگی دارد. تابش‌های ایجاد شده ممکن است با دیگر مؤلفه‌های پلاسما برهمکنش کرده و یا ممکن است دوباره جذب و یا نشر شود. این امر باعث تغییر شکل یافتن خطوط طیفی نیز می‌شود. بنابراین با استفاده از نمای این خطوط می‌توان اطلاعات زیادی در مورد پلاسما به دست آورد. در دماهای خیلی بالا مواد به طور کامل یونیده می‌شوند و در نتیجه تابش مقید-مقید کمتر اتفاق می‌افتد.

• گذارهای مقید-آزاد

یک الکترون آزاد می‌تواند توسط تراز مقید یونی جذب شود. در نتیجه باعث کاهش بار یون به اندازه واحد می‌گردد. انرژی اضافی الکترون ممکن است به صورت فوتون‌هایی گسیل شود که ما آن را تابش مقید-آزاد یا تابش بازترکیبی می‌نامیم. طیف تابشی گذار مقید-آزاد به صورت پیوسته می‌باشد. شکل خطوط طیف به توزیع الکترون‌های آزاد و نیز سطح مقطع جمع‌آوری الکترون‌ها به درون تراز مقید، وابسته است.

• گذارهای آزاد-آزاد

وقتی الکترون آزادی با ذره آزاد دیگری برخورد کند از سرعتش کاسته می‌شود یا به عبارت دیگر انرژی خود را از دست می‌دهد. در نتیجه گذاری به حالت آزاد با انرژی پایین‌تر انجام می‌دهد. این انرژی اضافی را به صورت پیوسته از خود گسیل می‌کند که تحت عنوان تابش آزاد-آزاد یا تابش ترمزی معروف است. در پلاسماهایی با یونیزاسیون بالا و عدد اتمی بالا تابش ترمزی می‌تواند غالب باشد. در این صورت ضریب نشر طیفی بر واحد طول موج در حدود $\frac{6200}{T_{eV}} A$ است. با کاهش طول موج، گسیل خیلی سریع کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۳: گذارهای آزاد-آزاد

۲-۷ برهم کنش فوتون با ماده

پرتوهای ایکس یا پرتوهای گاما تابش الکترومغناطیسی هستند. اگر آن‌ها را به صورت ذره در نظر بگیریم، وقتی با سرعت نور C حرکت می‌کنند، جرم سکون و بار آن‌ها صفر است. نام مشترک برای

پرتوهای ایکس و گاما وقتی به صورت ذره در نظر گرفته شوند فوتون است [۸۲]. فوتون‌ها بر خلاف ذرات باردار، فاقد بار الکتریکی هستند و در خلال نفوذ به درون ماده انرژی خود را به طور یکنواخت از دست نمی‌دهند. این ذرات غیرمادی، می‌توانند پیش از آن که با یک اتم برهم‌کنش کنند مسافتی را درون ماده بپیمایند. مقدار نفوذ یک فوتون با انرژی معلوم به درون ماده، به صورت آماری توسط احتمال وقوع برهم‌کنش در واحد مسافت پیموده شده تعیین می‌شود که خود به ویژگی‌های محیط مادی و انرژی فوتون بستگی دارد. سازوکارهای اصلی انتقال انرژی از طرف فوتون به ماده عبارتند از برانگیختگی فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تولید زوج و واکنش‌های هسته‌ای حاصل از فوتون [۶۸]. رابطه انرژی، بسامد و طول موج عبارتند از:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad ۵-۲$$

عموما فوتون‌های با $E > 1\text{MeV}$ پرتو گاما و فوتون‌های با $E < 1\text{MeV}$ پرتو ایکس هستند [۸۲].

۲-۸ ضرایب تضعیف

نفوذ فوتون به درون ماده به صورت آماری توسط احتمال آن که فوتون در واحد مسافت پیموده از طریق یکی از فرآیندهای فیزیکی ممکن با اتم‌های ماده برهم‌کنش کند تعیین می‌شود. این احتمال که با نماد μ نشان داده می‌شود، ضریب تضعیف خطی نام دارد و دارای بعد وارون طول است. ضریب μ به انرژی فوتون و به ویژگی‌های ماده بستگی دارد. ضریب تضعیف جرمی، $\frac{\mu}{\rho}$ که معمولاً بر حسب یکای cm^2g^{-1} بیان می‌شود، نشانگر احتمال وقوع برهم‌کنش در $1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2}$ از ماده برانگیخته است. فوتون‌های تک انرژی در عبور از ماده برانگیخته یکنواخت، به طور نمایی تضعیف می‌شوند. هنگامی که باریکه به درون ماده تحریک‌شونده نفوذ می‌کند، برخی از فوتون‌ها می‌توانند پراکنده و برخی نیز برانگیخته شوند. اگر $N(x)$ تعداد فوتون‌هایی باشد که بدون انجام برهم‌کنش تا عمق x به درون ماده نفوذ می‌کنند، آن‌گاه تعداد فوتون‌هایی که در ضخامت کوچک dx بعدی، با ماده برهم‌کنش می‌کنند متناسب با N و dx است. بنابراین می‌توانیم چنین بنویسیم:

$$dN = -\mu N dx \quad ۶-۲$$

که در آن ثابت تناسب μ همان ضریب تضعیف خطی است. پاسخ این معادله به شکل زیر است:

$$N(x) = N e^{-\mu x} \quad ۷-۲$$

$e^{-\mu x}$ احتمال آن است که باریکه فرودی ضخامت x از ماده تحریک‌شونده را بدون انجام برهم‌کنش بپیماید. از این رو، سازه $e^{-\mu x}$ به طور کلی بیانگر کسری از فوتون‌هاست که بدون برخورد از درون ماده تحریک‌شونده عبور می‌کنند.

ضریب تضعیف خطی کل برای فوتون‌هایی با انرژی معلوم در یک ماده معین، از جمع ضریب‌های تضعیف مربوط به فرآیندهای فیزیکی گوناگون که سبب خروج فوتون‌ها از باریکه فرودی می‌شوند به دست می‌آید:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad ۸-۲$$

که در آن τ ، σ و κ به ترتیب عبارتند از ضریب تضعیف خطی فتوالکتریک، ضریب تضعیف خطی کامپتون و ضریب تضعیف خطی تولید زوج. ضریب‌های تضعیف جرمی متناظر عبارتند از $\frac{\tau}{\rho}$ ، $\frac{\sigma}{\rho}$ و $\frac{\mu}{\rho}$. مواد با عدد اتمی بزرگ سبب برانگیختگی و تضعیف فزاینده باریکه فوتونی می‌شوند و با افزایش انرژی فوتون‌ها ضریب تضعیف به سرعت کاهش می‌یابد [۶۹].

۲-۹ آشکارسازهای تابش

اندازه‌گیری تابش در کلیه جنبه‌های انرژی‌های هسته‌ای در مطالعات علمی، در کار رآکتورها برای تولید قدرت الکتریکی، و برای حفاظت در برابر آسیب‌های تابشی ضروری است. آشکارسازها برای شناسایی محصولات پرتوزای واکنش‌های هسته‌ای و اندازه‌گیری شار نوترون به کار می‌روند. آن‌ها مقدار رادیوایزوتوپ‌ها را در هوایی که استنشاق می‌کنیم و آبی که می‌خوریم، یا جذب یک نمونه از ماده پرتوزای تزریق شده به بدن انسان برای تشخیص پزشکی را اندازه‌گیری می‌کنند.

نیاز به آشکارساز به آنچه که می‌خواهیم بدانیم وابسته است: (الف) آیا یک زمینه تابشی وجود دارد؛ (ب) تعداد ذرات هسته‌ای برخورد کننده با یک سطح در هر ثانیه یا در هر فاصله زمانی به خصوص؛ (ج) نوع ذرات حاضر، و آیا انواع مختلف آن وجود دارد، و تعداد نسبی هر کدام؛ (د) انرژی هر کدام از ذرات فرودی (ه) زمان رسیدن ذره به آشکارساز. از اندازه‌گیری تابش می‌توان به خواص تابش مثلاً توانایی نفوذ آن در ماده و تولید یونیزاسیون پی‌برد. همچنین می‌توان خواص یک چشمه پرتوزا، شامل آهنگ واپاشی، نیمه عمر و مقدار ماده را تعیین نمود [۷۰].

۲-۱۰ آشکارسازهای ترمولومینسانس

۲-۱۰-۱ تاریخچه

گسیل نور از برخی مواد، پدیده‌ای جالب و پیچیده است که از دیرباز مورد توجه بوده و دارای کاربرد-های متنوع می‌باشد. در سال ۱۶۶۳ رابرت بویل از پیشگامان علم شیمی، از روشنایی عجیبی که هنگام گرم کردن الماس در تاریکی مشاهده کرد، خبر داد. هنری بکرل، در سال ۱۸۸۳ در طی تحقیقات خود پیرامون طیف مادون قرمز، اثر ترمولومینسانس را توصیف کرد و این نکته را بیان کرد که تابش پرتو مادون قرمز بر ماده فسفرسانس همان اثر افزایش دما را دارد.

ماری کوری در سال ۱۹۰۴ در رساله دکتری خود به پدیده ترمولومینسانس اشاره کرد. همچنین در سال ۱۹۲۵ بعد از کشف پرتو ایکس، در مورد اثر پرتو ایکس در ایجاد ترمولومینسانس مقاله‌ای ارائه کرد و نشان داد که ترمولومینسانس در موادی که زمان بیشتری در معرض تابش پرتو 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 [۸۳].

۲-۱۰-۲ پدیده ترمولومینسانس

برخی از مواد نیمه هادی یا عایق در صورتی که ابتدا پرتو دهی و سپس گرمادهی شوند، نور مرئی انتشار می‌دهند که به آن نور ترمولومینسانس گویند. بنابراین ترمولومینسانس انتشار نور مرئی از ماده در اثر تحریک گرمایی می‌باشد. موادی که دارای این خاصیت می‌باشند 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 می‌شوند. الکترون‌های برانگیخته شده به ترازهای انرژی بالاتر منتقل می‌شوند و به دلیل ناپایداری در زمان کوتاهی به حالت پایه قبلی برمی‌گردند که در مسیر بازگشت در دام‌های الکترونی که به واسطه ناخالصی و نقایص ذاتی در ماده ایجاد شده به دام می‌افتند و تا زمانی که مجدداً انرژی دریافت نکنند در دام باقی می‌مانند. به این ترتیب می‌توان گفت پرتوی برخوردی به ماده در آن ذخیره شده است. در صورتی که به وسیله گرما دوباره به ماده انرژی داده شود الکترون‌ها از دام آزاد شده و انرژی اضافی خود را با انتشار فوتون ترمولومینسانس انتشار می‌دهند. معمولاً گرمادهی به صورت خطی و تا دمای $250^{\circ}C$ صورت می‌پذیرد [۸۳].

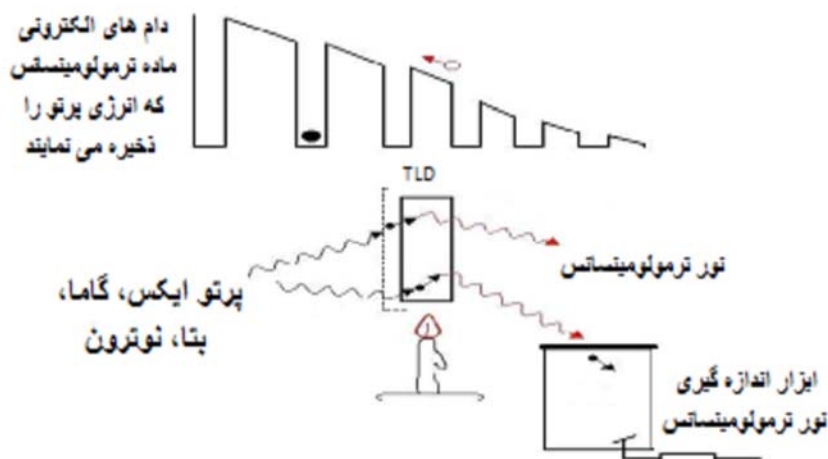
لازم است پرتوکاران به منظور تعیین مقدار پرتوگیری از پرتوهای ایکس یا گاما یا نوترون‌ها آشکارسازهای موسوم به دزیمر داشته باشند. دزیمر ترمولومینسانس یا گرمالیان (TLD)، که انرژی تابش جذب شده را اندازه‌گیری می‌کند، در زمره مطمئن‌ترین انواع است. این دزیمر دارای مواد بلوری مانند CaF_2 یا LiF است. هنگامی که ماده حرارت داده می‌شود نور را با یک منحنی تابش خاص آزاد می‌کند. یک تکثیرکننده فوتونی قله منحنی تابش را خوانده و مقادیر انرژی جذب شده انباشته شده، یعنی دز را می‌دهد. در گستره وسیعی از پرتوگیری پاسخ دستگاه خطی است [۷۱].

وقتی ناخالصی‌های فعالساز ویژه به بلور افزوده شوند، زوج‌های الکترون-حفره به تشکیل حالت‌های برانگیخته با انرژی‌هایی که در گاف ممنوع قرار می‌گیرند منجر می‌شوند. در یک آشکارساز ترمولومینسانس، مطلوب آن است که حالت‌های برانگیخته به سرعت به حالت پایه و انگیخته شوند، به طوری که تابش فلورسان بی‌درنگ گسیل شود. ماده بلوری و ناخالصی‌های افزوده شده به گونه‌ای برگزیده می‌شوند که در دمای اتاق، الکترون‌ها و حفره‌ها توسط ناخالصی‌ها به دام افتند و بدین‌سان انرژی برانگیختگی در بلور حبس شود. یک بلور TLD هنگامی که در میدان تابشی قرار می‌گیرد به منزله یک آشکارساز برافزاینده انجام وظیفه می‌کند که در آن، شمار الکترون‌ها و حفره‌های به دام افتاده به تاریخچه پرتوگیری تابشی بلور بستگی دارد.

پس از پرتوگیری، ماده TLD را گرم می‌کنند. با افزایش دما، الکترون‌ها و حفره‌های به دام افتاده مهاجرت می‌کنند و با یکدیگر ترکیب می‌شوند، که نتیجه آن گسیل فوتون‌هایی با انرژی چند eV است. تعدادی از این فوتون‌ها وارد لامپ افزونگر فوتونی می‌شوند و یک علامت الکترونیکی تولید می‌کنند. نمونه معمولاً در یک وسیله قرائتگر TLD، موسوم به خواننده پردازش می‌شود. این وسیله ماده را به طور خودکار گرم می‌کند، بهره نوری را به عنوان تابعی از دما اندازه می‌گیرد، و اطلاعات بدست‌آمده را به صورت یک منحنی تابانی، می‌نگارد. دمایی که در آن شدت نور بیشینه است معیار انرژی بستگی الکترون به حفره در داخل دام است. منحنی‌های تابانی نوعی بیش از یک قله دارند، که این قله‌ها مربوط به دام‌های مختلف با انرژی‌های بستگی متفاوت هستند. دامنه قله‌ها متناسب با تعداد حامل‌های باری است که در دام‌های مربوط گیرافتاده‌اند. دز تابش جذب شده را از مقایسه مقدار کل نور برون‌دادی یا سطح زیر منحنی تابانی با آنچه که از دزسنج گرمالیانی مدرج بدست می‌آید می‌توان تعیین کرد. اگر دزسنج تا دمای به حد کافی بالا گرم شود می‌توان تمام دام‌ها را تهی ساخت و بلور را دوباره مورد استفاده قرار داد [۷۲].

وقتی پرتو یوننده‌ای بر یک بلور می‌تابد، انرژی داده شده به الکترون‌ها می‌تواند چند پیامد داشته باشد. الکترون ممکن است به اندازه کافی انرژی به دست آورد که از نوار ظرفیت به نوار رسانش منتقل شود،

این فرایند یونش خوانده می‌شود. یا الکترون به اندازه کافی انرژی بدست می‌آورد که به یک حالت برانگیخته برود و یک اکسیژن تشکیل دهد. اکسیژن که از یک الکترون و یک حفره که به طور الکتروستاتیکی در قید یکدیگرند تشکیل شده است، می‌تواند در بلور حرکت کند. الکترون‌ها، حفره‌ها و اکسیژن‌ها ممکن است در "دام‌های" متعددی که در جامد وجود دارند گرفتار آیند. دام‌ها به راه‌های مختلفی تشکیل می‌شوند. اگر دمای بلور ثابت بماند یا کاهش یابد حامل‌های به دام افتاده برای زمان طولانی در جای خود باقی می‌مانند. با این همه اگر دمای بلور را افزایش دهیم، احتمال فرار افزایش می‌یابد. وقتی الکترون و حفره آزاد می‌شوند و به حالت پایه برمی‌گردند نور گسیل می‌کنند. گسیل این نور گرمالیان خوانده می‌شود و خصوصیتی است که TLD ها بر پایه آن کار می‌کنند.



شکل ۲-۴: تابش آشکارساز

مواد گرمالیانی متعددی وجود دارند، اما آن‌هایی که برای دزسنجی مفیدند باید دارای ویژگی‌های زیر باشند:

- ✓ نگهداری حامل‌های به دام افتاده برای دوره‌های بلند زمان در دماهای محیط پرتوگیری
- ✓ نور خروجی زیاد
- ✓ پاسخ خطی در گستره وسیعی از دز
- ✓ بازپزی کامل برای استفاده‌های پی در پی [۷۳]

۲-۱۰-۳ کاربردهای ترمولومینسانس

مهم‌ترین کاربردهای مواد ترمولومینسانس، استفاده از این مواد برای هدف‌های دزیمتری و عمرسنجی می‌باشد. تاریخ استفاده از پدیده ترمولومینسانس برای هدف‌های دزیمتری، به دهه ۱۹۵۰ بازمی‌گردد. تا این زمان، دزیمتری عمدتاً با استفاده از فیلم‌های حساس به پرتوهای مختلف صورت می‌گرفت که دارای محدودیت‌هایی از جمله محوشدگی، حساسیت به عوامل محیط و نیاز به کاربرد فرآیندهای نسبتاً پیچیده‌ای در اتاق تاریک است. بنابراین در اوایل دهه ۱۹۵۰، اقدامات جدی برای یافتن جانشین مناسب‌تر آغاز شد. به دنبال آن دزیمترهای رادیوفوتولومینسانس در ابعاد وسیع، تولید و برای اهداف نظامی به کار رفت، که عمده آن‌ها توسط کیرک در سال ۱۹۵۷ صورت گرفت. در سال ۱۹۶۱ کارتن و همکارانش با ادامه تحقیقات دانیلز در سال ۱۹۵۳ در خصوص ماده لیتیم فلئوراید و با افزایش ناخالصی‌های منیزیم و تیتانیوم به عنوان فعال‌ساز موفق به ساخت دزیمتری شدند که امروزه نیز به طور وسیع تحت عنوان TLD-100 مورد استفاده قرار می‌گیرد. با گسترش استفاده از مواد ترمولومینسانس برای دزیمتری پرتوهای مختلف، دو نمونه دیگر از ترکیبات لیتیم فلئوراید تحت عناوین TLD-600 و TLD-700 با درصد تغییر ایزوتوپ ${}^6\text{Li}$ و ${}^7\text{Li}$ در ترکیب طبیعی و برای اندازه‌گیری هم‌زمان دز پرتوهای گاما، بتا و نوترون عرضه شدند [۸۳ و ۸۴].

۲-۱۱ یکاهای دز تابش

برای بحث اثرات تابش تعدادی اصطلاح اختصاصی ضروری است. اولی عبارت است از دز جذب شده (D). آن عبارت است از مقدار انرژی تحویل شده به هر کیلوگرم از بافت پرتو دیده، بر حسب ژول، و آن به صورت یونیزاسیون و برانگیختگی مولکول‌ها یا اتم‌های بافت ظاهر می‌گردد. یکای SI دز گری (Gy) است که عبارت است از 1 J/kg. واحد قدیمی‌تر جذب انرژی، راد (rad) است، که برابر 100 erg است، یعنی $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$ [۷۴]. بعبارت دیگر یک راد برابر با انرژی جذب شده 100 erg در یک گرم ماده یا بافت است [۸۱].

$$1 \text{ RAD} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}} \quad ۹-۲$$

اثر زیست‌شناختی انرژی برجای‌مانده می‌تواند بسته به نوع تابش بزرگ یا کوچک باشد. مثلاً دز یک راد حاصل از نوترون‌های سریع یا ذرات آلفا بسیار مخرب‌تر از دز یک راد پرتوهای ایکس یا گاما است. به طور کلی، ذرات سنگین به دلیل اتلاف انرژی بزرگ‌تر با فاصله و به وجود آمدن غلظت بالای

یونیزاسیون، اثر جدی تری نسبت به فوتون‌ها ایجاد می‌کنند. دز معادل (H) به عنوان کمیت مهم تفاوت‌های ناشی از جذب انرژی با عامل کیفیت (QF) را، با مقادیری مثل جدول 1-2 در نظر می‌گیرد.

جدول ۱-۲: عوامل کیفیت

عوامل کیفیت	
۱	پرتوهای ایکس، گاما و ذرات بتا
۲	نوترون‌های گرمایی 0.025 eV
۱۰	نوترون‌های با انرژی نامعلوم
۱۰	پروتون‌های انرژی بالا
۲۰	یون‌های سنگین، شامل ذرات آلفا

$$H = (D)(QF)$$

۱۰-۲

اگر D بر حسب Gy بیان شود، آن گاه H بر حسب سیورت (Sv) خواهد بود؛ اگر D بر حسب راد باشد، آن گاه H بر حسب رم (rem) خواهد بود.

آهنگ دز پرتو $\frac{dD}{dt}$ ، مقدار انرژی جذب شده در واحد زمان و واحد جرم است. یکای آن ممکن است به صورت راد یا mGy بر دقیقه، راد یا cGy در ساعت، راد یا Gy در روز بیان شود [۸۱]. اثر بلند مدت تابش بر روی یک موجود زنده همچنین به آهنگ انرژی تابیده شده، بستگی دارد. از این رو از آهنگ دز بیان شده بر حسب یکاهای مناسب مانند راد در ساعت یا میلی رم در سال استفاده می‌شود. توجه داشته باشید که اگر دز یک انرژی باشد، آهنگ دز یک قدرت است [۷۴].

۲-۱۲ حفاظت در برابر پرتوها

حفاظت موجودات زیست شناختی از خطر پرتوگیری یک نیاز اولیه در کاربرد انرژی هسته‌ای است. ایمنی با استفاده از یک یا چند روش عمومی که متضمن کنترل چشمه تابش یا توانایی آن برای متأثر نمودن موجودات زنده هستند فراهم می‌شود.

تابش و مواد پرتوزا رابطی بین یک دستگاه با یک فرآیند به عنوان یک چشمه و موجود زنده برای محافظت شدن است. می‌توان برای حذف چشمه یا جابجا کردن فرد تلاش نمود، یا مانعی را بین این دو وارد ساخت. لذا راه‌های متعددی برای کمک به تضمین ایمنی قابل دسترسی است:

- ✓ اجتناب از تولید تابش یا ایزوتوپ‌های گسیل‌کننده ناخواسته تابش
- ✓ اطمینان از این که هر ماده پرتوزا برای جلوگیری از پخش شدن، در داخل ظروف یا مانع‌های متعدد نگه‌داشته شده باشد
- ✓ فراهم نمودن لایه‌های مواد حفاظ بین چشمه تابش و فرد و انتخاب ویژگی‌های مطلوب واسطه‌های زمین شناختی که در آن پسماندها دفن می‌شوند
- ✓ محدود نمودن دسترسی به ناحیه‌ای که در آن سطح تابش خطرناک است، و استفاده از مزیت کاهش شدت با فاصله
- ✓ رقیق نمودن ماده پرتوزا با حجم‌های بسیار بزرگ هوا یا آب در زمان رها شدن برای پایین آوردن غلظت ماده خطرناک
- ✓ محدود نمودن زمانی که فرد در منطقه تابش می‌ماند، با هدف کاهش دز دریافت شده [۷۵]

۲-۱۳ اثرات فاصله و حفاظ

برای حفاظت، می‌توان از این حقیقت که شدت‌های تابش با فاصله از چشمه کاهش و با معکوس توان دوم فاصله تغییر می‌کند، بهره جست.

ذراتی را در نظر می‌گیریم که اغلب با آن‌ها سر و کار داریم. چون ذرات باردار (الکترون‌ها و ذرات آلفا و پروتون‌ها و ...) دارای برد بسیار کوتاه در ماده هستند، لازم است فقط به تابش با نفوذ (پرتوهای گاما یا ایکس) و نوترون‌ها توجه شود. ضریب تضعیف با عمق نفوذ برای فوتون‌ها و نوترون‌ها می‌تواند به شکل نمایی $e^{-\Sigma r}$ که در آن r عبارت است از فاصله تا چشمه و Σ یک سطح مقطع میکروسکوپی مناسب است بیان شود. در تحلیل حفاظ، این ضریب تضعیف خطی، μ با یکای cm^{-1} نامیده می‌شود. باید توجه داشت که I یا σ به تعداد اتم‌های هدف بستگی دارد، و از طریق سطح مقطع میکروسکوپی σ به نوع تابش، انرژی آن و خواص شیمیایی و هسته‌ای هدف نیز بستگی دارد. برای حفاظ‌گذاری نوترون سریع، یک عنصر سبک به دلیل اتلاف وسیع انرژی نوترون به ازای هر برخورد ترجیح داده می‌شود. لذا مواد هیدروژن‌دار مانند آب، بتن، یا زمین حفاظ‌های مؤثر هستند. هدف، کند نمودن نوترون‌ها در فاصله کوچکی از منشأ آن‌ها و اجازه دادن به آن‌ها به جذب شدن در انرژی گرمایی است. نوترون‌های گرمایی به راحتی به وسیله بسیاری از مواد جذب می‌شوند، اما بور به دلیل این که پرتو گاما همراه آن بسیار ضعیف است، ترجیح داده می‌شود.

برای حفاظ گذاری پرتو گاما یا ایکس که در آنها برهمکنش اصلی با الکترون‌های اتمی به وقوع می‌پیوندد، ماده با عدد اتمی بالا مطلوب است. پراکندگی کامپتون با Z ، تولید زوج با Z^2 و پدیده فوتوالکتریک با Z^5 تغییر می‌کند. عناصری مانند آهن و سرب برای حفاظ این پرتوها به ویژه مفید هستند. مقدار تضعیف به ماده حفاظ، ضخامت آن و انرژی فوتون بستگی دارد [۷۵].

۲-۱۳-۱ حفاظ گذاری در برابر پرتوهای ایکس

یک روش حفاظ گذاری در برابر پرتوهای ایکس تجهیز دستگاه مولد پرتو ایکس با یک حفاظ ساختمانی می‌باشد. یک سد محافظ اصلی مانند دیواری با یک پوشش سربی، حفاظت در برابر باریکه مفید را بر عهده دارد و در محلی بر سر راه این پرتوها قرار داده می‌شود. این حفاظ آهنک پرتودهی را در خارج از ناحیه پرتو ایکس در جهت باریکه مفید کاهش می‌دهد. برخی اوقات، اجزاء ساختمانی موجود، مانند دیوارهای بتونی، به منزله سدهای فرعی مناسب عمل می‌کنند. در غیر این صورت لازم است حفاظ‌های اضافی مانند ورقه‌های سربی به این دیوارها افزوده شوند.

سرب مؤثرترین و عملی‌ترین ماده برای حفاظ گذاری در برابر پرتو ایکس است. از نظر وزن، این ماده به طور قابل ملاحظه‌ای سبک‌تر از بتون است. نسبت ضخامت بتن به ضخامت سرب برابر $۱۷/۹$ است. بنابراین یک حفاظ بتونی که سطح معینی را پوشانده است باید $۱۷/۹$ بار سنگین‌تر از یک حفاظ سربی باشد که همان سطح را می‌پوشاند. دلیل فیزیکی اصلی تفاوت مزبور آن است که ضریب تضعیف فوتوالکتریک در سرب برای مقادیر کوچک انرژی فوتون‌ها خیلی بزرگ‌تر از ضریب تضعیف فوتوالکتریک در بتون است [۷۶].

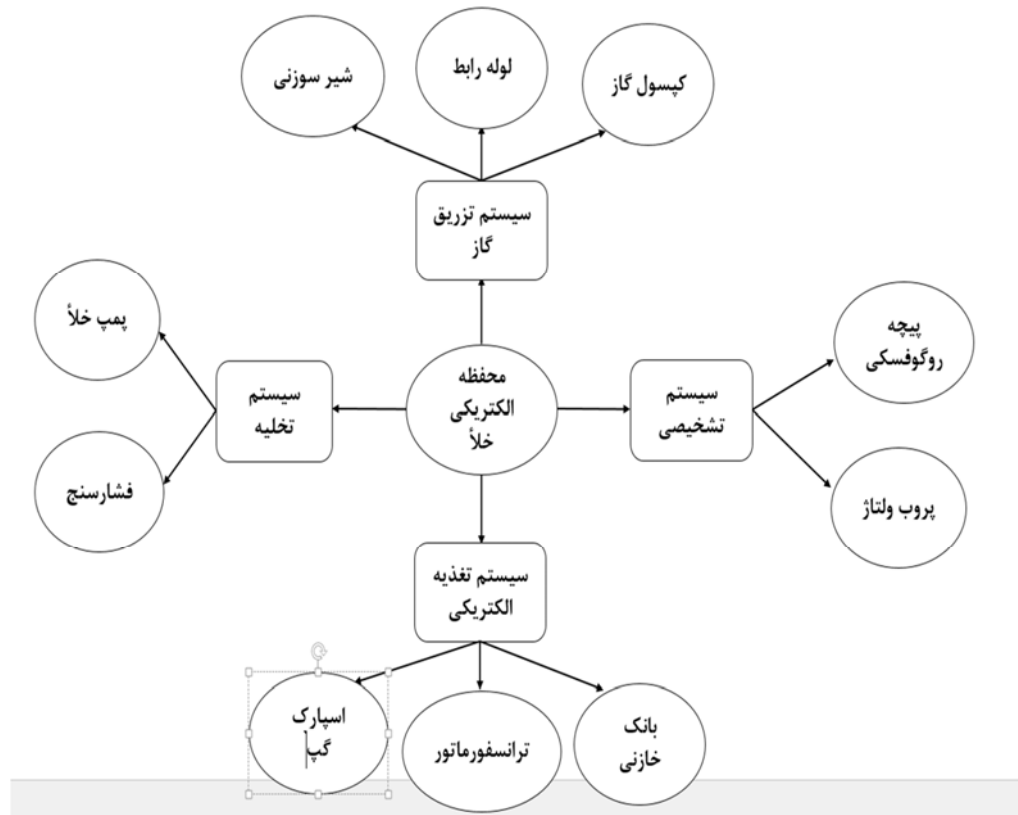
فصل ۳ : چیدمان آزمایش و ابزار اندازه گیری

۳-۱ مقدمه

در این پژوهش با توجه به هدف، از ابزار و وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش استفاده شده است. هدف از انجام آزمایش‌ها در این پژوهش، اندازه‌گیری دز پرتو ایکس خروجی از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. در این فصل ابتدا مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی را ذکر کرده و سپس ساختار کلی و چیدمان آزمایش را بیان می‌کنیم. در ادامه به شرح سیستم‌های تشخیصی و ابزار اندازه‌گیری و روش انجام آزمایش خواهیم پرداخت.

۳-۲ ساختار کلی و چیدمان آزمایش

ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود شامل چهار بخش اصلی می‌باشد که در شکل زیر به صورت شماتیکی به نمایش درآمده است.



شکل ۳-۱: ساختار کلی دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود

۳-۳ مشخصات دستگاه

دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود از نوع مدر می‌باشد. ظرفیت خازن این دستگاه معادل $C_0 = 16$

μf و ولتاژ بیشینه $V_0 = 12 \text{ kV}$ با اندوکتانس $L_0 = 200 \text{ nH}$ است. انرژی بیشینه دستگاه برابر $1/15 \text{ kJ}$ می‌باشد. مشخصات کامل دستگاه در جدول ۱-۳ بیان شده است.

جدول ۱-۳: ویژگی‌های دستگاه پلاسمای کانونی

پارامترها	مقادیر
امپدانس سیستم	$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 0.111$
ولتاژ بیشینه	$V_0 = 12 \text{ Kv}$
شعاع آند	$a = 10 \text{ mm}$
شعاع کاتد	$b = 5 \text{ mm}$
طول آند	$z_0 = 60 \text{ mm}$

۳-۴ سیستم تخلیه و دمش

پمپ، فشارسنج، شیرها و لوله‌های متصل‌کننده، مجموعه‌ای است که طراحی سیستم‌های تخلیه و دمش گاز یک سیستم خلأ را موجب می‌شود. سیستم الکتروودی پلاسمای کانونی در داخل محفظه خلأ جای می‌گیرد. با استفاده از یک پمپ روتاری دو مرحله‌ای، فشار اولیه این محفظه در حدود 10^{-2} تا 10^{-3} میلی بار است.

۳-۴-۱ محفظه خلأ

محفظة‌های خلأ در دو نوع استیل ضدزنگ و شیشه‌ای موجود هستند. در این پژوهش از استیل ضدزنگ استفاده شده است. محفظه خلأ از سه قسمت اصلی زیر تشکیل شده‌اند:
بدنه اصلی: استوانه‌ای به ارتفاع ۲۵۲ میلی‌متر، قطر ۱۶۳ میلی‌متر و از جنس استیل ضدزنگ است. ضخامت استیل استفاده شده در بدنه ۳/۵ میلی‌متر است. ضخامت باید به گونه‌ای باشد که بتواند نیروی ناشی از اختلاف فشار درون محفظه و محیط بیرون را تحمل کند. این محفظه دارای چهار بازو

می‌باشد که دو به دو مقابل یکدیگر قرار دارند که برای اتصال سیستم سایه‌نگاری، تصویربرداری و ... استفاده می‌شود.



شکل ۳-۲: محفظه خلأ

صفحه پایه: الکترودها بر روی این قسمت قرار گرفته‌اند. در قسمت مرکزی آند از جنس مس به طول ۶ cm با سطح مقطع دایره به قطر ۱۹ mm قرار دارد. در اطراف آند، عایقی از جنس پیرکس به طول ۴ cm است که قابلیت تعویض دارد. کاند هم از ۶ میله برنجی به ارتفاع ۶ cm در اطراف آند روی صفحه پایه قرار می‌گیرد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳: الکترودها

دیواره فلانچ دار: این دیواره‌ها امکان نصب سیستم‌های اندازه‌گیری اشعه ایکس، سایه‌نگاری لیزری،

فشارسنج، پمپ خلأ و ... بر روی دستگاه را به کاربر می‌دهد. طراحی ابعاد محفظه خلأ با توجه به نیاز محقق انجام می‌شود، بطوریکه امکان نصب سایر قطعات و اتصالات استاندارد بر روی این محفظه‌ها وجود داشته باشد. مثلاً با نصب پنجره دید روی بدنه اصلی امکان مشاهده تمامی فضای داخل محفظه فراهم می‌گردد. فلانچ‌ها بر روی دیواره و روی صفحه پایه تعبیه می‌شود به طوریکه بتوان قطعات مورد نیاز از جمله فشارسنج، پمپ خلأ و سایر قطعات را نصب نمود. همانطور که در شکل ۳-۳ دیده می‌شود قسمت پایین محفظه خلأ به طور متقارن از طریق ۱۲ کابل هم محور به قطب منفی (زمین) خازن وصل شده است. به عبارتی دیگر بدنه محفظه خلأ به زمین متصل است. با توجه به این که کاتد به محفظه وصل است می‌توان گفت کاتد به زمین وصل است.

۳-۴-۲ پمپ خلأ

در دستگاه‌های پلاسمای کانونی برای تشکیل پینچ نیاز به ایجاد خلأ اولیه است. فشار اولیه این محفظه (فشار خلأ اولیه) معمولاً در حدود 10^{-2} تا 10^{-3} میلی‌بار است که این فشار با استفاده از یک پمپ روتاری تک مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای یا پمپ روتاری یا پمپ توربو قابل دسترسی است.



شکل ۳-۴: پمپ خلأ

پمپ استفاده شده از نوع روتاری دو مرحله‌ای مدل VE280N است (شکل ۳-۴). پمپ توسط برق شهر تغذیه می‌شود و آهنگ تخلیه آن حدود 226 Lit/min است. با این نرخ تخلیه میتوان به خلأ در حدود 10^{-3} torr رسید.

۳-۴-۳ فشارسنج

همانطور که قبلا بیان شد سیستم پلاسمای کانونی در فشارهای پایین (از مرتبه چند تور) کار می‌کند. باید محفظه تا فشارهای در حد میلی‌تور پایین بیاوریم و سپس گاز را تزریق کنیم. برای اندازه‌گیری و مشاهده فشار داخل محفظه از گیج پیرانی و نمایشگر دیجیتالی استفاده می‌کنیم.



شکل ۳-۵: فشارسنج



شکل ۳-۶: گیج پیرانی

۳-۴-۴ کپسول گاز و شیر سوزنی

گازهای مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۳-۷ نمایش داده شده که دارای خصوصیات زیر هستند:

- ✓ گاز آرگون، شرکت سپهر گاز کاویان سیلندر 50 لیتری با خلوص ۹۹/۹۹۹۵٪
- ✓ گاز نیتروژن، شرکت سپهر گاز کاویان سیلندر 44 لیتری با خلوص ۹۹/۹۹۹۵٪



شکل ۳-۷: کیسول‌های گاز مورد استفاده

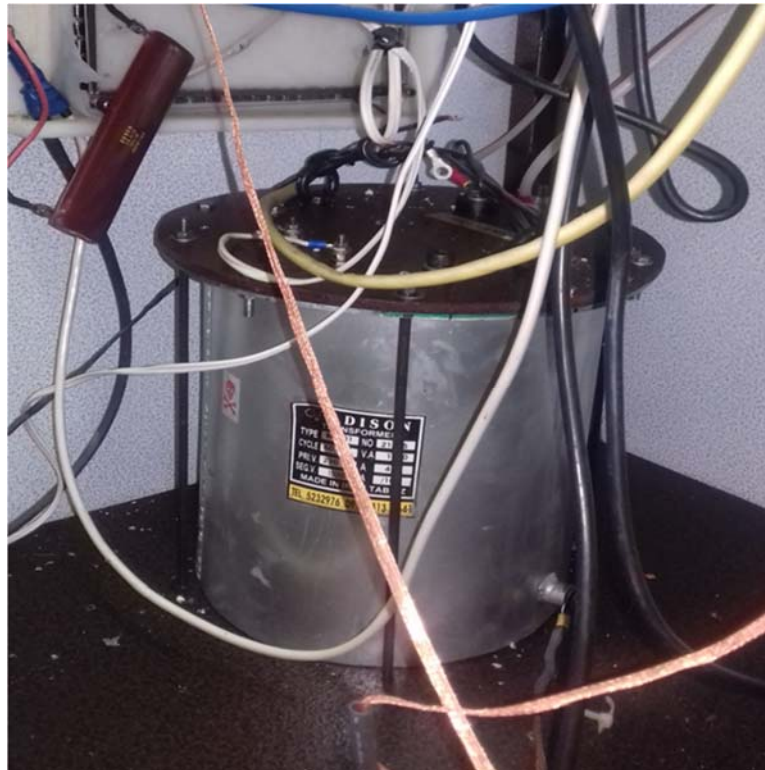
برای کنترل میزان گاز ورودی به داخل محفظه خلأ از شیر سوزنی استفاده شده است. شیر سوزنی از یک طرف توسط لوله بسیار نازک مسی به رگلاتور سر کیسول وصل شده است و از طرفی دیگر توسط کلمب به محفظه خلأ متصل شده است. رایج‌ترین مصرف این نوع شیرها در حوزه ابزار دقیق می‌باشد و به راحتی می‌توان میزان عبور گاز را کنترل کرد.

۳-۵ سیستم تغذیه الکتریکی

انرژی الکتریکی دستگاه پلاسمای کانونی توسط این سیستم تأمین می‌شود به طوری که بانک خازنی شارژ شده و از طریق اسپارک گپ این انرژی به محفظه خلأ انتقال می‌یابد. این سیستم شامل قسمت‌هایی است که در ادامه به معرفی آن‌ها خواهیم پرداخت.

۳-۵-۱ ترانسفورماتور

برای شارژ خازن دستگاه از سیم پیچ ولتاژ بالا و یکسوکننده‌هایی استفاده شده که برق ۲۲۰ ولت شهر را به برق مستقیم تا نهایت ۱۲ کیلوولت (ولتاژ خروجی قابل تبدیل است) تبدیل می‌کند. در شکل ۳-۸ نمایی از ترانس استفاده شده در دستگاه نمایش داده شده است.



شکل ۳-۸ : ترانسفورماتور

ترانس استفاده شده در این سیستم همواره در داخل روغن مخصوص ولتاژ بالا نگهداری می‌شود.

۳-۵-۲ بانک خازنی

خازن دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود شکل ۳-۹ یک خازن ولتاژ بالا با ظرفیت $16 \mu\text{f}$ و بیشینه ولتاژ اعمالی 12 kV می‌باشد. با توجه به رابطه $E = \frac{1}{2}CV^2$ ، C ظرفیت خازن و V اختلاف پتانسیل دو سر خازن است، مقدار انرژی مربوط به این دستگاه kJ بدست می‌آید.



شکل ۳-۹: بانک خازنی

۳-۵-۳ اسپارک گپ

به منظور انتقال سریع و متقارن انرژی ذخیره شده در بانک خازنی، در یک لحظه به دو سر آند و کاتد از اسپارک گپ (سوئیچ سریع) استفاده می‌شود. سیستم اسپارک گپ از دو صفحه موازی برای انتقال جریان بالا با اندوکتانس پایین تشکیل شده است؛ که توانایی تحمل ولتاژهای بالا و قدرت انتقال جریان تا چند صد آمپر را دارد. جریان اعمالی از طریق یونیزه شدن هوای بین دو صفحه برقرار می‌شود. اسپارک گپ استفاده شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود از نوع تریگاترون می‌باشد (شکل ۳-۱۰).



شکل ۳-۱۰: اسپارک گپ

این نوع اسپارک گپ شامل دو الکتروود A و B است که در فاصله d از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این الکتروودها یا بوسیله پوشش C که از یک ماده عایق مانند تفلون ساخته شده است در یک محفظه بسته نگهداری می‌شوند و یا بدون محافظ قرار می‌گیرند. الکتروود سوم D، تریگر است. محل قرار گرفتن آن به طراحی اسپارک گپ بستگی دارد و نقش آن ایجاد شکست در هوای بین الکتروودها و شروع تخلیه است. ولتاژ لازم به وسیله سیستم تریگر به الکتروود D اعمال می‌شود. به این ترتیب فاصله d باید به گونه‌ای انتخاب شود که قبل از رسیدن شارژ خازن به مقدار مورد نظر، شکست رخ ندهد و عمل تخلیه الکتریکی به طور کاملاً کنترل شده آغاز شود. در ساختار اسپارک گپ تریگاترون، الکتروود تریگر در داخل یکی از الکتروودها قرار می‌گیرد و توسط عایق E از آن جدا می‌شود.

۳-۵-۴ تریگر

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

۳-۵-۵ اتصال به زمین

این سیستم به واقع بعد از عمل تریگ و تخلیه الکتریکی، دو سر خازن را به هم وصل می‌نماید و باقیمانده انرژی ذخیره شده در خازن را تخلیه می‌کند و بعد از آن خازن بطور کامل تخلیه می‌شود. این سیستم از یک آهنربا تشکیل شده است که با اتصال کلید مربوطه میدان مغناطیسی در سیستم ایجاد می‌شود و اهرم مربوط به اتصال به زمین از مکان اولیه‌اش جدا می‌شود و یا به عبارت دیگر، دو سر خازن را از هم جدا می‌کند. در هنگام شارژ کردن خازن باید این سیستم روشن باشد تا با اعمال ولتاژ، خازن شارژ شود. پس از عمل تریگ و دشارژ خازن باید بلافاصله این سیستم را خاموش نمود تا باقیمانده انرژی ذخیره شده در خازن تخلیه شود، در غیراین صورت خازن دچار آسیب می‌شود.



شکل ۳-۱۱: اتصال به زمین

۳-۶ سیستم تشخیصی

در آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی مثل ولتاژ، جریان، مشتق جریان از سیستم‌هایی استفاده کرده‌ایم که به بیان آنها خواهیم پرداخت.

۳-۶-۱ اسیلوسکوپ

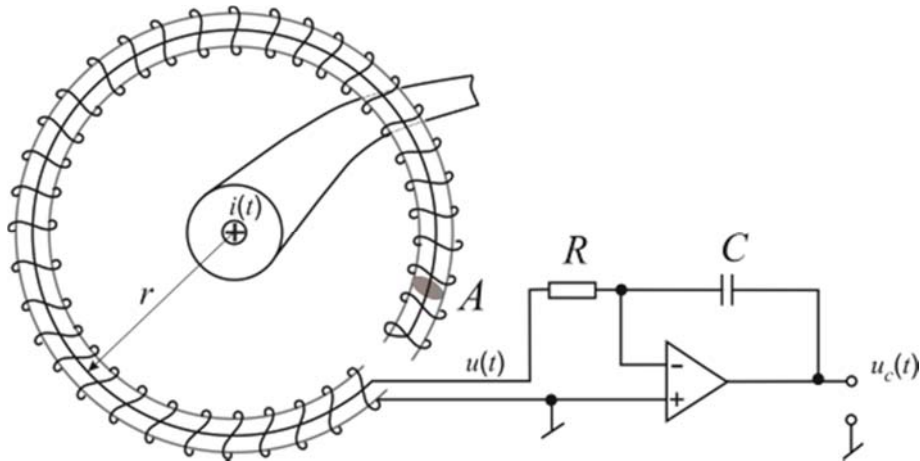
دستگاهی الکترونیکی است که امکان مشاهده ولتاژ را فراهم می‌کند. غالباً مقدار ولتاژ به صورت نموداری دوبعدی نمایش داده می‌شود که محور افقی، زمان و محور عمودی آن ولتاژ است. از نوسان- نما برای نمایش دقیق موج استفاده می‌شود. علاوه بر دامنه، معمولاً قادر به اندازه‌گیری و نمایش دیگر پارامترها مانند عرض پالس، دوره تناوب و زمان بین دو حادثه (مانند وقوع دو پیک) هستند. اسیلوسکوپ مورد استفاده از نوع دیجیتال چهار کاناله که قابلیت ذخیره‌سازی نیز دارد استفاده شده است.



شکل ۳-۱۲: نمایی از اسیلوسکوپ مدل GPS-1204C

۳-۶-۲ پیچه رگوفسکی

پیچه رگوفسکی یکی از وسایل اندازه‌گیری جریان است که بر مبنای قانون آمپر کار می‌کند. سال- هاست که از این وسیله برای آشکارسازی و اندازه‌گیری جریان استفاده می‌شود. ساختار پیچه همانطور که در شکل ۳-۱۳ نمایش داده شده است، به صورت چنبر پیچیده شده است و یک هادی حامل جریان از میان آن عبور می‌کند. جریان عبوری از هادی سبب القای ولتاژ در ترمینال‌های خروجی پیچه می‌گردد، این ولتاژ متناسب با مشتق جریان عبوری از هادی است. اصلی‌ترین مزیت پیچه رگوفسکی در مقایسه با ترانسفورماتور جریان هسته غیرمغناطیسی آن می- باشد به این صورت که با استفاده از پیچه مشکل اشباع هسته از بین رفته است.



شکل ۳-۱۳: ساختار پیچه روگوفسکی

طرز کار پیچه روگوفسکی بر اساس قانون آمپر به صورت زیر تحلیل می شود:

$$\Phi = NBA \quad 1-3$$

$$V_0 = - \frac{d\phi}{dt} \quad 2-3$$

با ترکیب دو رابطه بالا خواهیم داشت:

$$V_0 = - \frac{\mu_0 NA}{2\pi r} \frac{dI}{dt} \quad 3-3$$

رابطه فوق نشان می دهد که ولتاژ القا شده متناسب با نرخ تغییرات جریان می باشد، بنابراین مقدار کل جریان تخلیه را می توان از اندازه گیری ولتاژ خروجی و انتگرال گیری از آن بدست آورد. سیگنال مشاهده شده بر روی اسیلوسکوپ تا حدودی کمتر از سیگنال واقعی است که ممکن است این تضعیف در مسیر کابل ایجاد شده باشد.

پیچه روگوفسکی استفاده شده در دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود دارای قطر اصلی 16 cm و قطر فرعی 11 cm می باشد. قطر سیم به کار رفته شده در این پیچه 1/5 mm و تعداد دورهای آن 280 می باشد.

۳-۶-۳ پروب ولتاژ

پروب ولتاژ مقدار اختلاف پتانسیل بین دو قسمت ولتاژ بالای سیستم پلاسمای کانونی را اندازه گیری می کند. پروب ولتاژ تقسیم کننده ولتاژ از نوع مقاومتی می باشد که مقدار ولتاژ را تا 100 برابر کاهش

می‌دهد. شکل ۳-۱۴ نمایی از آن را نشان می‌دهد. در این شکل اجزای تشکیل‌دهنده این سیستم شامل ۱۰ عدد مقاومت ۵۱۰ اهمی شنت است.



شکل ۳-۱۴: پروب ولتاژ

این تقسیم‌کننده ولتاژ با یک لوله مسی پوشیده می‌شود که نقش کاهنده نویز را ایفا می‌کند. یکی از منحنی‌هایی که در تحلیل داده‌ها خیلی مهم است، سیگنال مربوط به ولتاژ الکتریکی است که توسط اسیلوسکوپ ثبت می‌گردد.

۳-۷ آشکارساز

برای دزیمتری نقطه‌ای و اطلاع از چگونگی توزیع شدت پرتو ایکس، درون چمبر در نقاط مشخصی قرص‌های TLD را قرار می‌دهیم سپس در فشار و ولتاژ تنظیم شده با گاز کاری مورد نظر شات می‌زنیم. پس از تشکیل پینچ، پرتو ایکس تولید می‌شود. با مکانیسمی که در فصل قبل شرح داده شد، انرژی ناشی از پرتو تابیده شده به آشکارسازها درون آن‌ها ذخیره می‌شود. پس از زدن تعداد معینی شات، آشکارسازها را از درون چمبر بیرون آورده و برای اطلاع از مقدار جذب پرتو توسط هر آشکارساز، آن‌ها را در سیستم خوانش دزیمتر قرار می‌دهیم.

آشکارسازهای مورد استفاده از نوع TLD-100 که آشکارساز مناسبی جهت آشکارسازی فوتون می‌باشد و دارای ابعاد کوچک $3/1 \times 3/1$ mm به ضخامت $1/4$ mm می‌باشند. ابعاد کوچک دزیمترهای TLD، معادل بافت بوده و عدد اتمی مؤثر آن‌ها این امکان را می‌دهد تا بتوان از آن‌ها در دزیمتری بیماران برای مصارف پزشکی استفاده نمود.



شکل ۳-۱۵: قرص‌های TLD مورد استفاده در آزمایش‌ها

۳-۸ سیستم خوانش کارت دزیمتر ترمولومینسانس

سیستم خوانش دزیمتر TLD دارای چندین قسمت اصلی شامل المان حرارت‌دهی، لامپ تکثیر کننده فوتونی، نمایشگر منحنی درخشندگی، کامپیوتر داخلی و سایر بردهای الکترونیکی که در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است. سیستم‌های جدید بسیار پیشرفته و با قابلیت منحصر بفرد می‌باشند. در این سیستم‌ها حرارت‌دهی دزیمتر از طریق گاز داغ انجام می‌شود و بطور کلی دخالت عوامل انسانی در فرآیند خوانش و دزیمتری جهت دوری از بروز خطا و افزایش دقت در دزیمتری حذف شده است.



شکل ۳-۱۶: سیستم خوانش دزیمتر TLD در آزمایشگاه

این دستگاه از نرم افزار قرائت گر 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 گردد و لازم به ذکر است که پروفایل شماره ۱۰ مربوط به اندازه‌گیری نور زمینه و نور مرجع می‌باشد.

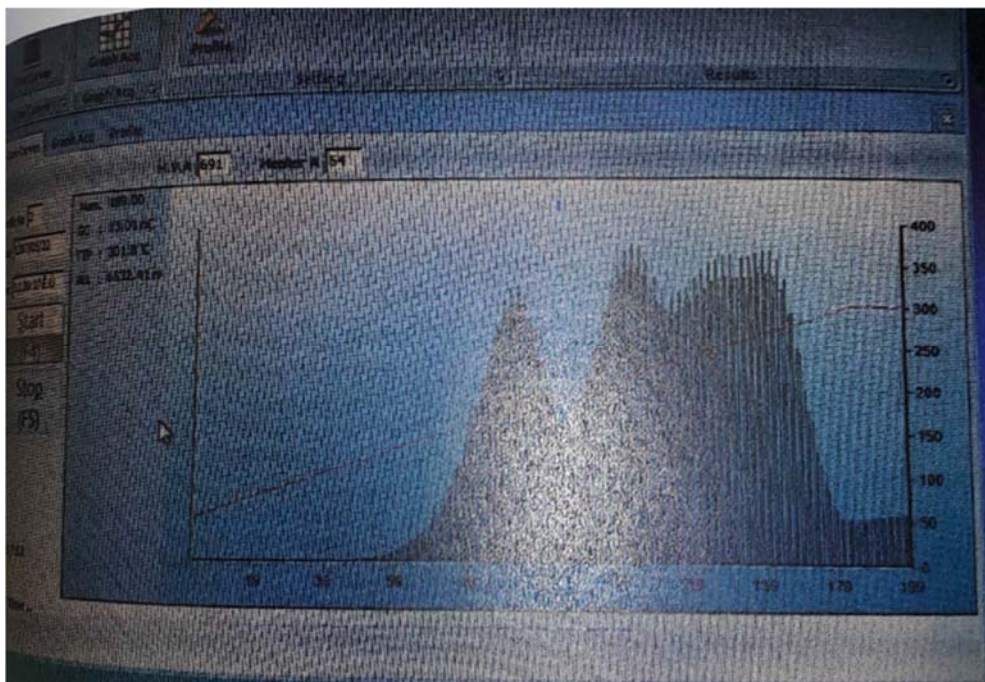
۳-۸-۱ خواندن قرص TLD

عملیات خواندن قرص شامل موارد زیر می‌گردد:

- ۱) تنظیم پارامترهای پروفایل حرارتی با استفاده از صفحه پروفایل.
- ۲) با فشار کلید کشویی، کشوی حاوی پلانچت بیرون می‌آید.
- ۳) با فشار مجدد کلید کشویی، کشوی حاوی پلانچت داخل رفته و در محل قرائت قرار می‌گیرد.
- ۴) با کلیک روی کلید START روی صفحه Glow Curves عملیات مربوط به خواندن قرص آغاز می‌گردد. این عملیات شامل موارد زیر می‌باشد:

- ✓ شروع عملیات گرمادهی متناسب با پروفایل انتخاب شده. جهت دیدن پروفایل و چگونگی تنظیم پارامترهای پروفایل حرارتی به صفحه Profile رجوع می‌کنیم.
- ✓ نمایش منحنی دما و روشنایی در محل‌های مربوطه.
- ✓ ذخیره منحنی دما و روشنایی درون فایلی که مسیر آن توسط کاربر در صفحه پروفایل مشخص شده و نام آن نیز برحسب 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 انتشاریافته برحسب دما رسم می‌شود. منحنی بدست آمده را منحنی درخشندگی ماده ترمولومینسانس می‌نامند. سطح زیر منحنی درخشندگی متناسب با مقدار دز پرتوهایی است که به ماده برخورد نموده است. 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 گیرند و آن‌ها را دزیومتر ترمولومینسانس با نام اختصاری TLD می‌نامند.



شکل ۳-۱۷: منحنی درخشندگی خروجی از سیستم قرائتگر

۳-۹ ویژگی های یک دزیمتر ایده آل

بلوری که برای اهداف دزیمتری مورد استفاده قرار می‌گیرد باید دارای حساسیت بالا باشد. به این معنا که نسبت به کمترین دزها حساس بوده و تابشی را تولید کند. بخصوص در دزیمتری محیطی که میزان دز خیلی کم و در حد میکروگری است. بلورهایی که به عنوان دزیمترهای شخصی و بالینی مورد استفاده قرار می‌گیرند باید معادل بافت بدن باشند یعنی از نظر تحریک‌پذیری و دریافت دز، مشابه بافت بدن عمل کنند. از دیگر خصوصیات یک بلور مناسب برای دزیمتری، تکرارپذیری آن است. بدین معنا که باید بتوان یک بلور را برای دفعات زیاد در معرض پرتو قرار داد در حالی که پاسخ آن در هر بار قرائت تغییر محسوسی نداشته باشد. در یک دزیمتر ایده‌آل می‌توان با گرمادهی، ترازهای عمیق را تخلیه کرد و برای استفاده مجدد آماده نمود. برای این که حساسیت دزیمتر به هنگام گرمادهی بیشتر باشد، بهتر است گرمادهی در محیط خلأ یا نیتروژن به جای هوا صورت گیرد. یک دزیمتر باید تا زمانی که گرمادهی نشده باشد، پایدار و ثابت باشد [۸۳ و ۸۴ و ۸۸ و ۸۹ و ۹۰].

فصل ۴ : طراحی و شیشه سازی دستگاه پلاسمای کانونی و دزیمتری پرتو ایکس

۴-۱ مقدمه

کد MCNP یکی از قوی‌ترین کدهای محاسباتی هسته‌ای است که براساس روش مونت‌کارلو کار می‌کند. این کد در طراحی نوترونی رآکتورهای هسته‌ای و بررسی ایمنی آن‌ها، محاسبات مصرف سوخت، پرتو پزشکی، طراحی حفاظ و ... کاربردهای فراوانی دارد. در این فصل ضمن معرفی اجمالی کد MCNP اقدام به طراحی و شبیه‌سازی دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان چشمه پرتوهای ایکس و دزیمتری پرتو ایکس می‌کنیم. کارت‌های مورد استفاده در این کد را نیز مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

۴-۲ تاریخچه کد MCNP

کد MCNP برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ در آزمایشگاه لوس آلاموس، تحت عنوان MCS تهیه شد و در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار به نام MCNP ارائه گردید و در ادامه نسخه‌های 4A و 4B 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 MCNP4C به بازار آمد. بعد از آن نسخه‌های X، 5 و 6 ارائه گردید که دارای قابلیت‌های فراوانی می‌باشند. MCNP یک کد بین‌المللی برای آنالیز ترابرد نوترون‌ها و پرتوهای ایکس و ... به-وسیله روش مونت‌کارلو می‌باشد [۸۵]. ما در این کد از نسخه MCNPX استفاده می‌کنیم. 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 با استفاده از نرم-افزارهای ویرایش متن می‌توان آن را نوشت. هر فایل ورودی شامل سه قسمت اصلی است که هر قسمت با یک خط خالی از قسمت قبل و بعد جدا می‌شود. اولین قسمت اصلی، تعریف سلول‌های مسأله می‌باشد. دومین قسمت اصلی تعریف سطوح مورد استفاده در مسأله را شامل می‌شود. سومین و آخرین قسمت اصلی فایل ورودی شامل داده‌های مسأله مانند تعریف چشمه، مواد و نوع خروجی می‌باشد. به طور کلی ساختار فایل ورودی به صورت زیر می‌باشد [۸۶]:

Blank Line or Title Card

Cell Cards

Blank Line

Surface Cards

Blank Line

Data Cards

Blank Line

شکل ۴-۱: ساختار فایل ورودی

۴-۳ اجزاء فایل ورودی

۴-۳-۱ کارت سلول

برای شبیه‌سازی توسط کد باید هندسه سیستم به طور دقیق با ابعاد واقعی بر حسب سانتی‌متر در فایل ورودی تعریف شود. منظور از سلول هر ناحیه‌ای از فضا است که توسط سطح یا سطوحی محدود شده باشد. برای تعریف هر سلول، به ترتیب شماره سلول، شماره ماده، چگالی ماده و سطوح مورد نیاز برای تعریف سلول را با درج حداقل یک فاصله از یکدیگر نوشته می‌شود. اهمیت ذره به طور کلی به صورت صفر و یک فرض می‌شود. اگر ذره وارد سلولی شود که اهمیت ذره در آن سلول صفر باشد، ردگیری ذره متوقف می‌شود. برای تعریف اهمیت ذره در یک سلول از دستور imp به صورت زیر استفاده می‌شود:

Imp : p=1

اهمیت ذره در تک تک سلول‌های موجود در مسئله باید در فایل ورودی مشخص شود. به این منظور می‌توان در تعریف هر سلول، اهمیت ذره در آن سلول را مشخص نمود. مواد در فایل ورودی شماره‌گذاری شده و چگالی آن‌ها در فایل، نگاشته شده است. در جدول زیر مقدار چگالی هر ماده بیان شده است.

جدول ۴-۱: چگالی مواد در فایل ورودی

چگالی g/cm ³		ماده	شماره ماده در فایل ورودی	
۸/۹۴		مس	۱	
۲/۲۳۵		پیرکس	۲	
۸/۴		آلیاژ برنج	۳	
۸/۰۳۷		آلیاژ فولاد ضد زنگ	۴	
$۱/۲۱۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۷۳۸ \times ۱۰^{-۶}$	نیتروژن	آرگون	۵
۰/۰۰۱۲		هوا	۶	
۲/۶۴		لیتیم فلئورید	۷	

۴-۳-۱-۱ محاسبه چگالی گاز کاری

برای محاسبه چگالی گاز کاری، از رابطه $\rho = \frac{m}{V}$ استفاده می‌کنیم. ابتدا حجم اشغال شده توسط گاز را محاسبه می‌کنیم.

$$V = (\text{حجم صفحه برنجی}) - (\text{حجم کاتد}) - (\text{حجم آند}) - (\text{حجم استوانه محفظه}) + (\text{حجم بازو})$$

$$\longrightarrow V = 2964.16 - 4639.467 - 16.788 - 31.278 - 124.775$$

$$\longrightarrow V = 7430 \text{ cm}^3$$

حال به محاسبه جرم گاز کاری با فشار معین درون حجم بدست آمده می‌پردازیم.

$$PV = NKT$$

$$P = 0.8 \text{ torr} = 106.656 \text{ Pa} , \quad T = 295 \text{ k} , \quad V = 7.43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$N = \frac{PV}{KT} = 1.94658 \cdot 10^{20}$$

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

$$\text{تعداد مول} : n = \frac{N}{N_A} = 3.2324 \cdot 10^{-4} \text{ mold}$$

$$\text{جرم مولی نیتروژن} : 28.0134 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 3.2324 \cdot 10^{-4} \cdot 28.0134 = 9.05505 \cdot 10^{-3} \text{ g}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = 1.219 \cdot 10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

به همین ترتیب برای گاز آرگون نیز چگالی محاسبه شده است.

۴-۳-۲ کارت سطوح

سطوح مختلفی در این کد قابل استفاده است که شامل سطوح کروی، استوانه‌ای، صفحه و ... است. با استفاده از این کارت می‌توان حجم‌های با شکل‌های مختلف و پیچیده را تعریف نمود.

۴-۳-۳ کارت داده

این کارت دارای سه قسمت کارت چشمه، کارت مواد و کارت تالی‌ها می‌باشد که در ادامه توضیح داده می‌شوند [۸۶].

۴-۳-۱ کارت چشمه SDEF

هر فایل 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 نوع ذره، انرژی، مکان و ... است [۸۵]. مکان چشمه ۱ سانتی‌متر بالاتر از نوک آند در نظر گرفته شده و ذره گسیل شونده از چشمه فوتون می‌باشد. از این رو $PAR=2$ نوشته شده است. توزیع انرژی بر اساس منبع [۶۷] همین پایان‌نامه نوشته شده و چشمه به لحاظ توزیع فضایی به صورت یک کره به شعاع 0.5 سانتی‌متر تعریف کردیم. طیف انرژی گسسته می‌باشد.

۴-۳-۲ کارت مواد

هر ماده‌ای که سلولی را پر کرده است 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 صحیح و 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 [۸۶].

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

$${}^A_ZX = (1000 \times Z) + A$$

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:

$$Mn ZAID_1 f_1 ZAID_2 f_2 \dots$$

که در آن f_i درصد وزنی یا اتمی آن ایزوتوپ است. درصد وزنی را با علامت منفی و درصد اتمی را با علامت مثبت (یا بدون علامت) درج می‌کنیم [۸۶].

اگر ماده مورد نظر ترکیبی از چند ماده 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 [۸۶].

محاسبه درصد وزنی یا درصد اتمی عناصر تشکیل دهنده مواد

آند : مس

با در نظر گرفتن آند از جنس مس خالص و صرف نظر از ناخالصی‌ها، در کارت مواد درصد اتمی آن، یعنی $+1$ درج شده است.

عایق : پیرکس

پیرکس ترکیبی از عناصر و ترکیبات شیمیایی مختلف می‌باشد که درصد وزنی هر یک از عناصر آن به

صورت زیر محاسبه شده و در فایل ورودی با علامت منفی نگاشته شده است.

ماده	درصد	M (جرم)
اکسید سیلیسیم	۷۷	$M(\text{SiO}_2) = 28 + (2 \cdot 16) = 60$
پراکسید سدیم	۱۲	$M(\text{Na}_2\text{O}_2) = (2 \cdot 23) + (2 \cdot 16) = 78$
اکسید کلسیم	۸	$M(\text{CaO}) = 40 + 16 = 56$
اکسید منیزیم	۳	$M(\text{MgO}) = 24 + 16 = 40$

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

$$wf(\text{O}) = 0.77 \left(\frac{2 M(\text{O})}{M(\text{SiO}_2)} \right) + 0.12 \left(\frac{2 M(\text{O})}{M(\text{Na}_2\text{O}_2)} \right) + 0.08 \left(\frac{M(\text{O})}{M(\text{CaO})} \right) + 0.03 \left(\frac{M(\text{O})}{M(\text{MgO})} \right) = 0.495$$

$$wf(\text{Na}) = 0.12 \left(\frac{2 M(\text{Na})}{M(\text{Na}_2\text{O}_2)} \right) = 0.71$$

$$wf(\text{Ca}) = 0.08 \left(\frac{M(\text{Ca})}{M(\text{CaO})} \right) = 0.057$$

$$wf(\text{Mg}) = 0.03 \left(\frac{M(\text{Mg})}{M(\text{MgO})} \right) = 0.018 ; \quad \sum wf = 1$$

کاتد : برنج

کاتدها و صفحه زیرین آن از آلیاژ برنج ساخته شده و این آلیاژ ترکیب دو فلز مس و روی می باشد. آلیاژ به کار رفته در این قسمت از دستگاه، دارای ۶۳ درصد مس و ۳۷ درصد روی می باشد.

بدنه محفظه : فولاد ضد زنگ

این ماده نوعی آلیاژ است که درصد عناصر آن مشخص بوده و با علامت منفی در فایل ورودی درج شده است.

درصد	عنصر
۷۶	آهن
۱۴	کروم
۹	نیکل
۱	کربن

گاز کاری : نیتروژن یا آرگون

گاز کاری به صورت خالص بوده و با درصد اتمی ۱ و با علامت مثبت در فایل ورودی در نظر گرفته می‌شود.

آشکارساز : بلور TLD

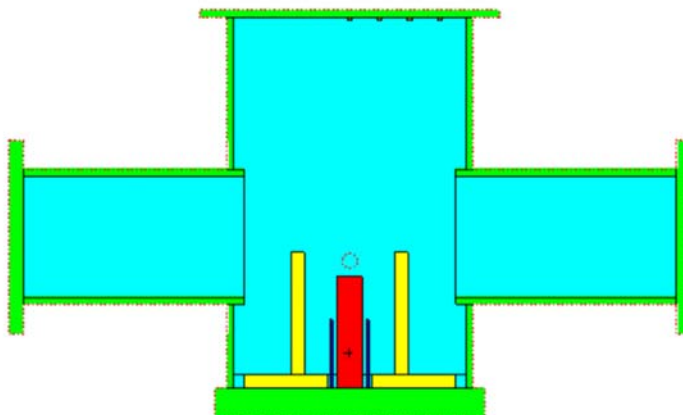
آشکارسازها از جنس لیتیم فلئورید بوده و درصد اتمی لیتیم و فلئور با علامت مثبت به مقدار ۰/۵ می‌باشد. آشکارسازهای در ارتفاع‌های متفاوت در فاصله ۷/۷ سانتی‌متری از محور آند و آشکارسازهای در زوایا و فواصل مختلف در ارتفاع سقف چمبر (۲۴/۵ سانتی‌متری) قرار دارند.

۳-۳-۳-۴ کارت تالی

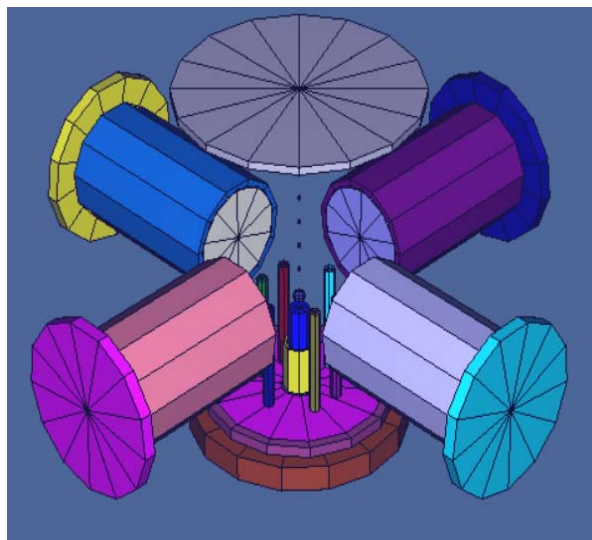
به کمک تعریف تالی‌ها در برنامه می‌توان کمیت‌های مختلف مانند جریان، شار، انرژی تخلیه شده و کمیت‌های دیگر را محاسبه کرد. یک تالی با تعیین نوع آن و نوع ذره به صورت $Fn:PI$ تعریف می‌شود که PI معرف نوع ذره است و n یک عدد صحیح و حداکثر سه رقمی است که رقم آخر آن نوع تالی را مشخص می‌شود. اضافه کردن ستاره به صورت Fn^* باعث ضرب تالی در انرژی و در نتیجه تغییر یکای تالی می‌گردد [۸۶].

۴-۴ مواد و روش کار

در مطالعه حاضر از کد شبیه‌سازی MCNPX برای انجام محاسبات استفاده شد. شبیه‌سازی چمبر و کاتدها و آند و عایق درون آن و قرص TLD با مشخصات هندسی ذکر شده در فصل سوم انجام شد. شکل‌های ۲-۴ و ۳-۴ هندسه و مدل شبیه‌سازی دستگاه را در دو و سه بعد نمایش می‌دهند.



شکل ۲-۴: مدل شبیه‌سازی خروجی از کد MCNPX دستگاه در دو بعد



شکل ۴-۳: مدل شبیه سازی خروجی از کد MCNPX دستگاه در سه بعد

در برنامه MCNPX با تالی F8* (بر حسب MeV) ذرات ترابرد شدند که این مقدار تالی ها و نتایج حاصل از آن ها را محاسبه خواهیم کرد. لازم به ذکر است که خروجی تالی F8* بر حسب MeV می- باشد که برای محاسبه دز جذبی بر جرم سلول تقسیم می شود که واحد آن بر حسب $\frac{\text{MeV}}{\text{g}}$ بدست آید که در ادامه به بررسی آن ها خواهیم پرداخت. برای رسم نمودارها از نرم افزارهای اورنجین و اکسل استفاده می کنیم.

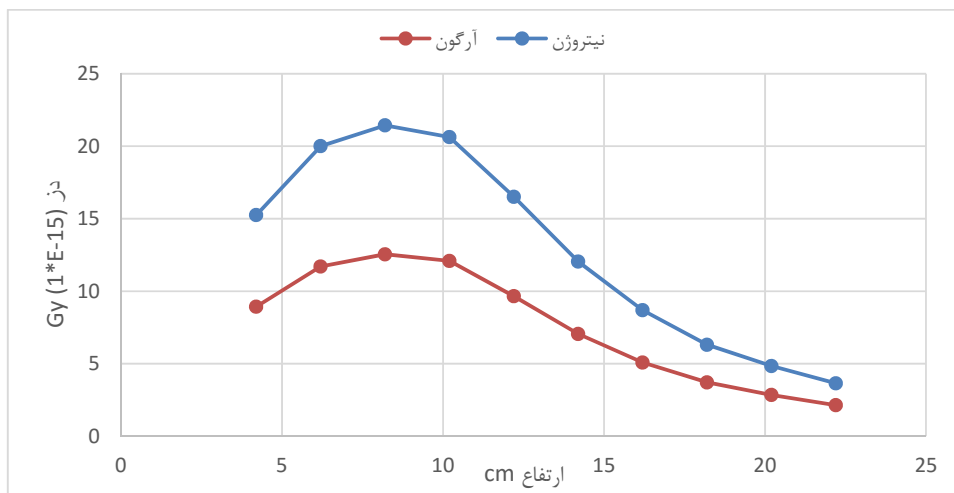
۴-۵ اندازه گیری دز پرتو ایکس

در این بخش، به بررسی دز پرتو ایکس در نقاط مشخص شده در فایل ورودی و نتیجه آن براساس داده های خروجی برنامه می پردازیم. برای بررسی همسانگردی، دز پرتو ایکس را در نقاطی با زوایای متفاوت نسبت به محور X تعریف شده در فایل ورودی بررسی می کنیم. همچنین برای تحقیق در مورد تأثیر فاصله بر دز پرتو ایکس، نقاط مذکور را در فاصله های متفاوت در نظر می گیریم. همچنین نقاطی با ارتفاع متفاوت را تعریف کرده و دز پرتو ایکس در آن ها را می سنجیم. نتایج تمام این بررسی ها برای هر دو نوع گاز آرگون و نیتروژن در درون و بیرون محفظه خلأ مقایسه و بحث خواهد شد.

۴-۵-۱ تأثیر ارتفاع بر دز پرتو ایکس درون محفظه

براساس داده های خروجی شبیه سازی، دز پرتو ایکس در ارتفاع نوک الکترودها به بیشینه مقدار خود می رسد و هر چه از این ارتفاع فاصله می گیریم، دز پرتو ایکس روندی کاهشی را طی می کند. این روند برای هر دو نوع گاز مشابه یکدیگر می باشد. همچنین با مقایسه نمودار گازها متوجه می شویم که در

تمام نقاط با ارتفاع متفاوت، دز پرتو ایکس برای گاز آرگون، مقدار کمتری بدست آمده است. از آنجا که آرگون گازی نجیب است و انرژی یونیزاسیون بالاتری نسبت به گاز نیتروژن دارد، با اعمال یک پتانسیل الکتریکی ثابت، کمتر یونیزه شده و کمتر الکترون‌های اتم‌های آن از اتم جدا می‌شوند. بنابراین تعداد الکترون‌های بسیار کمتری در لایه جریان پلاسما وجود دارد و تابش ترمزی آن‌ها کمتر از زمانی است که پلاسما با یونیزه شدن گاز نیتروژن تولید شود.

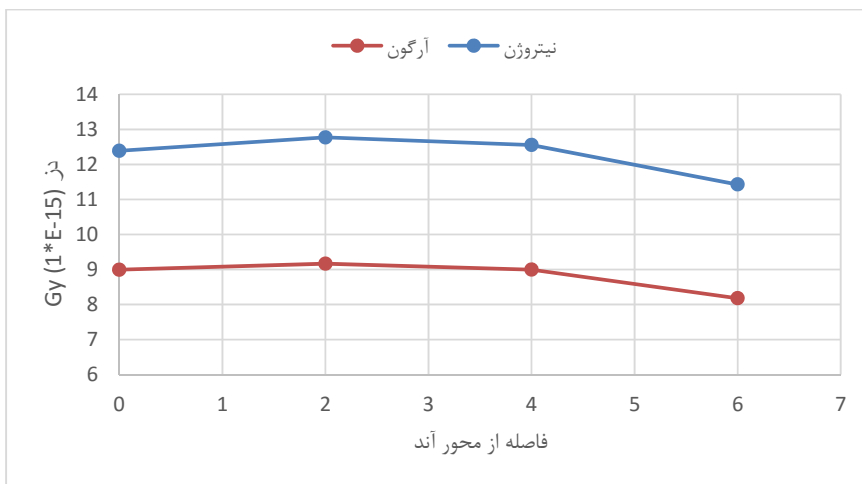


شکل ۴-۴: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در ارتفاع های متفاوت

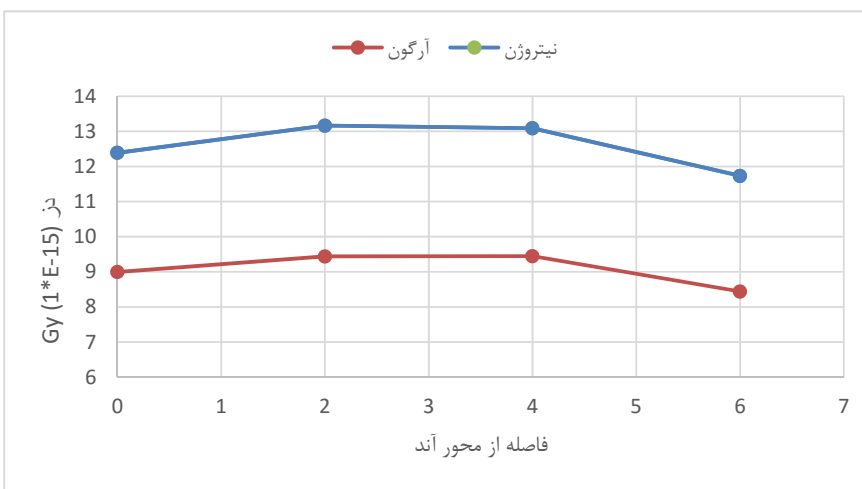
۴-۵-۲ مقایسه دز پرتو ایکس در فواصل مختلف از محور آند درون

محفظه

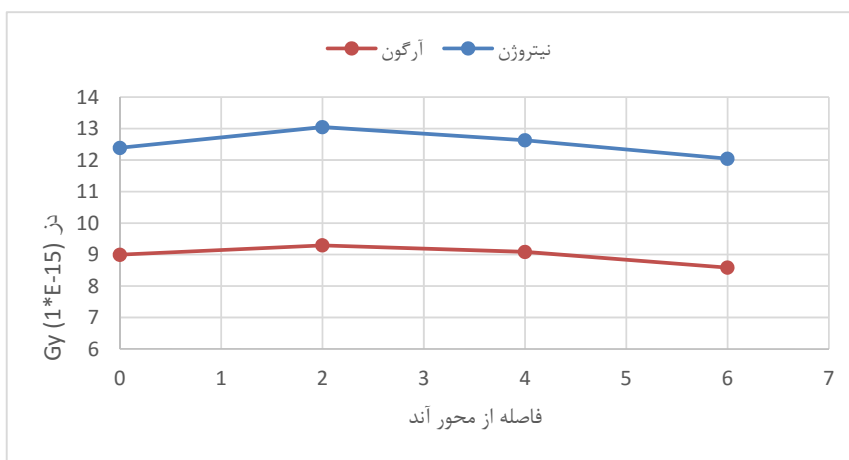
در شکل‌های ۴-۵ الی ۴-۸ نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زوایای متفاوت نشان داده شده است. بر این اساس، دز پرتو ایکس در تمام زوایا با افزایش فاصله از محور آند کاهش می‌یابد. این پدیده با توجه به مطالب گفته شده در بخش ۲-۱۳ و کاهش دز پرتو به صورت نمایی با افزایش فاصله از چشمه توجیه‌پذیر است. در تمام زوایا دز پرتو ایکس شبیه‌سازی شده با گاز آرگون، مقدار کمتری می‌باشد.



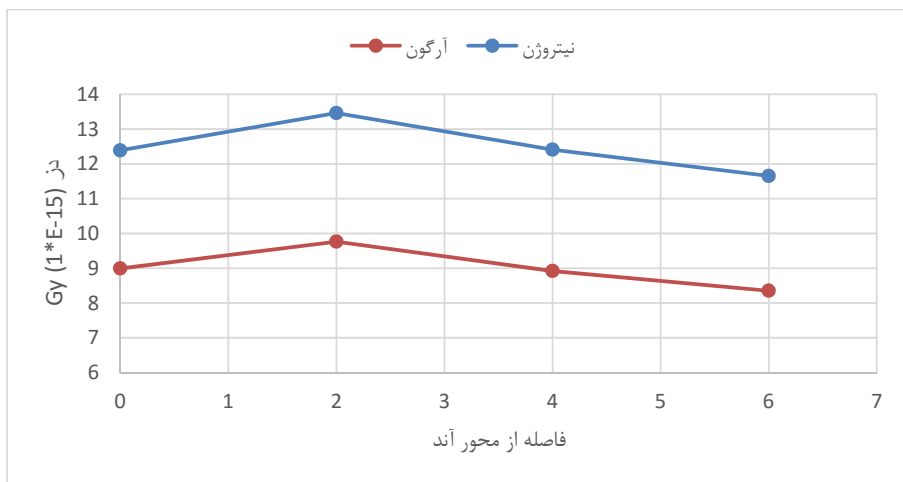
شکل ۴-۵: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه صفر درجه



شکل ۴-۶: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۳۰ درجه



شکل ۴-۷: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۶۰ درجه



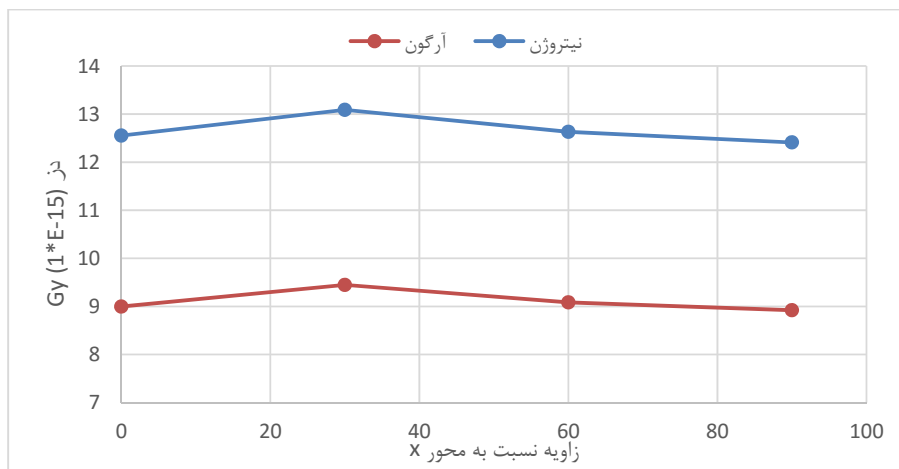
شکل ۴-۸: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۹۰ درجه

۴-۵-۳ مقایسه دز پرتو ایکس در زوایای مختلف درون محفظه برای دو نوع گاز

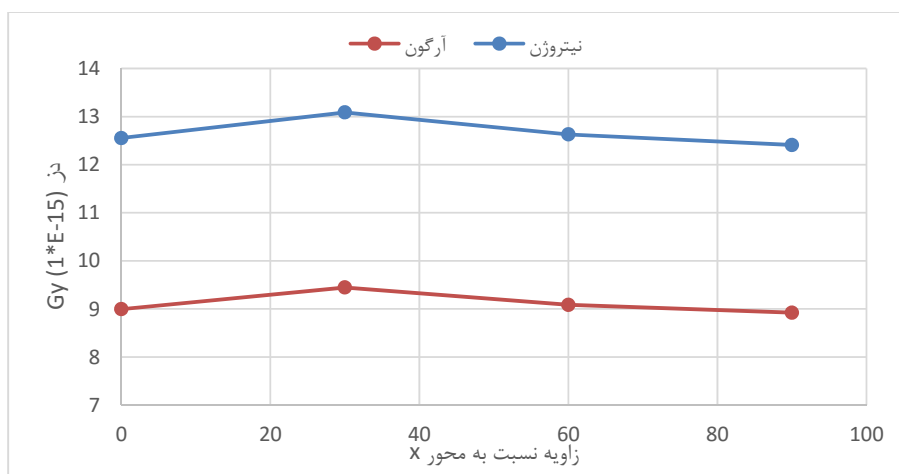
شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰ و ۴-۱۱ دز پرتو ایکس در زوایای متفاوت درون محفظه خلأ را بر اساس نتایج شبیه‌سازی نمایش می‌دهند. مشاهده می‌شود که در هر فاصله نظم خاصی در مقدار دز وجود ندارد. این بدان معناست که دز پرتو ایکس تولید شده همسانگرد نمی‌باشد. در این بررسی نیز می‌بینیم که دز پرتو ایکس برای گاز نیتروژن مقدار بیشتری ثبت شده است.



شکل ۴-۹: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۲cm



شکل ۴-۱۰: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۴cm



شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصل ۶ cm

توجه: بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مقدار دز پرتو ایکس در بیرون محفظه خلأ صفر بدست آمده است و به همین دلیل از رسم نمودار و مقایسه و بحث در مورد آن صرف نظر کردیم. در شبیه‌سازی برای هر گاز، صدمیلیون ذره تراپرد شده و خرجی کد به تعداد ذرات نرمال شده و مقدار دز بیان شده، به ازای گسیل یک فوتون و بیشینه خطای آماری ۲/۴۷٪ بدست آمده است.

فصل ۵ : تحلیلی و نتایج تجربی

۵-۱ مقدمه

در این فصل مشاهدات آزمایشگاهی از دستگاه پلاسمای کانونی شاهرود (SHUPF) و تحلیل نتایج حاصل از داده‌های بدست آمده شرح داده شده است. آزمایش‌ها در شرایط کاری متفاوت از جمله فشارها، ولتاژهای متفاوت و با گازهای کاری آرگون و نیتروژن انجام شده است. در آزمایش‌ها زمان پینچ با ولتاژهای کاری ۱۱ KV، ۱۰ و ۹ و فشارهای Torr ۱/۲، ۱ و ۰/۸ و دز پرتو ایکس در ولتاژ ۱۰ KV در فشار Torr ۰/۸ با گازهای کاری متفاوت (آرگون و نیتروژن) مد نظر بوده است.

یک منحنی بسیار مهم در سیستم پلاسمای کانونی، منحنی مشتق جریان می‌باشد. در شکل ۵-۱ نمونه‌ای از این منحنی نشان داده شده است. با استفاده از منحنی مشتق جریان می‌توان به محل وقوع پینچ پی‌برد. در این شکل افت شدید در منحنی بیانگر تشکیل پینچ است. این افت بدلیل تغییرات سریع اندوکتانس پلاسمای می‌باشد [۸۷]. فاصله زمانی نقطه شروع خیزش منحنی و نقطه افت شدید در منحنی را زمان پینچ تعریف می‌کنند.

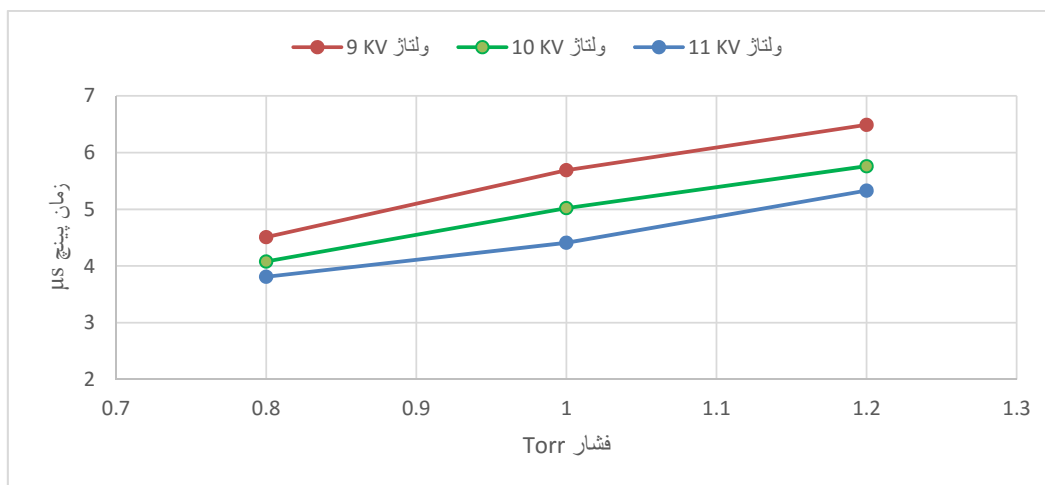


شکل ۵-۱: منحنی مشتق جریان

۲-۵ تأثیر فشار و ولتاژ بر زمان پینچ برای گاز آرگون

۱-۲-۵ تأثیر فشار

برای بررسی تأثیر فشار بر زمان پینچ باید تمام پارامترهای دیگر از جمله ولتاژ ثابت باشد. شکل ۲-۵ تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژ را در فشارهای متفاوت با گاز کاری آرگون نشان می‌دهد. برای هر مورد ۱۰ شات زده و میانگین‌گیری می‌کنیم.



شکل ۲-۵: نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ثابت برای گاز آرگون

با توجه به شکل درمی‌یابیم که هر چه میزان گاز موجود در محفظه سیستم افزایش می‌یابد، زمان پینچ نیز افزایش می‌یابد. روند این تغییرات را می‌توان با بررسی دینامیک دستگاه توجیه کرد که به بیان آن می‌پردازیم.

با توجه به روابط سرعت در فازهای محوری و شعاعی، سرعت‌ها در دو فاز با چگالی و میزان جرم مؤثر در هر فاز رابطه عکس دارند. یعنی با افزایش (کاهش) چگالی و جرم، سرعت حرکت لایه جریان کاهش (افزایش) می‌یابد.

$$v_0 = \left[\frac{\mu \ln c}{4\pi^2(c^2 - 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{f_c}{\sqrt{f_m}} \frac{(I_0/a)}{\sqrt{\rho}} \quad 1-5$$

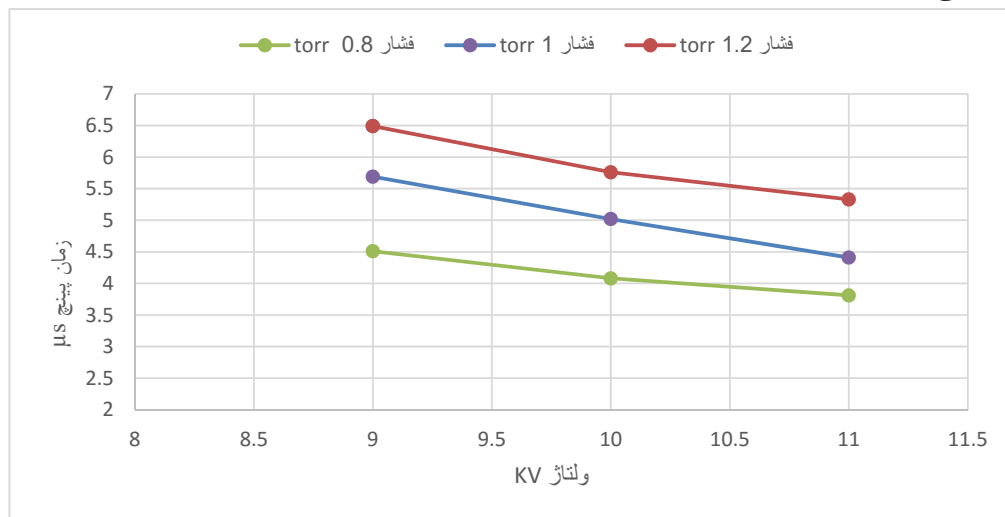
$$v_r = \frac{[\mu(\gamma + 1)]^{\frac{1}{2}}}{4\pi} \frac{f_c}{\sqrt{f_{mr}}} \frac{(I/a)}{\sqrt{\rho}} \quad 2-5$$

با توجه به رابطه $\rho \propto m$ چگالی با جریان رابطه مستقیم دارد. با افزایش (کاهش) فشار میزان جرم گاز ورودی به سیستم افزایش (کاهش) می‌یابد.

سرعت با فاکتور جرم در مرحله شعاعی (f_{mr}) و مرحله محوری (f_m) نسبت عکس دارد، افزایش فشار سبب افزایش ρ و f_m و f_{mr} می‌شود و در نهایت سبب کاهش سرعت لایه جریان می‌شود و مدت زمان بیشتری لازم دارد تا لایه جریان طول آند را طی کند و به انتهای آن برسد. بنابراین زمان پینچ افزایش خواهد یافت.

۵-۲-۲ تأثیر ولتاژ

حال برای بررسی تأثیر ولتاژ، تمام پارامترها از جمله فشار سیستم را ثابت در نظر می‌گیریم. آزمایش را در ولتاژهای متفاوت ۹ و ۱۰ و ۱۱ KV تکرار می‌کنیم. برای هر مورد ۱۰ شات زده و میانگین‌گیری می‌کنیم. شکل ۳-۵ تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژ را در ولتاژهای متفاوت با گاز کاری آرگون نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۵: نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ثابت برای گاز آرگون

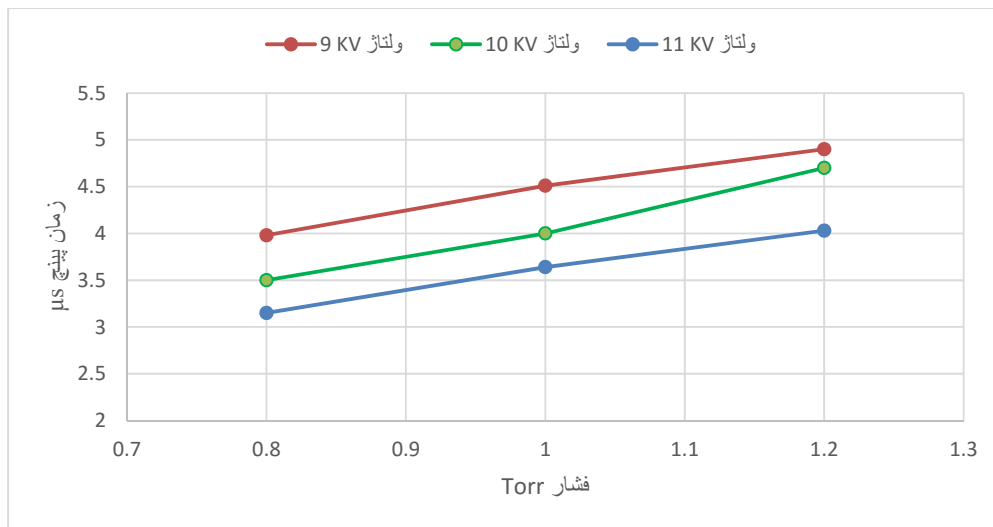
مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ، زمان پینچ کاهش یافته است. این پدیده با توجه به دینامیک لایه جریان و رابطه ۳-۵ توجیه‌پذیر است.

$$I = \frac{v}{\sqrt{L/c}} \quad 3-5$$

با افزایش ولتاژ، جریان سیستم افزایش می‌یابد. با توجه به روابط ۱-۵ و ۲-۵ سرعت لایه جریان با جریان نسبت مستقیم دارد. با افزایش جریان، لایه جریان سریع‌تر طول آند را طی می‌کند و بدین ترتیب زمان پینچ شدگی کاهش می‌یابد.

۳-۵ تأثیر فشار و ولتاژ بر زمان پینچ برای گاز نیتروژن

مشابه کاری که برای گاز آرگون انجام دادیم، برای بررسی تأثیر فشار بر زمان پینچ باید تمام پارامترهای دیگر از جمله ولتاژ ثابت باشد. شکل ۴-۵ تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژ را در فشارهای متفاوت با گاز کاری نیتروژن نشان می‌دهد. برای هر مورد ۱۰ شات زده و میانگین‌گیری می‌کنیم.



شکل ۴-۵: نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ثابت برای گاز نیتروژن

در نمودار بالا می‌بینیم که هر چه فشار گاز موجود در محفظه سیستم افزایش می‌یابد، زمان پینچ نیز افزایش می‌یابد. توجه روند این تغییرات با توجه به دینامیک دستگاه مشابه موردی است که برای گاز آرگون در بخش ۱-۲-۵ بیان شد.

حال می‌خواهیم تأثیر مستقیم افزایش بر معادلات زمان را در فازهای محوری و شعاعی بررسی کنیم. با توجه به روابط زیر زمان با چگالی ρ و فاکتورهای جرم f_m و f_{mr} نسبت مستقیم دارد.

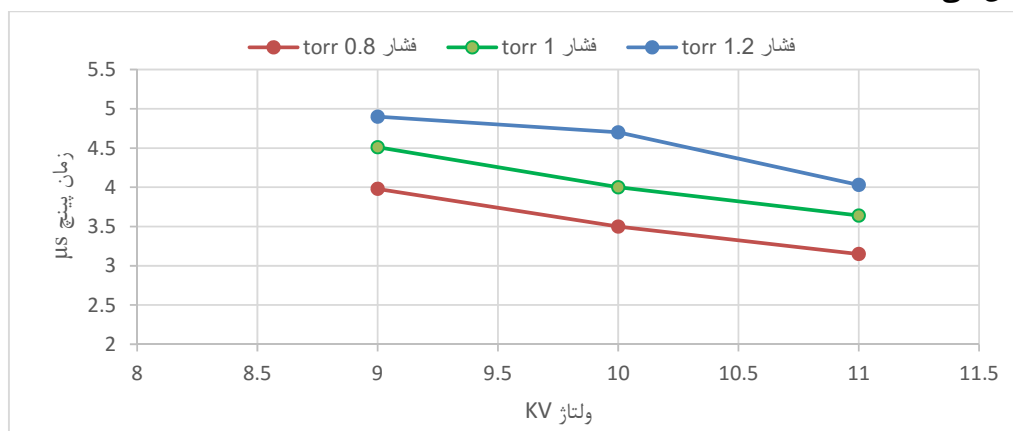
$$t_0 = \left[\frac{4\pi^2(c^2 - 1)}{\mu \ln c} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{\sqrt{f_m}}{f_c} \frac{z_0}{(I_0/a)/\sqrt{\rho}} \quad 4-5$$

$$t_r = \frac{4\pi}{[\mu(\gamma + 1)]^{\frac{1}{2}}} \frac{\sqrt{f_{mr}}}{f_c} \frac{a}{(I_0/a)/\sqrt{\rho}} \quad 5-5$$

با افزایش فشار، میزان کاری درون محفظه افزایش می‌یابد که به دنبال آن مدت زمان هر کدام از فازها افزایش خواهد یافت.

۵-۳-۱ تأثیر ولتاژ

برای بررسی تأثیر ولتاژ، تمام پارامترهای تأثیرگذار سیستم را ثابت نگه می‌داریم. آزمایش را در ولتاژهای متفاوت ۹ و ۱۰ و ۱۱ KV تکرار می‌کنیم. برای هر مورد ۱۰ شات زده و میانگین‌گیری می‌کنیم. شکل ۵-۵ تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژ را در ولتاژهای متفاوت با گاز کاری نیتروژن نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۵: نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ثابت برای گاز آرگون

و جریان نسبت به هم رابطه مستقیم دارند. با افزایش ولتاژ و افزایش جریان سرعت لایه جریان افزایش می‌یابد که سرعت لایه جریان در هر فاز با جریان تخلیه رابطه مستقیم دارد. این روابط حاکی از آن است که با افزایش ولتاژ و انرژی منتقل شده به گاز درون سیستم لایه جریان با سرعت بیشتری فازهای محوری و شعاعی را سپری می‌کند و در نتیجه زمان پینچ کاهش خواهد یافت.

۵-۴ تأثیر نوع گاز بر زمان پینچ

قبل از شروع آزمایش باید به این نکته توجه کرد که هنگام کار با گاز کاری جدید، باید اثر گاز قبلی را با تمیز کردن درون محفظه خلأ و تزریق مداوم گاز کاری جدید به محفظه از بین برد. در بررسی انجام شده در این پایان‌نامه از دو نوع گاز آرگون و نیتروژن استفاده شده است. در جدول ۱-۵ مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بیان شده است.

جدول ۱-۵: مشخصات گازها

نوع گاز	چگالی جرمی g/L	عدد اتمی	انرژی یونش KJ/mol	نسبت گرمای ویژه γ
آرگون	۱/۷۸۴	۱۸	۱۵۲۰/۶	$\frac{5}{3}$
نیتروژن	۱/۲۵۱	۷	۱۴۰۲/۳	$\frac{7}{5}$

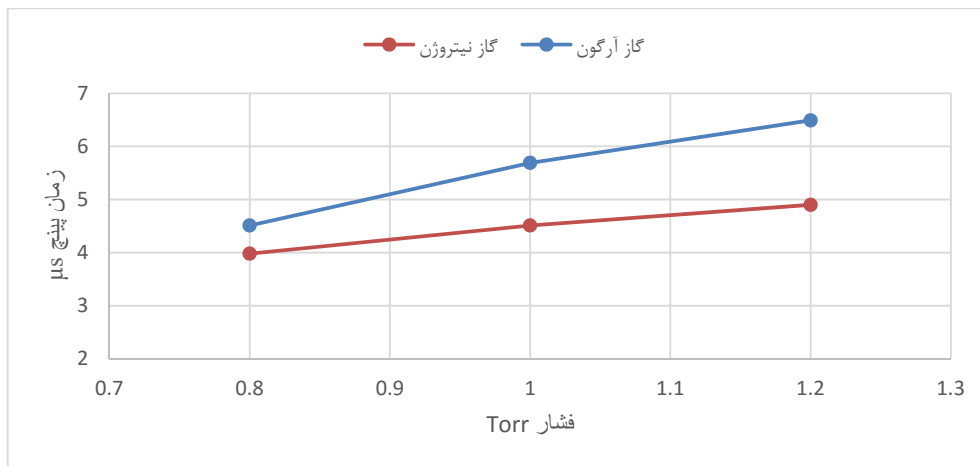
۵-۴-۱ تأثیر نوع گاز بر زمان پینچ در فشارهای متفاوت

شکل‌های ۵-۶ و ۵-۷ و ۵-۸ تغییرات زمان پینچ بر حسب فشار را برای دو نوع گاز در ولتاژهای ۹ و ۱۰ کیلوولت نمایش می‌دهند. براساس این نمودارها می‌توان گفت افزایش زمان پینچ در اثر افزایش فشار رخ می‌دهد که در بخش‌های قبل به شرح آن پرداختیم. علاوه بر این منحنی‌های مربوط به گاز نیتروژن در تمامی ولتاژها نسبت به منحنی گاز آرگون پایین‌تر هستند، یعنی زمان پینچ در تمام حالت‌ها کمتر از گاز آرگون است.

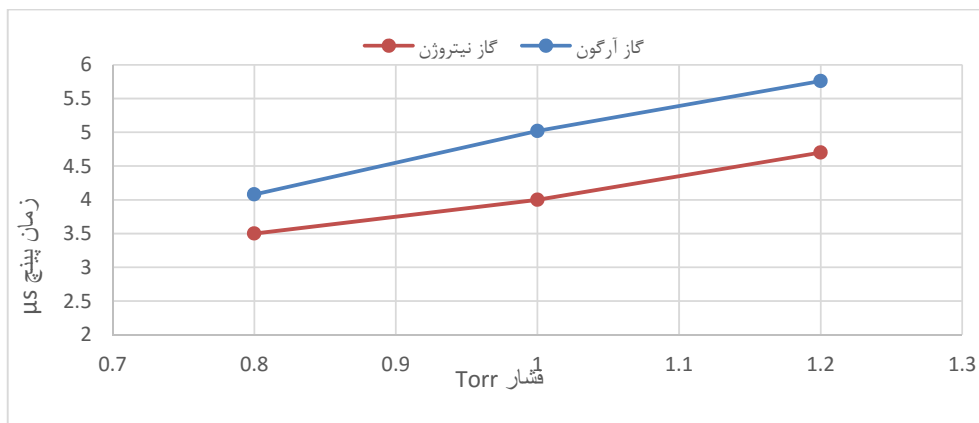
وابستگی دینامیک پلاسما به پارامترهای گاز در فاز شعاعی ایجاد می‌شود. فرآیند یونیزاسیون موجب اتلاف انرژی و کاهش دما می‌شود که برای گازهای مختلف متفاوت می‌باشد حتی اگر چگالی جرمی یکسان باشد.

$$\gamma = \frac{1}{\text{یونیزاسیون}} \quad ۵-۶$$

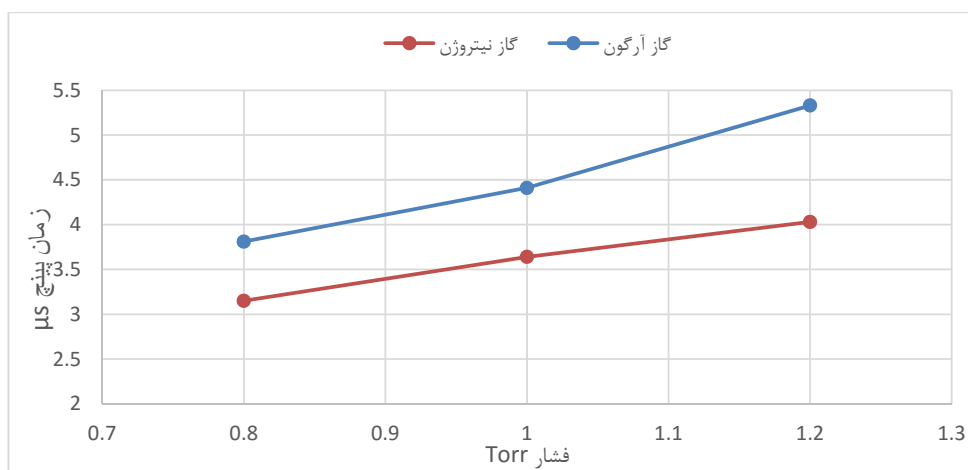
با توجه به این که آرگون گاز نجیب است و تمایل کمتری به شرکت در واکنش نسبت به نیتروژن دارد و این که انرژی اولین یونش آرگون بیشتر از نیتروژن است پس میزان یونیزاسیون نیتروژن بیشتر از آرگون است بنابراین طبق رابطه ۵-۶ نسبت گرمایی ویژه γ نیتروژن پایین‌تر خواهد بود. از این رو سرعت لایه جریان طبق رابطه ۵-۲ کاهش می‌یابد و زمان پینچ کوتاه‌تر می‌شود.



شکل ۵-۶: نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ۹ KV برای دو نوع گاز



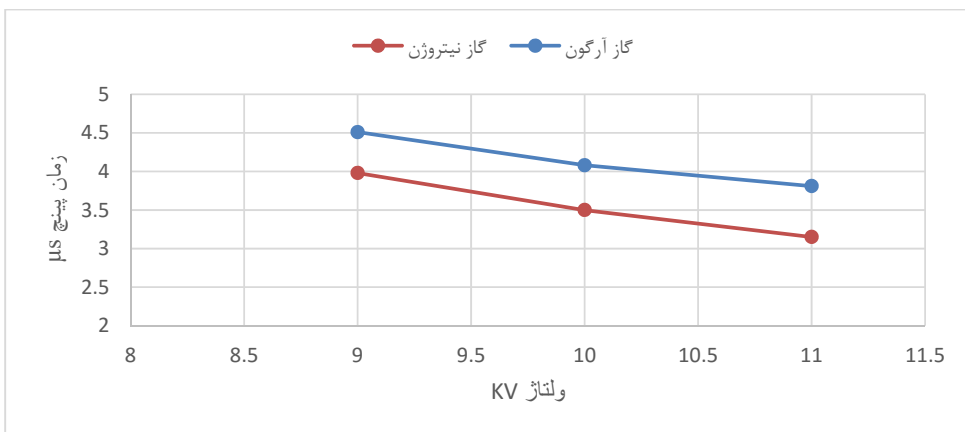
شکل ۵-۷: نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ۱۰ KV برای دو نوع گاز



شکل ۵-۸: نمودار تغییرات زمان پینچ در ولتاژ ۱۱ کیلوولت

۵-۴-۲ تأثیر نوع گاز بر زمان پینچ در ولتاژهای متفاوت

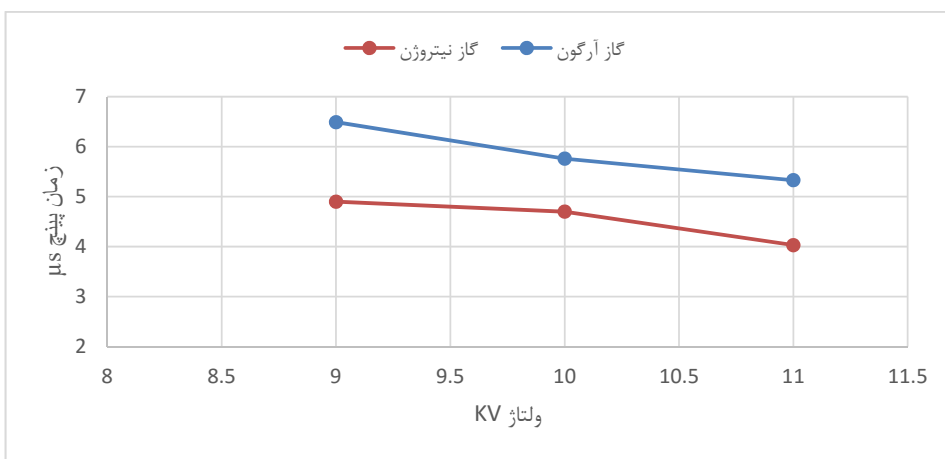
شکل‌های ۵-۹ و ۵-۱۰ و ۵-۱۱ تغییرات زمان پینچ بر حسب ولتاژهای متفاوت را برای دو نوع گاز آرگون و نیتروژن در سه فشار ۰/۸ و ۱ و ۱/۲ Torr نشان می‌دهند. با مشاهده نمودارها واضح است که با افزایش ولتاژ، زمان پینچ کاهش یافته است. همچنین مشخص است که در یک فشار یکسان منحنی مربوط به گاز نیتروژن پایین‌تر از منحنی مربوط به گاز آرگون می‌باشد. توجیه چنین رفتاری در بخش قبل شرح داده شد.



شکل ۵-۹: نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ۸/۰ Torr برای دو نوع گاز



شکل ۵-۱۰: نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ۱ Torr برای دو نوع گاز



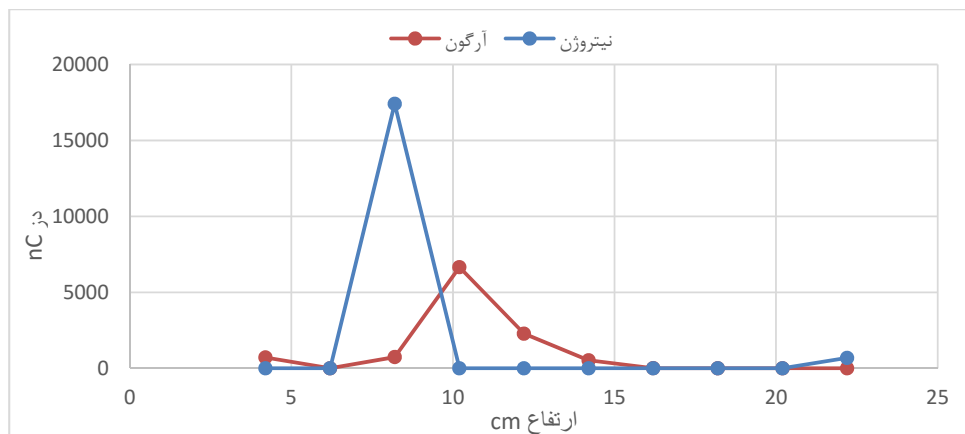
شکل ۵-۱۱: نمودار تغییرات زمان پینچ در فشار ۲/۱ Torr برای دو نوع گاز

۵-۵ اندازه گیری دز پرتو ایکس

مطابق شبیه سازی انجام شده در فصل چهارم همین پایان نامه در نقاط با ارتفاع و فاصله و زاویه مشخص شده، آشکارسازهای TLD را درون و بیرون محفظه خلأ دستگاه چیده ایم. سپس با تولید پلاسما با گازهای آرگون و نیتروژن، آزمایش را انجام داده ایم. پس از انجام آزمایش با دستگاه پلاسمای کانونی، آشکارسازها را از دستگاه جدا کرده و توسط قرائتگر به بررسی پرتو ایکس جذب شده پرداخته ایم. در این بخش به بررسی داده های بدست آمده از آشکارسازها توسط قرائتگر می پردازیم. در کلیه نمودارهای این فصل در واقع دز جذبی مقایسه شده است و مقدار آن بر حسب گری نیست. برای رسم نمودار بر حسب گری لازم است داده های قرائتگر را در ضریب کالیبراسیون ضرب کنیم تا داده ها بر حسب گری شود. در آزمایشگاه محفظه خلأ دستگاه درجه بندی شده و با توجه به تقارن محفظه، محور x را منطبق بر خط تقارن در نظر گرفته و درجه بندی انجام شده است.

۵-۵-۱ مقایسه دز پرتو ایکس در ارتفاع های متفاوت درون محفظه برای دو نوع گاز

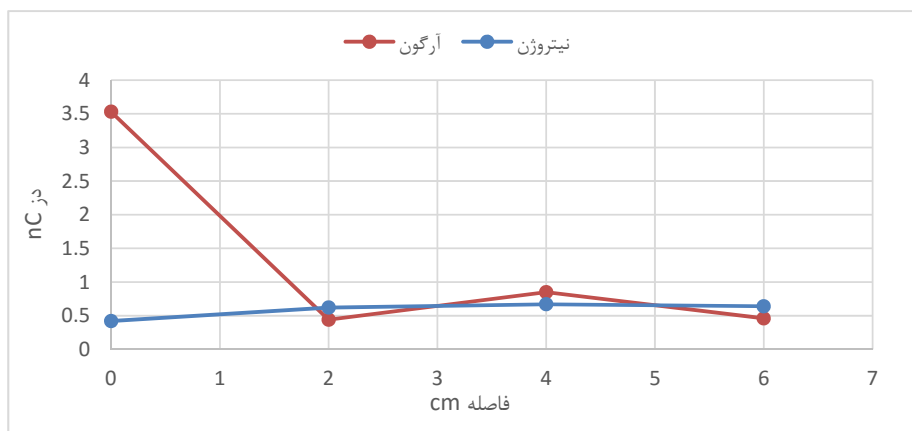
مطابق شکل ۵-۱۲ دز پرتو ایکس هنگام انجام آزمایش با گاز نیتروژن در ارتفاع ۸/۲ سانتی متر و هنگام انجام آزمایش با گاز آرگون در ارتفاع ۱۰/۲ سانتی متر به بیشینه مقدار خود می رسد. این ارتفاع در محدوده ارتفاع نوک الکترودها می باشد و این پدیده با نتایج شبیه سازی در توافق است. همچنین دز پرتو ایکس تولید شده توسط گاز نیتروژن بیشتر است که این نیز با نتایج شبیه سازی مطابقت دارد. تفاوت این نمودار با نمودار متناظر با داده های شبیه سازی در شدت افت دز پرتو با فاصله گرفتن از محدوده نوک الکترودها می باشد که این بدلیل عدم توانایی شبیه سازی نیروهای الکترومغناطیسی و پلاسما در نرم افزار MCNPX است.



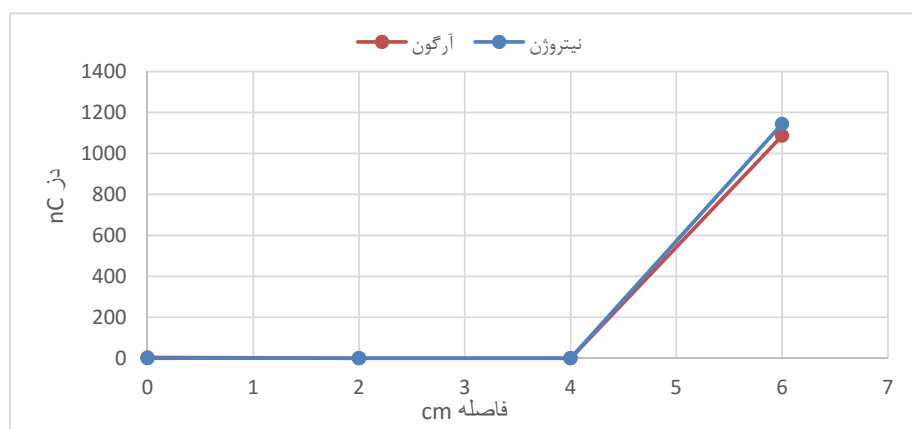
شکل ۵-۱۲: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در ارتفاع های متفاوت

۵-۵-۲ اندازه گیری و مقایسه دز پرتو ایکس در فواصل و زوایای مختلف برای دو نوع گاز (درون محفظه)

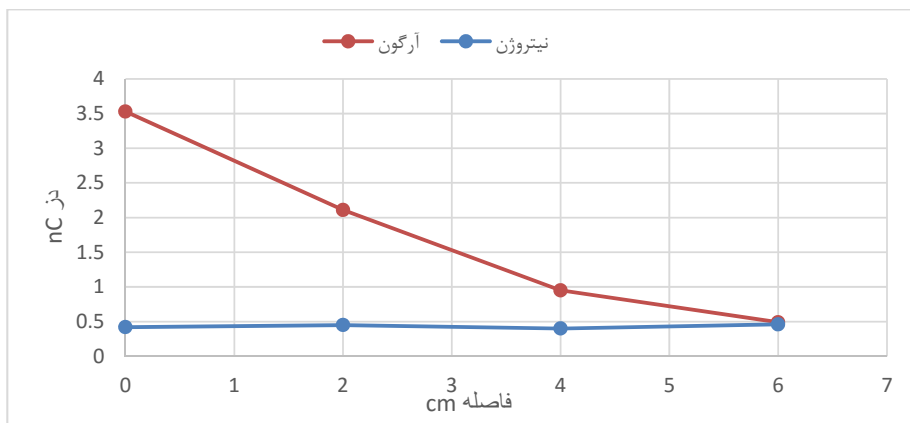
مطابق داده‌های بدست آمده، دز پرتو ایکس در زاویه‌های ۳۰ درجه و فاصله ۶ سانتی‌متر برای گازهای آرگون و نیتروژن به ترتیب ۱۰۸۶/۵۱ و ۱۱۴۳/۸۸ نانوکولن و در زاویه ۹۰ و فاصله ۲ سانتی‌متر برای گازهای آرگون و نیتروژن به ترتیب ۲۱۹/۲۷ و ۴۳۱/۷۲ نانوکولن است. در سایر زوایا و فواصل، دز جذبی آشکارسازها در حد تابش زمینه می‌باشد. در اینجا نیز مطابق مطالب فصل چهارم و داده‌های شبیه‌سازی ناهمسانگردی دز پرتو ایکس تأیید می‌شود. همچنین مطابق نتایج شبیه‌سازی، دز پرتو ایکس تولید شده با گاز نیتروژن مقدار بیشتری دارد.



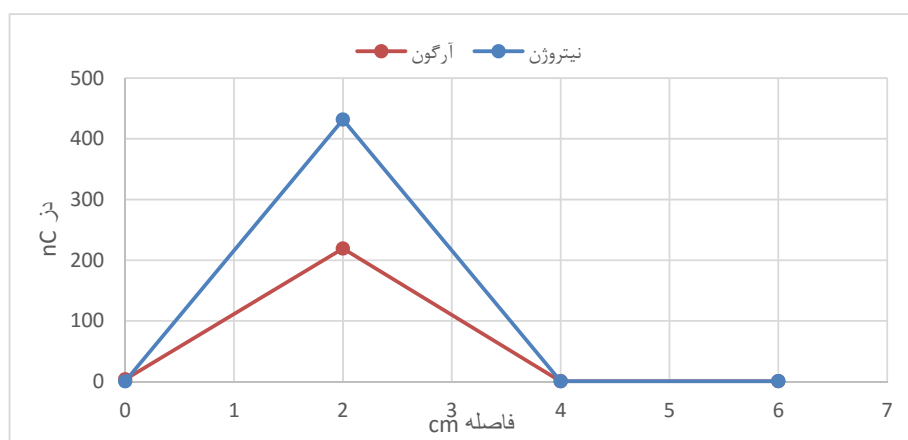
شکل ۵-۱۳: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه صفر درجه



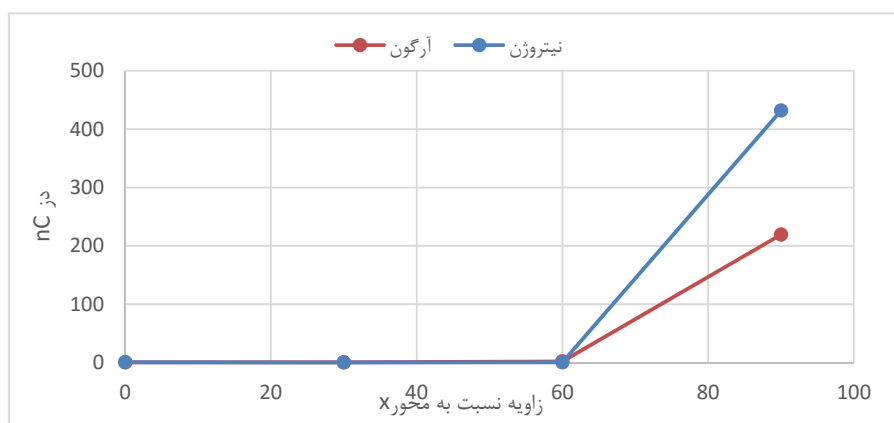
شکل ۵-۱۴: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۳۰ درجه



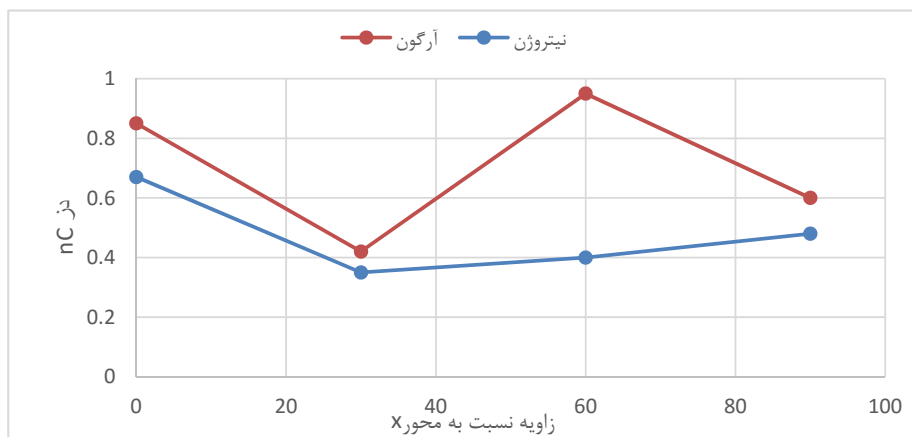
شکل ۵-۱۵: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۶۰ درجه



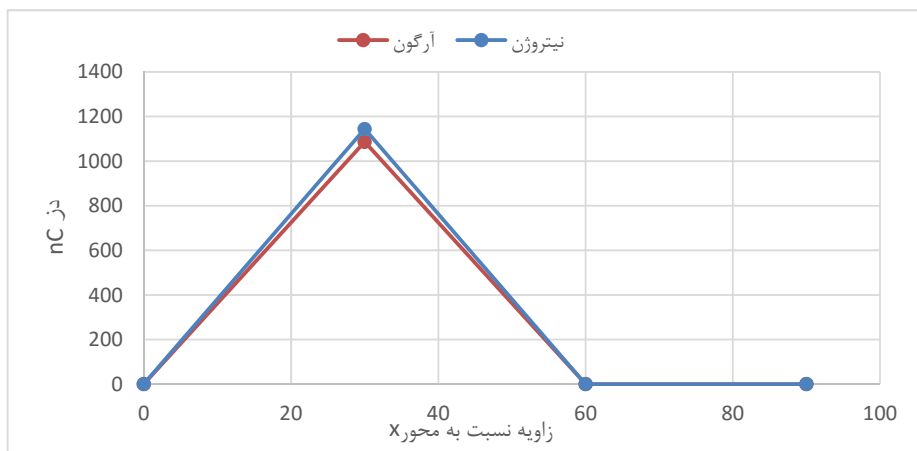
شکل ۵-۱۶: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در زاویه ۹۰ درجه



شکل ۵-۱۷: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۲cm



شکل ۵-۱۸: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۴ cm



شکل ۵-۱۹: نمودار تغییرات دز پرتو ایکس در فاصله ۶ cm

توجه : بر اساس نتایج تجربی، مقدار دز پرتو ایکس در بیرون محفظه خلأ نزدیک به صفر (در حد تابش زمینه) بدست آمده است و به همین دلیل از رسم نمودار و مقایسه و بحث در مورد آن صرف نظر کردیم.

۵-۶ نتیجه گیری

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ، زمان تشکیل پینچ کاهش یافته و با افزایش فشار، زمان تشکیل پینچ افزایش می‌یابد. این مطلب در مورد هر دو گاز کاری آرگون و نیتروژن صادق است. همچنین با مقایسه نوع گاز دریافتیم که در انجام آزمایش با گاز نیتروژن، زمان پینچ کمتری نسبت به گاز آرگون بدست می‌آید.

در این پژوهش به بررسی تأثیر نوع گاز بر دز پرتو ایکس انتشار یافته در دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از آشکارسازهای گرمالیانی (TLD) به صورت تجربی و نظری به روش مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX پرداختیم.

نتایج تجربی نشان می‌دهد که بیشترین پرتو ایکس انتشار یافته در محدوده ارتفاع نوک الکترودها می‌باشد که این پدیده با نتایج شبیه‌سازی در توافق است. همچنین دز پرتو ایکس گسیل شده هنگام استفاده از گاز نیتروژن بیشتر است که این نیز با نتایج شبیه‌سازی مطابقت دارد. تفاوت این نمودار با نمودار متناظر با داده‌های شبیه‌سازی در شدت افت دز پرتو با فاصله گرفتن از محدوده نوک الکترودها می‌باشد که این بدلیل عدم توانایی شبیه‌سازی نیروهای الکترومغناطیسی و پلاσμα در نرم‌افزار MCNPX است.

نتایج تجربی حاصل از بررسی توزیع زاویه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین پرتو ایکس در زاویه ۳۰ درجه و در فاصله ۶ سانتی متری از محور آند انتشار می‌یابد و مقدار دز ناهمسانگرد می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که با افزایش فاصله از چشمه، دز جذبی کاهش می‌یابد. همچنین مقدار دز جذبی (تجربی) آشکارسازها در بیرون محفظه در حد تابش زمینه (نزدیک به صفر) و در شبیه‌سازی صفر ثبت شد.

مراجع

- [۱] نجوم به زبان ساده، ماپردگانی، محمدرضا خواجه پور، نشر مؤسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی
- [۲] آشنایی با فیزیک پلاسما و همجوشی کنترل شده، فرانسیس اف چن، دکتر حسن مهدیان و اسماعیل نامور، مرکز نشر دانشگاهی، ص ۸
- [3] A.I.Mozorov, "Introduction to plasma dynamics", 2012
- [۴] آشنایی با فیزیک پلاسما و همجوشی کنترل شده، فرانسیس اف چن، دکتر حسن مهدیان و اسماعیل نامور، مرکز نشر دانشگاهی، ص ۹
- [۵] هانو کاتونن، شاه علی غ، ۱۳۹۴، "مبانی ستاره شناسی"، انتشارات شاهچراغ، ص ۲۰۷
- [۶] پلاسما، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، گروه فیزیک
- [۷] آشنایی با فیزیک پلاسما و همجوشی کنترل شده، فرانسیس اف چن، دکتر حسن مهدیان و اسماعیل نامور، مرکز نشر دانشگاهی، ص ۱۰ الی ۱۸
- [۸] جان ار. ریتس، فردریک جی. میلفورد، رابرت دبلیو. کریستی، ۱۳۸۳، مبانی نظریه الکترومغناطیس، جلد اول، جلال صمیمی، ابوالقاسم جمشیدی، مسیب جمشیدی پور، ناصر علیزاده قمصری، چاپ دهم، مرکز نشر دانشگاهی تهران
- [9] S.Bing, "Comparative study of dynamics and x-ray emission", PhD thesis, nanyang technological university. Chapter 5
- [10] D.D.L.Chang, "Development, design and applications of structural capacitors"
- [11] Xiaoping Wang, Y.Chen, Min Fu, "Effect of high-voltage discharge non-thermal plasma on f-C3N4 in a plasma-photo catalyst system"
- [12] S.M.Miremad, B.S.Bidabadi, "Measurement to the effective energy of pulsed x-ray emitted from a Mather-type plasma focus device"
- [13] 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 pressure"
- [14] M.Habibi, R.Amrollahi, G.R.Etaati, "experimental study of hard x-ray emission with different anode tips in APF plasma focus device", 2010
- [15] S.M.Miremad, B.S.Bidabadi, "Effect of inserted metal at anode tip on formation of pulsed x-ray emitting zone of plasma focus device" 2018
- [16] H.Harold, A.Jerzikiwicz, M.Sadowski, "Comparative analysis of large plasma focus experiments performed at IPF, Stuttgart and at IPJ"
- [17] M.Kashani and K.Soto, "Cathode effects in plasma focus discharge" 2002

- [18] M.Zakauallah, I.Ahmad, G.Mortaza, M.Yasin, M.M.Beg, "effects of insulator sleeve contamination on the low energy plasma focus performance"
- [19] S.Goudarzi, S.M.Hoseinian, A.Raeisdana, "Experimental results of breakdown in Dena plasma focus device", 2014
- [20] H.R.Yousefi, F.M.Aghamir, K.Masugata, "Effect of the insulator length on Mather-type plasma focus devices", 2006
- [21] H.P.Y.Randy, S.S.Loke, pa.Lee, R.S.Rawat, "Effects of insulator sleeve length on neutron and x-ray emissions from deuterium filled dense plasma focus device"
- [22] A.Tarifeno, E.Ramos-Moore, P.Ferrari, L.Soto, "Understanding the insulator conditioning process in fast plasma focus discharge" 2012
- [23] S.Lee, A.Serbian, "Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch" 1996
- [24] Vena Carter, "Advanced nuclear physics, first edition 2009
- [۲۵] کنت اس کرین، ۱۳۷۹، فیزیک جدید، منیژه رهبر، بهرام معلمی، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی تهران
- [26] J.P.Friedberg (2008), "Plasma physics and fusion energy", Cambridge university press
- [۲۷] "آشنایی با فیزیک پلاسما و همجوشی کنترل شده"، فرانسیس اف چن، دکتر حسن مهدیان و اسماعیل نامور، مرکز نشر دانشگاهی
- [۲۸] "مبانی نظریه الکترومغناطیس"، جان ار. ریتس، فردریک جی. میلفورد، رابرت دلبیو. کریستی، ۱۳۸۳، جلد اول، جلال صمیمی، ابوالقاسم جمشیدی، مسیب جمشیدی پور، ناصر علیزاده قمصری، چاپ دهم، مرکز نشر دانشگاهی تهران، ص ۴۱۷
- [۲۹] محمدی م، ۱۳۸۷، رساله دکتری: "مطالعه دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از سیستم سایه نگاری لیزری"، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز
- [۳۰] "آشنایی با فیزیک پلاسما و همجوشی کنترل شده"، فرانسیس اف چن، دکتر حسن مهدیان و اسماعیل نامور، مرکز نشر دانشگاهی، ص
- [31] T.Zhang, R.S.Rawat, S.M.Hassan, J.J.Lin, S.Mahmood, T.L.Tan, S.V.Springham, V.A.Gribkov, P.Lee, S.Lee," Drive parameter as a design consideration for Mather and Filippov types of plasma focus"
- [32] S.Lee, P.Lee, G.Zhang, A.Serban, I.Mahe, X.Feng, S.V.Springham, C.Selvem, V.Kadriashor and T.K.Wong," Application of plasma focus as a source of high energy electron"
- [33] S.Vahedi, S.Sobhanian, M.A.Mohammadi and V.Siahposh," Preliminary measurements in Sahand plasma focus emphasizing on the temporal characteristics of hard and soft x-rays ", 2006
- [34] S.P.Moo, C.K.Chakrabarty and S.Lee," An investigation of the ion beam of a plasma focus using a metal obstacle and deuterated target", 1991

- [35] L.Michel, K.H.Schonbach and Heinz Fischer,” Neutron emission from a small 1kj plasma focus”, 1973
- [36] J.W.Mather,” Investigation of the high-energy acceleration mode in the coaxial gun”, 1964
- [37] N.V.Filippov, T.L.Filippov and V.P.Vinogardov,” Dense, high-temperature plasma in a non-cylindrical z-pinch compression”, 1962
- [38] M.A.Mohammadi, S.Sobhanian, C.S.Wong, S.Lee, P.Lee and R.S.Rawat,” The effect of anode shape on neon soft x-ray emission and current sheath configuration in plasma focus device”,2009
- [39] J.W.Mather,” Formation of a high-density deuterium plasma focus”, 1965
- [40] L.Soto,” New trends and future perspectives on plasma focus research”, plasma physics and controlled fusion, 2005
- [41] M.Habibi,” Two hump-shaped angular distributions of neutrons and soft x-ray in a small plasma focus device”, 2018
- [42] H.Kelly and et al, “Analysis of the nitrogen ion beam generated in a low-energy plasma focus device by a Faraday Cup operating in the secondary electron emission mode”,1998
- [43] G.R.Etaati, R.Amrollahi, M.Habibi, R.Baghdadi,” Angular distribution of argon ions and x-ray emissions in the APF plasma focus device”, 2011
- [44] 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”, 2015
- [45] I.V.Fomenkov and et Al, “EUV discharge light source based on a dense plasma focus operated with positive and negative polarity”
- [46] M.P.Srivastava, S.R.Mohanty, S.Annapoorni, R.S.Rawat, “Diode like behavior of an ion irradiated polyniline film”, 1996
- [47] R.S.Rawat, M.P.Srivastava, S.Tandon and A.Manning, ”Crystallization of an amorphous lead zirconate titanate thin film with a dense plasma focus device”, 1993
- [48] H.R.Yousefi, Y.Nakata, H.Ito and K.Masugata, ”Characteristic observation of the ion beams in the plasma focus device”, 2007
- [49] H.Kelly, A.Lepone, A.Marquez, D.Lamas and On.Viejo, “Coating on metallic samples produced by a small energy plasma focus”, 1996
- [50] M.Omani, M.Habibi, R.Amrollahi, A.Khosravi, ”Improvement of corrosion and electrical conductivity of 316L stainless steel as bipolar plate by TiN nanoparticle implantation using plasma focus”, 2012
- [51] Y.P.Bogolubov and et Al,”Application of a plasma focus-based source for fast neutron and x-ray radiography”, 2009
- [52] M.Akel, Sh.Al-Hawat and S.Lee, ”Numerical experiments on soft x-ray emission optimization of nitrogen plasma in 3kj plasma focus SY-1 using modified Lee model”, 2009
- [53] D.J.Elliott microlithography, process technology for IC fabrication, 1986, newYork

- [54] P.Knoblauch and et Al, "Hard x-ray dosimetry of a plasma focus suitable for industrial radiography", 2018
- [55] Vo.Rasp and et Al, "Plasma focus as a powerful hard x-ray source for ultrafast imaging of moving metallic objects", 2004
- [56] H.Krompholz and et Al, "Formation of the plasma layer in a plasma focus device", 1980
- [57] M.Zakaulah, I.Ahmad, A.Omar, G.Mortaza and M.M.Beg, "Effects of anode shape on plasma focus operation with argon", 1996
- [58] J.N.Feugeas, "The influence of the insulator surface in the plasma focus behavior", 1989
- [59] A.Dodges and et al, "The breakdown phase in a coaxial plasma gun", 1980
- [60] So.Lee, S.H.Saw, A.E.Abdou, H.Torreblance, "Characterizing plasma focus device-role of the static inductance-instability phase Fitted by anomalous resistance", 2010

[۶۱] مقدمه ای بر مفاهیم، سیستم ها و کاربردهای انرژی هسته ای، محمد قنادی مراغه، ص ۹۷ و

۱۰۱

- [62] VI.Raspy and et Al, "Plasma focus based repetitive source of fusion neutrons and hard X-rays", 2008
- [63] H.Bhuyan and et Al, "magnetic probe measurements of current sheet dynamics in a coaxial plasma accelerator", 2003
- [64] L.Soto and et al, "Research on pinches driven by speed2 generator: Hard x-ray and neutron emission in plasma focus configuration", 2004

[۶۵] رستمی فرد. 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

- [66] B.D.Cullity, "Elements of x-ray diffraction" , Associate professor of metallurgy university of notre dame

[۶۷] شریف زاده، دکتر مهدی مؤمنی، پایان نامه ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک

[۶۸] صمد راستی کردار، محمد حسین نادری، "مبانی حفاظت در برابر پرتوها"، ص ۱۲۳

[۶۹] صمد راستی کردار، محمد حسین نادری، "مبانی حفاظت در برابر پرتوها"، ص ۱۳۹ الی ۱۴۰

[۷۰] محمد قنادی مراغه، "مقدمه ای از مفاهیم، سیستم ها و کاربردهای انرژی هسته ای"، ص ۱۴۵

[۷۱] محمد قنادی مراغه، "مقدمه ای از مفاهیم، سیستم ها و کاربردهای انرژی هسته ای"، ۱۵۰ و

۱۵۱

[۷۲] صمد راستی کردار، محمد حسین نادری، "مبانی حفاظت در برابر پرتوها"، ص ۲۴۰ و ۲۴۱

[۷۳] نیکلاس سولفانیدس، "اندازه گیری و آشکارسازی تابش های هسته ای"، رحیم کوهی، محمود

هادی زاده یزدی، چاپ دوم، ۱۳۸۶، ص ۷۶۵ و ۷۶۶

[۷۴] محمد قنادی مراغه، "مقدمه ای از مفاهیم، سیستم ها و کاربردهای انرژی هسته ای"، ص ۲۶۹
[۷۵] محمد قنادی مراغه، "مقدمه ای از مفاهیم، سیستم ها و کاربردهای انرژی هسته ای"، ص ۳۹۳
الی ۴۰۰

[۷۶] صمد راستی کردار، محمد حسین نادری، "مبانی حفاظت در برابر پرتوها"، ص ۵۳۵ و ۵۴۴
[77] Lee S. (1988). "Radiation enhancement and applications scaling from the UNU/ICTP pff"
[78] Lee S. and Serbian A. (1996). "Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch"
[79] Shark M.N. Goudarzi S. Raeisdana A. and Jafarabadi M. (2013). "Numerical analysis of amirkabir plasma focus (APF) device for neon and argon gases"
[80] Roomi A. and Habibi M. (2012). "The effect of working gas admixture, applied voltage and pressure on focusing time parameter in the APF plasma focus device"
[81] هرمان. سمیر، ۱۳۸۰، فیزیک بهداشت از دید پرتوشناسی، ابراهیم بوکاظمی، انتشارات نشر دانشگاهی، تهران ۲۳۲
[82] نیکلاس سولفانیدیس، ۱۳۷۱، اندازه‌گیری و آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای، رحیم کوهی، انتشارات کتابستان مشهد

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

[84] <https://radiopedia.org/articles/thermoluminescent-dosimeter>

[85] D. B. Pelowitz, (2005), MCNPXTM User Manual. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos

[86] آموزش کد MCNPX، یاسر کاسه‌ساز، مصطفی حسن‌زاده

[۸۷] Lee S. and Serban A. (1996), "Dimensions and Lifetime of the Plasma Focus Pinch" IEEE Transactions on plasma focus, 24, 3, pp 1101-1105

[88] [HTTPS://en.m.wikipedia.org/wiki/thermoluminescent-dosimetry](https://en.m.wikipedia.org/wiki/thermoluminescent-dosimetry)

[89] [HTTPS://www.adinehbook.com/gp/product/9649362266](https://www.adinehbook.com/gp/product/9649362266)

[90] [HTTPS://www.gammadata.se/products/radiation-detection/dosimetry/tld](https://www.gammadata.se/products/radiation-detection/dosimetry/tld)

Abstract

Recently, with the development of science, humans need new techniques for research. X-rays can be used as an important tool in a variety of fields, including medicine, engineering, astronomy, chemistry and etc. X-ray is a kind of electromagnetic radiation that encourages scientists to study it and its uses. Therefore, we look at the production and characteristics of x-ray. The plasma focus device is one of the sources of x-ray production. In order to achieve the energy generated by nuclear fusion reactions and to prepare suitable conditions for these reactions, the need for the creation of plasma focus device has been made, which has been a pulse generator of x-ray, neutron and charged particles that used in research and industrial centers for many years. The production of x-rays and neutron in this device requires the occurrence of a pinch in the system. The best efficiency of the device's products is when the pinch and maximum flow event simultaneously and the pinch has been symmetry and singularity. This device and x-ray emission of that, have advantages that make the device has abundant uses. The most important are high efficiency, low cost, easy maintenance and pulse x-ray emission from this device.

In this study, we investigate the effect of gas type on x-ray doses emitted in a plasma focus device using thermoluminescence (TLD) dosimeters experimentally and theoretically. The pinch time parameter was also investigated at different pressures, voltages and gases. Analysis of data and diagrams shows that pinch time parameter increases with increasing pressure and decreasing with increasing voltage. According to the data obtained, the pinch time parameter at the same pressure and voltage as during the experiment with argon gas was higher than nitrogen gas was used.

Experimental measurements of absorbed dose at different heights and absorption dose calculations of the detectors were performed theoretically by Monte Carlo method using MCNPX code. Experimental results show that the most X-ray emitted is in the range of tip height of the electrodes, which is in agreement with the simulation results. The x-ray dose is also higher when using nitrogen gas, which is consistent with the simulation results. The difference between this diagram and the corresponding diagram of the simulation data is in the intensity of the beam dose drop by the

distance from the tip of the electrodes due to the inability to simulate electromagnetic forces and plasma in MCNPX software. Experimental results from the angular distribution show that most X-rays are propagated at an angle of 30° at a distance of 6 cm from the anode axis and the dose is anisotropic. The simulation results show that the absorption dose decreases with increasing distance from the spring. Also, the absorption (experimental) dose of the detectors was recorded outside the chamber at the background radiation level (near zero) and at zero simulation.

Keywords: Plasma focus device, Pinch time, X-ray, Absorption dose, TLD, Monte Carlo simulation



**#Shahrood University of
#Technology**

Faculty of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc. Thesis in Nuclear Physics

Effect of gas on X-Ray Dose from Plasma Focus Device of Shahrood University of
Technology

By: Hamid Reza Bordbar

Supervisors:

Dr. Hossein Tavakkoli Anbaran

Dr. Mahdi Momeni

September, 2019