

بررسی تأثیر طول عایق بر عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی ۴ کیلوژول از نظر گسیل پرتو اشعه ایکس و یون

سعیده کوهستانی^{۱*}

^۱گروه فیزیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

*ایران، نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، گروه فیزیک، کدپستی ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱.

پست الکترونیکی: saeidehkoohestani@gmail.com

چکیده

در این مقاله تأثیر طول‌های مختلف عایق پیرکس بر شدت اشعه ایکس نرم، اشعه ایکس سخت و انتشار یون تولید شده توسط دستگاه پلاسمای کانونی ۴ کیلوژول دانشگاه صنعتی امیرکبیر به‌طور همزمان بررسی شده است. ماده عایق مورد استفاده پیرکس بوده و طول آن از ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر با گام‌های ۵ میلی‌متری متغیر بوده است. سه فشار مختلف گاز نئون برای تزریق در دستگاه ۶، ۷، و ۸ تور، در آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری شدت اشعه ایکس سخت و نرم به‌ترتیب از آشکارساز سوسوزن و فوتودیود PIN و برای اندازه‌گیری گسیل یون از فنجان‌های فارادی استفاده شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که طول ۴۵ میلی‌متر حداکثر انتشار یون را ایجاد می‌کند، در حالی که یک عایق ۵۰ میلی‌متر شدت بیشتری را برای اشعه ایکس نرم و سخت ایجاد می‌کند. برای به‌دست آوردن بهترین عملکرد دستگاه با در نظر گرفتن همه خروجی‌ها، محاسباتی بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌کار برده شده است و در نتیجه این محاسبات ضریبی که در این تحقیق به‌عنوان ضریب عملکرد نامیده شده به‌دست آمده است. بر اساس مقادیر این ضریب، بهترین عملکرد با طول ۵۰ میلی‌متر و فشار گاز ۸ تور حاصل می‌شود.

کلیدواژه‌گان: اشعه ایکس نرم، اشعه ایکس سخت، گسیل یون، دستگاه پلاسمای کانونی، فنجان فارادی، فوتودیود.

۱. مقدمه

پینچ^۱ تولید می‌کنند. این یون‌های پر انرژی کاربردهای بالقوه مختلفی در اصلاح مواد، درمان سرطان و رادیوتراپی دارند. دریافت و کنترل انتشار اشعه ایکس نیز در کاربردهای مختلف مانند علم مواد، آشکارسازی پلاسما و تصویربرداری پزشکی حیاتی است. یکی از جنبه‌های مهم که به‌طور قابل توجهی بر رفتار دستگاه‌های پلاسمای کانونی تأثیر می‌گذارد، طول ماده عایق قرار داده‌شده بین الکترودها است. عایق به‌عنوان یک جزء

در سال‌های اخیر، به دلیل کاربردهای متنوع فیزیک پلاسما از همجوشی هسته‌ای و اخترفیزیک تا سنتز مواد، تحقیقات مرتبط با این زمینه شاهد پیشرفت‌های قابل توجهی بوده است. در میان جنبه‌های مختلف مورد مطالعه، دستگاه‌های پلاسمای کانونی اهمیت ویژه‌ای یافته است. دستگاه‌های پلاسمای کانونی، مولدهای پلاسمای فشرده و پر انرژی هستند که ذرات با انرژی بالا و همچنین پرتوهای ایکس را از طریق پدیده فشرده‌سازی

^۱ Pinch

کلیدی در حفظ خرابی الکتریکی درون دستگاه عمل می‌کند و به فشرده‌سازی و محصور شدن ستون پلاسما کمک می‌کند. بررسی اثر طول عایق بر انتشار یون و اشعه ایکس به یک حوزه تحقیقاتی فعال تبدیل شده‌است که هدف آن افزایش عملکرد و کارایی این دستگاه‌ها است.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی بر روی بررسی اثر طول عایق بر انتشار اشعه ایکس نرم و سخت در دستگاه‌های پلاسما کانونی متمرکز شده‌اند. پیش از این اثر طول عایق پیرکس بر انتشار پرتو ایکس نرم و سخت در دستگاه پلاسما کانونی امیرکبیر به‌طور تجربی بررسی شده‌اند [۲، ۱]. در نتیجه این مطالعات مشخص شد که تغییر طول عایق منجر به تغییرات قابل توجهی در شدت پرتوهای ایکس سخت و نرم ساطع شده می‌شود. همچنین نشان داده شد که با انتخاب طول ۵۰ میلی‌متر عایق پیرکس می‌توان به حداکثر شدت انتشار هر دو اشعه ایکس سخت [۱] و نرم [۲] دست یافت. در پژوهش دیگری [۳]، اثرات طول عایق بر توزیع مکانی و رفتار زمانی انتشار اشعه ایکس نرم در یک دستگاه پلاسما کانونی ۳/۳ کیلوژول در فشارهای مختلف گاز نئون بررسی شده‌است. حاصل این تحقیق استخراج یک رابطه غیر خطی بین طول عایق و شدت اشعه ایکس نرم است که طول بهینه منجر به حداکثر خروجی تابش می‌شود. همچنین مشخص شد که فشارهای مختلف گاز نیز بر شدت اشعه ایکس نرم تأثیر دارد. چنین یافته‌هایی به‌خصوص برای کاربردهایی که نیاز به هماهنگ‌سازی دقیق و کنترل زمان‌بندی پالس‌های اشعه ایکس ساطع شده دارند، بسیار مفید است. علاوه بر این‌ها در پژوهشی دیگر، نقش طول عایق در زاویه واگرایی و عرض پرتوهای ایکس نرم با استفاده از تکنیک‌های آشکارسازی متعدد مورد بررسی قرار گرفته‌است [۴]. مطالعه آن‌ها اطلاعاتی را در مورد ارتباط بین طول عایق، دینامیک پلاسما و ویژگی‌های تشعشع ارائه کرد. محمدی و همکاران [۵] همچنین تأثیر شکل عایق را بر انتشار اشعه ایکس نرم و

سخت بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییر در شکل عایق نیز می‌تواند منجر به الگوهای متمایز تابش اشعه ایکس نرم و سخت شود و بر نقش حیاتی آن در شکل دادن به ویژگی‌های تشعشعات ساطع شده تأکید شده‌است. در تحقیق دیگری [۶] اثر جنس عایق بر انتشار پرتو ایکس در یک دستگاه پلاسما کانونی بررسی شده‌است. تحقیقات آن‌ها تغییرات شدت اشعه ایکس نرم مرتبط با جنس‌های مختلف عایق را مشخص نموده‌است و نحوه تأثیر این پارامتر بر خواص تابش را روشن کرده‌است. مؤمنی و همکاران [۷] روابط بین طول عایق و دینامیک پلاسما را بررسی کرده‌اند. یافته‌های این مطالعه ابزاری برای بهینه‌سازی طول عایق برای تشکیل یک پلاسما پایدار و انتشار اشعه ایکس در دستگاه پلاسما کانونی ارائه داده‌است.

علی‌رغم انواع مطالعات متمرکز بر انتشار پرتو ایکس، تحقیقاتی کمتری تأثیر طول عایق را بر پارامترهای انتشار یون دستگاه‌های پلاسما کانونی بررسی کرده‌اند. شدت انتشار یون در این مقاله به‌صورت تعداد یون (در این‌جا یون نئون) دریافت شده توسط سطح مقطع فنان فارادی در لحظه ثبت سیگنال توسط اسپلوسکوپ (که همان لحظه‌شات دستگاه است) تعریف می‌شود. در پژوهش اخیر نویسنده [۸] تأثیر طول عایق پیرکس و کوآرتز بر شدت یون ساطع شده توسط دستگاه پلاسما کانونی امیرکبیر بررسی شد. در این مطالعه نشان داده شد که در برخی از طول‌های خاص، یون نئون بیش‌تری تولید می‌شود.

در مطالعه دیگری [۹]، نویسندگان نقش طول عایق را در شکل دادن به خواص پرتو یون دوتریوم در یک دستگاه پلاسما کانونی بررسی کردند. با تغییر سیستماتیک طول عایق، آن‌ها تغییرات قابل توجهی را در توزیع انرژی یون، واگرایی پرتو و چگالی تعداد یون دوتریوم مشاهده کردند. یافته‌های آن‌ها بر اهمیت طول عایق بهینه برای انتشار یون کارآمد تأکید کرد. روت و همکارانش [۱۰] نیز رابطه بین جنس عایق و میزان انتشار یون را بررسی کردند. مطالعه آن‌ها بر درک تأثیر ترکیب مواد عایق بر

اسیلوسکوپ Tektronix با فرکانس‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاهرتز ضبط شد.

کل جریان تخلیه شده با استفاده از سیم پیچ Rogowski اندازه‌گیری شد. انتشار اشعه ایکس نرم از دستگاه با استفاده از فتودیوهای (BPX-۶۵) PIN که در فاصله ۲۲ سانتی‌متری از نوک آند قرار داده شده بودند، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری‌های پرتو ایکس سخت، یک آشکارساز سوسوزن متشکل از یک سوسوزن پلاستیکی استوانه‌ای NE-۱۰۲ با وضوح زمانی ۵ نانوثانیه و یک ضرب‌کننده نوری (PM-۵۳) استفاده شد. این آشکارساز در خارج از محفظه تخلیه، روبروی یک پنجره شیشه‌ای ۵ میلی‌متری قرار داشت.

برای بررسی انتشار یون از دستگاه، از فنجان فارادی^۲ استفاده شد. این فنجان که از پوسته‌های داخلی و خارجی از جنس برنج ساخته شده و با لایه‌ای از گرافیت پوشانده شده، تمام الکترون‌های همراه را از طریق پتانسیل منفی خود حذف می‌کند. این فنجان دارای درپوشی با دهانه ۵۰۰ میکرومتر بود و با پلی اتیلن عایق بندی شده بود. در این مطالعه، اندازه‌گیری پرتو یونی با یک فنجان قرار داده شده در محور آند، در فاصله ۱۴ سانتی‌متری از نوک آند، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، انجام شد.

۳. تشریح نتایج

نتایج آزمایش در ولتاژ ۱۱ کیلوولت تحت فشارهای ۶، ۷ و ۸ تور جمع‌آوری شد. پنج شات برای هر شرایط کاری انجام شد و نتایج آن‌ها به‌منظور کاهش خطاهای آزمایش میانگین‌گیری شد. سطح زیر نمودار سیگنال‌های به‌دست‌آمده از اسیلوسکوپ‌ها با استفاده از نرم افزار مطلب محاسبه گردید و به‌عنوان معیار بررسی شدت انتشار اشعه ایکس و یون در نظر گرفته شد. نمونه سیگنال‌های خام حاصل از آشکار ساز سوسوزن (برای اشعه

روی تولید یون‌های پرسرعت در دستگاه پلاسمای کانونی متمرکز بود. آن‌ها با مقایسه مواد مختلف عایق، تغییرات قابل توجهی را در انرژی یون مشاهده کردند و نقش حیاتی مشخصات عایق را در شکل دادن به انتشار یون مشخص کردند. در حالی‌که پیشرفت‌های قابل توجهی در روشن کردن اثر طول عایق بر انتشار اشعه ایکس نرم و سخت در دستگاه‌های پلاسمای کانونی صورت گرفته است، ابهاماتی وجود دارد که راه را برای کاوش بیش‌تر باقی گذاشته است. به‌عنوان مثال، تأثیر این پارامتر بر عملکرد کلی دستگاه از نظر انتشار یون و اشعه ایکس به‌طور هم‌زمان باید بررسی شود تا درک کامل تری از این سیستم پیچیده به‌دست آید. از آنجایی که برای یک دستگاه کارآمد بسیار مهم است که هم از نظر تولید یون‌های پراانرژی و هم از نظر انتشار اشعه ایکس نرم یا سخت بهینه شود، در نظر گرفتن همه این خروجی‌ها هنگام بررسی تأثیر پارامترهای دستگاه از جمله طول عایق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، در این مطالعه هدف ما بررسی نقش طول عایق در بهینه‌سازی دستگاه پلاسمای کانونی ۴ کیلوژول امیرکبیر از نظر شدت اشعه ایکس نرم، اشعه ایکس سخت و انتشار یون به‌طور هم‌زمان است.

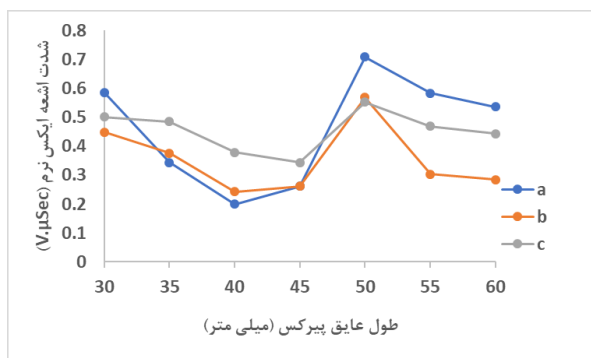
۲. مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر

در دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر از عایق‌های پیرکس با طول‌های مختلف (از ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر) استفاده شد. قبل از تزریق گاز نئون، سیستم خلاء محفظه تا فشار 5×10^{-5} e- تور کاهش داده شد. پس از هر پنج شات، گاز تخلیه و با گاز تازه جایگزین شد تا ناخالصی‌ها به حداقل برسد. کابل‌های یکسان RG ۵۸ AI با طول ۸ متر برای تمام اتصالات الکتریکی استفاده شد. برای کاهش اثرات نویز الکترومغناطیسی، کابل‌ها با فویل آلومینیومی پیچیده شدند. سیگنال‌های دریافتی با استفاده از چهار

² Faraday cup

^۱ Photomultiplier

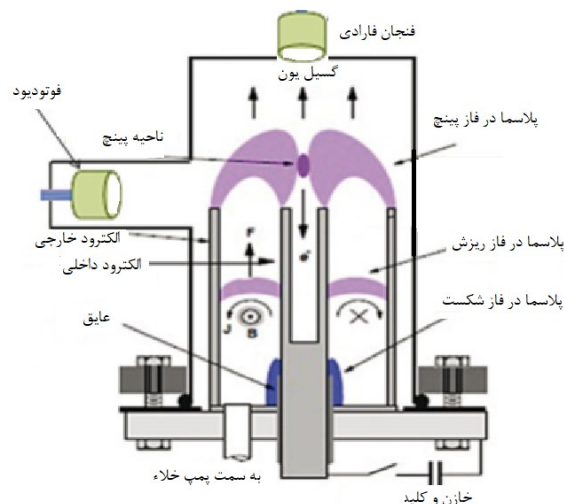
در شکل ۳، شدت اشعه ایکس نرم محاسبه شده برای طول‌های مختلف عایق‌های پیرکس ترسیم شده است. این نتایج پیش‌تر در مرجع [۲] نیز منتشر شده بود. بدیهی است که تغییر در طول عایق می‌تواند بر شدت اشعه ایکس نرم تأثیر بگذارد. شدت اشعه ایکس نرم با افزایش طول عایق پیرکس از ۴۰ به ۵۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. افزایش بیش‌تر طول عایق به ۶۰ میلی‌متر منجر به کاهش شدت اشعه ایکس نرم می‌شود. بنابراین، برای حداکثر اشعه ایکس نرم، طول ۵۰ میلی‌متری عایق پیرکس بهترین گزینه است.



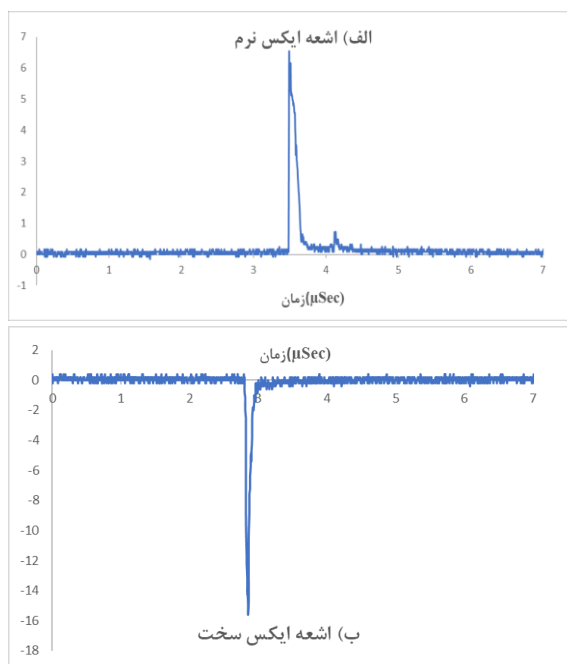
شکل (۳): شدت اشعه ایکس نرم نسبت به طول عایق پیرکس در شرایط کاری مختلف: ولتاژ ۱۱ کیلوولت و فشار (a) ۶ تور، (b) ۷ تور، (c) ۸ تور.

در شکل ۴ نیز تغییرات شدت اشعه ایکس سخت نسبت به طول عایق پیرکس نمایش داده شده است [۱]. با توجه به نمودار شکل ۴، رفتار شدت اشعه ایکس سخت برای فشارهای مختلف یکسان است. همچنین، حداکثر اشعه ایکس سخت منتشر شده مربوط به عایق ۵۰ میلی‌متری است و با افزایش طول به ۶۰ میلی‌متر، شدت سیگنال کاهش می‌یابد. از این‌رو در صورت استفاده از عایق پیرکس، برای به دست آوردن بیش‌ترین شدت اشعه ایکس سخت، طول بهینه عایق برابر با ۵۰ میلی‌متر خواهد بود.

ایکس سخت) و دیود نوری (برای اشعه ایکس نرم) که برای عایق پیرکس به طول ۶۰ میلی‌متر و فشار کاری ۷ تور توسط کانال‌های اسپلکوپ دریافت شده است در شکل ۲ نشان داده شده است.



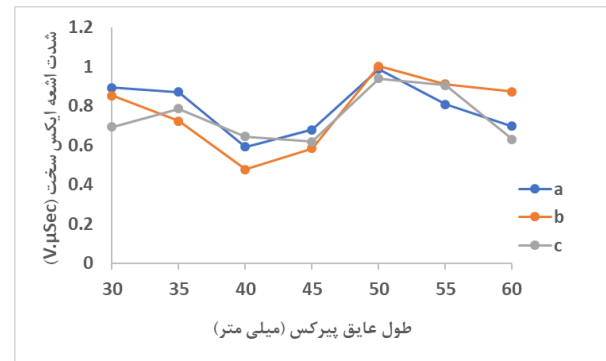
شکل (۱): طرح واره دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر به همراه آشکارسازها.



شکل (۲): نمونه سیگنال‌های خام الف) اشعه ایکس نرم حاصل از دیود نوری و ب) اشعه ایکس سخت حاصل از آشکارساز سوسوزن برای عایق پیرکس به طول ۶۰ میلی‌متر و فشار کاری ۷ تور.

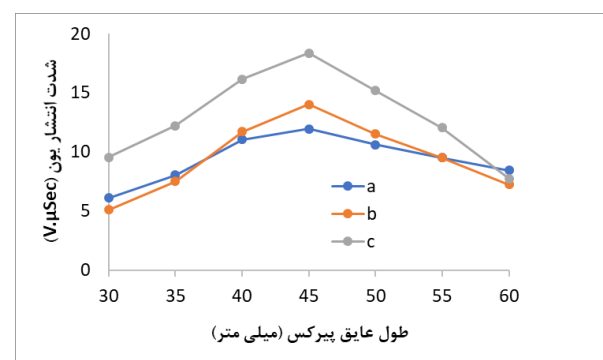
با مقایسه رفتار پرتو ایکس و گسیل یون در برابر طول عایق، می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه یک عایق پیرکس ۴۵ میلی‌متری شدت یون بیش‌تری را حاصل می‌شود، اما این عایق پیرکس ۵۰ میلی‌متری است که منجر به انتشار اشعه ایکس بیش‌تر می‌شود. همچنین مشخص شد که انتشار یون در فشار ۸ تور بیش‌تر است. با این حال، هیچ الگوی قابل تشخیصی برای شدت اشعه ایکس نرم و سخت در برابر فشار کاری وجود ندارد، که نشان می‌دهد فشار گاز تأثیر واضحی بر شدت پرتو ایکس ندارد.

برای غلبه بر این تضاد و تعیین انتخاب بهینه طول ابزار، یک تحلیل ریاضی مشابه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌کار گرفته شده است. در مرحله اول، هر دو شدت اشعه ایکس و یون نشان داده شده در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ در محدوده صفر تا یک نرمال شده‌اند. سپس بر اساس میزان اهمیت هر خروجی، وزنی در نظر گرفته شده است. در این‌جا، وزن ۰/۲۵ برای اشعه ایکس نرم و سخت در نظر گرفته شده و وزن ۰/۵ به انتشار یون اختصاص داده شده است. مقادیر مربوط به هر شرایط کاری با در نظر گرفتن وزن نسبی آن‌ها با هم جمع می‌شوند. مقدار حاصل در این‌جا «ضریب عملکرد» نامیده شده است. ضریب عملکرد برای طول‌های مختلف پیرکس و فشار کاری در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، طول ۵۰ میلی‌متر به بالاترین مقدار این ضریب منتهی می‌شود. مقادیر ضریب عملکرد با افزایش طول پیرکس به ۵۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. مقایسه این مقادیر برای فشارهای مختلف نیز نشان می‌دهد که فشار ۸ تور شرایط بهتری را برای دستگاه فراهم می‌کند. لازم بذکر است که با توجه به انتخاب گام‌های ۵ میلی‌متری برای طول عایق میزان خطای محاسبات در انتخاب طول بهینه عایق به اندازه ± 5 میلی‌متر است. لذا نتایجی که در مورد طول عایق در این مقاله بیان شده است دارای خطای اندازه‌گیری ± 5 میلی‌متر است.



شکل (۴): شدت اشعه ایکس سخت نسبت به طول عایق پیرکس در شرایط کاری مختلف: ولتاژ ۱۱ کیلوولت و فشار (a) ۶ تور، (b) ۷ تور، (c) ۸ تور.

در شکل ۵، میزان انتشار یون که توسط آشکارساز فنجان‌ی فارادی اندازه‌گیری شده برای طول‌های مختلف پیرکس ارائه شده است [۸]. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، انتشار یون برای عایق پیرکس با افزایش طول تا ۴۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد و بعد از آن کاهش می‌یابد. این روند برای همه شرایط کاری صادق است. این نشان می‌دهد که عایق پیرکس با طول ۴۵ میلی‌متر نسبت به سایر طول‌های پیرکس انتشار یون بیش‌تری را حاصل می‌شود. همچنین مشخص است که انتشار یون در هنگام کار در فشار ۸ تور برای تقریباً تمام طول‌های عایق پیرکس بیشینه است.

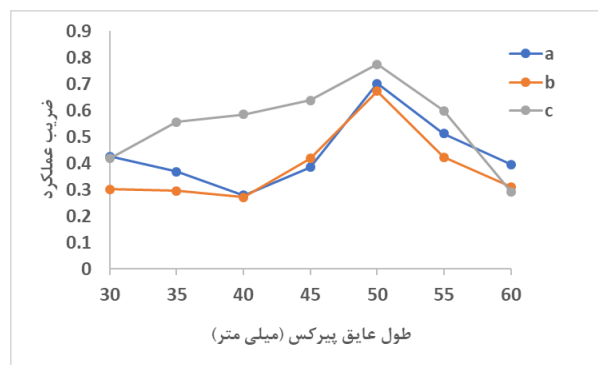


شکل (۵): شدت انتشار یون نسبت به طول عایق پیرکس در شرایط کاری مختلف: ولتاژ ۱۱ کیلوولت و فشار (a) ۶ تور، (b) ۷ تور، (c) ۸ تور.

سریع تر پوشش جریان شود و به طور بالقوه باعث تشکیل پره^۲ شود. بنابراین، طول عایق که بخشی از الکتروود داخلی را در بر می گیرد، نقش مهمی در دینامیک پلاسما کانونی ایفا می کند.

۴. نتیجه گیری

یافته های این مقاله حاکی از آن است که گسیل یون نئون با استفاده از عایق پیرکس به طول ۴۵ میلی متر حداکثر است. در مقابل، بیشترین شدت اشعه های ایکس نرم و سخت مربوط به طول عایق ۵۰ میلی متر است. برای به دست آوردن بهترین عملکرد دستگاه با در نظر گرفتن همه خروجی ها، هر سه پارامتر بر اساس وزن نسبی آن ها ترکیب شدند و در نتیجه کمیته به نام ضریب عملکرد به دست آمد. روند تغییرات ضریب عملکرد در برابر طول عایق پیرکس نشان داد که بهترین عملکرد با طول ۵۰ میلی متر حاصل می شود. علاوه بر این، فشار گاز ۸ تور انتخاب بهتری است. لازم بذکر است که طول بهینه معرفی شده برای عایق پیرکس با در نظر گرفتن شرایط دستگاه پلاسما کانونی موجود است و ممکن است این مقدار برای دستگاه های دیگر با شرایط کاری دیگر متفاوت باشد.



شکل (۶): مقادیر ضریب عملکرد دستگاه نسبت به طول عایق پیرکس در شرایط کاری مختلف: ولتاژ ۱۱ کیلوولت و فشار (a) ۶ تور، (b) ۷ تور، (c) ۸ تور.

اگر وزن های دیگری برای خروجی ها در نظر گرفته شود، نتایج تحلیل ممکن است متفاوت باشد. با این حال، مقادیر ضریب عملکرد به دست آمده در تطابق خوبی با کیفیت تشکیل ستون پلاسما مشاهده شده در آزمایش ها است. شدت اشعه ایکس و انتشار یون به شدت تحت تأثیر ابعاد دستگاه، به ویژه عایق، است. عایق بلندتر می تواند منجر به افزایش اندوکتانس شود و باعث شود پوشش جریان^۱ برای مدت طولانی تری روی سطح عایق بماند. برعکس، عایق کوتاه تر می تواند منجر به رشد

۵. مراجع

1. S. Koohestani, M. Habibi, R. Amrollahi, R. Baghdadi, A. Roomi. Effect of quartz and pyrex insulators length on hard-X ray signals in APF plasma focus device. *J. Fusion Energ.* 30 (2011) 68-71.
2. S. Koohestani, M. Habibi, R. Amrollahi. Study of the effect of pyrex and quartz insulators on X-ray intensity in a 4 kJ plasma focus device. *European Phys. J. D.* 67 (2013) 1-6.
3. R. S. Rawat, T. Zhang, C. B. L. Phua, J. X. Y. Then, K. A. Chandra, X. Lin, P. Lee. Effect of insulator sleeve length on soft x-ray emission from a neon-filled plasma focus device. *Plasma Sources Sci. Technol.* 13 (4) (2004) 569.
4. T. Zhang, X. Lin, K. A. Chandra, T. L. Tan, S. V. Springham, A. Patran, R. S. Rawat. Current sheath curvature correlation with the neon soft x-ray emission from plasma focus device. *Plasma Sources Sci. and Technol.* 14 (2) (2005) 368.
5. M. A. Mohammadi, S. Sobhanian, C. S. Wong, S. Lee, P. Lee, R. S. Rawat. The effect of anode shape on neon soft X-ray emissions and current sheath configuration in plasma focus device. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 (4) (2009) 045203.
6. S. Hussain, M. Shafiq, M. A. Badar, M. Zakauallah. Effect of insulator sleeve material on the x-ray emission from a plasma focus device. *Phys. Plasmas* 17 (9) (2010) 092705.
7. M. Momenei, Z. Khodabakhshei, N. Panahi, M. A. Mohammadi. Experimental investigation of the effect of insulator sleeve length on the time to pinch

² Spoke

¹ Current sheath

- and multipinch formation in the plasma focus facility. *J. Theor. Appl. Phys.* 11 (2017) 59-62.
8. S. Koohestani, M. Habibi, A. Dehkordi. Investigation of the Effect of Insulator Sleeves on the Ion Emission in a 4kJ Plasma Focus Device. *Radiat. Phys. Eng.* 2 (3) (2021) 17-23.
9. H. P. Randy, S. S. Loke, P. Lee, R. S. Rawat, S. Lee. Effects of insulator sleeve length on neutron and X-ray emissions from deuterium filled dense plasma focus device. *30th European Phys. Soc. Conf. Controlled Fusion Plasma Phys.* Vol. 27A, 2003, pp. 1-208.
10. R. K. Rout, A. B. Garg, A. Shyam, M. Srinivasan. Influence of electrode and insulator materials on the neutron emission in a low energy plasma focus device. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 23 (6) (1995) 996-1000.