

بررسی اثر هندسه‌ی آند بر توزیع فضایی ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس دستگاه پلاسمای کانونی

میرعماد، سید میلاد - شیرانی پید آبادی، بابک*

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای (کاربرد پرتوها)

چکیده:

در این پژوهش اثر ۴ هندسه‌ی آندی تخت، گنبدی، مخروطی بزرگ و مخروطی کوچک بر روی ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس دستگاه پلاسمای کانونی $UIPF\ 3\ kJ$ ، در ولتاژ ثابت $21\ kV$ ، برای فشارهای $0.3\ mbar$ ، $0.6\ mbar$ ، $0.9\ mbar$ و $1.2\ mbar$ و همچنین در فشار ثابت $0.9\ mbar$ ، برای ولتاژهای $19\ kV$ ، $21\ kV$ و $23\ kV$ مورد مطالعه قرار گرفت. هندسه‌های مخروطی دارای نواحی گسیل اشعه ایکس کم حجم بودند که برای کاربردهای رادیوگرافی مناسب‌تر است. بیشترین دوز رسیده به فیلم رادیوگرافی با توجه به مقیاس خاکستری تصاویر، در ولتاژ ثابت $21\ kV$ ، به ترتیب مربوط به هندسه‌های مخروطی بزرگ در فشار بهینه‌ی $1.2\ mbar$ ، مخروطی کوچک، گنبدی و تخت در فشار بهینه‌ی $0.9\ mbar$ به دست آمد.

کلمات کلیدی: دستگاه پلاسمای کانونی، اشعه ایکس پالسی، دوربین روزنه‌ای، مقیاس خاکستری

مقدمه :

اهمیت دستگاه پلاسمای کانونی را می‌توان از سه جنبه‌ی آموزشی، تحقیقات پایه‌ای و کاربردهای صنعتی مورد مطالعه قرار داد. یکی از محصولات دستگاه پلاسمای کانونی پالس‌های تابش ایکس با طول بازه زمانی بسیار کوتاه می‌باشد. سه مکانیسم اصلی برای تولید تابش ایکس در تخلیه‌ی دستگاه پلاسمای کانونی تعریف می‌شود. مکانیسم اول به تابش ترمزی الکترون‌ها از میدان یونی داخل پلاسمای مربوط می‌شود. مکانیسم دوم تولید تابش ایکس با انرژی‌های بالاتر است که توسط برخورد باریکه‌های الکترونی شتاب داده شده در ستون پلاسمای با آند تولید می‌شود. همچنین مکانیسم سوم تولید تابش ایکس مطابق با گسیل خطی از سری‌های K عناصر با عدد اتمی بالا می‌باشد. این مکانیسم هم در ستون پلاسمای (مثلاً در تخلیه با گازهای نئون و آرگون) و هم در ناحیه آند که باریکه‌های الکترونی به آن برخورد می‌کنند (گسیل $K\alpha$ از ماده‌ی آند) دیده شده است. مکانیسم‌های واقعی که باعث گسیل ایکس سخت در پلاسمای می‌گردند، هنوز بحث‌برانگیز است و انجام تحقیقات آزمایشگاهی بیشتری به منظور بهینه‌سازی تولید ایکس جهت برخی کارهای عملی مورد نیاز است. تابش‌های ایکس در علوم مختلف، نظیر مواد، مهندسی و پزشکی کاربرد و اهمیت غیر قابل انکاری یافته‌اند [۱ و ۲]. حسین و همکاران با قرار دادن تونپاده‌ی سربی در داخل آند مسی دستگاه پلاسمای کانونی $1/8\ kJ$ که با گاز هیدروژن پر شده بود، شدت تابش ایکس در پنجره‌های مختلف انرژی را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها

آنالیز طیفی را با استفاده از آشکارسازهای پین دیود به همراه فیلترهای راس انجام دادند. شدت بیشینه در هندسه $\pi 4$ برابر $J \ 1/1 \pm 27/3$ به دست آمد. آن‌ها همچنین تصاویر ناحیه‌ی کانونی گسیلنده اشعه ایکس را توسط دوربین روزنه‌ای اشعه ایکس در فشار بهینه $0/5 \text{ mbar}$ ، به دست آوردند. برای این کار با قرار دادن فیلتر بر روی روزنه‌ی دوربین، نواحی گسیل اشعه ایکس نرم و سخت را از هم جدا کرده و بر روی فیلم‌های فوجی این نواحی را مشاهده کردند [۳]. شفیق و همکاران نیز، گسیل اشعه ایکس را در پنجره‌های مختلف انرژی، توسط دوربین فیلتر دار و آشکارساز پین دیود همراه با فیلترهای راس مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از تونپاده‌های آندی با عدد اتمی بالا (سرب، تنگستن و مولیبدن) استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین انرژی در هندسه‌ی $\pi 4$ برای سه تونپاده W ، Pb و Mo به ترتیب برابر $J \ 0/2 \pm 29/4$ ، $0/05 \pm 3/43$ و $0/02 \pm 4$ می‌باشد [۴]. محمدی و همکاران نیز تأثیر سه هندسه‌ی متفاوت آندی (تخت، سوراخ دار و نیم کره‌ای) را بر دینامیک غلاف جریان در فاز برخورد شعاعی، زمانی که از گاز نئون به عنوان گاز کاری دستگاه پلاسمای کانونی استفاده شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که شدت ایکس نرم برای آند تخت در فشار $0/4 \text{ mbar}$ بیشینه است و برای دو آند دیگر در فشار پایین‌تری به دلیل کاهش طول ستون پلازما تقریباً نصف می‌شود. همچنین آن‌ها در آند نیمه کروی عمدتاً پدیده‌ی چند پینچی را مشاهده کردند که می‌تواند دلیلی بر شدت بیشینه تابش ایکس سخت برای این آند باشد [۵]. مهتاب و حبیبی اثر ۵ هندسه‌ی مختلف آند را بر روی شدت تابش‌های ایکس گسیلی از یک دستگاه پلاسمای کانونی 4 kJ مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین شدت تابش ایکس به ترتیب در هندسه‌های مخروطی تخت، کروی محدب و مخروطی توخالی به دست می‌آید [۶]. یکی از مشخصه‌های تابش ایکس پالسی گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی، به منظور شناخت بهتر و استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی در تصویر برداری صنعتی و پزشکی، توزیع فضایی ناحیه‌ی گسیلنده‌ی تابش‌های ایکس در این دستگاه است. هندسه و ابعاد ناحیه‌ی گسیل ایکس، اطلاعات مفیدی از چشمه‌ی به کار رفته در تصویر برداری را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. تالوکدار و همکارانش به بررسی اثر شکل الکتروود مرکزی بر ساختار پینچ و گسیل اشعه‌ی ایکس دستگاه پلاسمای کانونی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که ساختار پینچ و گسیل اشعه‌ی ایکس دستگاه پلاسمای کانونی به شدت به طراحی تیزی نوک آند وابسته است [۷]. در این پژوهش سعی شده که اثر هندسه‌ی تونپاده‌ی آندی بر ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور از ۴ تونپاده آندی از جنس مس و با هندسه‌های مختلف استفاده شد. با توجه به تصاویر به دست آمده از دوربین روزنه‌ای برای هر یک از تونپاده‌ها در شرایط عملکردی فشار و ولتاژ مختلف، ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس ثبت شد و مورد مطالعه قرار گرفت.

چیدمان آزمایشگاهی :

در این پژوهش از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر ۳ kJ-UIPF استفاده شد. این دستگاه توسط یک بانک خازنی با ظرفیت $11/4 \mu F$ شارژ می‌شود. آند مرکزی از جنس مس و به شکل استوانه‌ای تخت می‌باشد. قطر آند برابر $2/5 \text{ cm}$ و طول مؤثر آن 13 cm می‌باشد. در انتهای باز آند حفره‌ای استوانه‌ای به قطر 1 cm و عمق 2 cm ایجاد شده است تا توننده‌های ساخته شده بتوانند در این محل جای‌گذاری شوند. عایق بین آند و کاتد، از جنس کوارتز با طول $6/2 \text{ cm}$ است. برای دستگاه پلاسمای کانونی ۳ عدد توننده آندی به شکل‌های تخت، گنبدی، مخروطی با ارتفاع 2 cm بالاتر از آند و یک توننده‌ی مخروطی دیگر با ارتفاع 1 cm بالاتر از آند ساخته شد. سطح مقطع زیرین ۳ توننده‌ی اول به‌اندازه‌ی سطح آند و توننده‌ی چهارم دارای شعاع $1/2 \text{ cm}$ بود. بخش فرو رونده‌ی هر ۴ توننده یک استوانه‌ای به ارتفاع $1/5 \text{ cm}$ و قطر 1 cm بود که در داخل حفره‌ی آند قرار می‌گرفت (شکل ۱).

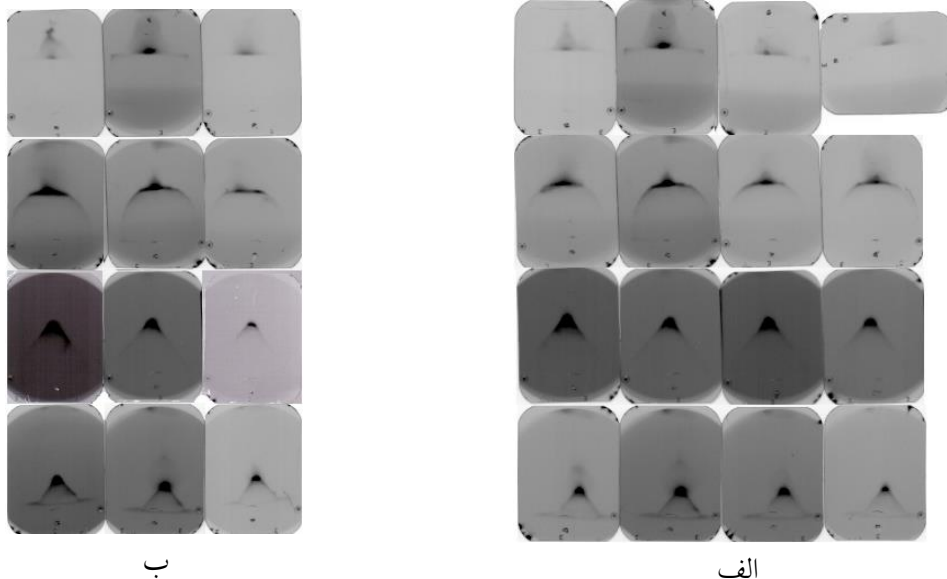


شکل ۱- هندسه‌های مختلف توننده‌ی آند الف (تخت، ب) گنبدی، ج) مخروطی بزرگ و د) مخروطی کوچک

برای ثبت تصویر ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس پالسی دستگاه پلاسمای کانونی، از دوربین روزنه‌ای استفاده شد. این وسیله بر روی دیواره‌ی کناری محفظه و هم سطح ارتفاع آند نصب شد. دوربین روزنه‌ای می‌تواند مشخصه‌هایی مانند، دید کلی از موقعیت مکانی ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس، سایز تقریبی آن و نگرشی کیفی از چگالی تابشی ستون پلاسمای گسیلنده‌ی ایکس را نتیجه دهد. قطر روزنه دوربین برابر $500 \mu m$ و بزرگنمایی آن برابر واحد (unity) تنظیم شد. برای ثبت تصاویر از فیلم رادیوگرافی دندان کداک سرعت E استفاده شد. پاسخ چگالی نوری بر حسب پرتودهی فیلم رادیوگرافی دندان کداک به تابش ایکس شامل ناحیه‌ای خطی بین $0/1 \text{ mSv}$ تا 40 mSv می‌باشد که به صورت تجربی در آزمایشگاه دوزیمتری استاندارد ثانویه به دست آمد. در هر مرحله با قرار دادن توننده‌ی آندی ساخته شده در حفره‌ی تعبیه شده در سر آند، تصاویر دوربین روزنه‌ای در شرایط مختلف ثبت شدند. برای هر ۴ هندسه‌ی توننده‌ی آند، ابتدا برای ولتاژ عملکردی ثابت 21 kV ، در ۴ فشار مختلف $0/3, 0/6, 0/9$ و $1/2 \text{ mbar}$ تصاویر دوربین روزنه‌ای ثبت شدند. سپس این آزمایش برای فشار ثابت $0/9 \text{ mbar}$ و در ولتاژهای عملکردی $19, 21$ و 23 kV تکرار شد. تصاویر ثبت شده‌ی دوربین روزنه‌ای مربوط به ۳ تخلیه‌ی متوالی پینچ دار دستگاه پلاسمای کانونی می‌باشد.

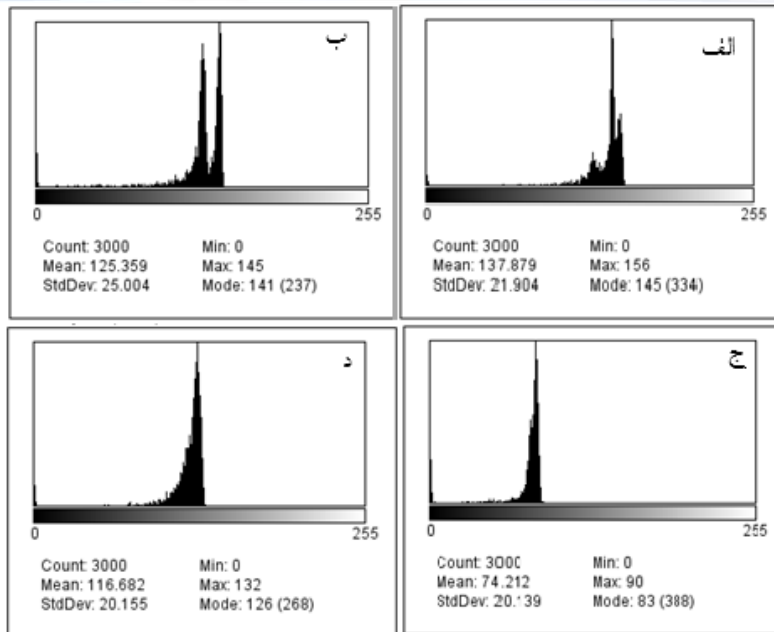
نتایج :

ناحیه‌ی تابش ایکس دستگاه پلاسمای کانونی در فشارهای مختلف کاری، برای ۴ هندسه‌ی تونهدای آندی، در شکل ۲-الف نشان داده شده است. در اینجا، هر سطر از راست به چپ به ترتیب مربوط به تصاویر ثبت شده در فشارهای ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ می‌باشند. این تصاویر در ولتاژ ثابت ۲۱ kV به دست آمده‌اند. همچنین شکل ۲-ب، ناحیه‌ی تابش ایکس دستگاه پلاسمای کانونی برای این ۴ هندسه‌ی آندی را در ولتاژهای مختلف کاری نشان می‌دهد. در این شکل نیز، هر سطر از راست به چپ به ترتیب مربوط به تصاویر ثبت شده در ولتاژهای ۱۹، ۲۱ و ۲۳ kV می‌باشد. در هر دو قسمت الف و ب از شکل ۲، ستون‌ها از بالا به پایین به ترتیب مربوط به تونهداهای تخت، گنبدی، مخروطی بزرگ و مخروطی کوچک می‌باشند. با توجه به شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که در ولتاژ ثابت ۲۱ kV، قوی‌ترین نواحی گسیل اشعه ایکس برای سه تونهداهای تخت، گنبدی و مخروطی کوچک در فشار ۰/۹ mbar اتفاق می‌افتد. برای تونهدای مخروطی بزرگ این فشار به ۱/۲ mbar افزایش می‌یابد. همچنین در سه هندسه‌ی گنبدی، مخروطی بزرگ و مخروطی کوچک افزایش ولتاژ منجر به قوی‌تر شدن ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس می‌شود. برای هندسه‌ی تخت افزایش ولتاژ منجر به متمرکز سازی بخار گازی مس در بالای تونهدای آندی شده و احتمال تشکیل نقاط داغ را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر می‌توان نتیجه گرفت که در تونهدای آندی با هندسه‌ی تخت، ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس در نوک تونهدا که با برخورد الکترون و ایجاد تابش ترمزی به وجود می‌آید، نسبت به سه تونهدای دیگر کوچک‌تر است.



شکل ۲- تصاویر ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس، ثبت شده توسط دوربین روزنه‌ای (هر ستون از بالا به پایین به ترتیب مربوط به تونهداهای تخت، گنبدی، مخروطی بزرگ و مخروطی کوچک) الف) در ولتاژ ثابت ۲۱ kV و ۰/۹، ۰/۶، ۰/۳ mbar به ترتیب ۰/۹، ۰/۶ و ۱/۲ هر سطر از راست به چپ ب) در فشار ثابت ۰/۹ mbar و ولتاژهای ۱۹، ۲۱ و ۲۳ هر سطر از راست به چپ

توزیع فضایی ناحیه گسیل ایکس در پلاسمای کانونی از لحاظ ساختاری دارای دو بخش است: ناحیه سطح آند و ناحیه پلاسمای بالای آند. به منظور استفاده از این دستگاه در کاربردهای رادیوگرافی، لازم است که شکل سطح مقطع، ابعاد چشمه و شدت گسیل ایکس در شرایط مختلف تعیین شده و حالت بهینه انتخاب شود. ابعاد هر فیلم در شکل ۲، $3 \times 4 \text{ cm}^2$ است که پس از اسکن، تصویر از 90×120 پیکسل تشکیل می‌شود. در اینصورت ابعاد هر پیکسل از تصویر، $0.34 \times 0.34 \text{ mm}^2$ می‌باشد. در این تحقیق، شکل مقطع چشمه ایکس دستگاه و شدت گسیل، به صورت مقایسه‌ای بین چهار نوع هندسه‌ی مختلف آند ارائه شده است. به منظور مقایسه کمی توزیع فضایی نواحی گسیل اشعه ایکس در تصاویر با آندهای مختلف، از امکان پردازش تصویر در نرم افزار MATLAB استفاده شد. سطح خاکستری پیکسل‌های موجود در تصویر، نشان دهنده میزان تاثیر چشمه ایکس بر آن نقطه از تصویر است. نمودار هیستوگرام سطح خاکستری، برای چهار هندسه آند در ولتاژ ثابت ۲۱ kV و در فشار بهینه‌ی هر کدام، در شکل ۳ نشان داده شده است. برای رسم هیستوگرام‌های سطح خاکستری، از یک مستطیل با ابعاد ۶۰ پیکسل در ۵۰ پیکسل که نوک تونپاده و بالای آن را به طور کامل پوشش می‌دهد، استفاده شد. در این حالت سطح خاکستری برای ۳۰۰۰ نقطه به صورت اعداد بین ۰ (سیاه) تا ۲۵۵ (سفید) مشخص شدند. سطح خاکستری تصاویر اشعه ایکس، معیاری از دوز رسیده به فیلم رادیوگرافی است. هر چه مقدار دوز بیشتر باشد، سطح خاکستری به عدد صفر (رنگ سیاه) نزدیک‌تر است. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در فشار بهینه‌ی کاری هر تونپاده، بیشترین دوز رسیده به فیلم که به معنی شدت بیشتر گسیل ایکس توسط چشمه است به ترتیب مربوط به مخروطی بزرگ (با میانگین سطح خاکستری ۷۴/۲)، مخروطی کوچک (۱۱۶/۷)، گنبدی (۱۲۵/۴) و تخت (۱۳۷/۹) می‌باشد.



شکل ۳- هیستوگرام سطح خاکستری تصاویر ثبت شده توسط دوربین روزنه‌ای در ولتاژ ثابت ۲۱ kV برای تونپاده‌های (الف) تخت (۰/۹ mbar-ب) گنبدی (۰/۹ mbar-ج) مخروطی بزرگ (۱/۲ mbar-د) مخروطی کوچک (۰/۹ mbar-)

بحث و نتیجه‌گیری :

در این پژوهش ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر ۳ kJ UIPF- برای چهار هندسه‌ی مختلف تونپاده‌های آنودی مسی (تخت، گنبدی، مخروطی بزرگ و مخروطی کوچک)، با استفاده از یک دوربین روزنه‌ای با بزرگ‌نمایی ۱ و قطر روزنه‌ی ۵۰۰ μm، مورد مطالعه قرار گرفت. تونپاده‌ی آنودی مخروطی بزرگ در ولتاژ ثابت کاری ۲۱ kV و فشار بهینه‌ی ۱/۲ mbar دارای بیشترین دوز رسیده به فیلم رادیوگرافی با سطح خاکستری بین ۰ تا ۹۰ بود. برای این تونپاده با افزایش ولتاژ (۲۳ kV) سطح خاکستری بین ۰ تا ۶۸ با مقدار میانگین ۴۹/۲ به دست آمد. این نشان می‌دهد که افزایش ولتاژ منجر به افزایش دوز رسیده به فیلم شده است. فشار بهینه‌ی کاری از ۰/۹ mbar در سه هندسه‌ی تخت، گنبدی و مخروطی کوچک به ۱/۲ mbar برای هندسه‌ی مخروطی بزرگ تغییر می‌کند. از تصاویر به دست آمده برای تونپاده‌ی تخت می‌توان نتیجه گرفت که در اثر برخورد باریکه‌ی الکترون با آن، بخار گازی کنده شده از سطح تونپاده در بالای آن تجمع می‌یابد. تابش ترمزی الکترون‌های گذرنده از این بخار منجر به ایجاد یک ناحیه‌ی هاله‌ای شکل در بالای تونپاده می‌شوند. این ناحیه برای آند تخت به علت داشتن سطح مقطع بیشتر در برخورد با باریکه‌ی الکترونی، نسبت به ۳ هندسه‌ی دیگر وسیع‌تر است. همچنین مشاهده شد برای تونپاده‌ی آنودی تخت با افزایش فشار، هاله‌ی ابری شکل گسیل اشعه ایکس وسیع‌تر شده تا به بزرگ‌ترین حالت خود در فشار ۰/۹ mbar و ولتاژ ۲۱ kV می‌رسد. در فشارهای بالاتر با متمرکز شدن بخار گازی در بالای تونپاده،

هاله ابری شکل کوچک‌تر شده و احتمال تشکیل نقاط داغ بیشتر می‌شود. به علاوه افزایش ولتاژ نیز احتمال شکل‌گیری نقاط داغ را در ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس بالا می‌برد. برای تونپاده‌های مخروطی نیز ناحیه‌ی گسیل اشعه ایکس به صورت مناطقی دایروی با حجم کم در نوک تیز تونپاده در می‌آید. این شکل از چشمه‌ی گسیلنده‌ی اشعه ایکس بهترین انتخاب برای کاربردهای رادیوگرافی می‌تواند باشد.

مراجع :

- [1] M. Venere, C. H. Moreno, A. Clause, R. Barbuza, and M. Del Fresno, "Tomographic system based on Plasma Focus X-rays," *Nukleonika*, vol. 46, pp. 93-94, 2001.
- [2] V. A. Gribkov, A. Srivastava, P. L. C. Keat, V. Kudryashov, and P. Lee, "Operation of NX2 dense plasma focus device with argon filling as a possible radiation source for micro-machining," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 30, pp. 1331-1338, 2002.
- [3] S. Hussain, M. Zakaullah, S. Ali, S. H. Bhatti, and A. Waheed, "X-ray enhancement from a plasma focus by inserting lead at the anode tip," *Physics Letters A* 319, pp. 181-187, 2003.
- [4] M. Shafiq, S. Hussain, A. Waheed, and M. Zakaullah, "X-ray emission from a plasma focus with high-Z inserts at the anode tip," *Plasma Sources Sci. Technol.* 12, pp. 199-204, 2003.
- [5] 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 emissions and current sheath configuration in plasma focus device," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 42, pp. 1-10, 2009.
- [6] M. Mahtab and M. Habibi, "Nitrogen Soft and Hard X-ray Emissions using Different Shapes of Anodes in a 4kJ Plasma Focus Device," *Plasma Physics Reports*, vol. 39, pp. 993-998, 2013.
- [7] N. Talukdar, N. K. Neog, and T. K. Borthkur, "Effect of anode shape on pinch structure and X-ray emission of plasma focus device," *Results in Physics*, vol. 3, pp. 142-151, 2013.