



مطالعه‌ی تجربی اثر هندسه‌ی آند و جنس - طول عایق دستگاه پلاسمای کانونی نوع مَدِر بر شدت باریکه‌ی یون نیتروژن

مر ترضی حبیبی*

دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵۴۴۱۳، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله، اثر هندسه‌ی الکترود آند با طول و جنس‌های مختلف پوشش عایق بر شدت باریکه‌ی یون نیتروژن در یک دستگاه پلاسمای کانونی ۳kJ مطالعه شده است. از دو جنس عایق پیرکس و کوارتز با طول‌های مختلف و دو هندسه‌ی استوانه‌ای و مخروطی آند استفاده شد. شدت یون‌ها در ولتاژ ۱۲ kV و آند مخروطی با عایق به طول ۵۰ mm از جنس پیرکس نسبت به عایق کوارتز، ضریب افزایشی ۱/۱۱ را نشان می‌دهد. طول بهینه‌ی متناظر با بیش‌ترین شدت باریکه‌ی یون در عایق پیرکس، با تغییر هندسه‌ی آند تغییر می‌کند و در این ولتاژ از مقدار بهینه‌ی ۴۵ mm در آند استوانه‌ای به طول ۵۰ mm در آند مخروطی افزایش یافته است. در شرایط کاری یکسان، آند مخروطی نسبت به آند استوانه‌ای شدت یون بیش‌تری را به دست می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: پلاسمای کانونی، باریکه یون، عایق، کوارتز، پیرکس، شدت یون، آند مخروطی

Experimental Study of the Anode Geometry and Insulator Material-Length Effect on Ion Beam Intensity in a Mather Type Plasma Focus Device

M. Habibi*

Energy Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 158754413, Tehran-Iran

Abstract: In this paper, the effect of the anode electrode geometry with different insulator sleeve lengths and materials on the ion beam emitted from a 3 kJ plasma focus device is studied. Two Pyrex and Quartz insulators with different lengths and two anode tip geometries, i.e. cylindrical and conic, are used. Ion beam intensity in 12 kV charging voltage and conic anode with the 50 mm Pyrex insulator was increased by a factor of 1.11. Optimum length of the Pyrex insulator related to the maximum ion beam intensity varied with the anode geometry and increased from 45 mm to 50 mm, when we replaced the cylindrical anode with the conic one in 12 kV applied voltage. Under the same working condition, the conic anode tip tended to have more ion beam intensity in comparison with the conventional cylindrical flat geometry.

Keywords: Plasma Focus, Ion Beam, Insulator Sleeve, Quartz, Pyrex, Ion Intensity, Conic Anode



۱. مقدمه

دو عامل هندسه‌ی نوک آند و عایق در دستگاه پلاسمای کانونی بر کیفیت لایه‌ی جریان پلازما در شروع و انتهای مسیر حرکت اثر می‌گذارند و به صورت غیرمستقیم، بر شدت گسیل باریکه‌ی یون نیز تأثیر خواهند گذاشت. بر این اساس، در این مقاله به طور هم‌زمان، اثر هندسه‌ی الکترود آند و هم‌چنین طول و جنس عایق بر شدت باریکه‌ی یون گسیلی در یک دستگاه پلاسمای کانونی کوچک ($\sim 3 \text{ kJ}$) مطالعه شده است. به این منظور، از دو جنس عایق پیرکس و کوارتز با طول‌های مختلف در دو هندسه‌ی مختلف نوک الکترود آند استفاده شد و پس از ثبت سیگنال یون‌ها با آشکارساز فنجان فارادی، نتایج تحلیل شدند. این مقاله نشان می‌دهد که برای عملکرد مطلوب دستگاه پلاسمای کانونی به شکل مولد یون، مشخصه‌ی بهینه‌ی آند-عایق باید به صورت تجربی به دست آید.

۲. تئوری

دستگاه پلاسمای کانونی، شتاب‌دهنده‌ی مگنتویدرودینامیکی (MHD) با الکترودهای هم‌محور (آند و کاتد) است که پلاسمای بسیار داغ (۱ تا 3 keV)، چگال (10^{19} cm^{-3}) و با طول عمر بسیار کوتاه (۲۰۰ تا 300 ns) در فاصله‌ی حدود ۱ تا 1.5 cm بالای الکترود مرکزی تولید می‌کند [۹]. طبق شکل ۱، آند دستگاه به صورت لوله‌ی توپر یا توخالی و نوک آن با هندسه‌های مختلف ساخته می‌شود. کاتد نیز به شکل آرایه‌ای از میله‌ها یا استوانه‌ای یکپارچه حول آند است و عایق بین الکترودها به صورت لوله‌ای از جنس پیرکس، بلور و یا مواد سرامیکی ساخته می‌شود. دینامیک پلاسمای کانونی به ۳ مرحله‌ی فاز شکست الکتریکی، فاز شتاب‌گیری محوری لایه‌ی جریان پلازما، و فاز شعاعی لایه‌ی جریان تفکیک می‌شود [۱۰]. اعمال تپ ولتاژ بالا بین دو الکترود هم‌محور درون چنبره‌ی دستگاه که از گاز کاری در فشار پایین (در حد چند mbar) پر شده است، به شکست الکتریکی بر روی سطح عایق می‌انجامد. در ابتدای تخلیه‌ی الکتریکی، ظرفیت سطحی عایق به تدریج باردار می‌شود و در نهایت میدان الکتریکی قدرتمندی بر روی سطح عایق ایجاد می‌کند که موجب شتاب‌گیری الکترون‌های آزاد اولیه‌ی گاز درون محفظه‌ی دستگاه می‌شود. زمانی که تخلیه‌ی الکتریکی به انتهای عایق می‌رسد، دو الکترود آند و کاتد با رشته‌ی جریان

تانکون مطالعات مختلفی به طور مجزا بر روی اثر هندسه‌ی الکترود آند یا جنس و ابعاد عایق دستگاه پلاسمای کانونی بر بهره‌ی نوترون و پرتو ایکس به صورت تجربی بررسی شده است [۱]. هم‌چنین مطالعاتی بر روی هندسه‌ی آند دستگاه پلاسمای کانونی بر بهره‌ی یون و نوترون انجام شده است [۲]. ژنگ و همکارانش، در مطالعه‌ی نشان دادند که قطر ستون پلاسمای چگال قبل از فروپاشی برای عایق‌های با ارتفاع مختلف تقریباً یکسان است، ولی ارتفاع ستون پلازما به ارتفاع عایق وابسته است [۳]. شیام و راوت، اثر جنس عایق و آند را بر بهره‌ی نوترون ناشی از یک دستگاه پلاسمای کانونی 2.2 kJ بررسی کردند [۴]. در این مطالعه ثابت شد که جنس پیرکس نسبت به آلومینا عملکرد بهتری دارد و اثر انباشت ذرات بر سطح عایق مطالعه شد. ذکاالله و همکارانش، نشان دادند که در اثر پوشش آلودگی‌ها بر سطح عایق یک دستگاه پلاسمای کانونی 2.3 kJ بهره‌ی نوترون کاهش می‌یابد [۵]. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که ابعاد بهینه‌ی عایق سبب تشکیل لایه‌ی جریان متقارن و یکنواخت می‌شود و بهره‌ی تابش‌ها را افزایش می‌دهد [۶]. تالوکدار و همکارانش، اثر هندسه‌ی آند بر گسیل پرتو ایکس را با چهار هندسه‌ی استوانه‌ای، واگرا، بیضوی و همگرا در یک دستگاه پلاسمای کانونی 2.2 kJ بررسی کردند که در این مطالعه، بهره‌ی پرتو ایکس در هندسه‌ی همگرا بیش‌تر و به ترتیب، هندسه‌های استوانه‌ای، بیضوی و واگرا کم‌ترین بهره را ثبت کردند [۷]. محمدی و همکارانش، اثر سه هندسه‌ی آند استوانه‌ای، مخروطی و گروی را بر گسیل پرتو ایکس نرم و لایه‌ی جریان پلازما با گاز نئون بررسی کردند [۸]. در این مطالعه، بیشینه‌ی بازدهی تابش ایکس نرم برای آند استوانه‌ای بوده است و برای دو هندسه‌ی دیگر، تقریباً نصف هندسه استوانه‌ای به دست آمد. موهانتی و همکارانش، شدت باریکه‌ی یون در فشارها و زاویه‌های مختلف را در سه هندسه‌ی آندهای استوانه‌ای توخالی، استوانه‌ای تخت و گروی با استفاده از آشکارساز فنجان فارادی در یک دستگاه پلاسمای کانونی 2.2 kJ بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که چگالی یون‌ها برای آند گروی بیش‌تر است [۸].

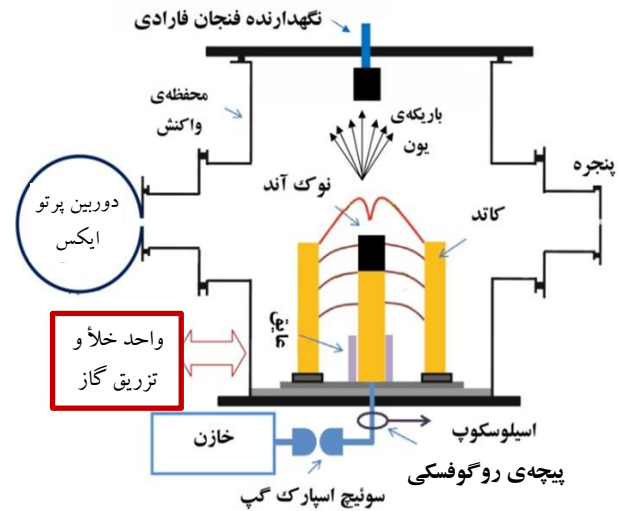


الکترودها (به ویژه، هندسه‌ی سر آند)، طول و جنس عایق، ولتاژ تخلیه، ترکیب گاز و فشار اولیه‌ی آن از عوامل مهمی هستند که بهره‌ی تابش‌های مختلف حاصل از دستگاه به آن وابسته است [۱۵].

۳. چیدمان تجربی

دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده به شکل چشمه‌ی یون طبق شکل ۲، یک خازن با ولتاژ بیشینه‌ی شارژ $15kV$ ، ظرفیت $40\mu F$ و اندوکتانس کل حدود $110nH$ دارد [۱۶]. طبق این شکل، الکتروود مرکزی (آند) دستگاه از دو قسمت ساخته شده است، که بخش پایینی از جنس مس و بخش بالایی قطعه‌ی قابل تعویض برای تغییر جنس و هندسه‌ی نوک آند است. در مجموع، ارتفاع و قطر آن به ترتیب 148 mm و 27.8 mm هستند. کاتد دستگاه متشکل از ۶ میله‌ی مسی به ارتفاع 145 mm و قطر 44.7 mm است. عایق بین الکتروودها نیز از جنس کوارتز یا پیرکس است که قطر و ضخامت آن به ترتیب 30 mm و 3 mm ارتفاع آن متغیر انتخاب شده است [۱۶]. برای اندازه‌گیری جریان باریکه‌ی یون گسیل شده از دستگاه، طبق شکل ۲، یک فنجان فارادی با قطر داخلی فنجان بیرونی 34 mm ، قطر بیرونی فنجان داخلی 9.5 mm و قطر روزنه‌ی ورودی $500\mu m$ و به فاصله‌ی 14 cm از نوک الکتروود آند قرار گرفته است [۱۷]. مکان بهینه‌ی نصب آشکارساز فنجان فارادی پس از قرار دادن آرایه‌ی از فنجان‌ها در زوایای مختلف بالای الکتروود آند و مشاهده‌ی بیشینه‌ی شدت یون در روی محور اصلی دستگاه انتخاب شد. یک منبع تغذیه با ولتاژ پس‌خور $150V$ - تغذیه می‌شود و در اثر این ولتاژ معکوس بین آند و کاتد یون‌ها به سمت فنجان داخلی شتاب می‌گیرند. با برخورد یون به سطح فنجان داخلی، الکترون‌ها از سطح گنده، و در دیواره‌ی آن جذب می‌شوند. در نتیجه، جریانی القا می‌شود که با مدار جداکننده، از ولتاژ پس‌خور جدا، و با اسیلوسکوپ ثبت می‌شود. ابعاد فنجان فارادی به گونه‌ای طراحی شده که مقاومت ظاهری آن 50Ω است، زیرا کابل انتقال داده از نوع RG58 با مقاومت 50Ω است و در این صورت بیش‌ترین بازده را در انتقال انرژی خواهیم داشت. هم‌چنین به

ضعیفی در بالای سطح عایق به هم مربوط می‌شوند. سپس رشته‌های جریان پلازما از سطح عایق در اثر نیروی لورنتس به سمت بالا شتاب می‌یابد و فاز شکست الکتریکی به پایان می‌رسد [۱۱].



شکل ۱. شمایی از دستگاه پلاسمای کانونی و بخش‌های مختلف آن، خط‌های بین آند و کاتد معرف لایه‌های جریان پلازما هستند که در امتداد الکتروودهای هم‌محور شتاب می‌گیرند.

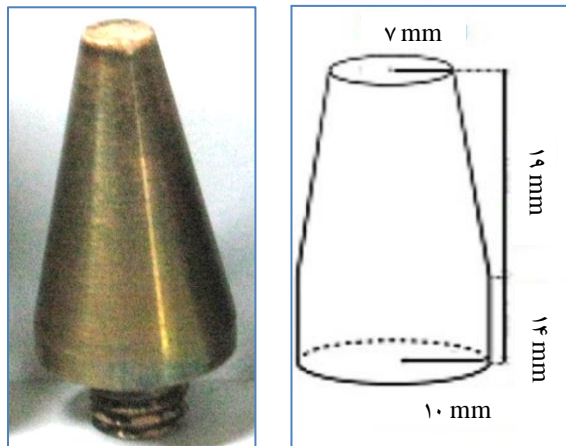
پس از تشکیل ستون پلاسمای چگال در بالای آند دستگاه، به دلیل ناپایداری سوسیسی و تغییر بسیار سریع در اندوکتانس پلازما، میدان الکتریکی قدرتمندی در ستون پلازما القا می‌شود [۱۲]. در نتیجه، یون‌های موجود در ستون پلازما به سمت بالای الکتروود آند با انرژی در محدوده‌ی چند ده کیلو الکترون ولت تا چند مگا الکترون ولت شتاب می‌گیرند [۱۳]. تعداد یون‌های گسیل شده به انرژی تخلیه‌ی الکتریکی دستگاه‌های پلاسمای کانونی با اندوکتانس در محدوده‌ی 30 تا 55 nH در حد kJ/zre $10^{14} \times 20 - 12$ به دست آمده است [۱۰]. گسیل یون‌ها پس از وقوع ناپایداری سوسیسی و تا حدود $1\mu s$ پس از آن ادامه می‌یابد. پینچ چگال، منبع پرتو ایکس نرم است و در اثر برخورد الکترون‌های شتاب‌یافته با سطح آند، ایکس سخت نیز گسیل خواهد شد. هم‌چنین، در صورت استفاده از گاز دوتریم، نوترون‌های قابل توجهی

(10^7 تا 10^{12} نوترون در هر پالس تخلیه) از دستگاه پلاسمای کانونی گسیل می‌شود [۱۴]. در این دستگاه، ابعاد و هندسه‌ی



استوانه‌ای و مخروطی استفاده، و دو سری لوله‌ی عایق دستگاه از جنس‌های پیرکس و کوارتز هر یک از ارتفاع ۳۰ mm تا ۶۰ mm با پله ۵ mm مطالعه شدند. در شکل ۳، ابعاد نوک مخروطی آند و

عایق‌های مورد استفاده نشان داده شده است.

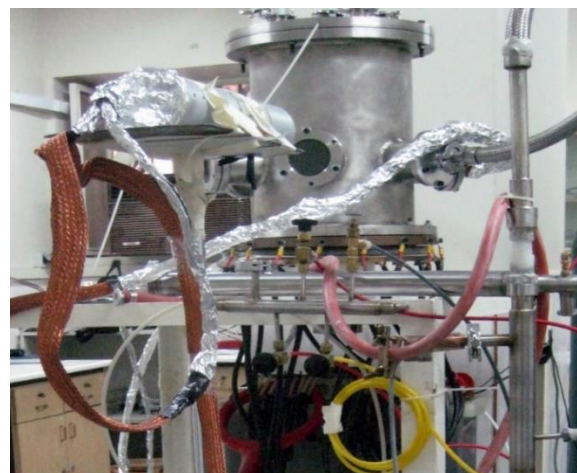


شکل ۳. ابعاد و هندسه‌ی مخروطی نوک الکتروند دستگاه پلاسمای کانونی و تصویر برخی از عایق‌های مورد استفاده در این مطالعه.

۴. نتایج تجربی

ابتدا برای دست‌یابی به محدوده‌ی مناسب فشار گاز نیتروژن تزریق شده (پس از تخلیه‌ی محفظه تا فشار حدود 10^{-2} mbar) در ولتاژهای ۱۰ تا ۱۳ kV که سیگنال جریان تخلیه‌ی الکتریکی با تشکیل پینچ پلازما همراه باشد، تست‌های مختلفی انجام شد. نتایج نشان داده‌اند که در فشار گاز ۴ mbar، سیگنال‌های جریان تخلیه‌ی الکتریکی برای گستره‌ی ولتاژ مورد نظر تا حدود ۸۰٪ با تشکیل پینچ پلازما همراه‌اند. در شکل ۴، یکی از سیگنال‌های نوعی پیچه‌ی روگوفسکی نشان داده شده است. در تمامی سیگنال‌های ثبت شده با فنجان فارادی، تنها داده‌هایی انتخاب شده‌اند که با سیگنال جریان پینچ همراه باشند، زیرا تا زمانی که اُفت جریان متناظر با تشکیل پینچ ستون پلازما در یک‌چهارم

منظور کاهش الکترون‌های ثانویه که سبب خطا در ثبت جریان یون با فنجان فارادی می‌شود، لایه‌ی داخلی فنجان از استوانه‌ای گرافیتی پوشانده شد [۱۷].



(الف)



(ب)

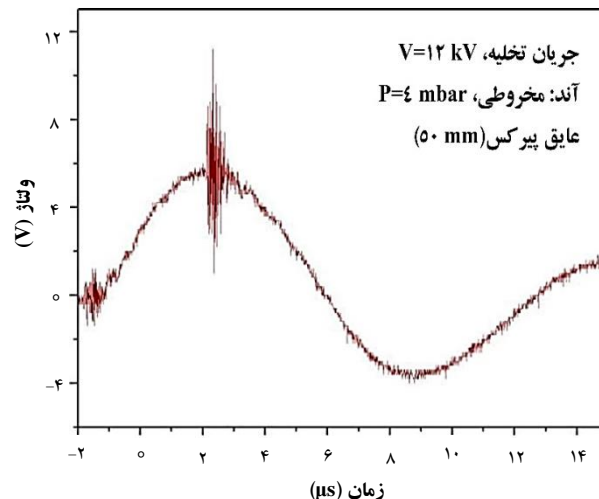
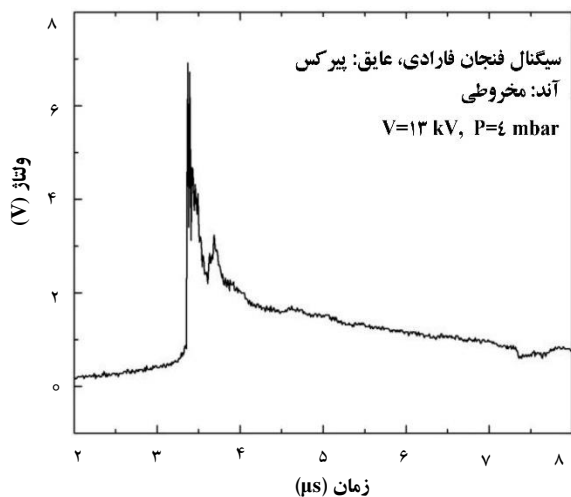
شکل ۲. الف) تصویری از دستگاه پلاسمای کانونی ~ 3 kJ مورد استفاده در آزمایش به ارتفاع محفظه‌ی خلأ ۳۸ cm، ب) تصویر آرایه‌ی الکترودها و عایق دستگاه.

از یک پیچه‌ی روگوفسکی برای ثبت جریان تخلیه‌ی الکتریکی در هر پالس، و بررسی کیفیت پینچ پلاسمای تشکیل شده استفاده شد. با توجه به سازوکار گسیل یون‌ها از دستگاه پلاسمای کانونی که پس از وقوع ناپایداری سوسیسی در ستون پینچ پلازما رخ می‌دهد، چنانچه در سیگنال جریان تخلیه، اُفت قابل توجه جریان در نقطه‌ی قله‌ی نخست سیگنال مشاهده نشود، نشان‌دهنده‌ی شرایط نامطلوب پالس مورد نظر است و باید با تزریق مجدد گاز و تنظیم دستگاه، پالس‌های مطلوبی شامل سیگنال جریان منجر به پینچ پلازما و سیگنال جریان یونی فنجان فارادی به دست آورد [۱۸]. از دو هندسه‌ی نوک آند شامل

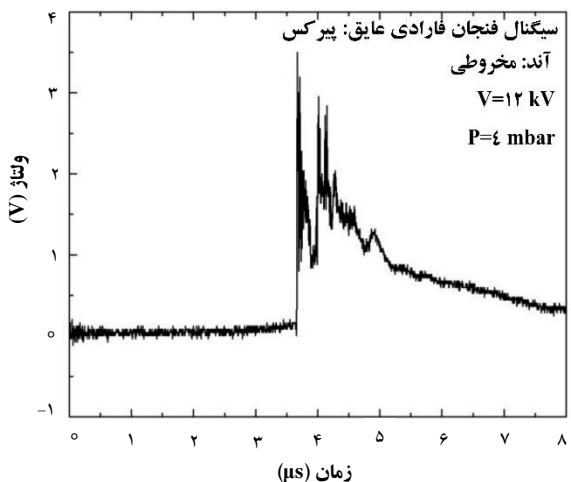


عایق پیرکس به ارتفاع ۵cm و ولتاژ تخلیه‌ی ۱۲ kV نشان داده شده است.

زمان تناوب جریان تخلیه رخ ندهد، یون‌های چندانی نیز به سمت بالا شتاب نمی‌گیرند. در نتیجه، نقش پیچیده‌ی روگوفسکی تنها انتخاب سیگنال‌های مطلوب حاصل از آشکارساز فنجان فارادی بوده است.



شکل ۴. سیگنال جریان تخلیه‌ی الکتریکی حاصل از پیچیده‌ی روگوفسکی برای آند مخروطی - عایق پیرکس در ولتاژ ۱۲kV و فشار ۴mbar.

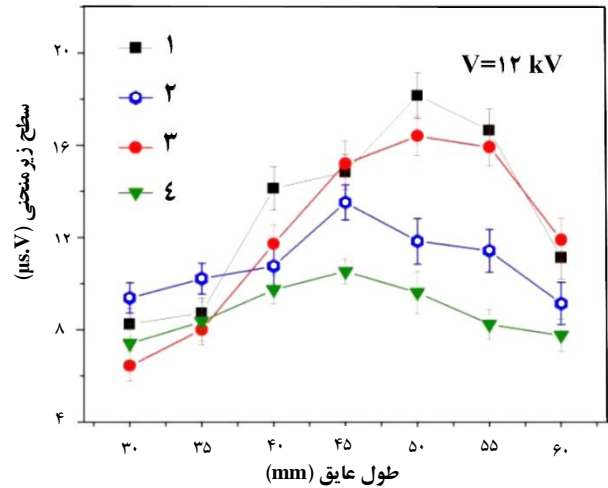


شکل ۵. سیگنال‌های نوعی فنجان فارادی در ولتاژهای ۱۲ و ۱۳ kV برای عایق از جنس پیرکس و آند مخروطی.

سیگنال‌های فنجان فارادی برای دو هندسه‌ی آند استوانه‌ای و مخروطی و عایق‌های پیرکس و کوارتز در دو ولتاژ ۱۲ و ۱۳ kV ثبت شدند که نمونه‌ای از این سیگنال‌ها برای عایق از جنس پیرکس و آند مخروطی در شکل ۵، نشان داده شده است. دسته‌بندی داده‌ها برای ولتاژها، جنس و طول عایق و هندسه‌ی آند در جدول ۱ ارائه شده‌اند. برای هر نقطه‌ی کاری، ۵ شات پلاسما زده شد. سطح زیر سیگنال‌های فنجان فارادی با نرم‌افزار ORIGIN6 محاسبه، و مقادیر انحراف از مقدار میانگین این ۵ شات در هر بازه‌ی کاری ولتاژ-فشار تعیین شد. سپس برای هر یک از شرایط انتخاب شده‌ی نوک آند-جنس عایق، منحنی میانگین تغییرات سطح زیر سیگنال‌های فنجان فارادی به صورت شدت یون‌ها برحسب طول عایق برای ولتاژ تخلیه‌ی ۱۲ kV در شکل ۶ رسم شد. در شکل ۷، شدت یون‌ها در طول‌های مختلف عایق از جنس پیرکس با هندسه‌ی آند مخروطی، و در ولتاژهای مختلف تخلیه‌ی الکتریکی ۱۰ تا ۱۳ kV و فشار ۴ mbar رسم شد. در شکل ۸ نیز تصویر دوربین روزنه‌ی سوزنی با فیلتر Al-Mylar-۶μm برای آندهای مخروطی و استوانه‌ای برای



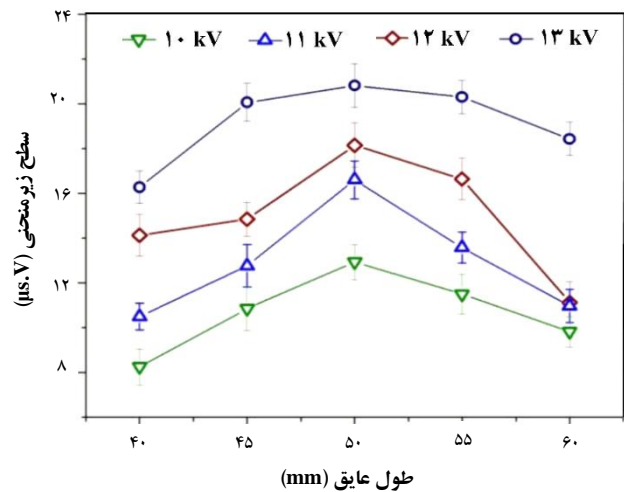
شکل ۶: شدت باریکه‌ی یون در طول‌ها و جنس‌های مختلف عایق برای دو هندسه‌ی آند استوانه‌ای و مخروطی: (۱) سر مخروطی - جنس عایق پیرکس، (۲) سر استوانه‌ای - جنس عایق پیرکس، (۳) سر مخروطی - جنس عایق کوارتز، (۴) سر استوانه‌ای - جنس عایق کوارتز - ولتاژ ۱۲ kV و فشار ۴mbar.



جدول ۱. دسته‌بندی شرایط تجربی بررسی هندسه و جنس عایق

ولتاژ تخلیه (kV)	هندسه‌ی آند	جنس عایق	طول عایق (mm)
۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰	استوانه‌ای و مخروطی	پیرکس و کوارتز	۶۰، ۵۵، ۵۰، ۴۵، ۴۰، ۳۵، ۳۰

طبق انتظار، شدت یون‌های گسیل شده با افزایش دامنه‌ی ولتاژ تخلیه‌ی الکتریکی افزایش می‌یابد. براساس داده‌های شکل ۷، نسبت شدت یون‌ها در طول عایق ۵۰mm، فشار ۴mbar و هندسه‌ی مخروطی آند در ولتاژهای مختلف پس از نرمال شدن به مقدار متناظر در ولتاژ ۱۰kV به دست آمده، و در جدول ۲ ارائه شده است. از شکل ۸ که تصویر پرتو ایکس نرم ستون پلاسما را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که شرایط کاری منجر به تشکیل پلاسمای چگال در آندهای مختلف مناسب است.



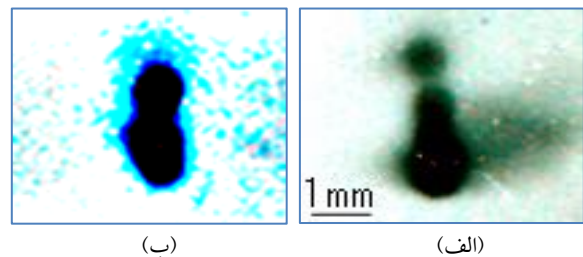
شکل ۷: شدت باریکه‌ی یون در طول‌های مختلف عایق از جنس پیرکس با هندسه‌ی آند مخروطی و در ولتاژهای مختلف تخلیه‌ی الکتریکی ۱۰ تا ۱۳ kV و فشار ۴mbar.

جدول ۲. شدت یون گسیلی در ولتاژهای مختلف برای آند مخروطی در طول عایق ۵۰mm و فشار ۴mbar

ولتاژ اعمال شده	۱۰ kV	۱۱ kV	۱۲ kV	۱۳ kV
شدت نرمال یون	۱	۱،۲۸	۱،۴۰	۱،۶۱۵

هم‌چنین با استفاده از شکل ۷ در ولتاژ مشخص ۱۲kV، شدت یون‌ها در طول‌های مختلف عایق پس از نرمال شدن به مقدار متناظر آن در طول عایق ۶۰mm در جدول ۳ ارائه شده است.

طبق شکل ۶، نسبت شدت یون‌ها در ولتاژ ۱۲kV و آند مخروطی در اثر استفاده از عایق به طول ۵۰mm از جنس پیرکس به کوارتز ضریب افزایشی ۱/۱۱ را نشان می‌دهد. طول بهینه‌ی عایق با تغییر هندسه‌ی آند تغییر کرده، و از مقدار بهینه‌ی ۴۵ mm



شکل ۸: تصویر دوربین روزنه‌ی سوزنی (الف) آند مخروطی، (ب) آند استوانه‌ای.

۵. تحلیل و نتیجه‌گیری



اندوکتانس پلاسما به صورت تابعی از Z با رابطه‌ی $L_p = \frac{\mu}{2\pi} Z \ln C$ داده می‌شود که $C = \frac{b}{\alpha(Z)}$ است. زمان رسیدن لایه‌ی جریانی به انتهای آند نیز از رابطه‌ی $t_a = \left(\frac{4\pi^2 z_0^2 (b^2 - a^2) \rho_0}{I_0^2 \mu \ln C} \right)^{1/2}$ به دست می‌آید و مشاهده می‌شود که ضریب $\frac{(b^2 - a^2)}{\ln C}$ در این رابطه، با کاهش شعاع α کاهش می‌یابد. هم‌چنین برای هم‌زمان‌سازی t_a با قله‌ی نخست جریانی تخلیه‌ی خازن، مقدار چگالی گاز و در نتیجه فشار باید افزایش یابد. در نتیجه، طبق نتایج تجربی در صورت استفاده از آند مخروطی، فشار بهینه‌ی منجر به پینچ نیز نسبت به آند استوانه‌ای افزایش می‌یابد.

در حالت استفاده از آند استوانه‌ای، لایه‌ی جریانی، زاویه‌ی بسیار کوچکی (α) نسبت به سطح آند می‌سازد. بنابراین در پایان فاز محوری، مؤلفه‌ی محوری نیروی لورنتس (F_z) بزرگ‌تر از مؤلفه‌ی شعاعی (F_r) است. این نیروی محوری به شدت با انحنای لایه‌ی جریانی تغییر می‌کند و قسمت جلویی لایه‌ی جریانی را بلندتر و به صورت منحنی می‌سازد. از طرف دیگر، طبق شکل ۹، در حالت استفاده از آند مخروطی، لایه‌ی جریانی زاویه‌ی آلفای بسیار بزرگ‌تری نسبت به سطح آند در لحظه‌ی ورود به بخش شیب‌دار آند می‌سازد و هر دو مؤلفه‌ی شعاعی و محوری نیروی لورنتس اهمیت دارند. در نتیجه لایه‌ی جریانی به طور هم‌زمان، دو حرکت محوری و شعاعی به سمت محور آند در طول فاز شعاعی دارد. به عبارت دیگر، علاوه بر مؤلفه شعاعی نیروی لورنتس، مؤلفه‌ی محوری نیرو نیز نقش مؤثری در فشردگی پلاسما و تشکیل ستون پلاسما قدرتمندتر ایفا می‌کند و انتظار می‌رود که گسیل یون‌ها در آند مخروطی نسبت به آند استوانه‌ای افزایش یابد. در این مقاله، نشان داده شد که برای بهره‌گیری از دستگاه‌های پلاسما کانونی به صورت چشمه‌ی یون، علاوه بر بهینه‌سازی پارامترهای کاری دستگاه، هندسه‌ی آند آن نیز اثر قابل توجهی بر افزایش بهره‌ی یون خواهد گذاشت.

سپاسگزاری

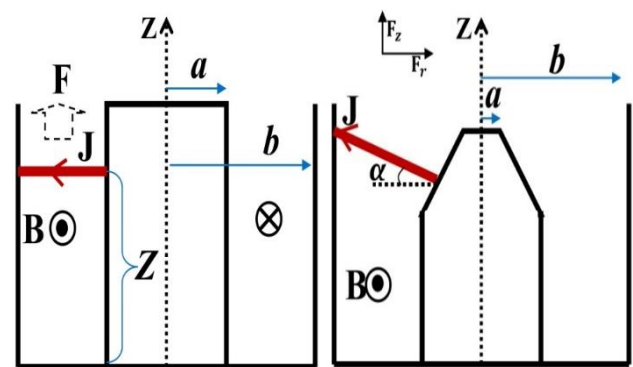
از آقای دکتر غلامرضا اطاعتی به سبب ساخت آشکارساز فارادی در دوره‌ی دکتری که انجام این تحقیق در سال‌های بعد میسر شد و هم‌چنین از آزمایشگاه گداخت دانشکده‌ی مهندسی انرژی و

در آند استوانه‌ای به طول ۵۰mm در آند مخروطی افزایش یافته است.

برای تحلیل رفتار تجربی مربوط به این مقاله می‌توان فرض کرد همه‌ی جرم گاز یونیزه‌شده در فضای بین آند و کاتد مانند یک ماشین برف‌روب جمع‌آوری می‌شوند. فاز محوری شتاب‌گیری لایه‌ی جریانی پلاسما تا نقطه‌ای در نظر گرفته شده است که لایه‌ی جریانی به انتهای طول الکتروود آند برسد. مقدار جرم جمع‌آوری شده با لایه‌ی جریانی در مکان Z طبق شکل ۹ برابر با $Z \rho \{ \pi (b^2 - a(z)^2) \}$ است که b ، α و ρ به ترتیب چگالی گاز شعاع آند، شعاع کاتد و ارتفاع لایه‌ی جریانی در راستای محور Z هاست [۱۹]. کاهش تدریجی شعاع آند در هندسه‌ی مخروطی موجب افزایش جرم جمع‌آوری شده با لایه‌ی جریانی در فاز محوری و افزایش گاز وارد شده به ستون پلاسما خواهد شد.

جدول ۳. شدت یون گسیلی در طول‌های مختلف عایق برای آند مخروطی

در ولتاژ ۱۲kV					
طول عایق (V=۱۲kV)					
۴۰mm	۴۵mm	۵۰mm	۵۵mm	۶۰mm	شدت نرمال یون
۱,۲۷	۱,۳۳	۱,۶۳	۱,۴۹	۱	



شکل ۹. مؤلفه‌های نیروی لورنتس برای دو آند مخروطی و استوانه‌ای.

چگالی شار مغناطیسی در سطح رسانایی که جریانی الکتریکی I از آن عبور می‌کند، طبق معادله‌ی آمپر همراه با کاهش شعاع الکتروود مرکزی، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، چگالی شار مغناطیسی در سطح آند با هندسه‌ی مخروطی به طور پیوسته افزایش خواهد یافت. در فاز محوری شتاب‌گیری لایه‌ی جریانی طبق شکل ۹، پلاسما بین دو استوانه‌ی هم‌محور قرار گرفته است و



فیزیک به سبب فراهم کردن امکانات لازم برای انجام آزمایش‌ها
 قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] F. Malik, H. Schmidt, S.M. Hassan, R.S. Rawat, T. Zhang, S. Mahmood, and J.J. Lin, Effect of Anode Shapes on Neutron Emission from a Repetitive Plasma Focus Device, *IEEE 34th ICOPS* **26** (2007) 13-19.
- [2] N. Talukdar, S. Borthakur, N. K. Neog, and T. K. Borthakur, Comparative study of neutron emission from a plasma focus device using two different anode shapes, *Phys. Plasmas* **23** (2016) 5-12.
- [3] T. Zhang, X. Lin, K. A. Chandra, Current sheath curvature correlation with the neon soft x-ray emission from plasma focus device, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14** (2005) 368-379.
- [4] A. Shyam and R. K. Rout, Effect of anode and insulator materials on plasma focus sheath (pinch) current, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** (1997) 1166-1178.
- [5] M. Zakaullah, I. Ahmed, N. Rashid, Study of neutron emission in a low-energy plasma focus with β -source-assisted breakdown, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **35** (1993) 689-694.
- [6] M. Zakaullah, T. J. Baig, S. Beg, and G. Murtaza, Effect of insulator sleeve length on neutron emission in a plasma focus, *Phys. Lett. A* **39** (1989) 1374-1385.
- [7] N. Talukdar, N.K. Neog, T.K. Borthkur, Effect of anode shape on pinch structure and X-ray emission of plasma focus device, *Results Phys.* **3** (2013) 142-151.
- [8] M.A. Mohammadi, S Sobhanian, R. S. Rawat, The effect of anode shape on neon soft X-ray emissions and current sheath configuration in plasma focus device, *Phys. D: Appl. Phys.* **42** (2009) 5203-5213.
- [9] J. W. Mather, Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus, *Phys. Fluids* **8** (1965) 336-349.
- [10] S. Lee and S. H. Saw, Plasma focus ion beam fluence and flux—Scaling with stored energy, *Phys. Plasmas* **19** (2012) 703-715.
- [11] W. Mather, *Methods of Experimental Physics*, Academic Press **9** (1971) 154-183.
- [12] M. G. Haines, Dense Plasma in Z-pinch and the Plasma Focus, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* **1456** (1981) 649-663.
- [13] H. Kelly and A. Marquez, Ion-beam and neutron production in a low-energy plasma focus, *Plasma Phys. Control. Fusion* **38** (1996) 1931-1942.
- [14] M. Sadowski, J. Zebrowski, E. Rydygier, and J. Kucinski, Ion emission from plasma-focus facilities, *Plasma Phys. Control. Fusion* **6** (1988) 763-769.
- [15] M. Zakaullah, I. Ahmad, A. Omar, G. Murtaza and M. M. Beg, Effects of anode shape on



plasma focus operation with argon, *Plasma Sources Sci. T.* **3** (1996) 122-138.

[16] M. Habibi, R. Amrollahi, M. Attaran and R. Etaati, Design, construction and the first experiments on the Amirkabir Plasma Focus (APF) facility, *Plasma Devices Oper.* **3** (2008) 98-109.

[17] Angular Distribution Analysis of Nitrogen Ions in a Low Energy Dense Plasma Focus Device, M. Sohrabi, et al, *Contrib. Plasma Phys.* **53** (2013) 54-63.

[18] S. Lee, T. Y. Tou, S. H. Saw, P. Lee, A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion, *Am. J. Phys.* **56** (1988) 26-38.

[19] S. Lee, and P. H. Sakanaka, Technology of a small plasma focus incorporating some experiences with the UNU/ICTP PFF Small Plasma Physics Experiments, *World Sci.* **113** (1990) 88-122.