

پایداری عملکرد، بازده پینچ و ضریب سرعت در دستگاه پلاسمای مینیاتوری J ۳ با هندسه‌های مختلف الکترودها

مرتضی حبیبی*، حسین جعفری

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

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۴/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۲۵

چکیده: با توجه به اهمیت پایداری عملکرد دستگاه‌های پلاسمای کانونی مینیاتوری در تولید پینچ‌های قوی و تکرارپذیر، در این مقاله ضمن ارایه‌ی مشاهدات تشکیل ستون پینچ در یک دستگاه پلاسمای کانونی J ۳، پایداری عملکرد آن در دو شیوه‌ی تک شات و شیوه‌ی تخلیه‌ی تکراری در بسامدهای ۰/۵ و ۵Hz نشان داده شد. همچنین، عامل‌های ایجاد نقص در تخلیه‌ی الکتریکی و راه‌کارهای جلوگیری از آن ارایه شدند. سپس، بازده دستگاه و قدرت پینچ پلاسمای برای چهار هندسه‌ی مختلف الکترودها با استفاده از نتیجه‌های تجربی و محاسبات نظری به ازای فشارهای ۰/۸، ۱/۱، ۱/۳، و ۱/۵ torr گاز آرگون و ولتاژهای شارژ ۸/۳، ۸/۵، ۸/۷، ۸/۹، و ۹/۱ kV و محاسبه شدند. مشخص شد که هندسه‌ی آند مخروطی ضمن وسیع نمودن محدوده‌ی فشار کاری گاز از ۰/۶ تا ۱/۵ torr، بیش‌ترین دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ را نیز تولید می‌کند. همچنین، عامل‌های مهم طراحی دستگاه مانند عامل سرعت و حساسیت پینچ برای الکترود بهینه تحت شرایط کاری فوق محاسبه شد. مشخص شد بهترین شرایط فشرده‌سازی ستون پلاسمای در این دستگاه در فشار و ولتاژکاری بهینه‌ی به ترتیب ۰/۸±۰/۸ mbar و ۸/۳-۸/۵ kV است و در صورت ملاک بودن عملکرد پایدار دستگاه برای تولید پینچ‌های قوی و تکرارپذیر، محدوده‌ی ولتاژکاری ۸/۵-۸/۷ kV و فشار گاز ۰/۶-۱/۱ mbar است.

کلیدواژه‌ها: دستگاه پلاسمای مینیاتوری، بازده پینچ، ضریب سرعت

Operation stability, pinching efficiency and speed factor in 3-joules miniature plasma pinch generator, for different electrodes geometry

M. Habibi*, H. Jafari

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

Abstract: Regarding the importance of the stability in a miniature pinch plasma generator in repetitive and strong plasma pinch, the stable operation of a 3J miniature plasma focus device in two single-shot and repetitive discharge modes (at 0.5Hz and 5Hz discharge frequencies) and the factors in creation of switch misfire was demonstrated. Then, the device efficiency and strength of the plasma pinch for four different coaxial electrode configurations were studied, upon scanning argon gas pressure ranged from 0.6 to 1.5 mbar via the study of the charging voltage variation from 8.3 to 9.3 kV. It was observed that the strength and efficient pinching is appropriately produced for the tapered anode configuration over an expanded operating pressure ranged from 0.6 to 1.5 mbar. After the calculation of the speed factor and pinch sensitivity for the optimum electrodes geometry, it was shown that the best plasma compression at the pinch phase was associated with 0.88±0.8 mbar argon gas pressure and 8.3-8.5 kV charging voltage, respectively. From the viewpoint of the stability assessment of the device, it was observed that the stable operation of the device was for the charging voltage of 8.3 to 8.7 kV in the operating pressure of 0.6 to 1.1 mbar.

Keywords: Miniature plasma generator, Pinching efficiency, Speed factor

*Email: mortezahabibi@gmail.com

۱. مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی یکی از مولدهای شناخته شده پینچ پلازما است که به کمک عبور یک جریان بسیار بالا از یک گاز کم فشار شرایط وقوع برهم کنش های هم جوشی گرما هسته ای باریکه ای هدف را فراهم می آورد که از محصول های آن می توان به نوترون های تند تپی (در صورت کار با گاز دوتریم)، یون های پراثرژی، تابش فرابنفش و تابش های ایکس نرم و سخت اشاره کرد. در گذشته، اغلب مطالعات تجربی دانشمندان متمرکز بر مولدهای پلاسمای اثرژی - متوسط (۱ تا ۱۰۰ kJ)، اثرژی - بالا (۱۰۰ kJ تا ۱ MJ) بود. اما امروزه، به دلیل برخی عیب های موجود در استفاده از این دستگاه های اثرژی - بالا مانند نرخ تکرار تخلیه ی پایین، هزینه های بالای آزمایش ها و ملزومات زمانی و انسانی مورد نیاز، از این ماشین ها تنها در مطالعات پژوهشی و غیر کاربردی استفاده می شود. در مقابل، مولدهای پلاسمای کانونی اثرژی - پایین یا مینیاتوری (اثرژی کم تر از ۱ kJ) با تغذیه توسط منبع های تغذیه ی ولتاژ بالای تپی و قابلیت عملکرد با آهنگ شارژ و تخلیه ی بالا، به دلیل حجم بسیار کم تر، قابل حمل و ایمن بودن به لحاظ مسایل حفاظت عایقی و پرتویی، چشم انداز روشنی را برای کاربردی نمودن ماشین های مولد تابش های یوننده فراهم کرده اند [۱-۱۰].

در روند تحقیقات بر روی مولدهای مینیاتوری، روت و همکاران [۱۱] ساخت یک مولد پلاسمای کانونی مینیاتوری ۲۰۰ J (خازن ۴ μF، ۱۰ nH) با تأمین اثرژی از طریق یک مبدل ولتاژ جریان مستقیم ۱۰ kV (تغذیه ورودی از طریق یک باتری ۲۴۷ / ۷۵ A) را گزارش کردند. توان منبع تغذیه ی این دستگاه به گونه ای است که در هر ۱۰ sec بانک خازن تا ولتاژ ۱۰ kV یک بار شارژ شده و سپس تخلیه می شود. تحت این شرایط، بعد از ۵۰ شات، متوسط بهره ی نوترونی دستگاه $10^6 \times (0.3 \pm 0.1)$ نوترون در هر شات اندازه گیری شد. وزن کلی این دستگاه (منبع تغذیه ولتاژ بالای تپی، بانک خازن و سوئیچ اسپارک گپ) در حدود ۲۳ kg گزارش شده است. در سال ۲۰۰۸ گزارشی از یک مولد پلاسمای مینیاتوری (۲۷ nH، ۲۴ μF، ۲۰۰ J) تحت عنوان FMPF-۱ ارائه شد که در آن مدت زمان تپ های پرتو ایکس سخت و نوترون در فشار

۳ mbar و پس از ۲۰ شات به ترتیب برابر با $8/9 \pm 0/8$ ns و $6/9 \pm 0/8$ ns به دست آمدند. اهمیت مدت زمان تپ تابش ها، در استفاده از این مولدها در عکس برداری های سریع و لایه نشانی های با ضخامت و حساسیت بسیار دقیق مشخص می شود. ورما و همکاران [۱۲] با ساخت یک مولد پلاسمای مینیاتوری ۱۳۵ J (خازن ۱۳/۸ kV، ۵۶ nH، ۲/۴ μF) و تأمین اثرژی آن از طریق یک سیستم شارژ ولتاژ مستقیم (مدل EMI HVPS ۸۰۲۱ از شرکت A.L.E ساخت کشور امریکا) توانستند با استفاده از اثرژی کم تر ولی با به کارگیری فن آوری عملکرد مولد پلاسمای کانونی در مد تخلیه ی تکراری ۱۰ Hz (منبع تغذیه ی ۴۰ kV-۱/۴۵۰ mA با آهنگ شارژ 9 kJ s^{-1} و سوئیچ تراپتورن با ولتاژ تریگ ۲۰ kV)، متوسط بهره ی نوترون دستگاه را افزایش دهند. در گزارشی دیگر از مولد FMPF-۱، ورما و همکاران [۹] نتیجه های مربوط به اندازه گیری پرتو ایکس سخت دستگاه را ارائه نمودند. نتیجه ها نشان داد که مدت زمان متوسط هر تپ پرتو ایکس سخت تولید شده در فشار ۳/۵ mbar در راستای محوری برابر 29 ± 3 ns و در راستای شعاعی برابر 18 ± 2 ns است.

با دقت در گزارش های بالا مشخص می شود که برای هر چه صنعتی تر شدن این دستگاه باید بتوان در بهترین نقطه ی کاری دستگاه در دو شیوه ی تخلیه ی تک شات و تخلیه ی تکراری کار کرد. برای دستیابی به این مهم، همواره تلاش می شود تا شرط هم زمانی ایجاد پینچ پلازما با زمان بیشینه ی جریان تخلیه به عنوان شرط اصلی در بهبود بازده پینچ تعیین شود. زیرا گسیل شدیدترین تابش های پلاسمای کانونی مربوط به فاز تشکیل ستون پینچ پلازما است [۲، ۷]. مشاهده شده است که در این فاز تغییرات شدیدی در علامت های ولتاژ و جریان تخلیه ی الکتریکی رخ می دهد. این تغییرات در دامنه ی ولتاژ و جریان تخلیه به دلیل تغییر ناگهانی در شدت میدان الکتریکی دو سر ستون پلازما است که خود ناشی از تغییر ناگهانی و بزرگ در اندوکتانس و مقاومت الکتریکی پلازما است. به همین دلیل، در مسیر مطالعه ی عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی، ثبت جریان و ولتاژ تخلیه ی الکتریکی به عنوان مؤثرترین روش آگاهی از چگونگی فشرده سازی ستون پلازما شناخته می شود [۷، ۹، ۱۱]. دامنه ی بالاتر قله ی تیز ولتاژ - افت شدید جریان

ظرفیت و کاهش اندوکتانس می‌شود) و سوئیچ راه‌انداز^۱ نیز درون ساختار بانک خازن (در فضای مرکزی ساختار هم‌محور بانک خازن) قرار داده شده است. با استقرار سوئیچ راه‌انداز در درون ساختار بانک خازن، ضمن کوتاه شدن مسیر جریان و کم‌حجم شدن مجموعه‌ی بانک خازن و سوئیچ، هم نوفه‌های الکترومغناطیسی و صدای عملکرد سوئیچ راه‌انداز حین عملکرد در شیوه‌ی تخلیه‌ی تکراری فیلتر می‌شود و هم شرایط ایمن به لحاظ مسایل عایق ولتاژ فشار- قوی فراهم می‌شود. با طراحی این بانک خازن ابداعی، قابلیت کار دستگاه با ولتاژ شارژ ۸-۹٫۵kV در بسامد تخلیه‌ی ۰٫۵-۵ Hz فراهم می‌شود. طراحی الکترودها و محاسبه‌ی ابعاد آن‌ها با استفاده از پارامترهای چگالی انرژی ستون پلاسما و عامل سرعت [۱۴، ۱۵] و رعایت شرط هم‌زمانی وقوع پینچ پلاسما با یک چهارم دوره‌ی تناوب علامت تخلیه انجام شده است [۱۲]. مشخصه‌های کلی این دستگاه در جدول ۱ درج شده است. فیزیک و مهندسی طراحی و ساخت این دستگاه در مرجع‌های [۱۶] و [۱۷] شرح داده شده است. تصویر طرح‌وار اجزای تشکیل‌دهنده‌ی دستگاه پلاسما کانونی مینیاتوری ۳J در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصه‌های فنی و هندسی دستگاه پلاسما کانونی مینیاتوری ۳J

پارامتر	مقدار
ولتاژ شارژ	۸-۹٫۵ kV
ظرفیت بانک خازن	۸۴ nF
انرژی بانک خازن	۲٫۵-۳ J
جریان تخلیه	۷٫۵ kA
فشار گاز کاری	۰٫۶-۱٫۵ Torr
شعاع آند	۱٫۲۵ mm
طول مؤثر آند	۲٫۵ mm
شعاع کاتد	۷٫۵ mm
طول مؤثر عایق	۱۳ mm
جنس آند	فولاد زنگ نزن
جنس کاتد	فولاد زنگ نزن / آلومینیم / مس
جنس عایق	پیرکس

به هنگام تشکیل پینچ با گسیل شدیدتر تابش‌های پلاسما کانونی متناظر است چراکه انرژی منتقل شده به ستون پلاسما با ولتاژ پینچ بستگی دارد. به ویژه این‌که وقوع پینچ در مولدهای مینیاتوری تحت تأثیر اتلاف انرژی در فازهای مختلف دینامیک پلاسما کانونی است؛ به بیان دیگر، اگر شکست الکتریکی به خوبی تشکیل نشود، بخش زیادی از انرژی بانک خازن باعث تخلیه‌ی سطحی و تشکیل رشته جریان‌های الکتریکی روی عایق آند و کاتد خواهد شد. نتیجه‌ی این اثر، پوسته‌ی جریانی است که انرژی الکترومغناطیسی لازم برای گذار از فاز شتاب‌گیری محوری به فاز فشرده‌سازی شعاعی را نخواهد داشت. بنابراین، دانستن این موضوع که بازدهی پینچ پلاسما تا چه حدی به تغییرات پارامترهای مختلف کاری دستگاه حساس است، از ارزش زیادی برخوردار است.

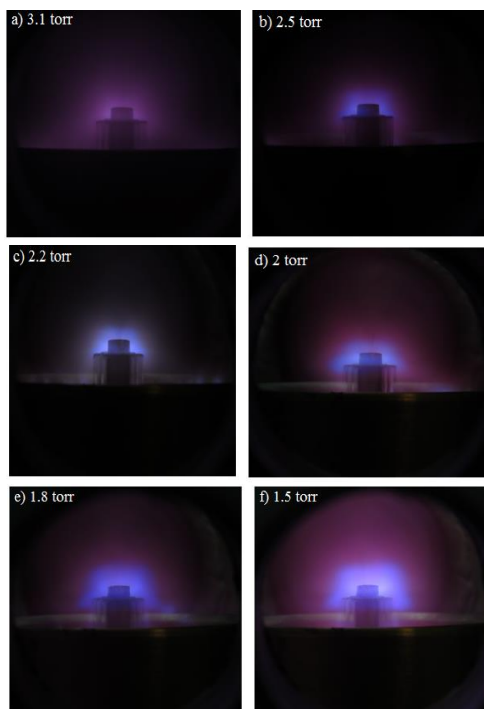
از آن‌جا که بازدهی پینچ پلاسما به شرایط مختلفی هم‌چون زمان شروع شکست الکتریکی، فشار گاز داخل محفظه، سطح ولتاژ شارژ، طول و ابعاد الکترودها بستگی دارد [۷، ۱۳]، به تحلیل هم‌زمان نتیجه‌های تجربی و بررسی محاسباتی پایداری پینچ پلاسما نیاز داریم. بدین منظور، با اعمال تغییرات اندک در پارامترهای مختلف ورودی دستگاه، پارامترهای خروجی‌های دستگاه را اندازه‌گیری کرده و با روش‌های محاسباتی بازدهی پینچ پلاسما را به دست می‌آوریم. در این مقاله، اثرهای ناشی از طراحی‌های مختلف الکترودهای دستگاه و تغییرات فشار گاز و سطح ولتاژ شارژ بر روی بازدهی پینچ پلاسما با استفاده از نتیجه‌های تجربی و تحلیل نظری بررسی شده است.

۲. ترتیب آزمایشی و روش کار

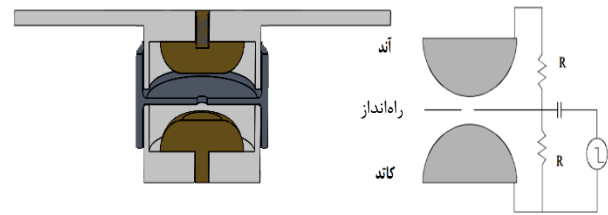
۱۰۲ دستگاه پلاسما کانونی مینیاتوری

دستگاه پلاسما کانونی مینیاتوری مورد استفاده در این پژوهش دارای یک بانک خازن ولتاژ- بالا و اندوکتانس- پایین هم‌محور با ظرفیت ۸۴nF است که از دوازده خازن ولتاژ- بالای سرامیکی (هر کدام ۷nF، ۱۵kV) با توزیع متقارن بین دو صفحه‌ی موازی به شکل دایره تشکیل شده است. طراحی بانک خازن ولتاژ- بالا و اندوکتانس- پایین به گونه‌ای است که تمامی خازن‌ها در یک ترتیب هم‌محور (که باعث کمینه شدن اندوکتانس می‌شود) دارای اتصال موازی بوده (که باعث افزایش

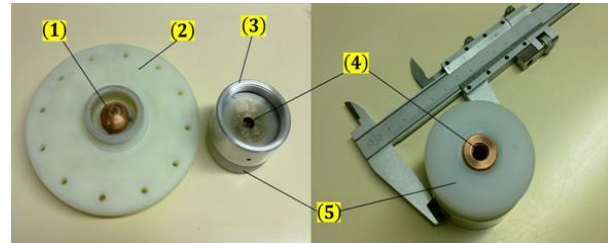
بازده دستگاه نیز می‌شود. این پدیده که در آن تنها کسر ناچیزی از جریان تخلیه از پوسته‌ی پلاسما عبور می‌کند، به اثر ریزش جریان معروف است [۱۰]. بررسی‌ها در دستگاه‌های پلاسما کانونی مینیاتوری نشان می‌دهند که در فشارهای بالا، اگر چه چگالی پلاسما افزایش می‌یابد اما ناپایداری سوسیزی عامل اساسی رشد سریع اندوکتانس است و ناپایداری ستون پلاسما رشد کرده و پینچ مطلوبی حاصل نخواهد شد [۲]. در نتیجه، تعیین حد بالای فشار گاز نیاز به سعی و خطای فراوان دارد. با توجه به استفاده از گاز آرگن که از جمله گازهای سنگین مورد استفاده در دستگاه به شمار می‌آید، انتظار می‌رود که تشکیل ستون پینچ در فشارهای کم‌تر از چند میلی بار مشاهده شود. در شکل ۳ اثر فشار مربوط به گاز آرگن در تشکیل ستون پلاسما نشان داده شده است. طبق این شکل در فشارهای بیش از ۱٫۵ mbar، با وجود شکل‌گیری پوسته‌ی پلاسما چتری شکل در بالای آند، پلاسما نمی‌تواند به سمت محور مرکزی دستگاه حرکت کند و ستون پینچ باریکی بسازد. با کاهش فشار، شرایط وقوع پوسته‌ی پلاسما منبسط شده فراهم شده و مشاهده می‌کنیم که پوسته‌ی پلاسما چتری شکل ایجاد می‌شود. به این خاطر در آزمایش‌های بعدی، ضمن این‌که ارتفاع کاند افزایش داده شد تا پوسته‌ی جریان مقاومت الکتریکی کم‌تری را در مسیر خود تجربه کند، محدوده‌ی فشار گاز نیز به مقادیر کم‌تر از ۱٫۵ mbar کاهش داده شد.



شکل ۳. اثر تغییر فشار گاز آرگن بر عملکرد دستگاه در تولید پوسته‌ی پلاسما چتری شکل.



(الف)



(ب)

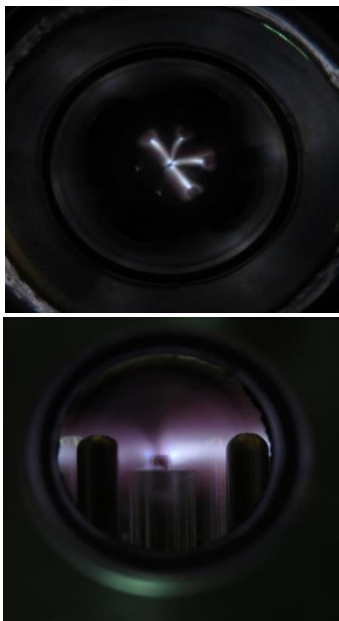
شکل ۲. الف) هندسه‌ی الکترودهای اصلی (نیم‌کروی) و الکترودهای راه‌انداز (صفحه‌ای روزنه‌دار)؛ ب) اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سوئیچ مولد جرقه، (۱) الکترودهای اصلی؛ (۲) عایق پلی‌آمید؛ (۳) بدنه‌ی آلومینیومی سوئیچ؛ (۴) الکترودهای دوم؛ (۵) عایق پلی‌اتیلن نگهدارنده‌ی الکترودهای سوئیچ.

نیاز فنی دیگر که باید در فرایند تخلیه‌ی تکراری به آن توجه نمود نگهداری شرایط اولیه‌ی کاری دستگاه در طول عملکرد تخلیه‌ی تکراری است. به بیانی دیگر، باید مدت زمان کار دستگاه بدون نیاز به تعویض گاز آرگن با شرط مشاهده‌ی پینچ در علامت‌های تخلیه تعیین شود. با انجام آزمون‌های خلأ مشاهده شد در صورتی که فشار گاز آرگن به مقداری در حدود ۳ mtorr کاهش یابد و سپس پمپ خاموش شود، پس از گذشت یک دقیقه، فشار خلأ از ۱۲ mtorr به ۳۶ mtorr تغییر پیدا می‌کند. با توجه به فشار کاری دستگاه که در حدود ۱ torr است، این میزان تغییر بسیار مطلوب و قابل قبول است.

۳. نتیجه‌ها و بحث

۱.۳ تعیین شرایط کاری و اثبات پینچ

برای دستیابی به هندسه‌ی بهینه، ابتدا باید حدود کلی مربوط به پارامترهای کاری دستگاه یعنی فشار گاز و سطح ولتاژ شارژ مشخص شود. برای این منظور، آزمایش‌های مختلفی با هدف دستیابی به یک پوسته‌ی پلاسما چتری- شکل انجام شد. یکنواختی پوسته‌ی پلاسما در طی فازهای دینامیک پلاسما، به تشکیل متقارن آن در فاز شکست الکتریکی بستگی دارد. چنانچه فاز شکست الکتریکی به صورت نامتقارن شروع شود، پوسته‌ی پلاسما نیز علاوه بر نامتقارن بودن، چگالی جریان بسیار کم‌تری را با خود حمل خواهد نمود که منجر به کاهش



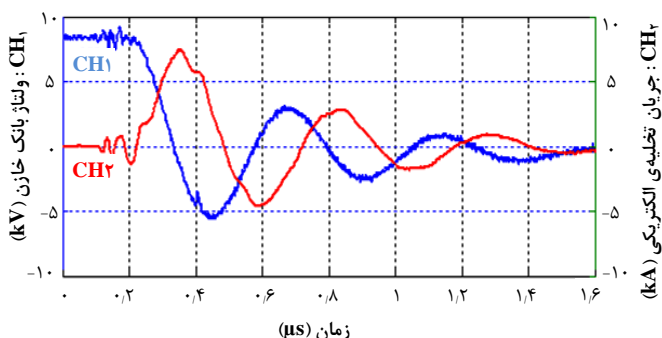
شکل ۴. تصویر نمونه‌ای از پوسته‌ی پلازما در ولتاژ شارژ بیش از ۹٫۳ kV.



شکل ۵. تصویر نمونه‌ای از پوسته‌ی پلازما در ولتاژ شارژ بیش از ۸٫۷ kV.

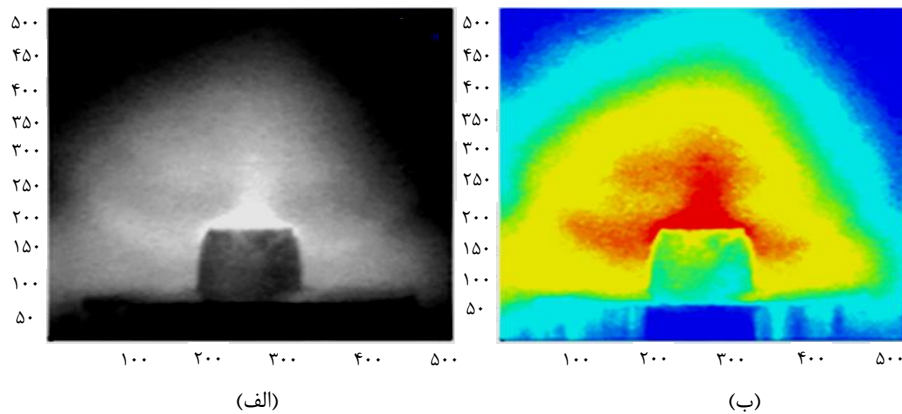
پس از تعیین محدوده‌ی فشار کاری گاز به عنوان یکی از عامل‌های کمک‌کننده به ایجاد تقارن در شروع فاز شکست، آزمایش‌های بعدی برای تعیین محدوده‌ی ولتاژ شارژ بانک خازن انجام شدند. در خصوص سطح ولتاژ شارژ، در تصویرهای گرفته شده از پنجره‌ی بالایی دستگاه از لحظه‌ی تشکیل پوسته‌ی پلازما مشخص شد در صورتی که در شرایط فشار کاری گفته شده در بالا، از ولتاژ شارژ بیش‌تر از ۹٫۳kV استفاده شود، پوسته‌ی پلازما دارای عدم تقارن خواهد شد. این‌گونه تخلیه‌ها منجر به فروپاشی سریع پوسته‌ی پلازما و کاهش بازده‌ی کاری دستگاه می‌شوند. در مقابل، مطابق شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده شد چنانچه ولتاژ شارژ در محدوده‌ی ۸٫۳-۹٫۳kV باشد شروع فاز شکست و تشکیل پوسته‌ی پلازما به صورت کاملاً متقارن خواهد بود. در این صورت، پوسته‌ی پلازما می‌تواند کسر بیش‌تری از جریان را با خود حمل کند و با توجه به رابطه‌ی مستقیم بین بهره‌ی نوترونی و توان نهم پارامتر محرک، چنانچه جریان عبوری از پلازما افزایش یابد، بهره‌ی نوترونی نیز به مقدار زیادی افزایش می‌یابد [۸، ۱۱]. با توجه به نتیجه‌هایی که در گام اول آزمایش‌ها به‌دست آمد محدوده‌ی پارامترهای کاری دستگاه به صورت فشار گاز آرگون از ۰٫۶-۱٫۵ mbar و سطح ولتاژ شارژ از ۸٫۳-۹٫۳kV در نظر گرفته شدند.

در شکل ۶ می‌توان نمونه‌ی علامت‌های ولتاژ و جریان تخلیه‌ی الکتریکی (در شیوه‌ی تک شات) مربوط به فشار گاز آرگون ۱ torr و ولتاژ شارژ ۸٫۵ kV و در شکل ۷ نیز تصویر گرفته شده از ستون پینچ پلاسمای مربوط به فاز شتاب‌گیری شعاعی (فاز پینچ) را مشاهده نمود. لازم به ذکر است به منظور درک بهتر تصویرهای گرفته شده از پینچ پلازما، ابتدا تصویر سیاه/سفید آن (شکل ۷ الف) با بزرگ‌نمایی در محیط نرم‌افزار متلب^۱ نمایش داده شده و سپس جهت مشاهده‌ی بهتر ستون پینچ تشکیل شده در فاز شعاعی دینامیک پلازما، از توزیع رنگی jet (شبه رنگی سازی) در نرم‌افزار متلب استفاده شد. با دقت در این نتیجه‌های تجربی مشخص است که طراحی الکترودهای دستگاه پلاسمای کانونی مینیاتوری و انتخاب محدوده‌ی پارامترهای عملکردی دستگاه به درستی انجام شده که منجر به ایجاد ستون پینچ قوی در قسمت مرکزی آند شده است.



شکل ۶. مشاهده‌ی پینچ در علامت‌های تخلیه‌ی الکتریکی برای هندسه‌ی سوم، با شرایط فشار کاری ۱ mbar و ولتاژ ۸٫۵ کیلوولت.

1. MATLAB



شکل ۷. الف) عکس گرفته شده از ستون پینچ پلاسما در شرایط فشار کاری ۱ mbar و ولتاژ ۸٫۵ kV؛ ب) تصویر پردازش شده برای متمایز نمودن ستون پینچ پلاسما.

هم چون نوترون و پرتوایکس سخت و نرم را تا بیش از ۵ برابر افزایش داد [۱۴].

۴.۳ اثر عملکرد ناقص تخلیه

یکی دیگر از پارمترهای مهم دستگاه در شیوهی تخلیهی تکراری، نبود عملکرد ناقص در فرایند تخلیهی تکراری است، زیرا وقوع هر تخلیهی ناقص می‌تواند در ادامه از تولید تپ‌های تخلیهی پایدار و متوالی بعدی جلوگیری کند. در شکل ۱۰ تصویر مربوط به علامت‌های جریان و ولتاژ تخلیهی دستگاه در ولتاژ ۸ kV و فشار گاز ۱/۱ torr با بسامد تخلیهی ۵Hz نشان داده شده است. این اندازه‌گیری به گونه‌ای انجام شد که دستگاه به مدت ۱۰ s و به طور پیوسته در بسامد ۵Hz در حال کار کردن بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود پایداری سطح ولتاژ ۸ kV در بسامد ۵Hz در مدت ۱۰s (تنها با استفاده از یک سوئیچ راه‌انداز بدون گاز فشرده) به خوبی حفظ شده است و تنها در دو تخلیهی غیرمتوالی تخلیهی ناقص رخ داده است. از جمله مواردی که به وقوع تخلیهی ناقص منجر می‌شود می‌توان به نداشتن زمان کافی برای بازیابی سوئیچ، تخلیهی ناقص انرژی بانک خازن در پوسته‌ی پلاسما، تبدیل بار خازن به بار اهمی بزرگ (مدار باز) به دلیل اجرای سریع فرایند بارکردن و تخلیه و در نتیجهی افزایش ولتاژ دوسر بانک خازن در لحظه‌ی شروع فرایند بارکردن اشاره کرد. افزایش زمان بازیابی الکترودهای اصلی سوئیچ می‌تواند با تحت فشار قرار دادن گاز درون آن انجام شود. تخلیهی ناقص بانک خازن و مدار باز شدن آن در لحظه‌ی بارکردن مجدد نیز به مشخصه‌ی خازن‌ها و نحوه‌ی شروع فاز شکست الکتریکی بستگی دارد. بنابراین، می‌توان با بهینه کردن طراحی الکترودها و انتخاب خازن و سوئیچ راه‌انداز مناسب، از وقوع نقص در عملکرد تخلیهی تکراری جلوگیری کرد.

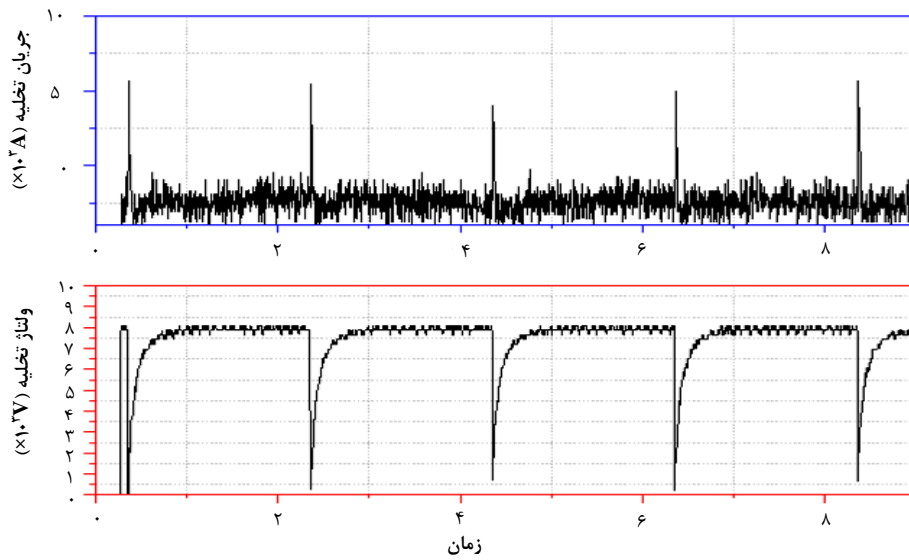
با توجه به رابطه‌ی نیمه‌تجربی تخمین عمر پینچ پلاسما $a[m] = 2 \times 10^{-6} tp[s]$ که با تحلیل چگونگی حرکت جبهه‌ی موج شعاعی و جبهه‌ی موج پیستونی برحسب زمان در دستگاه‌های با محدوده‌ی انرژی ژول تا مگا ژول به دست آمده [۱۸-۲۰]، مدت زمان وقوع پینچ پلاسما در این دستگاه حدود ۲٫۵ ns تخمین زده شد. با دقت در شکل موج ولتاژ تخلیه در شکل ۶ مشخص است که طول عمر پینچ در حالت تجربی در حدود ۳ ns است، که این نتیجه با گزارش‌های ارایه شده هم‌خوانی دارد.

۲.۲ پایداری در بسامدهای پایین

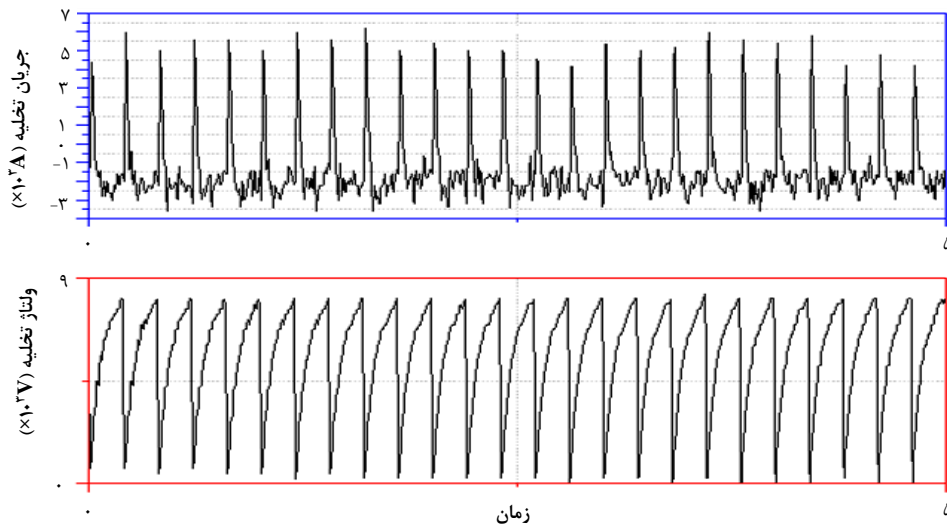
پس از اطمینان از عملکرد دستگاه در شیوه‌ی تک شات، پایداری دستگاه در شیوه‌ی تخلیهی تکراری در بسامدهای پایین یعنی در بسامد ۰٫۵Hz مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۸ نتیجه‌ی اندازه‌گیری علامت‌های جریان تخلیه و ولتاژ تخلیهی دستگاه در ولتاژ ۸ kV و فشار ۱ torr با بسامد تخلیهی ۰٫۵ Hz نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پایداری عملکرد دستگاه در بسامدهای تخلیهی پایین به خوبی حاصل شده است. تحت این شرایط، در پنج نوبت آزمایش دستگاه مشاهده شد که در طول ۹۰s عملکرد دستگاه که معادل ۴۵ تخلیه است، تنها در کم‌تر از ۳ تخلیه پدیده‌ی پینچ رخ نداد و نیاز به تعویض گاز آرگون احساس شد.

۳.۳ پایداری در بسامدهای بالا

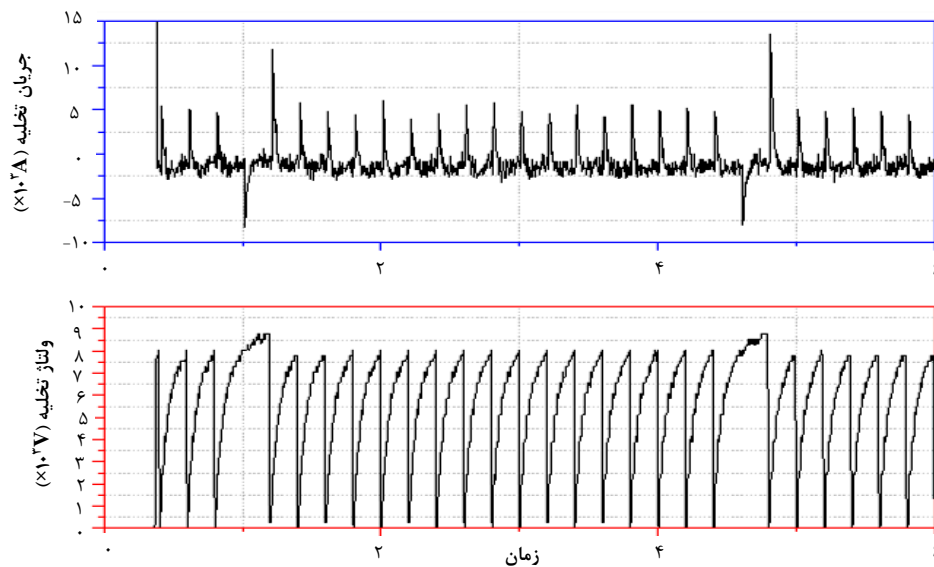
در ادامه‌ی بررسی عملکرد پایداری دستگاه در طریقه‌ی تخلیهی تکراری، علامت‌های تخلیهی الکتریکی در بسامد ۵Hz اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است پایداری دستگاه در بسامد ۵ Hz برای مدت زمان ۵s به خوبی حاصل شده که یک دست‌آورد مطلوب برای یک دستگاه ولتاژ-بالای تپی است؛ زیرا تحت این شرایط می‌توان بهره‌ی تابش‌های مختلفی



شکل ۸. علامت‌های جریان و ولتاژ تخلیه در ولتاژ ۸ kV و فشار ۱ torr و بسامد تخلیه ۵ Hz.



شکل ۹. پایداری عملکرد دستگاه در ولتاژ ۸ kV و فشار ۱٫۱ torr و با بسامد تخلیه ۵ Hz برای مدت ۵s.



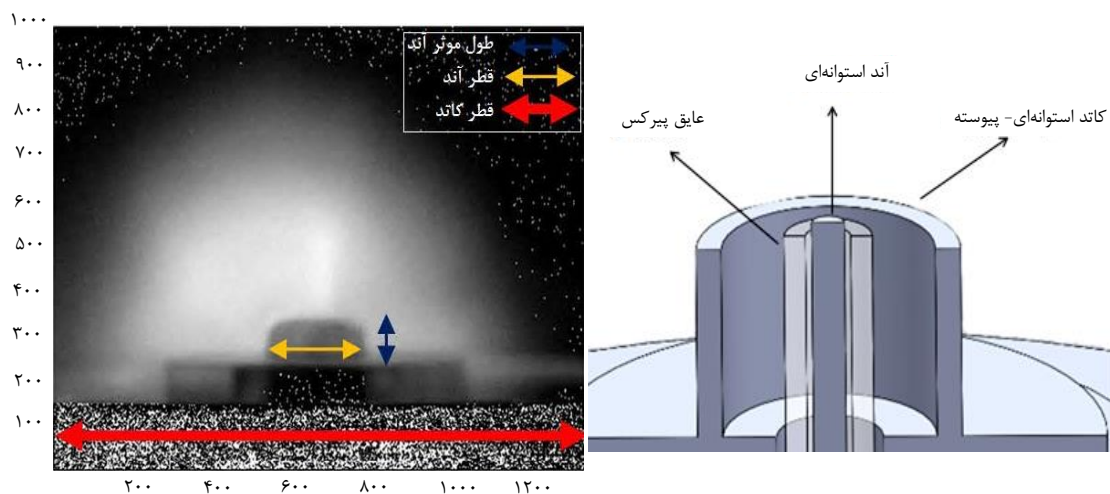
شکل ۱۰. علامت‌های جریان تخلیه (کانال ۱) و ولتاژ تخلیه دستگاه (کانال ۴) در ولتاژ ۸ kV و فشار ۱٫۱ torr و با بسامد تخلیه ۵ Hz.

این ساختار قابلیت خوبی در بازتولید پینچ دارد. سایر نتیجه‌های مربوط به این ساختار که در فشارهای بیش‌تر از ۱/۱ torr انجام شد، نشان از کاهش بازده پینچ داشت.

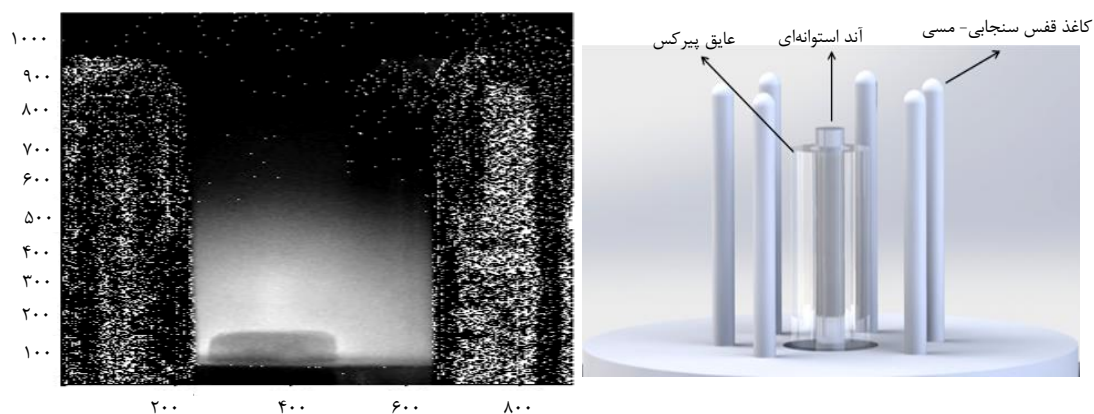
با توجه به این‌که داشتن محدوده‌ی شرایط کاری وسیع می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان دستگاه کمک کند، در گام بعد، یک کاتد قفس سنجابی شامل دوازه میله‌ی مسی به‌کار گرفته شد (شکل ۱۲). مشخص شده است که استفاده از کاتد میله‌ای کمک می‌کند تا توزیع چگالی جریان عبوری از آند و الکترودهای میله‌ای به صورت یکنواخت و متمرکز انجام شود که به نوبه‌ی خود کمک می‌کند تا میدان الکتریکی بین شکاف الکترودها افزایش یابد و در نتیجه، شکل‌گیری تخلیه‌ی سطحی/خزشی بر روی عایق الکترودها بهتر انجام شود [۲۱]. با استفاده از هندسه‌ی دوم مشاهده شد که عملکرد دستگاه در دست‌یابی به فشردگی‌سازي بهتر، در محدوده‌ی بیش‌تری از فشار گاز یعنی از ۰/۶-۱/۲ torr بهبود می‌یابد، اما دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ نسبت به کاتد استوانه‌ای تغییر چندانی نداشت.

۵.۳ بازدهی پینچ پلاسما و هندسه‌ی بهینه‌ی الکترودها
پس از آزمایش‌های متعدد در شیوه‌های تک شات و تخلیه‌ی تکراری و کسب اطمینان از عملکرد دستگاه، میزان بازده دستگاه و قدرت پینچ در هندسه‌های مختلف الکترودها مورد بررسی تجربی و نظری قرار گرفت. همان‌طور که اشاره شد مشاهده‌ی قله‌ی تیز ولتاژ/افت شدید جریان در علامت‌های الکتریکی نشان از تشکیل پینچ در فاز فشردگی‌سازي شعاعی دارد. در این پژوهش، از دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ تخلیه به عنوان معیاری از اندازه‌ی بازدهی پینچ و با هدف معرفی بهترین طراحی الکترودها و تعیین محدوده‌ی کاری پارمترهای عملکردی دستگاه استفاده شده است.

به عنوان اولین هندسه‌ی الکترودها، از یک آند استوانه‌ای با طول مؤثر ۱/۵ mm و قطر ۱/۲۵ mm و یک کاتد استوانه‌ای پیوسته با قطر داخلی ۹ mm استفاده شد (شکل ۱۱). آزمایش‌ها نشان داد که در فشارهای کم‌تر از ۱ torr دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ در علامت ولتاژ تخلیه افت قابل توجهی دارد اما، برای فشار گاز آرگون از ۱-۱/۱ torr نتیجه‌ها نشان دادند که



شکل ۱۱. طراحی مربوط به هندسه‌ی اول الکترودها و تصویر پینچ در فشار گاز آرگون ۱ torr و ولتاژ ۸/۹ kV.



شکل ۱۲. طراحی مربوط به هندسه‌ی دوم الکترودها و تصویر پینچ در فشار گاز آرگون ۱ torr و ولتاژ ۸/۸ kV.

$$S = \frac{I_p / a}{\sqrt{\rho_0}} \left(kA / cm \text{ torr}^{1/2} \right) \quad (1)$$

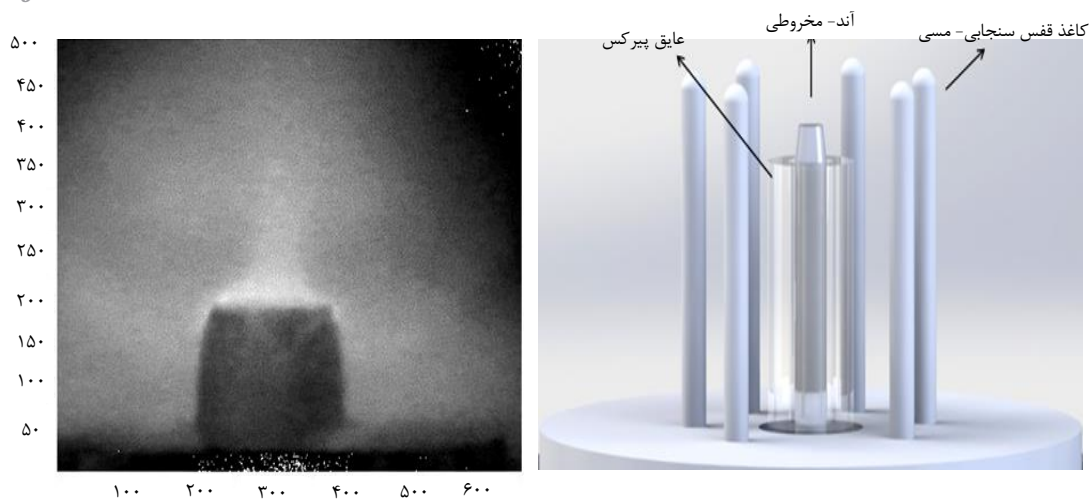
که در آن I_p جریان بیشینه عبورکننده از پوسته‌ی پلاسما، a شعاع آند، و ρ_0 فشار اولیه‌ی گاز درون محفظه‌ی دستگاه پلاسمای کانونی است. این پارامتر، از طریق بی‌بعدسازی معادله‌ی حرکت فراصوتی پوسته‌ی پلاسما در فاز محوری به دست می‌آید. محاسبه‌ی ضریب سرعت از آن جهت ارزشمند است که این ضریب در انتقال انرژی مغناطیسی به ستون پلاسما نقش مهمی دارد به طوری که با افزایش آن، سرعت ستون پلاسما و دمای مربوط به برهم‌کنش‌های هم‌جوشی گرما هسته‌ای باریکه-هدف افزایش می‌یابد [۲۳]. لازم است بدانیم که هرچند سرعت پوسته‌ی پلاسما در فاز محوری متناسب با ضریب سرعت است، اما بالا بودن آن و در نتیجه افزایش سرعت پوسته‌ی پلاسما همیشه و لزوماً باعث دستیابی به پینچ قوی‌تر نمی‌شود؛ چراکه با افزایش بیش از حد سرعت پوسته‌ی پلاسما در یک هندسه‌ی ثابت، شرط هم‌زمانی تشکیل پینچ و بیشینه بودن جریان تخلیه‌ی الکتریکی از بین می‌رود. شکل ۱۵ داده‌های مربوط به اندازه‌گیری دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ و ضریب سرعت را به عنوان معیاری از مقدار بازده پینچ در هندسه‌های مختلف الکترودها نشان می‌دهد. در این شکل، به خوبی مشاهده می‌شود که وقوع پینچ پلاسما به طور قابل توجهی تحت تأثیر بازه‌ی کاری و هندسه‌ی الکترودها است [۲۴]. هم‌چنین، با دقت در منحنی مشخصه‌های هندسه‌های مختلف الکترودها در شکل ۱۵ نتیجه گرفته می‌شود که هندسه‌ی سوم یعنی استفاده از آند مخروطی (با نسبت ظاهری حدود یک)، به دلیل این که منجر به پینچ قوی و متوالی در محدوده‌ی فشار کاری وسیع از ۰/۶-۱/۵ torr شده است، به عنوان هندسه‌ی بهینه برای دستگاه پلاسمای کانونی مینیاتوری ۳J در نظر گرفته شد.

به منظور افزایش دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ که نشانه‌ای از انتقال انرژی مکانیکی و جنبشی بیش‌تر به پوسته‌ی پلاسما است، قطر انتهای آند کاهش داده شد تا چگالی جریان خطی در انتهای آند تقویت شده و بازده فشرده‌سازی شعاعی ستون پلاسما افزایش یابد. بنابراین، طول آند از ۱/۵ mm به ۲/۵ mm افزایش و شعاع آند به صورت مخروطی از ۱/۲۵mm به ۱/۱mm کاهش داده شد (شکل ۱۳). با انجام آزمایش‌ها همان‌طور که انتظار می‌رفت استفاده از آند مخروطی و بلندتر، پینچ قوی‌تری در محدوده‌ی فشار کاری ۰/۶-۱/۵ torr به دست داد.

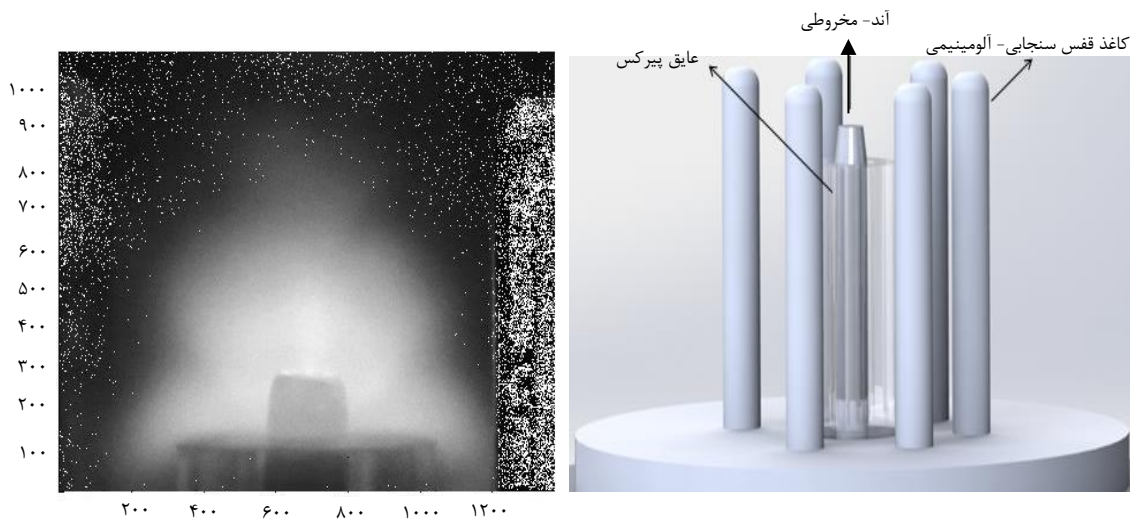
با توجه به اهمیت پارامتر «نسبت شعاع کاتد به شعاع آند» در روند طراحی الکترودهای پلاسمای کانونی، اثر کاهش شعاع کاتد از ۹ mm به ۷/۵ mm نیز در عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی مینیاتوری مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱۴). آزمایش‌ها نشان داد که کاهش شعاع کاتد می‌تواند در دستیابی به پینچ قوی‌تر در فشارهای پایین اثرگذار باشد. در طراحی چهارم الکترودها، قدرت پینچ در فشار کاری ۰/۶-۰/۹ torr مطلوب بود اما در فشارهای بالاتر به دلیل اتلاف بخش زیادی از انرژی در تشکیل تخلیه‌ی سطحی/ لغزشی بر روی عایق پیرکس، افت زیادی را متحمل شد. هندسه‌ی الکترودهای به کار رفته در این آزمایش‌ها و مشخصه‌های آن در جدول ۲ جمع‌بندی شده است.

۶.۳ ضریب‌های طراحی دستگاه

محاسبه‌ی ضریب‌های طراحی دستگاه و مشاهده‌ی ارتباط آن‌ها با تغییر در پارامترهای فیزیکی دستگاه از جمله فرایندهای صحت‌سنجی طراحی به شمار می‌رود. بدین‌منظور برای هر ساختار الکترودی، تحت شرایط کاری فشار گاز آرگون از ۰/۶-۱/۵ torr و تغییر سطح ولتاژ بارکردن از ۸/۳-۹/۳kV، دامنه‌ی تیز قله‌ی ولتاژ اندازه‌گیری و مقدار ضریب سرعت با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد [۲۲]:



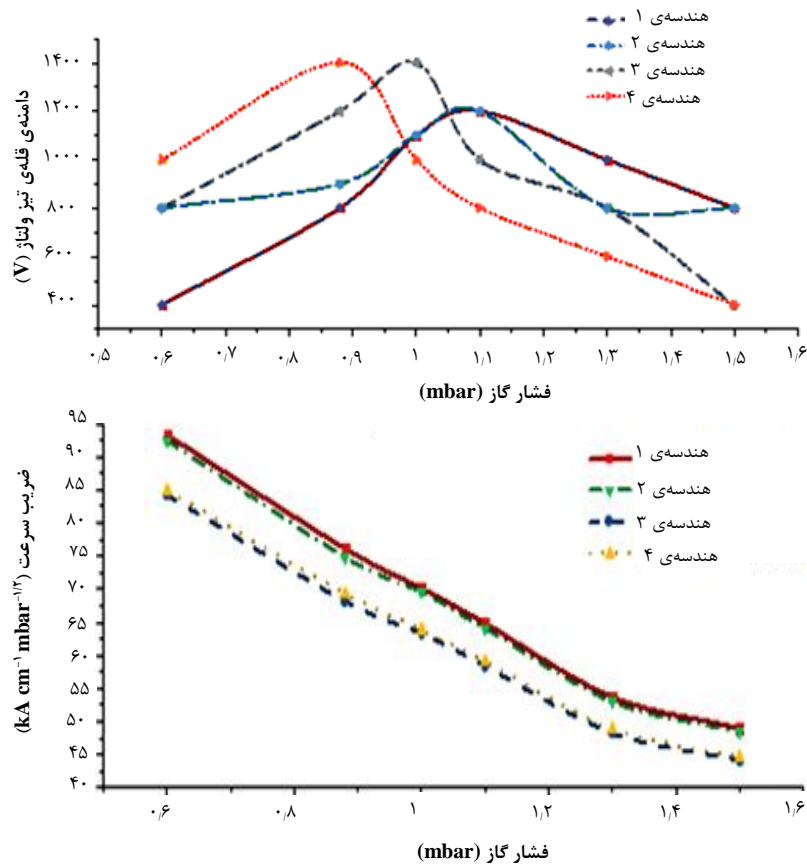
شکل ۱۳. طراحی مربوط به هندسه‌ی سوم الکترودها و تصویر پینچ در فشار گاز آرگون ۰٫۹ torr و ولتاژ ۸٫۵ kV.



شکل ۱۴. طراحی مربوط به هندسه‌ی چهارم الکترودها و تصویر پینچ در فشار گاز آرگون ۱ torr و ولتاژ ۸٫۷ kV.

جدول ۲. مشخصه‌های هندسه‌های مختلف استفاده شده در آزمایش‌ها

کاتد			آند			هندسه‌ی الکترودها	
جنس	شعاع داخلی	شکل	جنس	شعاع	طول مؤثر	شکل	
فولاد زنگ نزن	۹ mm	استونه‌ای	فولاد زنگ نزن	۱٫۲۵ mm	۱٫۵ mm	استونه‌ای	۱
مس	۹ mm	قفس سنجابی	فولاد زنگ نزن	۱٫۲۵ mm	۱٫۵ mm	استونه‌ای	۲
مس	۹ mm	قفس سنجابی	فولاد زنگ نزن	۱٫۱۰ mm	۲٫۵ mm	مخروطی	۳
آلومینیم	۷٫۵ mm	قفس سنجابی	فولاد زنگ نزن	۱٫۱۰ mm	۲٫۵ mm	مخروطی	۴



شکل ۱۵. بیشینه دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ مربوط به علامت ولتاژ تخلیه و ضریب سرعت محاسبه شده توسط علامت جریان تخلیه برای هندسه‌های مختلف الکترودها.

دستگاه در آن شرایط دارای عملکرد پایدار در تولید پینچ‌های قوی و تکرارپذیر است، مشخص نمود.

در شکل ۱۶ نمونه‌ای از یکپارچه‌سازی نتیجه‌های تجربی برای محاسبه‌ی دامنه‌ی قله‌ی تیز در ولتاژ کاری ۸٫۹ kV و محدوده‌ی فشار گاز ۰٫۹-۱٫۵ mbar نشان داده شده است. این نمودار باید برای مقادیر مختلف ولتاژ از ۸٫۳-۹٫۳ kV رسم و دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ برای هر فشار کاری مشخص شود. سپس، با جای‌گذاری مقدار تعیین شده در رابطه‌ی ۲، حساسیت قله‌ی تیز ولتاژ به عنوان معیاری از بازده پینچ دستگاه حساب شود. در این صورت، با رسم مشخصه‌ی حساسیت (مقادیرهای حساسیت بر حسب فشارهای کاری مختلف گاز) می‌توان اثر تغییرات پارامترهای عملکردی دستگاه بر بازده پینچ را مطالعه کرد. شکل ۱۷ حساسیت قله‌ی تیز ولتاژ را برای هندسه‌ی سوم نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ در دستگاه‌های پلاسمای کانونی مینیاتوری به طور قابل توجهی کم‌تر از دستگاه‌های انرژي- بالا است، باید مشخص شود که تغییرات پارامترهای عملکردی دستگاه تا چه حدی روی بازده‌ی پینچ پلازما تأثیر می‌گذارد. برای این منظور می‌توان از پارامتری تحت عنوان حساسیت پینچ استفاده کرد. طبق تعریف حساسیت قله‌ی تیز ولتاژ (V_{spike}) به فشارهای مختلف گاز (p) در شرایط کاری با مقادیر مختلف ولتاژ بارگیری (V_{charge}) به صورت زیر تعریف می‌شود:

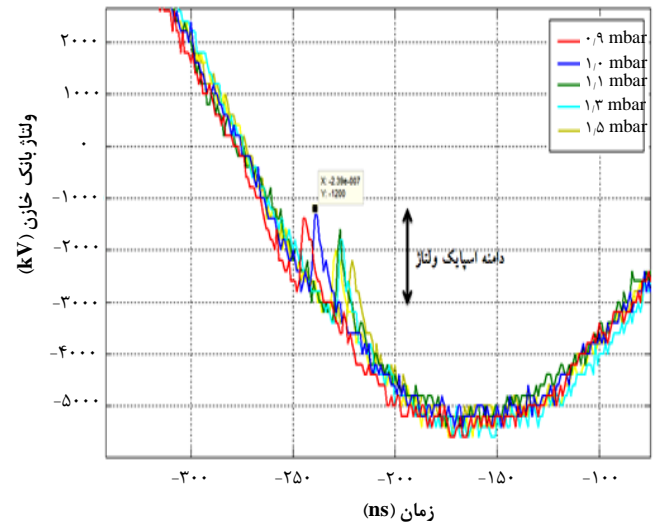
$$S_{V_{charge}} = \frac{\Delta V_{spike} / V_{spike}}{\Delta P / P} \quad (2)$$

با استفاده از محاسبه‌ی حساسیت می‌توان هم مقادیرهای بهینه‌ی پارامترهای عملکردی دستگاه و هم مقدارهایی که

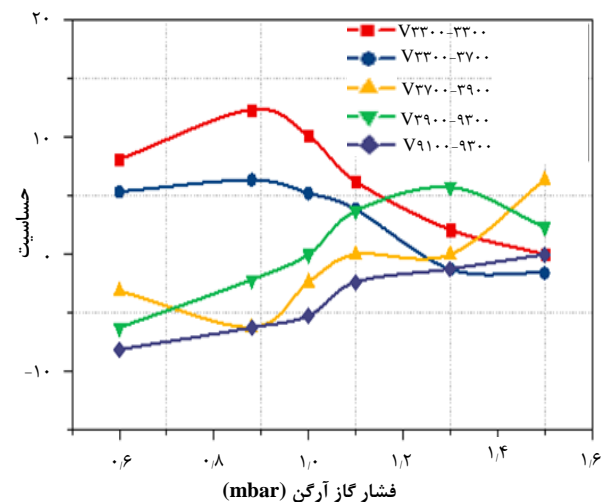
۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن ارایه‌ی مشخصه‌های عملکردی و فنی یک دستگاه پلاسمای کانونی J۳، مشاهده‌های مربوط به تشکیل ستون پینچ به صورت علامت‌های الکتریکی و تصویر دیدگانی ارایه شد. همچنین، عملکرد پایدار دستگاه در تولید پینچ‌های قوی و تکرارپذیر در دو شیوه‌ی تک شات و شیوه‌ی تخلیه‌ی تکراری مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد صحیح و پایدار تخلیه‌ی تکراری دستگاه در دو بسامد ۰٫۵Hz و ۵Hz نشان داده شد، به طوری که تغییر در شرایط خلأ دستگاه در طول ۹۰s عملکرد آن تقریباً ناچیز بود. همچنین، اثر وقوع نقص در تخلیه در طریقه‌ی تخلیه تکراری نیز مورد بحث قرار گرفت و عامل‌های ایجادکننده‌ی آن مشخص شدند. در ادامه، به بررسی مقدار بازده دستگاه و قدرت پینچ برای چهار هندسه‌ی الکتروود با استفاده از نتیجه‌های آزمایش و محاسبه‌های نظری پرداخته شد. مشخص شد که هندسه‌ی مخروطی آند ضمن وسیع نمودن محدوده‌ی فشار کاری گاز از ۰٫۶-۱٫۵ torr، بیش‌ترین دامنه‌ی قله‌ی تیز ولتاژ را نیز تولید کرد. در انتها نیز ضریب‌های مهم طراحی دستگاه برای الکتروود بهینه و به ازای فشارهای ۰٫۸، ۱٫۱، ۱٫۳، و ۱٫۵ torr گاز آرگون و ولتاژهای باردارکردن ۸٫۳، ۸٫۵، ۸٫۷، ۸٫۹، ۹٫۱، و ۹٫۳ kV و محاسبه شد. مشخص شد بهترین شرایط فشرده‌سازی ستون پلاسمای در این دستگاه در فشار و ولتاژ کاری بهینه‌ی به ترتیب ۰٫۸۸±۰٫۸ mbar و ۸٫۵kV-۸٫۳ است و در صورت ملاک بودن عملکرد پایدار دستگاه برای تولید پینچ‌های قوی و تکرارپذیر، محدوده‌ی ولتاژ کاری، ۸٫۵kV-۸٫۷ و فشار گاز، ۰٫۶-۱٫۱ mbar تعیین شد.

با دقت در منحنی‌های شکل ۱۷ می‌بینیم که بهترین شرایط فشرده‌سازی ستون پلاسمای در این دستگاه در فشار و ولتاژ کاری بهینه به ترتیب ۰٫۸۸±۰٫۸ mbar و ۸٫۵kV-۸٫۳ است. اما در صورتی که ملاک تعیین محدوده‌ی پارامترها، دستیابی به حداقل تغییرات در عملکرد پایدار دستگاه برای تولید پینچ‌های قوی و تکرارپذیر باشد، محدوده‌ی ولتاژ کاری ۸٫۷kV-۸٫۵ و فشار گاز ۰٫۶-۱٫۱ mbar خواهند بود.



شکل ۱۶. یکپارچه‌سازی نتیجه‌های تجربی برای محاسبه‌ی دامنه قله‌ی تیز برای ولتاژ کاری ۸٫۹ kV و محدوده‌ی فشار ۰٫۹-۱٫۵ mbar.



شکل ۱۷. مشخصه‌ی حساسیت قله‌ی تیز ولتاژ (حساسیت بر حسب فشار گاز با تغییر در مقدار ولتاژ شارژ).

1. Patricio, et al. *Pinch evidence in a fast and small plasma focus of only tens of joules*, Plasma Sources Science and Technology, **13**, 2, 329 (2004).
2. S. M. Hassan, et al. *Pinching evidences in a miniature plasma focus with fast pseudospark switch*, Plasma Sources Science and Technology, **15**, 4, 614 (2006).
3. M. Barbaglia, et al. *Experimental study of the hard x-ray emissions in a plasma focus of hundreds of Joules*, Plasma Physics and Controlled Fusion, **51**, 4, 045001 (2009).
4. S. M. Hassan, et al. in: *IEEE 34th International Conference on Plasma Science*, (IEEE, NM, USA, 2007), pp. 17-22.
5. L. Soto, et al, *Demonstration of neutron production in a table-top pinch plasma focus device operating at only tens of joules*, Journal of Physics D: Applied Physics, **41**, 20, 205215 (2008).
6. R. K. Rout, et al. in: *Sixteenth Annual Conference of Indian Nuclear Society: science behind nuclear technology*, (Bhabha Atomic Research Centre, India, 2005), pp.128-136.
7. R. Verma, et al. *Compact sub-kilojoule range fast miniature plasma focus as portable neutron source*, Plasma Sources Science and Technology, **17**, 4, 045020 (2008).
8. N. Bennett, et al. *Development of the dense plasma focus for short-pulse applications*. Physics of Plasmas, **24**, 1, 012702 (2017).
9. R. Verma, et al. *Miniature plasma focus device as a compact hard X-ray source for fast radiography applications*, IEEE Transactions on Plasma Science, **38**, 657 (2010).
10. M. Milanese, R. Moroso, and J. Pouzo, *DD neutron yield in the 125 J dense plasma focus Nanofocus*, The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics, **27**, 1, 77 (2003).
11. R. K. Rout, et al. *Battery powered tabletop pulsed neutron source based on a sealed miniature plasma focus device*, Journal of Physics D: Applied Physics, **41**, 20, 205211 (2008).
12. R. Verma, Ph.D thesis, NIE University, (2010).
13. H. Jafari, and M. Habibi, *Simulation of electrical discharge in a 3.6 Joule miniature plasma focus device using SIMULINK*, The European Physical Journal D, **68**, 8, 1-11 (2014).
14. S. Lee, and A. Serban, *Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch*, IEEE Transactions on Plasma Science, **24**, 3, 1101 (1996).
15. L. Soto, et al. *Research on pinch plasma focus devices of hundred of kilojoules to tens of joules*, Brazilian journal of physics, **34**, 1814 (2004).
16. H. Jafari, M. Habibi, and G. R. Etaati, *Design and Construction of a Very Low Energy Plasma Focus, Operating at Repetitive Discharge Mode and Pinching Evidences*, Physics Letters A, **381**, 34, 2813 (2017).
17. H. Jafari, M. Habibi, and H. R. Aali Vaneghi, *High-Voltage Pulsed-Power Supply Operating at Repetitive Discharge Mode for Driving Very Small Plasma Focus Devices*, IEEE Transactions on Plasma Science, **99**, 1 (2015).
18. S. Lee, et al. *High rep rate high performance plasma focus as a powerful radiation source*, IEEE Transactions on Plasma Science, **26**, 4, 1119 (1998).
19. S. Z. Sheykhrajeh, Ph.D thesis, Queensland University of Technology, (2011).
20. A. Bernard, et al. *Scientific status of plasma focus research*, Journal of Moscow Physical Society, **8**, 93 (1998).
21. S. Lee, et al. *A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion*, American Journal of Physics, **56**, 1, 62 (1988).
22. S. Lee, and S. H. Saw, in: *Joint ICTP-IAEA Workshop on Dense Magnetized Plasma and Plasma Diagnostics*, (ICTP, Trieste, Italy, 2010), pp.377-384.
23. L. Soto, et al. *Nanofocus: an ultra-miniature dense pinch plasma focus device with submillimetric anode operating at 0.1 J*, Plasma Sources Science and Technology, **18**, 1, 015007 (2009).
24. T. Zhang, et al. *Drive Parameter as a Design Consideration for Mather and Filippov Types of Plasma Focus*, IEEE Transactions on Plasma Science, **34**, 5, 2356 (2006).