

بررسی اثر انرژی سیستم، فشار و نشتی جریان بر زمان پینچ در دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF1

محمد نوروزی - فریدون عباسی دوانی* - بابک شیرانی

دانشکده مهندسی هسته ای دانشگاه شهید بهشتی گروه کاربرد پروتوها

چکیده:

در این مقاله اثر انرژی بانک خازنی، فشار گاز تزریق شده به سیستم ونشتی جریان بر زمان پینچ و سرعت لایه پلاسمای^۷ در فاز محوری در دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF1 برای دو گاز آرگون و نئون بررسی شده است. نتایج تجربی و معادلات نظری با هم مقایسه شده اند. آزمایشهای تجربی نشان می دهند که کاهش انرژی سیستم و افزایش فشار، وقوع پینچ را به تأخیر می اندازند. همچنین در بررسی تاثیر نوع گاز و آلودگی ها هرچند انتظار داشتیم که در چگالی جرمی یکسان برای دو گاز شرایط نسبتاً یکسانی مشاهده شود، اما از آنجا که آزمایشات مربوط به نئون، بعد از ۱۰۰ بار تخلیه انجام شد، آلودگی ها، نشتی جریان را بالا برده و پینچ بهینه در فشار بالاتری نسبت به فشار مورد انتظار رخ داد.

۱. مقدمه:

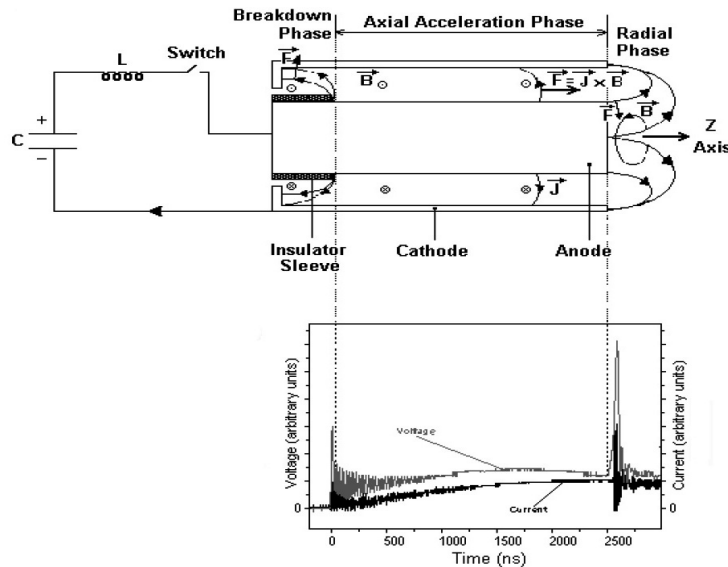
دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان یک مولد پالسی توانمند در تولید نوترون، ایکس، الکترون و یون شناخته شده است [۱]. دستگاه پلاسمای کانونی، در اوایل دهه ۱۹۶۰، به طور مستقل توسط مدر در آمریکا [۱] و فیلیپوف در اتحاد جماهیر شوروی اختراع شد [۲]. دستگاه تشکیل شده است از یک بانک خازنی، کلید ولتاژ و جریان بالا (گاف جرقه^۸)، محفظه تخلیه، عایق و الکترودها. اصول کار آن بدین صورت است که انرژی بانک خازنی از طریق یک کلید با قابلیت عبور جریان و ولتاژ بالا به الکترودهای درون محفظه که توسط یک عایق از هم جدا شده اند فرستاده می شود. جریان عبوری از درون آند، زمانی که به سر عایق می رسد باعث تخلیه الکتریکی در درون گاز شده و گاز درون محفظه یونیزه خواهد شد (فاز شکست)، گاز یونیزه حاصل را پلاسمای گویند. در شکل ۱ ساختار دستگاه و فازهایی که متعاقب فاز شکست در آن رخ می دهند و همچنین سیگنال جریان و ولتاژ مربوطه نشان داده شده است. همانطور که می دانیم در دستگاه پلاسمای کانونی رابطه مستقیمی بین بهره نوترونی و ایکس با چگونگی رخداد پینچ وجود دارد. توسعه

⁷ plasma sheath

⁸ spark gap

Email: mohamadnorozi12@gmail.com & fabbasi@mail.sbu.ac.ir

تخلیه جریان در یک دستگاه پلاسمای کانونی اساساً بستگی به شرایط اولیه گاز [۴،۳] و پارامترهای مربوط به الکترودها [۶،۵]، عایق [۸،۷،۴،۳] و قطبیت الکترودها دارد. مقاله حاضر به بررسی تجربی اثر دو عامل مهم در زمان و چگونگی پینچ یعنی فشار و ولتاژ کاری (انرژی) برای گازهای آرگون و نئون و همچنین اثر جریان نشتی در زمان پینچ می‌پردازد.



شکل ۱. الف. دینامیک پوشینه جریان^۹ در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر. (ب) سیگنال جریان و ولتاژ متناظر با آن

۲. مشخصات دستگاه و ابزار تشخیصی

دستگاه SBUMTPF1 یک پلاسمای کانونی از نوع مدر می‌باشد که در دانشگاه شهید بهشتی طراحی و ساخته شده است. مشخصات دستگاه بدین شرح است، عایقی از جنس شیشه با طول مؤثر ۴ cm و ضخامت ۲ mm، آندی مسی با طول مؤثر ۱۲ cm و قطر ۲۱ mm و کاتد نیز شامل ۱۲ میله مسی با طول ۱۱ cm و قطر ۱۲ mm که فاصله مرکز آنها از مرکز آند برابر ۴۰ mm در نظر گرفته شد. سوئیچ مورد استفاده برای انتقال انرژی از خازن به الکترودها یک گاف جرقه از نوع تریگاترون است. اندوکتانس کل سیستم برابر ۱۹۰ nH، خازن مورد استفاده یک خازن هم محور استوانه‌ای با ظرفیت ۸/۶ μF می‌باشد. اندازه‌گیری سیگنال جریان و مشتق آن توسط پیچ‌روگفسکی انجام گردید. ثبت و تحلیل سیگنال‌ها توسط یک اسیلوسکوپ ۲۰۰ مگاهرتز و نرم‌افزارهای Matlab و Origin انجام پذیرفت.

^۹ Current sheath

۳. معادلات حاکم بر سیستم

با استفاده از معادلات الکترو مغناطیس و ترمو دینامیک زمان رخداد فاز محوری و فاز تراکم شعاعی توسط روابط زیر بیان خواهد شد [۹-۱۱]

$$t_{ax} = \left[\frac{4\pi^2 (c^2 - 1)}{\mu \ln c} \right]^{1/2} \frac{\sqrt{f_m} z_0 \sqrt{\rho}}{f_c (I/a)} \quad (۱) \text{ زمان رخ داد فاز محوری}$$

$$t_r = \frac{4\pi}{\sqrt{\mu(\gamma+1)}} \frac{\sqrt{f_{mr}} a \sqrt{\rho}}{f_c I/a} \quad (۲) \text{ زمان متناظر با فاز شعاعی برابر}$$

$$c_a = z_0 / t_{ax} = \frac{(I/a)}{\rho^{1/2}} g_a \quad (۳) \text{ سرعت فاز محوری برابر}$$

$$c_r = a / t_r = \frac{(I/a)}{\rho^{1/2}} g_r \quad (۴) \text{ سرعت فاز شعاعی برابر}$$

معادلات بالا معادلات تصحیح شده موسوم به معادلات Lee هستند. در معادلات ارائه شده توسط Lee جمله $(\sqrt{f_m} / f_c)$ در زمان فاز محوری و $(\sqrt{f_{mr}} / f_c)$ در فاز شعاعی لحاظ نشده است. در این مقاله لزوم وجود این جمله تصحیحی و اثر آن به عنوان معیاری از جریان نشتی نیز بررسی می شود.

معادلات حاکم بر زمان رخداد فاز محوری و فاز شعاعی نشان می دهند که این دو زمان با افزایش چگالی (یا معادل آن فشار) افزایش می یابند. به عبارت دیگر سرعت این فازها کاهش یافته و افزایش ولتاژ باعث تسریع در زمان وقوع این فازها خواهد شد $(t \propto 1/I, I \propto V)$. بررسی اثر جمله تصحیحی $(\sqrt{f_m} / f_c)$ در دوگاز آرگون و نئون با ثابت گرفتن اثر لختی جرمی دو گاز (در اینجا چگالی گاز (ρ)) انجام پذیرفت، و در صورت یکسانی انرژی و فشار تنها متغیر $(\sqrt{f_m} / f_c)$ خواهد بود که در آن f_m "بهره روبش" یا کسری از جرم گاز که وارد ناحیه پلاسما می شود و f_c نشانگر کسری از جریان تخلیه است که از لایه جریان عبور می کند، که این کسر معیاری از نشتی جریان می باشد. از آنجا که یکی از مهمترین عوامل نشتی جریان، آلودگی های روی سطح عایق است، بررسی ها نشان داد که آلودگی روی سطح عایق سبب افزایش جریان نشتی و بالا رفتن فشار بهینه پینچ شدند.

۴. آزمایش ها و تحلیل داده ها

یکی از مفیدترین اطلاعات قابل اندازه گیری در دستگاه پلاسما کانونی اندازه گیری جریان و مشتق آن است که توسط پیچچه روگفسکی انجام می پذیرد. در شکل ۱ دلبه تیز^{۱۱} دیده می شوند یکی در ابتدای فاز شکست و دیگری در انتهای فاز شتاب محوری (زمان وقوع پینچ). زمان بین این دلبه تیز را زمان پینچ می

¹⁰ sweeping efficiency

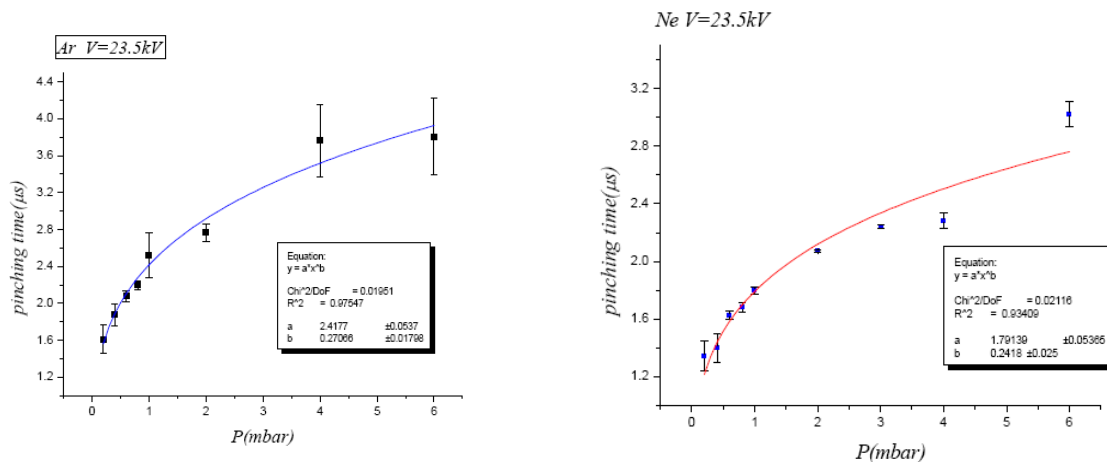
¹¹ spike

نامیم. به منظور تعیین شرایط کاری بهینه برای هر گاز در هر یک از شرایط مشخص ولتاژ و فشار، آزمایشها ۸ بار تکرار شد و میانگین اطلاعات حاصل در شکل های ۲ و ۳ رسم شده اند. آزمایشهای انجام شده به شرح زیر تشریح می شوند:

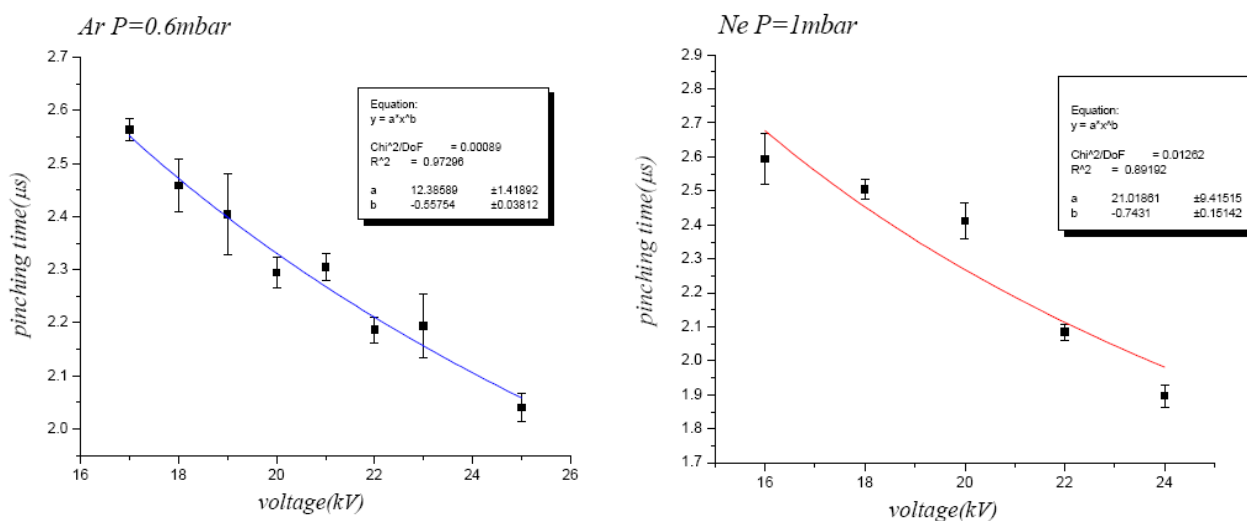
الف) ابتدا در ولتاژ ۲۳/۵ کیلو ولت که دستگاه نیز بر پایه این ولتاژ طراحی شده، در بازه فشار بین ۰/۰۸ تا ۶ میلی بار انرژی خازنی را تخلیه کردیم. قبل از فشار ۰/۲ میلی بار اثری از پینچ مشاهده نشد و در فشارهای بیشتر از ۴mbar پینچ بسیار ضعیفی تشکیل شد (به خصوص برای آرگون به دلیل پایین بودن دمای پلاسما در فشارهای بالا). لازم به ذکر است که برای ولتاژهای دیگر نیز این آزمایش انجام گرفت و نتایج مشابهی حاصل گشت. ما در این مقاله تنها منحنی های مربوط به ولتاژ ۲۳/۵kV را ارائه می کنیم.

از ۲ منحنی مربوط به شکل ۲ افزایش زمان پینچ را همگام با افزایش فشار در هر دو گاز می بینیم، از منحنی های برازش در می یابیم که مقدار b در رابطه $y = ax^b$ تقریباً برای دو گاز برابر و حدود ۰/۲۵ می باشد اما مقدار a به طور محسوسی در آرگون بیشتر از نئون می باشد که علت آن ناشی از سنگینی بیشتر جرم آرگون نسبت به نئون در یک فشار ثابت می باشد و در نتیجه افزایش لختی ناشی از جرم (ρ) را خواهیم داشت. نکته ای که باید در اینجا اشاره شود بازه فشاری است که سیستم پینچ می دهد، آزمایشات نشان می دهد که حد بالای این بازه برای آرگون کمتر از نئون است (حداکثر فشاری که پینچ مناسب در آرگون مشاهده شد ۲ میلی بار و برای نئون ۴ میلی بار بود)، چرا که با توجه به بالاتر بودن وزن اتمی آرگون، در یک انرژی ثابت پینچ برای این گاز در فشارهای پایین تری رخ می دهد و در فشارهای بالا به علت بالا بودن چگالی جرمی و پایین آمدن دما، یونیزاسیون به اندازه کافی رخ نداده و پینچ به شدت ضعیف خواهد شد.

ب) در آزمایشی دیگر اثر تغییر انرژی و جمله تصحیحی بر زمان پینچ بررسی گردید. این آزمایش نیز برای فشارهای مختلف انجام گرفت در اینجا منحنی مربوط به فشار ۰/۶mbar برای آرگون و ۱mbar برای نئون ارائه می شود، نکته مهم در انتخاب این دو فشار برابری چگالی جرمی دو گاز است ($P_{Ar}A_{Ar} = P_{Ne}A_{Ne}$) که A عدد جرمی و P فشار گاز است) تا با توجه به ثابت بودن پارامترهای دیگر (هندسه و انرژی) در کنار ثابت بودن چگالی جرمی انتظار داریم دینامیک دستگاه برای دو گاز در فاز محوری یکسان باشد، اما از آنجا که آزمایشهای مربوط به نئون بعد از ۱۰۰ ها بار تخلیه در آرگون انجام می شد، آلودگی های روی سطح عایق تاثیر بسزایی بر دینامیک دستگاه داشتند. هر ۲ منحنی شکل ۳ نشان می دهند که افزایش ولتاژ کاهش زمان پینچ را سبب می شود. یعنی با افزایش ولتاژ (انرژی) سرعت پوشینه افزایش می یابد و پلاسما در زمان کمتری به بالای آند می رسد.



شکل ۲. رابطه زمان پینچ و فشار برای دو گاز آرگون و نئون



شکل ۳ منحنی تغییرات زمان پینچ بر حسب تغییرات ولتاژ

از آنجا که پینچ بهینه در آرگون در ولتاژ ۲۳ kV و فشار ۰/۶ mbar بدست آمد، انتظار داشتیم در انرژی مزبور و فشار ۱ mbar نئون نیز پینچ بهینه مشاهده شود، اما پینچ در نئون برای این انرژی قبل از قله جریان روی داد، و پینچ بهینه برای فشار ۱ میلی بار در ولتاژ ۱۹ kV مشاهده شد. حتی در بسیاری از سیگنالهای مربوط به نئون بروز چندین پینچ مشاهده شد. رخداد چندین پینچ سبب کاهش لختی جرمی اولین لایه پلاسما می تولیدی می شود (یعنی کاهش مقدار f_m) و از آنجا که نئون در انرژی پایین تری نسبت به آرگون کاملاً یونیزه می شود، لذا انرژی که به ستون پلاسما وارد می شود تغییر محسوسی نکرده و با توجه

به پارامتر حرکت انتظار داریم همزمانی پینچ و بیشینه جریان در فشارهای بالاتر اتفاق افتد و در فشار مزبور این همزمانی در انرژی‌های پایتتر مشاهده شود. مشاهدات تجربی نیز این فرضیه را تأیید می‌کند.

۵. نتیجه گیری

در این کار تلاش شد تا با بررسی اثر ولتاژ و فشار درستی عملکرد دستگاه SBUMTPF1 بررسی گردد. نتایج تجربی تطبیق خوبی با معادلات نظری و دید فیزیکی حاکم بر دستگاه داشت. همچنین نتایج تجربی حاکی از آن است که آلودگی‌های روی سطح عایق عامل مهمی در زمان وقوع پینچ خواهد بود، حتی با یکسان گرفتن تمام شرایط کاری حاکم بر دستگاه، گازهای مختلف زمانهای پینچ متفاوتی را نتیجه می‌دهند که این اختلاف ناشی از متفاوت بودن انرژی یونیزاسیون ونشتی جریان در گازهای مختلف است. اثر نشتی جریان توسط جمله تصحیحی در روابط Lee بیان می‌شود، لذا لزوم لحاظ کردن این جمله در محاسبات مربوط به دستگاه پلاسمای کانونی لازم به نظر می‌رسد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که آلودگی‌های روی سطح عایق سبب بروز چندین پینچ می‌شود، و همانطور که می‌دانیم تکین نبودن پینچ بهره ایکس و نوترون را به شدت کاهش خواهد داد، لذا لزوم از بین بردن این آلودگی‌ها در سیستم از طریق استفاده از عایق جدید و استفاده از الکترودهایی با میزان سایش و خوردگی کم لازم به نظر می‌رسد.

۶. مراجع

- [1] J.W. Mather, *Phys. Fluids*, 8, 366 (1965)
- [2] N. V. Filippov, T. I. Filippova and V. P. Vinogradov, *Nucl. Fus. Suppl.*, 2, 577(1962).
- [3] A. Donges, G. Herziger, H. Krompholz, *Phys. Lett.*, 76A, 391 (1980).
- [4] H. Krompholz, W. Neff, F. Ruhl, K., *Phys. Lett.*, 77A, 246 (1980).
- [5] J. Nowikowski and Z. Jankowicz, in *Proc. 9th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys.*, Oxford, Vol. 2, p. 542 (1979).
- [6] M. Borowiecki and S. Czekaj, in *Proc. of 4th Int. Workshop on Plasma Focus and Z-Pinch Res.*, Warsaw, p. 86 (1985).
- [7] W. Kies, *Plasma Phys. Contr. Fusion*, 28, 1645 (1986).
- [8] J. N. Feugeas, *J. Appl. Phys.*, 66, 3467 (1989).
- [9] S. Lee and A. Serban, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 24, 3, 1101 (1996).
- [10] S. Lee, *Plasma Phys.*, 25, 571 (1983).
- [11] S. Lee, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 16, 2463 (1983).