



## بررسی سرعت حرکت لایه‌ی جریان در یک دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی ۲/۲ کیلوژول

محمد امیر حمزه تفرشی\*، داریوش رستمی فرد، علی نصیری

پژوهشکده‌ی پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

**چکیده:** این مقاله پس از معرفی اجمالی دستگاه پلاسمای کانونی ۱-MTPF، نمونه‌هایی از داده‌های تجربی آن را ارائه می‌دهد. داده‌ها نشان می‌دهند که می‌توان با انتخاب فشار گاز و ولتاژ تخلیه‌ی مناسب، شرایطی را فراهم کرد تا تنگش پلاسما در محدوده‌ی خاصی از زمان اتفاق بیفتد. علاوه بر این، تأثیر فشار گاز و ولتاژ تخلیه بر سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان نیز مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد که در صورت استفاده از گاز آرگون، بیشینه‌ی سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان در حدود  $5 \text{ cm } \mu\text{s}^{-1}$  است که می‌تواند با ترکیب‌های مختلفی از فشار گاز و ولتاژ تخلیه به دست آید. با استفاده از مفهوم ضریب سرعت، سرعت حرکت لایه‌ی جریان در لحظه‌ی تنگش نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در دو آزمایش مختلف با فشار گاز و ولتاژ تخلیه‌ی متفاوت، یکسان بودن زمان تنگش حدوداً بیان‌گر یکسان بودن سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان است.

**کلیدواژه‌ها:** پلاسمای کانونی، زمان تنگش، لایه‌ی جریان، ضریب سرعت

## Study of the Current Sheath Velocity in a 2.2 kJ Plasma Focus Device

M.A. Tafreshi\*, D. Rostamifard, A. Nasiri

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran-Iran

**Abstract:** In this article, after a brief introduction of *MTPF-I* plasma focus device, some of the related experimental data are presented. These data show that it is possible to select the proper gas pressure and discharge voltage in order to have a specified pinch time interval. In addition, the effects of gas pressure and discharge voltage on the current sheath's mean velocity have also been studied. This study showed that, in the case of argon, the maximum value of the current sheath's mean velocity is about  $5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ , where it can be obtained under various combinations of the pressures and discharge voltages. By using the speed factor concept, the velocity of the current sheath at the pinch time was also examined. It was determined that in two separate experiments with different gas pressures and discharge voltages, the equality of the pinch times means the approximate equality of the current sheath radial velocities.

**Keywords:** Plasma focus, Pinch time, Current Sheath, Speed factor

**۱. مقدمه**

دستگاه‌های پلاسمای کانونی می‌توانند گاز را یونیده و تبدیل به پلازما نمایند و سپس پلازما را تحت فشار قرار داده و آن را در یک نقطه متمرکز و یا کانونی کنند. بنابراین می‌توان گفت که این‌گونه دستگاه‌ها منبع‌های تولید تپ‌هایی از پلاسمای فشرده (و یا کانونی) شده‌اند. دمای این پلازما در گستره‌ی keV، چگالی آن در حدود  $10^{26} m^{-3}$  و حجم آن در حدود چند  $mm^3$  است.

مهم‌ترین قسمت‌های یک دستگاه پلاسمای کانونی، آند، کاتد، عایق و منبع انرژی آن است که معمولاً یک بانک خازنی با خودالقایی نسبتاً کم است. برای انجام تخلیه‌ی الکتریکی، ابتدا محفظه‌ی خلأ از گازهای مزاحم تخلیه و یک گاز مناسب به آن تزریق می‌شود. پس از آن یک بانک خازن تا پتانسیل مناسب شارژ شده و با استفاده از یک کلید اتصال سریع الکتریکی، اختلاف پتانسیل قطب‌های بانک خازن به آند و کاتد دستگاه وصل و عمل تخلیه‌ی الکتریکی انجام می‌شود. در شروع عمل تخلیه، اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد، باعث ایجاد یک میدان الکتریکی در فضای بین آند و کاتد شده و به این ترتیب تخلیه‌ی الکتریکی از روی سطح عایق شروع و یک لایه جریان در نزدیک سطح عایق تشکیل می‌شود. وجود این لایه باعث پیدایش یک میدان مغناطیسی سمتی و بنابراین پیدایش نیروی لورنتس می‌شود. این نیرو بر لایه‌ی جریان و پلاسمای پیش روی آن، اثر گذاشته و باعث متراکم شدن پلازما می‌شود.

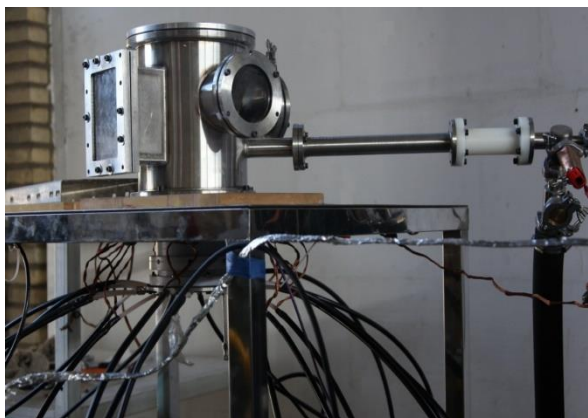
به این ترتیب، حرکت لایه‌ی جریان و پلاسمای پیش روی آن به سمت محور تقارن شروع می‌شود. این حرکت نهایتاً منجر به پیدایش ستونی کوچک از پلاسمای تنگیده شده بر روی محور تقارن می‌شود. به علت بی‌ثباتی‌های پلازما، پس از مدت زمان کوتاهی (حدود ۱۰۰ نانوثانیه)، این ستون پلاسمای فشرده (یا کانونی) شده از هم می‌پاشد. همان‌طور که پیش از این گفته شد، هنگامی که پلازما تحت تأثیر بیش‌ترین فشار از ناحیه‌ی میدان مغناطیسی به شدت متراکم شده است، چگالی و دمای آن تا حدی زیاد می‌شود که می‌تواند باعث تولید چشمگیر پرتوهای پُرانرژی از قبیل ایکس نرم، ایکس سخت، و نوترون شود [۱-۴]. عامل اصلی تولید پرتو ایکس نرم، برانگیختگی و واانگیختگی اتم‌های گاز و یا اتم‌های آند است. پرتو ایکس سخت نیز عمدتاً

به علت برخورد الکترون‌های پُرانرژی با سطح آند و تحت اثر پدیده‌ی تابش ترمزی، گسیل می‌شود. گسیل نوترون نیز حاصل واکنش‌های گداخت هسته‌ای است.

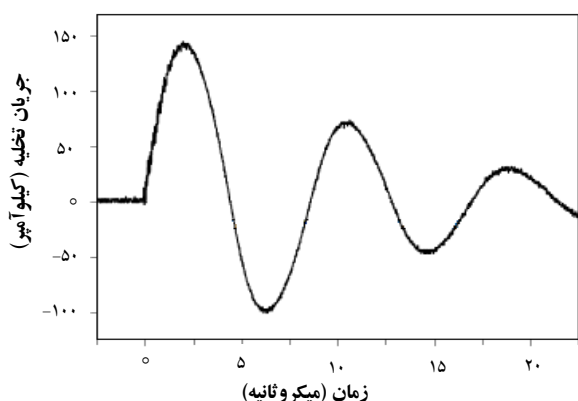
اولین مدل از دستگاه‌های پلاسمای کانونی، در سال ۱۹۶۲ در کشور روسیه ساخته شد. این مدل، بعدها به نام سازنده آن به عنوان مدل فیلیپوف [۵] معروف شد. در سال ۱۹۶۵، در آمریکا، مدل دیگری مطرح شد که آن نیز بعدها به نام سازنده‌اش به مدل مدر [۶] معروف شد. با وجود تفاوت‌های ساختاری، در مرحله‌ی نهایی فشرده‌سازی پلازما، پدیده‌ی تنگیدگی پلازما در این دو مدل تا حدود زیادی مشابه است. زمینه‌های اصلی تشابه عبارت‌اند از دینامیک فاز نهایی فرایند کانونی شدن پلازما و نیز دینامیک تولید و گسیل پرتوها. شاخص‌های دستگاه‌های پلاسمای کانونی از قبیل تمیزی از نظر مسائل زیست محیطی، آسانی نسبی طراحی، قیمت نسبتاً پایین، گسیل پرتوهای با شار نسبتاً بالا، زمان نسبتاً کم گسیل پرتو (در محدوده‌ی چند ده نانوثانیه)، و کوچکی نسبی چشمه‌ی گسیل پرتو، باعث جذاب شدن این دستگاه‌ها برای پژوهش‌گران زیادی شده است [۷]. بعضی از مهم‌ترین زمینه‌های کاربردی این دستگاه‌ها عبارت‌اند از لایه‌نشانی [۸]، فشرده‌سازی مواد [۹] و پرتونگاری فوق سریع [۱۰، ۱۱]. پژوهش‌های نسبتاً زیادی نیز در زمینه‌ی بررسی‌های نظری و تجربی در حال انجام است که هدف اصلی آن‌ها طراحی و ساخت دستگاه‌های بهینه است [۱۲-۱۶]. پس از مرور کوتاه مقوله‌ی کانونی شدن پلازما، دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-۱ به اختصار معرفی و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی آن ارایه می‌شوند.

**۲. معرفی اجمالی دستگاه MTPF-۱**

دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-۱ دستگاهی از نوع مدر است که آند آن به صورت یک استوانه‌ی توپر احاطه شده به وسیله‌ی ۱۲ میله‌ی کاتد است. هم آند و هم میله‌های کاتد، از جنس مس هستند. ارتفاع مؤثر میله‌های کاتد ۱۴/۵ cm و فاصله‌ی بین آند و کاتد ۲/۷ cm است. عایق دستگاه، استوانه‌ای با ارتفاع مفید ۵ cm و به ضخامت ۰/۲۵ cm از جنس شیشه‌ی پیرکس است. شکل ۱، طرح‌واره‌ای از الکترودهای این دستگاه و اندازه‌ی آن‌ها را نشان می‌دهد.



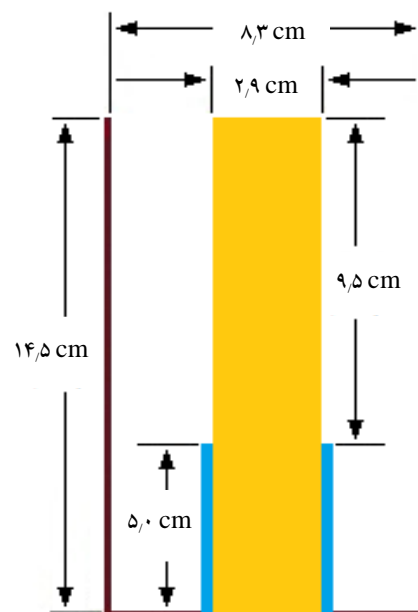
شکل ۲. تصویری از محفظه خلأ دستگاه MTPF-۱.



شکل ۳. علامت جریان یک تخلیه ۱۶ کیلوولتی در دستگاه MTPF-۱.

یکی از رایج‌ترین سامانه‌های تشخیص دستگاه‌های پلاسمای کانونی، یک پیچ‌ی نسبتاً ساده است که به پیچ‌ی مشتق جریان معروف است. این پیچ‌ی تشکیل شده است از چند دور سیم روکش‌دار که در نزدیکی قطب مثبت یکی از خازن‌های بانک خازن قرار داده می‌شود. نحوه‌ی قرارگیری این پیچ‌ی به گونه‌ای است که خطوط میدان مغناطیسی سمتی از داخل این پیچ‌ی عبور کرده و باعث پیدایش یک ولتاژ القایی می‌شوند که دامنه‌ی آن متناسب با دامنه‌ی جریان تخلیه است.

شکل ۴ الف، نمونه‌ای از علامت‌های پیچ‌ی مشتق جریان دستگاه MTPF-۱ را نشان می‌دهد. این علامت نتیجه‌ی یک تخلیه‌ی ۱۴ کیلوولتی در گاز آرگون است. قله‌ی منفی و نسبتاً تیز این شکل، نشان‌دهنده‌ی زمان تنگیدگی یا  $t_p$  است. این قله‌ی تیز نتیجه‌ی افزایش نسبتاً زیاد خودالقایی مدار و در نتیجه کاهش چشمگیر جریان مدار در لحظه‌ی تنگیدگی پلازما است. شکل ۴ ب، نیز علامت پرتو ایکس سخت مرتبط با تخلیه‌ی شکل



شکل ۱. طرح‌واره‌ی از الکترودهای دستگاه MTPF-۱.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، فاصله‌ی بین لبه‌ی بالایی آند و لبه‌ی بالایی عایق ۹٫۵ cm و شعاع آند نیز ۱٫۴۵ cm است. مجموع این دو فاصله ۱۰٫۹۵ cm است که فاصله‌ی است که لایه‌ی جریان بر روی سطح آند می‌پیماید. ظرفیت بانک خازن این دستگاه  $16.8 \mu F$  است و بنابراین انرژی تخلیه در یک تخلیه‌ی ۱۶ کیلوولتی، برابر  $2.2 \text{ kJ}$  است. شکل ۲، تصویری از محفظه‌ی خلأ دستگاه MTPF-۱ و محل قرارگیری آن را نشان می‌دهد.

در صورت کار کردن دستگاه در یک فشار نسبتاً زیاد (به صورتی که تنگیدگی پلازما صورت نگیرد و شرایط شبیه شرایط مدار اتصال کوتاه باشد)، جریان تخلیه به صورتی درمی‌آید که در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳، علامت جریان ناشی از یک تخلیه‌ی ۱۶ کیلوولتی در گاز آرگون با فشار نسبتاً زیاد (بدون شکل‌گیری پدیده‌ی تنگیدگی پلازما) را نشان می‌دهد. این شکل که با استفاده از یک پیچ‌ی روگوفسکی به دست آمده است، دوره‌ی (متناوب) تخلیه را  $8.5 \mu s$  به دست می‌دهد و بنابراین زمان افزایش جریان (یا زمان یک چهارم دوره) برابر  $2.1 \mu s$  می‌شود.

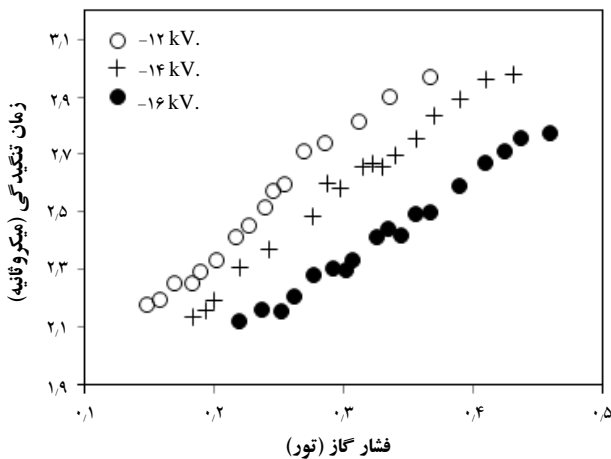
با استفاده از دوره‌ی به دست آمده و ظرفیت خازن، خودالقایی اولیه‌ی مدار برابر  $10.5 \text{ nH}$ ، به دست می‌آید. با استفاده از شکل فوق، مقاومت مدار نیز برابر با  $19.1 \text{ m}\Omega$  به دست می‌آید [۱۷، ۱۸].



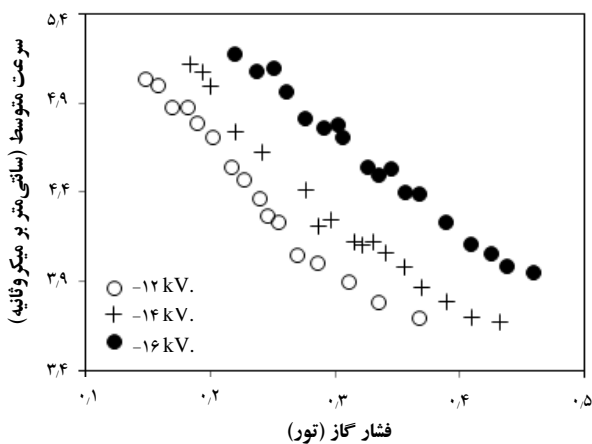
شکل ۵، معرف مقدار متوسطی است که از داده‌های شش تخلیه-ی الکتریکی به دست آمده است. خطای مربوط به اندازه‌گیری فشار، نادیده انگاشتی، ولی خطای استاندارد زمان‌های تنگیدگی در حدود  $\pm 0.04 \mu\text{s}$  بود.

برای داده‌های شکل ۵، فشار کمینه، فشاری است که برای آن زمان تنگیدگی  $t_p$ ، با زمان یک چهارم تخلیه  $t_{1/4}$ ، برابر است. اهمیت این شکل در آن است که با استفاده از آن می‌توان فشار گاز و ولتاژ تخلیه را به گونه‌ای انتخاب کرد که تنگیدگی در یک بازه‌ی زمانی خاص اتفاق بیفتد.

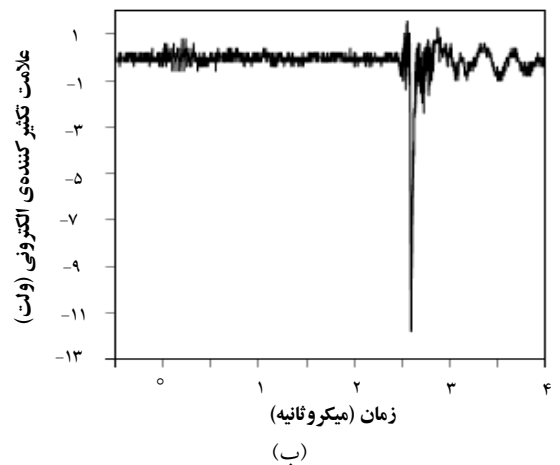
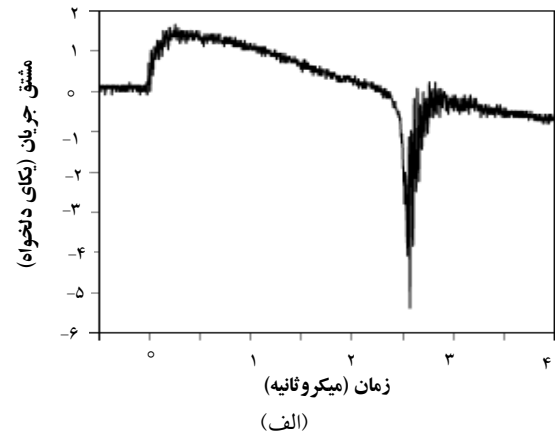
با صرف نظر کردن از زمان شکل‌گیری لایه‌ی جریان، سرعت متوسط لایه‌ی جریان حدوداً برابر با  $\bar{v} = d/t_p$  می‌شود که در آن،  $d$  طول مسیری است که لایه بر روی سطح آند دستگاه MTPF-1 می‌پیماید (10.95 cm). با استفاده از این رابطه و زمان‌های تنگیدگی به دست آمده از شکل ۵، سرعت متوسط حرکت لایه برای شرایط مختلف به دست می‌آید (شکل ۶).



شکل ۵. زمان تنگیدگی به عنوان تابعی از فشار گاز در ولتاژهای تخلیه ۱۲، ۱۴ و ۱۶ کیلوولت.



۴ الف را نشان می‌دهد. این علامت نیز با استفاده از یک مجموعه آشکارساز سوسوزن و تکثیرکننده‌ی فوتونی به دست آمده است.



شکل ۴. مشتق جریان و علامت پرتو ایکس سخت یک تخلیه‌ی نوعی در دستگاه MTPF-1 آرگون، ۰.۲۹ تور؛ ۱۴ کیلوولت.

### ۳. راهکار تجربی و نتایج اولیه

تعداد نسبتاً زیادی تخلیه‌های ۱۲، ۱۴، و ۱۶ کیلوولتی (معادل ۱.۲، ۱.۶، و ۲.۲ کیلوژول) در گاز آرگون انجام شد. نحوه‌ی عمل به این صورت بود که در شروع کار، محفظه‌ی خلأ از گازهای غیرمرتبط (عمدتاً از هوا تا  $10^{-4}$  تور) تخلیه شد. سپس گاز آرگون به آن تزریق و شش تخلیه‌ی الکتریکی انجام شد. پس از آن، محفظه‌ی خلأ مجدداً تا فشار حدود  $10^{-4}$  تور تخلیه و مجدداً شش تخلیه‌ی الکتریکی به انجام رسید، و کار به همین منوال ادامه پیدا کرد. پس از کامل شدن آزمایش‌ها، علامت‌های مشتق جریان مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های مربوط به تنگیدگی-های ضعیف حذف و نهایتاً حدود ۳۳۰ علامت مشتق جریان برای بررسی بیش‌تر انتخاب شد. به این ترتیب، سه تابع به دست آمد که وابستگی زمان تنگیدگی به فشار گاز را در ولتاژهای تخلیه‌ی ۱۲، ۱۴ و ۱۶ کیلوولت، نشان می‌دهند (شکل ۵). هر نقطه از



زمان‌های تنگیدگی یکسان، می‌توان نوشت:  $V_{dis1}$  [ثابت]  $I_{p1}$  و  $V_{dis2}$  [ثابت]  $I_{p2}$  و بنابراین نسبت جریان‌ها برابر است با

(۲)

$$\frac{I_{p1}}{I_{p2}} \approx \frac{V_{dis1}}{V_{dis2}}$$

با توجه به رابطه‌های ۱ و ۲، برای دو تخلیه‌ی با زمان‌های تنگیدگی مساوی، نسبت سرعت‌های شعاعی لایه‌ی جریان برابر است با

(۳)

$$\frac{v_{r1}}{v_{r2}} \approx \frac{V_{dis1} \sqrt{P_2}}{V_{dis2} \sqrt{P_1}}$$

جدول ۱، نسبت سرعت‌های شعاعی برای تخلیه‌های با ولتاژ تخلیه‌ی برابر با ۱۴ و ۱۶ کیلوولت را نشان می‌دهد که با استفاده از رابطه‌ی ۳ و نتایج تجربی شکل ۵، به دست آمده‌اند.

در جدول ۱، نسبت سرعت‌های شعاعی همواره برابر تقریباً ۱ حاکی از برابری تقریبی سرعت‌های شعاعی در تخلیه‌های با ولتاژهای ۱۴ و ۱۶ کیلوولت است. به عنوان مثال، ردیف ۳ نشان می‌دهد که سرعت لایه در مورد تخلیه با ولتاژ ۱۶ کیلوولت و با فشار گاز ۰٫۳۵۷ تور برابر است با سرعت لایه در تخلیه با ولتاژ ۱۴ کیلوولت ولی در فشار گاز ۰٫۲۷۶ تور. به عبارت دیگر، این جدول نشان می‌دهد که به رغم تفاوت در فشار گاز و ولتاژ تخلیه، برابری زمان تنگیدگی را می‌توان به صورت تقریبی به حساب برابری سرعت شعاعی لایه جریان گذاشت. محاسبات جدول ۱، برای نسبت‌های سرعت‌های شعاعی ۱۶kV/۱۲kV و ۱۴kV/۱۲kV نیز انجام شد و نتایج مشابه به دست آمد.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این بررسی، با استفاده از داده‌های تجربی حاصل از یک دستگاه پلاسمای کانونی از نوع مدر با انرژی ۲٫۲ کیلوژول سرعت حرکت لایه‌ی جریان مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱. نسبت سرعت‌های شعاعی

ردیف	نسبت سرعت‌های شعاعی		فشار گاز (تور) برای تخلیه‌ی	زمان تنگیدگی (میکروثانیه)
	۱۶kV/۱۴kV	۱۴kV/۱۶kV		
۱	۱٫۰۳	۰٫۱۹۴	۱۶kV	۲٫۱۶
		۰٫۲۳۸	۱۴kV	

شکل ۶. اثر فشار گاز بر سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان در ولتاژهای تخلیه‌ی متفاوت.

شکل ۶، رابطه‌ی سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان و فشار گاز را برای ۳ ولتاژ تخلیه‌ی متفاوت نشان می‌دهد. این شکل هم‌چنین نشان می‌دهد که بیشینه‌ی سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان برای هر سه ولتاژ تخلیه‌ی ۱۲، ۱۴ و ۱۶ کیلوولت در حدود  $5 \text{ cm } \mu\text{s}^{-1}$  است. به عنوان مثال، ولتاژ تخلیه‌ی ۱۲ kV، در فشار ۰٫۱۵ تور، به همان سرعت متوسطی منجر می‌شود که ولتاژ تخلیه‌ی ۱۶ kV با فشار ۰٫۲۴ تور. تأثیر عملی این تفاوت در آن است که در ولتاژ تخلیه‌ی بیش‌تر، فشار گاز نیز باید بیش‌تر باشد و این به معنی آن است که چگالی اتم‌های گاز و به پیروی از آن چگالی پلاسمای بیش‌تر می‌شود. به عبارت دیگر فشار بیش‌تر گاز، منجر به حجم بیش‌تر پلاسمای و متعاقباً شدت بیش‌تر پرتوهای گسیل شده می‌شود.

### ۴. بررسی ضریب سرعت

یک گام دیگر در مسیر بررسی سرعت حرکت لایه‌ی جریان، بررسی ضریب سرعت است که با سرعت شعاعی لایه‌ی جریان،  $v_r$ ، بر روی سطح فوقانی آند نسبت مستقیم دارد. این ضریب که به طور نظری به دست می‌آید [۱۹، ۲۰]، به صورت  $S = I_p / \alpha \sqrt{P}$  تعریف می‌شود که در آن،  $I_p$  جریان لایه (برحسب kA)،  $\alpha$  شعاع آند (برحسب سانتی‌متر)، و  $P$  فشار گاز (برحسب تور) است. این عبارت را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که برای دو تخلیه‌ی الکتریکی در یک دستگاه پلاسمای کانونی، نسبت سرعت شعاعی لایه‌ی جریان‌ها را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\frac{v_{r1}}{v_{r2}} = \frac{S_1}{S_2} \approx \frac{I_{p1} \sqrt{P_2}}{I_{p2} \sqrt{P_1}} \quad (۱)$$

به طور کلی در یک مدار RLC، در تخلیه‌های با ولتاژهای تخلیه‌ی متفاوت، در یک نقطه‌ی زمانی ثابت از دوره‌های تخلیه، جریان‌های تخلیه،  $I_p$ ، را می‌توان متناسب با ولتاژهای تخلیه،  $V_{dis}$ ، در نظر گرفت. این بدان معنی است که در یک دستگاه پلاسمای کانونی، برای دو تخلیه با ولتاژهای تخلیه‌ی متفاوت، ولی



۲,۳۱	۰,۲۹۲	۰,۲۲۰	۰,۹۹	۲
۲,۴۹	۰,۳۵۷	۰,۲۷۶	۱,۰۰	۳
۲,۵۸	۰,۳۹۰	۰,۲۹۷	۱,۰۰	۴
۲,۶۶	۰,۴۱۰	۰,۳۱۵	۱,۰۰	۵
۲,۷۰	۰,۴۲۶	۰,۳۴۰	۱,۰۲	۶
۲,۷۵	۰,۴۳۸	۰,۳۵۶	۱,۰۳	۷

### مرجع‌ها

- [1] M. Barbaglia, H. Bruzzone, H. Acuna, L. Soto, A. Clause, Experimental study of the hard X-ray emissions in a plasma focus of hundreds of Joules, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 51(4) (2009) 045001-9.
- [2] N.V. Filippov, T.I. Filippova, M.A. Karakin, V.I. Krauz, V.P. Tykshaev, V.P. Vinogradov, Y.P. Bakulin, V.V. Timofeev, V.F. Zinchenko, J.R. Brzosko, J.S. Brzosko, Filippov type plasma focus as intense source of hard X-rays (Ex~50 keV), *IEEE Trans. on Plasma Science*, 24(4) (1996) 1215-1222.
- [3] W. Surata, M.J. Sadowski, M. Paduch, E. Zielinska, K. Tomaszewski, Recent measurements of soft X-ray emission from the DPF-1000U facility, *Nukleonika*, 60(2) (2015) 303-308.
- [4] V.A. Gribkov, A. Banaszak, B. Bienkowska, A.V. Dubrovsky, I. Ivanova-Stanik, L. Jakubowski, L. Karpinski, R.A. Miklaszewski, M. Paduch, M.J. Sadowski, M. Scholz, A. Szydowski, K. Tomaszewski, Plasma dynamics in the PF-1000 device under full-scale energy storage: II. Fast electron and ion characteristics versus neutron emission parameters and gun optimization perspectives, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40(12) (2007) 3592-3607.
- [5] N.V. Filippov, T.I. Filippova, V.P. Vinogradov, Dense, high-temperature plasma in a noncylindrical z-pinch compression, *Nucl. Fusion, Suppl*, 2 (1962) 577.
- [6] J.W. Mather, Formation of a high-density deuterium plasma focus, *Physics of Fluids*, 8(2) (1965) 366-377.
- [7] L. Soto, New trends and future perspectives on plasma focus research, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 47(5A) (2005) 361-381.

زمان تنگیدگی و سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان، به فشار گاز و ولتاژ تخلیه وابسته است. نشان داده شد که با انتخاب فشار گاز و ولتاژ تخلیه‌ی مناسب، زمان تنگیدگی را می‌توان در محدوده‌ی خاصی نگه داشت. هم‌چنین مشخص شد که بیشینه سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان  $5 \text{ cm } \mu\text{s}^{-1}$  است. با استفاده از ضریب سرعت، نشان داده شد که در تخلیه‌های با ولتاژ تخلیه و فشار گاز متفاوت با گاز مشابه برابر بودن زمان تنگیدگی را می‌توان به عنوان برابر بودن تقریبی سرعت شعاعی لایه جریان، قلمداد نمود.



- neon dense plasma, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 27(2) (2007) 127-139.
- [9] V.I. Krauz, M.G. Levashova, M.A. Karakin, O.N. Krokhin, V.S. Lisitsa, A.N. Mokeev, V.V. Myalton, V.Ya Nikulin, A.V. Oginov, V.P. Smirnov, V.E. Fortov, Influence of the radiation of the plasma focus-current sheath on the implosion dynamics of condensed targets, *Plasma Physics Reports*, 34(1) (2008) 43-51.
- [10] V. Raspa, L. Sigaut, R. Llovera, P. Cobelli, B. Knoblauch, R. Vieytes, A. Clause, C. Moreno, Plasma focus as a powerful hard X-ray source for ultrafast imaging of moving metallic objects, *Brazilian Journal of Physics*, 34(4B) (2004) 1696-1699.
- [11] M.A. Tafreshi, M.M. Nasser, N. Nabipour, D. Rostamifard, A. Nasiri, Application of plasma focus device in fast industrial radiography, *J. Fusion Energy*, 33(6) (2014) 689-692.
- [12] S. Lee, Plasma focus radiative model: review of the Lee model code, *J. Fusion Energy*, 33(4) (2014) 319-335.
- [13] V. Siahpoush, M.A. Tafreshi, S. Sobhanian, S. Khorram, Adaptation of Sing Lee's model to the Filippov type plasma focus geometry, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 47(7) (2005) 1065-1075.
- [14] M.A. Abd Al-Halim, Simulation of plasma focus devices with hemisphere electrodes, *J. Fusion Energy*, 29(2) (2010) 134-140.
- [8] Sh. Zeb, A. Qayyum, M. Sadiq, M. Shafiq, A. Waheed, M. Zakaullah, Deposition of diamond-like carbon films using graphite sputtering in
- [15] M.M. Milanese, J.J. Niedbalski, R.L. Moroso, Filaments in the sheath evolution of the dense plasma focus as applied to intense auroral observations, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 35(4) (2007) 808-812.
- [16] S.M. Hassan, E.L. Clark, C. Petridis, G.C. Androulakis, J. Chatzakis, P. Lee, N.A. Papadogiannis, M. Tatarakis, Filamentary structure of current sheath in miniature plasma focus, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 39(11) (2011) 2432-2433.
- [17] A.E. Abdou, M.I. Ismail, A.E. Mohamed, S. Lee, S.H. Saw, R. Verma, Preliminary results of Kansas State University dense plasma focus, *IEEE Trans. on Plasma Science*, 40(10) (2012) 2741-2744.
- [18] S.H. Saw, S. Lee, F. Roy, P.L. Chong, V. Vengadeswaran, A.S.M. Sidik, Y.W. Leong, A. Singh, In situ determination of the static inductance and resistance of a plasma focus capacitor bank, *Rev. Sci. Instrum.*, 81(5) (2010) 053505-1-053505-4.
- [19] H. Krompholz, F. Ruhl, W. Schneider, K. Schonbach, G. Herziger, A scaling law for plasma focus devices, *Physics Letters A*, 82(2) 82-84.
- [20] S. Lee, A. Serban, Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch, *IEEE Trans. on Plasma Science*, 24(3) (1996) 1101-1105.

