



تأثیر پارامترهای الکتریکی دستگاه‌های پلاسمای کانونی نوع مدیر بر انرژی پرتو ایکس سخت

محمدامیر حمزه تفرشی*^۱، داریوش رستمی فرد^۱، تانیا داوری مهابادی^۱، علی نصیری^۱

۱. پژوهشکده‌ی فیزیک پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران - ایران
۲. گروه فیزیک و بیوفیزیک، واحد علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۱۹۱۶۸-۹۳۸۱۳، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله پس از مروری بر تاریخچه‌ی دستگاه‌های پلاسمای کانونی، موضوع کانونی شدن پلاسما مطرح، و در پی آن دو دستگاه جدید پلاسمای کانونی نوع مدیر و نتایج پژوهشی حاصل از مقایسه‌ی آن‌ها معرفی می‌شوند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی چگونگی تأثیر ظرفیت بانک خازنی C_0 و القائیدگی مدار L_0 ، بر انرژی پرتو ایکس سخت گسیل شده از دستگاه‌های پلاسمای کانونی نوع مدیر بوده است. این پژوهش نشان داد که تأثیر کاهش ضریب $\sqrt{L_0 C_0}$ بر افزایش انرژی پرتو ایکس سخت، به مراتب بیش‌تر از تأثیر ناشی از تغییر انرژی تخلیه است، به نحوی که با وجود کاهش ۵۵٪ انرژی تخلیه، کاهش ۴۰٪ مقدار $\sqrt{L_0 C_0}$ باعث افزایش ۲۲۷٪ انرژی پرتو ایکس سخت شده است. به بیان دیگر، در طراحی دستگاه‌های پلاسمای کانونی نوع مدیر، باید توجه داشت که گسیل پرتو ایکس سخت با انرژی بیش‌تر، الزاماً مترادف با مصرف انرژی تخلیه‌ی بیش‌تر نیست.

کلیدواژه‌ها: پلاسمای کانونی، نوع مدیر، پرتو ایکس سخت، فاکتور سرعت

The Effect of Electrical Parameters of Mather Type Plasma Focus Devices on Energy of the Hard X-Ray Yield

M.A. Tafreshi^{*1}, D. Rostamifard¹, T.D. Mahabadi², A. Nasiri¹

1. Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399-51113, Tehran – Iran
2. Department of Physics and Biophysics, Tehran Medical Sciences Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 19168-93813, Tehran – Iran

Abstract: In this paper, after reviewing the history of plasma focus devices, the plasma focusing issue is raised and then the results of comparisons between two new Mather type plasma focus devices are presented. The main aim of this investigation was to study the effect of the energy bank capacitance C_0 , and the circuit inductance L_0 , on the energy of the hard X-ray of Mather type devices. This investigation showed that the effect of the $\sqrt{L_0 C_0}$ reduction, on the increment of the hard X-ray energy, is much more than the effect of the discharge energy variation. That is, in spite of 55% discharge energy decrement, a 40% reduction of the $\sqrt{L_0 C_0}$, leads to 227% increment of the hard X-ray energy. That is observed in a Mather type device designing. It should be mentioned that the more energy consumption is not a necessary condition for a more energetic hard X-ray emission.

Keywords: Plasma Focus, Mather Type, Hard X-Ray, Speed Factor



۱. مقدمه

کانونی شدن پلاسما و کاربردهای آن در ایران نیز آغاز شد و به سرعت رونق گرفت، به طوری که در حال حاضر علاوه بر دو دستگاه دنا [۷] و سهند [۸] که هر دو ساخت کشور روسیه‌اند، از تعداد نسبتاً زیادی دستگاه پلاسمای کانونی استفاده می‌شود که همگی توسط متخصصین داخلی طراحی و ساخته شده‌اند [۹-۱۴].

توانایی‌ها و ویژگی‌های دستگاه‌های پلاسمای کانونی، باعث شده است تا این دستگاه‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران رشته‌های مختلف قرار گیرند [۱۵-۲۴]. بارزترین ویژگی‌های این دستگاه‌ها عبارتند از؛ تمیزی از نظر زیست محیطی، آسانی نسبی ساخت، ارزانی قیمت، شدت نسبتاً زیاد پرتوها، زمان نسبتاً کم پرتودهی (در حدود چند ده نانو ثانیه)، و کوچک بودن چشمه‌ی گسیل پرتو (در حدود 1 mm^3). این ویژگی‌ها باعث شده است تا کاربرد پرتو ایکس سخت این گونه دستگاه‌ها در زمینه‌های مختلفی از جمله رادیوگرافی فرا سریع مطرح شود [۲۵-۲۷]. این پژوهش، در رابطه با تأثیر تجربی پارامترهای مدار الکتریکی دستگاه‌های پلاسمای کانونی از این نوع مدبر بر انرژی پرتو ایکس سخت گسیل شده است. برای انجام آن از دو دستگاه پلاسمای کانونی از این نوع استفاده شده است. ساختار هندسی محفظه‌ی خلأ این دستگاه‌ها کاملاً مشابه، ولی مدار الکتریکی آن‌ها کاملاً متفاوت است. این دستگاه‌ها با نام‌های MTPF-1 و MTPF-3 شناخته می‌شوند و به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در پژوهشکده‌ی پلاسما و گداخت هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران، طراحی و ساخته شده‌اند.

۲. مروری بر کانونی شدن پلاسما

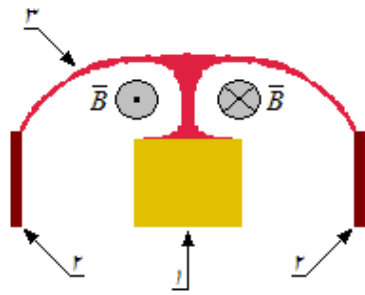
در حالت خیلی ساده، می‌توان گفت که یک دستگاه پلاسمای کانونی از آند، کاتد، عایق و بانک خازنی (منبع انرژی) تشکیل شده است. ساختار هندسی دستگاه به گونه‌ای است که مجموع سطوح آند، کاتد و عایق، یک فضای بسته (محفظه خلأ) تشکیل می‌دهند که با یک کلید اتصال سریع الکتریکی، به بانک خازنی وصل می‌شوند. شکل ۱، طرح‌واره‌ای تقریبی از محفظه‌ی خلأ یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدبر و لایه‌ی جریان^(۱) را نشان می‌دهد.

دستگاه‌های پلاسمای کانونی، نوعی مولد تپی پلاسما هستند که میدان مغناطیسی، پلاسمای آن‌ها را محصور می‌کند و تحت فشار قرار می‌دهد. ساختار این دستگاه‌ها به گونه‌ای است که فشار وارد شده به پلاسما، باعث تنگش (و یا کانونی شدن) پلاسما در محدوده‌ای نسبتاً کوچک می‌شود. دما و چگالی این پلاسمای کانونی شده، به ترتیب از مرتبه‌ی keV و 10^{26} m^{-3} است.

چگالی و دمای نسبتاً زیاد این گونه از پلاسما باعث گسیل پرتوهای پرانرژی می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از؛ پرتو ایکس نرم (با انرژی کم‌تر از ۱۰ keV)، پرتو ایکس سخت (با انرژی بیش‌تر از ۱۰ keV) و نیز نوترون‌های پرانرژی که تحت شرایط مناسب تولید می‌شوند [۱-۳]. گسیل پرتو ایکس نرم عمدتاً به علت برانگیختگی و به دنبال آن وانگیختگی اتم‌های گاز و یا اتم‌های آند انجام می‌پذیرد. گسیل پرتو ایکس سخت نیز به علت برخورد الکترون‌های پرانرژی پلاسما با آند دستگاه و تحت تأثیر پدیده‌ی تابش ترمزی انجام می‌شود. انجام واکنش‌های گداخت هسته‌ای نیز عامل گسیل نوترون‌ها است.

در مورد تاریخچه‌ی ساخت دستگاه‌های پلاسمای کانونی، می‌توان گفت که در سال ۱۹۶۲، فیلیپوف ساخت یک دستگاه پلاسمای کانونی در روسیه را اعلام کرد [۴]. در سال ۱۹۶۵ نیز مدبر، یک دستگاه پلاسمای کانونی با ساختاری متفاوت را در آمریکا شکل‌دهی کرد [۵]. در سال ۱۹۹۶ ماکیف و همکارانش [۶] موفق به ارائه‌ی مدل سومی از دستگاه‌های پلاسمای کانونی شدند که به مدل گروی معروف است. با وجود تفاوت ساختاری دستگاه‌های پلاسمای کانونی، در هنگام فشرده‌سازی نهایی پلاسما، هر سه مدل تا حد زیادی مشابه یک دیگر عمل می‌کنند. مهم‌ترین شباهت‌ها عبارتند از؛ یکسان بودن دینامیک تنگش (یا کانونی شدن) پلاسما، یکسان بودن قوانین حاکم بر گسیل پرتوها، و یکسان بودن نوع پرتوهای گسیل شده.

اولین دستگاه پلاسمای کانونی ایران، دستگاه دنا است که از روسیه خریداری، و در بهار ۱۳۷۹ در پژوهشکده‌ی پلاسما و گداخت هسته‌ای در سازمان انرژی اتمی ایران نصب و راه‌اندازی شد [۷]. پس از راه‌اندازی این دستگاه، پژوهش در زمینه‌ی



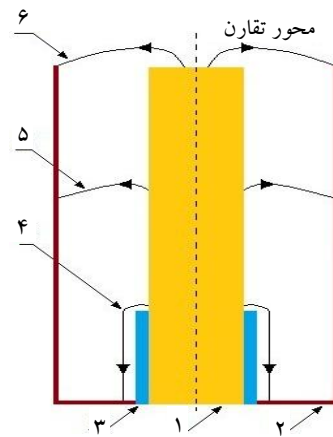
شکل ۲. طرح‌واره‌ای از لایه‌ی جریان در قسمت فوقانی آند و کاتد. (۱) آند، (۲) کاتد و (۳) لایه‌ی جریان.

۳. معرفی دستگاه‌ها

همان‌طور که قبلاً بیان شد، محفظه‌ی خلأ هر دو دستگاه کاملاً مشابه یک‌دیگرند. الکتروود مرکزی (آند)، استوانه‌ای از جنس مس است و کاتد دستگاه‌ها از ۱۲ میله‌ی تشکیل شده مسی است که گرداگرد آند قرار گرفته‌اند. ارتفاع هر میله‌ی کاتد ۱۴٫۵cm و فاصله‌ی هر میله تا آند ۲٫۷cm است. عایق دستگاه نیز استوانه‌ای از جنس پیرکس با ضخامت ۰٫۲۵ mm و ارتفاع مؤثر ۵ cm است. فاصله‌ی بین سطح بالایی آند تا لبه‌ی بالایی عایق نیز ۹٫۵cm، و شعاع استوانه‌ی آند ۱٫۴۵cm است. مجموع این دو عدد (۱۰٫۹۵ cm) طول مسیری است که لایه‌ی جریان بر روی سطح آند می‌پیماید (طول d). شکل ۳، تصویری از محفظه‌ی خلأ و درون آن را نشان می‌دهد.

پارامترهای الکتریکی دو دستگاه، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. ستون دوم این جدول، ولتاژ تخلیه، ستون سوم ظرفیت بانک خازنی، ستون چهارم الفانیدگی، ستون پنجم پارامتر $\sqrt{L_0 C_0}$ ، ستون ششم تقریبی از مقاومت ظاهری مدار است که با استفاده از پارامتر $\sqrt{L_0 / C_0}$ به دست آمده‌اند، و ستون هفتم نیز تقریبی از بیشینه‌ی جریان تخلیه است که با استفاده از پارامتر $\sqrt{V_0 / Z_0}$ محاسبه شده‌اند.

دو ستون آخر نیز به ترتیب دوره‌ی تناوب تخلیه و زمان یک چهارم تناوب $t_{1/4}$ (یا زمان صعود جریان t_r) قرار دارند. در این جا باید به دو نکته نیز اشاره شود. نکته اول آن که پارامترهای ارائه شده در ستون‌های ۵ الی ۹ این جدول، برگرفته از پارامترهای ستون‌های دوم تا چهارم هستند و صرفاً به منظور ساده سازی ارائه‌ی مطالب بعدی، بیان شده‌اند. نکته دیگر آن است که پارامتر $\sqrt{L_0 / C_0}$ دستگاه MTPF-1، ۴۰٪ کم‌تر است.



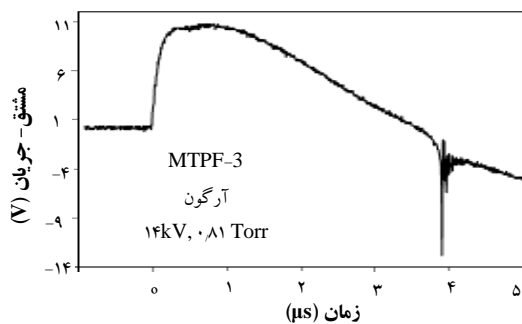
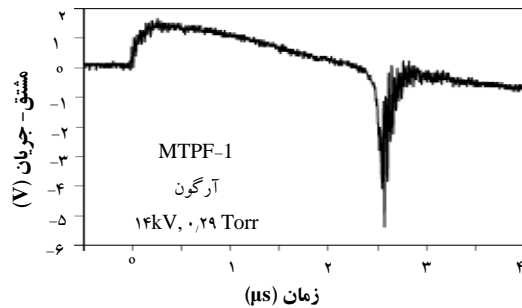
شکل ۱. طرح‌واره‌ای از محفظه‌ی خلأ و حرکت لایه‌ی جریان. (۱) آند، (۲) کاتد، (۳) عایق، (۴) موقعیت اولیه‌ی لایه‌ی جریان، (۵) موقعیت لایه‌ی جریان در حال حرکت به سمت سطح فوقانی آند، (۶) موقعیت لایه‌ی جریان در لحظات پایانی.

مراحل مختلف عملکرد این گونه دستگاه‌ها به این صورت است که در ابتدا محفظه‌ی خلأ تخلیه شده و گاز مورد نظر به آن تزریق می‌شود. پس از آن، بانک خازنی تا اختلاف پتانسیل مناسب شارژ، و سپس با کلید اتصال سریع الکتریکی، اختلاف پتانسیل دو سر بانک خازنی به آند و کاتد دستگاه وصل می‌شود. این اختلاف پتانسیل، باعث پیدایش میدان الکتریکی در فضای بین آند و کاتد و آغاز تخلیه‌ی الکتریکی از روی سطح عایق می‌شود. به این ترتیب لایه‌ای از جریان الکتریکی (به نام لایه‌ی جریان) در مجاورت سطح عایق تشکیل می‌شود. وجود این لایه، باعث پیدایش یک میدان مغناطیسی سمتی، و متعاقباً به کارگیری نیروی لورنتس $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ بر خود لایه‌ی جریان و پلاسمای قرار گرفته در پیش روی آن می‌شود. به این ترتیب، حرکت لایه‌ی جریان و پلاسما به سمت محور تقارن آغاز می‌شود. حرکت لایه‌ی جریان باعث می‌شود تا در نهایت ستون نسبتاً کوچکی از پلاسمای کانونی (و یا تنگیده) شده، حول محور تقارن شکل گیرد. این پلاسمای کانونی شده، پس از زمان کوتاهی (کم‌تر از ۱۰۰ns) در اثر به روز ناپایداری‌های پلاسما دچار واپاشی می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، در حین فشردگی پلاسما و به ویژه در حالت بیشینه‌ی آن، فشار وارد شده به پلاسما در حدی است که باعث گسیل پرتوهای پرانرژی می‌شود. شکل ۲، طرح‌واره‌ای از ستون پلاسما و لایه‌ی جریان در قسمت بالایی آند و کاتد را نشان می‌دهد. در این شکل، جهت میدان مغناطیسی سمتی نیز نشان داده شده است.



جدول ۱. پارامترهای الکتریکی دو دستگاه

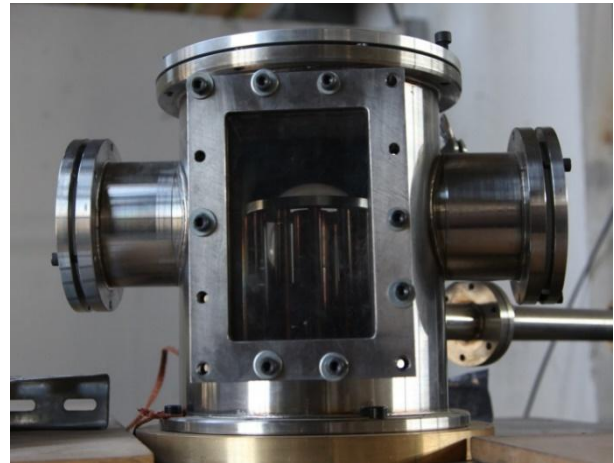
دستگاه	V□ (kV)	C□ (μF)	L□ (nH)	$\sqrt{L_0 C_0}$ (μs)	Z□ (mΩ)	I□ (kA)	T (μs)	t _r (μs)
MTPF-1	۱۴	۱۶٫۸	۱۰٫۵	۱٫۳۳	۷۹	۱۷۷	۸٫۳۵	۲٫۰۹
MTPF-3	۱۴	۳۷٫۲	۱۳۰	۲٫۲۰	۵۹	۲۳۷	۱۳٫۸	۳٫۴۵



شکل ۴. سیگنال‌های مشتق جریان.

در این جا لازم است به این نکته نیز اشاره شود که برای داشتن یک تنگش موفق، باید با انتخاب فشار گاز مناسب، ترتیبی برگرفته شود تا تنگش در زمان مناسب رخ دهد. به عبارت دیگر $t_p \geq t_r$ باشد تا به این ترتیب، مقدار زیادی از انرژی بانک خازنی به پلاسما منتقل شود.

سامانه‌ی تشخیصی دیگری که در این آزمایش‌ها استفاده شده است، یک مجموعه‌ی سوسوزن پلاستیکی و تکثیرکننده‌ی فوتونی ۱۴ فوتونی است که برای اندازه‌گیری نسبی انرژی پرتو ایکس سخت به کار رفته است. سوسوزن مورد استفاده، استوانه-ای با قطر و ارتفاع ۵٫۰۸ (۲in) است. در آزمایش‌های مربوط به هر دو دستگاه پلاسمای کانونی، پرتو ایکس پس از عبور از یک پنجره از جنس پلکسی گلاس^(۲)، به ورودی این سامانه رسیده است. فاصله‌ی لبه‌ی ورودی این سامانه تا سر آند نیز حدود ۴۲cm بوده است. شکل ۵ که با استفاده از این سامانه به دست آمده است، سیگنال پرتو ایکس سخت حاصل از تخلیه‌های الکتریکی شکل ۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تصویری از محفظه‌ی خلأ دستگاه‌ها.

مهم‌ترین سامانه‌ی تشخیصی دستگاه‌های پلاسمای کانونی، پیچ‌های ساده است که پیچ‌های مشتق جریان نام دارد. این پیچ‌ها از چند دوره تشکیل شده است و در کنار قطب مثبت یکی از خازن‌های بانک انرژی قرار می‌گیرد. نحوه قرارگیری پیچ‌ها به صورتی است که عبور خطوط میدان مغناطیسی ناشی از جریان تخلیه‌ی خازن، باعث پیدایش یک جریان القایی در پیچ‌ها متناسب با مشتق جریان تخلیه می‌شود.

شکل ۴، نمونه‌ای از سیگنال مشتق جریان دستگاه‌های MTPF-1 و MTPF-3 را نشان می‌دهد. این دو سیگنال، حاصل آن تخلیه‌های الکتریکی هستند که در فشار بهینه‌ی گاز صورت گرفته و منجر به کانونی شدن نسبتاً قوی پلاسما شده‌اند. در هر دو تخلیه، گاز مورد استفاده آرگون، و اختلاف پتانسیل ۱۴ kV بوده است. قله‌ی تیز و منفی موجود در سیگنال‌های زیر، نشان دهنده‌ی زمان کانونی شدن پلاسما و یا به بیان دیگر، زمان رخداد تنگش پلاسما t_p است. علت پیدایش این قله‌های منفی، افزایش نسبتاً زیاد امپدانس مدار در لحظه‌ی تنگش است.

جدول ۲. مقایسه‌ی تخلیه‌های الکتریکی ۱۴kV در گاز آرگون (مربوط به شکل‌های ۴ و ۵)

دستگاه	E (kJ)	T (μs)	P (Torr)	t _p (μs)	d (cm)	سرعت متوسط (cm/μs)	HXR (V)
MTPF-1	۱٫۶۵	۸٫۳۵	۰٫۲۹	۲٫۵۷	۱۰٫۹۵	۴٫۲۶	-۱۱٫۸
MTPF-3	۳٫۶۵	۱۳٫۸	۰٫۸۱	۳٫۹۳	۱۰٫۹۵	۲٫۷۹	-۴٫۷

- ۱) فشار بهینه گاز در دستگاه MTPF-1 کم‌تر است.
- ۲) سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان در دستگاه MTPF-1 بیش‌تر است.
- ۳) انرژی پرتو ایکس سخت دستگاه MTPF-1 بیش‌تر است. اکنون که روند کار مشخص شده است، می‌توان به بررسی دقیق‌تر موضوع پرداخت.

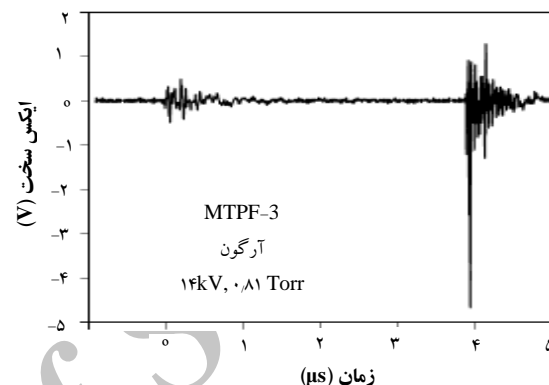
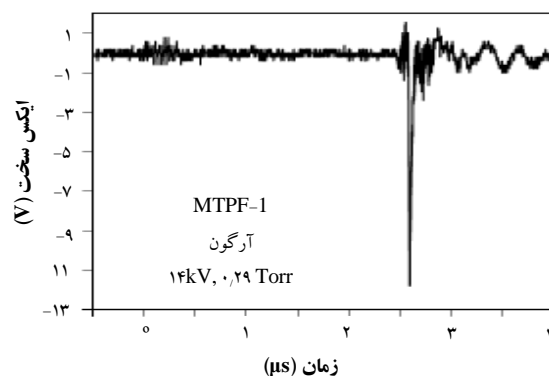
۵. بررسی دقیق‌تر سرعت متوسط و تولید پرتو ایکس

به منظور بررسی دقیق‌تر موارد بیان شده، در این قسمت، داده‌های بیش‌تری بررسی شده است. به بیان دیگر، به جای در نظر گرفتن صرفاً یک تخلیه در هر دستگاه، نتایج حاصل از تعداد نسبتاً زیادی تخلیه بررسی شده است. در تمامی این آزمایش‌ها، گاز مورد استفاده، آرگون، و ولتاژ تخلیه ۱۴kV بوده است. شکل ۶، تأثیر تغییر فشار گاز بر زمان تنگش t_p دو دستگاه را نشان می‌دهد. اولین نقطه‌ی هر یک از توابع این شکل، نشان‌دهنده‌ی حداقل فشار گاز قابل قبول است. به بیان دیگر، فشاری است که باعث می‌شود تا t_p=t_{۱/۴} شود (۰٫۱۲ Torr برای MTPF-1 و ۰٫۶۳ Torr برای MTPF-3).

شکل ۷، که با استفاده از داده‌های شکل ۶ به دست آمده است، اثر فشار گاز بر سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان دو دستگاه را نشان می‌دهد.

شکل ۸، نیز نشان‌دهنده‌ی دامنه‌ی سیگنال‌های پرتو ایکس سخت دو دستگاه است.

جدول ۳، نتایج حاصل از بررسی داده‌های شکل ۸ را نشان می‌دهد. ستون چهارم این جدول، فشار بهینه‌ی گاز را نشان می‌دهد (که منجر به بیش‌ترین گسیل پرتو ایکس سخت شده است)، ستون پنجم، سرعت متوسط لایه در فشار بهینه، و ستون ششم، میانگین دامنه‌ی سیگنال پرتو ایکس در فشار بهینه را نشان می‌دهند.



شکل ۵. پرتو ایکس سخت مربوط به تخلیه‌های شکل ۴.

۴. بررسی اولیه‌ی سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان و تولید پرتو ایکس سخت

جدول ۲، خلاصه‌ی نتایج حاصل از دو تخلیه‌ی معرفی شده در قسمت قبل (شکل‌های ۴ و ۵) را نشان می‌دهد.

ستون‌های دوم تا ششم این جدول، به ترتیب انرژی تخلیه‌ی E، دوره تناوب تخلیه‌ی T، فشار گاز P، زمان تنگش t_p، و طول مسیری که لایه‌ی جریان بر روی سطح آند می‌پیماید d، را نشان می‌دهند. ستون هفتم جدول، سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان بر روی آند دستگاه‌ها در فاصله زمانی بین شروع تخلیه تا زمان تنگش نشان می‌دهد. این سرعت با تقسیم طول مسیر d بر زمان تنگش t_p، به دست آمده است. با توجه به این که برای محاسبه‌ی این سرعت از زمان شکل‌گیری لایه‌ی جریان صرف نظر شده است، بنابراین می‌توان این سرعت را به عنوان حداقل سرعت متوسط نیز معرفی کرد. ستون آخر جدول نیز بیشینه‌ی دامنه سیگنال‌های پرتو ایکس سخت را نشان می‌دهد که از شکل ۵ به دست آمده‌اند. داده‌های این جدول، که با استفاده از پارامترهای دو تخلیه با تنگش‌های نسبتاً قوی تهیه شده است نشان می‌دهند که:



نتایج حاصل از بررسی صورت گرفته در این قسمت، نتایج اولیه‌ی به دست آمده در بخش قبلی (بخش ۴) را تأیید و تکمیل می‌کند. به عبارت دیگر، جدول ۳ نشان می‌دهد که تحت فشار بهینه:

- (۱) انرژی تخلیه در MTPF-1، ۰٫۴۵ برابر کم‌تر است.
- (۲) فشار بهینه‌ی گاز در دستگاه MTPF-1، ۰٫۳۶ برابر کم‌تر است.
- (۳) سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان در دستگاه MTPF-1، ۱٫۴ برابر بیش‌تر است.
- (۴) دامنه‌ی سیگنال پرتو ایکس سخت در دستگاه MTPF-1، ۳٫۳ برابر بیش‌تر است.

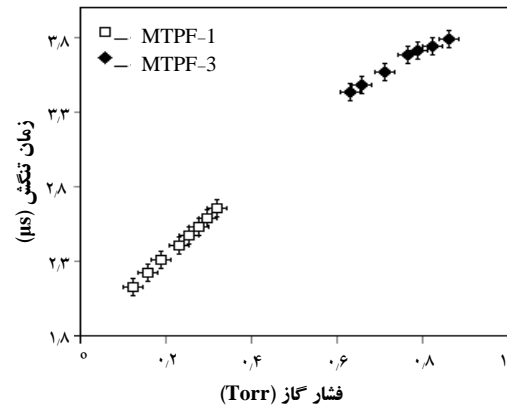
۶. بررسی فاکتور سرعت

یک گام دیگر به منظور مقایسه‌ی سرعت حرکت لایه‌ی جریان این دستگاه‌ها، مقایسه‌ی فاکتور سرعت $s = I / (\alpha \sqrt{P})$ آنها است. این فاکتور که به صورت نظری به دست آمده است [۲۸]، رابطه‌ای مستقیم با سرعت حرکت شعاعی لایه‌ی جریان بر روی سطح فوقانی آند دارد. در این رابطه I جریان لایه برحسب KA ، α شعاع آند برحسب cm ، و P فشار گاز برحسب torr است. از طرف دیگر، به صورت تقریبی می‌توان جریان I را تابعی از $(C_p / L_p)^{0.5}$ دانست و بنابراین نسبت فاکتورهای سرعت دو دستگاه به صورت تقریبی برابر است با:

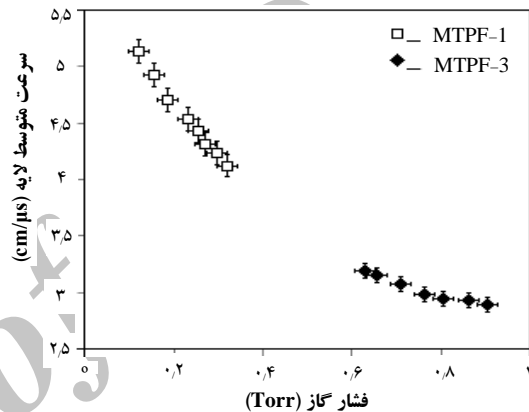
$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{C_{01} L_{01} P_1}{C_{02} L_{02} P_2} \right)^{0.5} = 1.25 \quad (1)$$

در این رابطه، C_{01} ظرفیت بانک خازنی، L_{01} القائیدگی مدار و P_1 فشار گاز در دستگاه MTPF-1، و C_{02} ظرفیت بانک خازنی، L_{02} القائیدگی مدار، و P_2 فشار گاز در دستگاه MTPF-3 است.

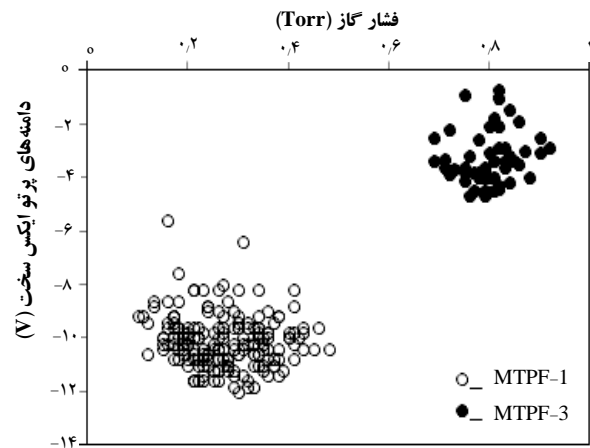
استفاده از مقادیر ظرفیت‌های خازنی و القائیدگی (به جدول ۱ مراجعه شود) و نیز فشارهای بهینه‌ی گاز (به جدول ۳ مراجعه شود)، نسبت سرعت حرکت لایه بر روی سطح آند دو دستگاه یعنی S_1/S_2 را ۱٫۲ برابر به دست می‌دهد. با وجود این که این



شکل ۶. اثر فشار گاز بر زمان تنگش.



شکل ۷. اثر فشار گاز بر سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان.



شکل ۸. اثر فشار گاز بر دامنه‌ی سیگنال پرتو ایکس سخت.

جدول ۳. فشار بهینه و دامنه سیگنال پرتو ایکس سخت

دستگاه	V (kV)	E (kJ)	P (Torr)	سرعت متوسط (cm/μs)	HXR _{mean} (V)
MTPF-1	۱۴	۱٫۶۵	۰٫۲۹±۰٫۰۸	۴٫۲۵±۰٫۱۵	۹٫۸±۱٫۰
MTPF-3	۱۴	۳٫۶۵	۰٫۸۱±۰٫۰۳	۲٫۹۵±۰٫۱۰	۳٫۰±۱٫۱



2. Plexiglass

مراجع

- [1] N.V. Filippov, T.I. Filippova, I.V. Khutoretskaia, V.V. Mialton, V.P. Vinogradov, Megajoule scale plasma focus as efficient x-ray source, *Phys. Lett. A* **211-31**(1996) 68-171.
- [2] 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** (2011) 2432-2433.
- [3] 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, and J.S. Brzosko, Filippov type plasma focus as intense source of hard x-rays ($E_x \sim 50$ keV), *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24-4** (1996) 1215-1222.
- [4] 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.
- [5] J.W. Mather, Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus, *Phys. Fluids* **8-2** (1965) 366-377.
- [6] M.A. Abd Al-Halim, Simulation of Plasma Focus Devices with Hemisphere Electrodes, *J. Fusion Energ.* **29** (2010) 134-140.
- [7] M.A. Tafreshi, M. Farrahi, M. Lamehi, Sh. Goudarzi, H. Habibi, M. Memarzadeh, V. Siahpoush, E. Saeedzadeh, V.P. Vinogradov, V.I. Krauz, V.A. Krivstov, M.A. Karakin, V.V. Myalton, V.P. Tykshaev, Dena a new PF device, *Nukleonika* **46 (1)** (2001) S85-S87.
- [8] S. Vahedi, S. Sobhanian, M.A. Mohammadi, V. Siahpoush, Preliminary measurements in Sahand plasma-focus emphasizing on the temporal characteristics of hard and soft X-rays, *Czech. J. Phys.* **56-2** (2006) B389-B395.
- [9] M.H.S. Alavi, M. Habibi, R. Amrollahi, and F. AfsharTaromi, A study on Plasma polymerization of acrylic acid using APF plasma focus device, *J. Fusion Energ.* **30-2** (2011) 184-189.

نتیجه، مربوط به سرعت حرکت لایه بر روی سطح بالایی آند دستگاه‌ها است، اما تأییدی بر بیش‌تر بودن سرعت حرکت لایه در دستگاه MTPF-1، و حدود تفاوت سرعت است.

۷. بحث و نتیجه‌گیری

کم‌تر بودن پارامتر $\sqrt{L_0/C_0}$ در دستگاه MTPF-1، طبیعتاً باعث کم‌تر شدن دوره‌ی تناوب تخلیه، و بنابراین کم‌تر شدن زمان صعود جریان $t_{1/4}$ شده است. با توجه به این که زمان تنگش مناسب، با رابطه‌ی $t_p \geq t_{1/4}$ تعیین می‌شود، بنابراین کم‌تر بودن $t_{1/4}$ در دستگاه MTPF-1 باعث می‌شود تا زمان تنگش مناسب این دستگاه، از مقادیر کم‌تری برخوردار باشد. برای دستیابی به مقادیر کم‌تر زمان تنگش، باید از فشار گاز کم‌تری استفاده شود تا به این ترتیب لایه‌ی جریان بتواند با سرعت بیش‌تری حرکت کرده و زودتر به مرحله تنگش برسد. سرعت بیش‌تر لایه‌ی جریان نیز به نوبه‌ی خود باعث انجام برخورد‌های قوی‌تر ذرات پلاسما و افزایش انرژی پرتو ایکس سخت (که ناشی از تابش ترمزی است) شده است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که:

- ۱) با توجه به ثابت بودن پارامترهای ساختاری (هندسی)، بیش‌تر بودن محسوس سرعت حرکت لایه‌ی جریان و نیز انرژی پرتو ایکس سخت دستگاه MTPF-1، نشان‌دهنده‌ی تأثیر نسبتاً زیاد پارامترهای الکتریکی (ظرفیت خازنی و القائیدگی مدار) بر سرعت حرکت لایه‌ی جریان و انرژی پرتو ایکس سخت است.
- ۲) کم‌تر بودن پارامتر به میزان ۴۰٪ مقدار $\sqrt{L_0/C_0}$ باعث افزایش سرعت متوسط حرکت لایه‌ی جریان به مقدار ۴۴٪، و انرژی پرتو ایکس سخت به مقدار ۲۲۷٪ شده است.
- ۳) تأثیر ۴۰٪ کم‌تر بودن مقدار $\sqrt{L_0/C_0}$ بر افزایش انرژی پرتو ایکس، بیش‌تر از تأثیر منفی ناشی از کم‌تر بودن ۵۵٪ انرژی تخلیه بوده است.
- ۴) در طراحی دستگاه‌های پلاسمای کانونی نوع مدِر، باید به این نکته توجه داشت که گسیل پرتو ایکس سخت با انرژی بیش‌تر، الزاماً هم‌تراز با مصرف انرژی بیش‌تر نیست.

پی‌نوشت‌ها

1. Current Sheath



- [10] D. Piriaei, T.D. Mahabadi, S. Javadi, M. Ghorannevis, S.H. Saw, S. Lee, The study of pinch regimes based on radiation-enhanced compression and anomalous resistivity phenomena and their effects on hard X-ray emission in a Mather type dense plasma focus device (SABALAN2), *Phys. Plasmas* **22** (2015) 123507.
- [11] S.E. Sanaz, Namini, H.Z. khatir, M. Ghorannevis, M.F. Aghamir, R.A. Behbahani, M. Kashani, Ion Beam Emission in a Low Energy Plasma Focus Device, *J. Fusion Energ.* **29** (2010) 471–475.
- [12] B. Shirani and F. Abbasi, Construction and experimental study of a 2.5kJ, simply configured, Mather Type plasma focus device, *Braz. J. Phy.* **40-2** (2010) 125-130.
- [13] V. Damideh, A. Asle-Zaeem, A. Heidarnia, A. Sadighzadeh, M.A. Tafreshi, F. AbbasiDavani, M. Moradshahi, M. BakhshzadMahmoudi, and R. Damideh, Design and fabrication of 11.2 kJ Mather-type plasma focus IR-MPF-1 with high drive parameter. *J. Fusion Energ.* (2012) **31-1** 47-51.
- [14] V. Damideh, M.A. Tafreshi, A. Heidarnia, A. Asle-Zaeem, A. Sadighzadeh, Design and construction of the 5 kJ Filippov-type plasma focus with brass anode, *J. Fusion Energ.* **30-6** (2011) 462-465.
- [15] L. Soto, New trends and future perspectives on plasma focus research, *Plasma Phys Contr. F.* **47** (2005) A361-A381.
- [16] N.V. Filippov, T.I. Filippova, A.N. Filippov, M.A. Karakin, E.Yu. Khautiev, V.I. Krauz, V.V. Mialton. S.A. Nikulin, V.P. Tykshaev, and V.P. vinogradov. Experimental simulation of the collisionless shock wave by plasma focus, *Czech. J. Phys.* **50- S3** (2000) 127.
- [17] R. Gratton, A.R. Piriz, On the use of plasma foci as drivers for pellet implosions, *Nucl. Fusion* **26-4**, (1986) 483.
- [18] B. Temple, O. Barnouin, and G.H. Miley, Plasma focus device for use in space propulsion, *Fusion Sci. Technol.* **19-3P2A** (1991) 846-851.
- [19] E.P. Bogolyubov, V.D. Bochkov. V.A. Veretennikov, L.T. Vekhoreva, V.A. Gribkov, A.V. Dubrovskii, Yu.P. Ivanov, A.I. Isakov. O.N. Krokin. P. Lee, V.Ya. Nikulin. A. Serban. P.V. Silin, X. Feng, and G.X. Zhang, A powerful soft X-ray source for X-ray lithography based on plasma focusing, *PhysicaScripta* **57** (1998) 488-494.
- [20] L.I. Ivanov, V.N. Pimenov, S.A. Maslyavet, Elena V. Dyomina, Vladimir A. Gribkov, Franco Mezzetti, Paola DeChiara, and Linda Pizzo, Influence of dense deuterium plasma pulses on materials in plasma focus device, *Nukleonika* **45(3)** (2000) 203-207.
- [21] Shaista Zeb, A. Qayyum, MehboobSadiq, M. Shafiq, A. Waheed, and M. Zakauallah, Deposition of diamond-like carbon films using graphite sputtering in neon dense plasma, *Plasma Chem. Plasma P.* **27-2** (2007) 127-139.
- [22] V.I. Krauz, M.G. Levashova, M.A. Karakin, O.N. Krokhin, V.S. Lisitsa, A.N. Mokeev, V.V. Myalton, V.YaNikulin, A.V. Oginov, V.P. Smirnov, and V.E. Fortov, Influence of the radiation of the plasma focus-current sheath on the implosion dynamics of condensed targets, *Plasma Phys. Rep.* **34-1** (2008) 43-51.
- [23] S. Lee, Plasma focus radiative mode: Review of the Lee model code, *J. Fusion Energ.* **33** (2014) 319-335.
- [24] V. Siahpoush, M.A. Tafreshi, S. Sobhanian, and S. Khorram, Adaptation of Sing Lee's model to the Filippov type plasma focus geometry. *Plasma Phys. Contr. F.* **47** (2005) 1065-1075.
- [25] M.A. Tafreshi, M.M. Nasserri, N. Nabipour, D. Rostamifard and A. Nasiri, Application of plasma focus device in fast industrial radiography, *J. Fusion Energ.* **33** (2014) 689-692.
- [26] V. Raspa, L. Sigaut, R. Llovera, P. Cobelli, B. Knoblauch, R. Vieytes, A. Clausse, and C. Moreno, Plasma focus as a powerful hard X-ray source for ultrafast imaging of moving metallic objects, *Braz J. Phys.* **34- 4B** (2004) 1696-1699.
- [27] A. Kanani, B. Shirani, I. Jabbari, J. Mokhtari, Assessment of image quality in X-ray radiography imaging using a small plasma focus device, *Radiat. Phys. Chem.* **101** (2014) 59-65.
- [28] Sing Lee and Adrian Serban, Dimensions and lifetime of the plasma focus pinch, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24-3** (1996) 1101-1105.