

تأثیر یارامترهای الکتریکی دستگاههای یلاسمای کانونی نوع مَدر بر انرژی پرتو ایکس سخت

محمدامیر حمزه تفرشی*'، داریوش رستمیفرد'، تانیا داوری مهابادی'، علی نصیری' ۱. پژوهشکدهی فیزیک پلاسما و گداخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۱۱۳ه-۱۱۲۳۹، تهران ـ ایران ۲. گروه فیزیک و بیوفیزیک، واحد علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۹۳۸۱۳–۱۹۱۲۸، تهران ـ ایران

چکیدد: در این مقاله پس از مروری بر تاریخچهی دستگاههای پلاسمای کانونی، موضوع کانونی شدن پلاسما مطرح، و در یی آن دو دستگاه جدید پلاسمای کانونی نوع مدر و نتایج پژوهشی حاصل از مقایسهی آنها معرفی می شوند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی چگونگی تأثیر ظرفیت بانک خازنی $_{C}^{}$ و القائیدگی مدار $_{L}^{}$ ، بر انرژی پرتو ایکس سخت گسیل شده از دستگاههای پلاسمای کانونی نوع مَدِر بوده است. این پژوهش نشان داد که تأثیر کاهش ضریب $\sqrt{L_{c}}$ بر افزایش انرژی پرتو ایکس سخت، به مراتب بیش تر از تأثیر ناشی از تغییر انرژی تخلیه است، به نحوی که با وجود کاهش ۵۵٪ انرژی تخلیه، کاهش ۴۰٪ مقدار 🛴 باعث افزایش ۲۲۷٪ انرژی پرتو ایکس سخت شده است. به بیان دیگر، در طراحی دستگاههای پلاسمای کانونی نوع مدر، باید توجه داشت که گسیل پرتو ایکس سخت با انرژی بیش تر، الزاماً مترادف با مصرف انرژی تخلیهی بیش تر

کلیدواژه ها: پلاسمای کانونی، نوع مَدرِ، 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, and the circuit inductance L, on the energy of the hard X-ray of Mather type devices. This invetigation showed that the effect of the \sqrt{LC} 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{LC} , 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 neccesary condition for a more energetic hard X-ray emission.

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

۱. مقدمه

دستگاههای پلاسمای کانونی، نوعی مولد تپی پلاسما هستند که میدان مغناطیسی، پلاسمای آنها را محصور می کند 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 ^{۳-} m

چگالی و دمای نسبتاً زیاد این گونه از پلاسما باعث گسیل پرتوهای پرانرژی می شود که مهم ترین آن ها عبارتند از؛ پر تو ایکس نرم (با انرژی کم تر از ۱۰ ke۷)، پر تو ایکس سخت (با انرژی بیش تر از ۱۰ ke۷) و نیز نو ترون های پرانرژی که تحت شرایط مناسب تولید می شوند [۱-۳]. گسیل پر تو ایکس نرم عمدتاً به علت برانگیختگی و به دنبال آن واانگیختگی اتم های گاز و یا اتم های آند انجام می پذیرد. گسیل پر تو ایکس سخت نیز به علت برخورد الکترون های پرانرژی پلاسما با آند دستگاه و تحت ت أثیر پدیده ی تابش ترمزی انجام می شود. انجام واکنش های گداخت هسته ای نیز عامل گسیل نو ترون ها است.

در مورد تاریخچه ساخت دستگاه های پلاسمای کانونی، می توان گفت که در سال ۱۹۶۲، فیلیپوف ساخت یک دستگاه پلاسمای کانونی در روسیه را اعلام کرد [۴]. در سال ۱۹۶۵ نیز مَدر، یک دستگاه پلاسمای کانونی با ساختاری متفاوت را در آمریکا شکل دهی کرد [۵]. در سال ۱۹۹۶ ماکیف و همکارانش شدند که به مدل گروی معروف است. با وجود تفاوت ساختاری شدند که به مدل گروی معروف است. با وجود تفاوت ساختاری پلاسما، هر سه مدل تا حد زیادی مشابه یک دیگر عمل می کنند. مهم ترین شباهت ها 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 خریـداری، و در بهـار ۱۳۷۹ در پژوهشـکدهی پلاسـما و گداخت هستهای در سازمان انرژی اتمی ایران نصب و راهاندازی شـد [۷]. پـس از راهانـدازی ایـن دسـتگاه، پـژوهش در زمینـهی

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 می شود که همگی توسط متخصصین داخلی طراحی و ساخته شدهاند [۹-

تواناییها و ویژگیهای دستگاههای پلاسمای کانونی، باعث شده است تا این دستگاهها مورد توجه بسیاری از پژوهش گران رشتههای مختلف قرار گیرند [۱۵–۲۴]. بارزترین ویژگیهای این دستگاهها عبار تند از؛ تمیزی از نظر زیست محیطی، آسانی نسبی ساخت، ارزانی قیمت، شدت نسبتاً زیاد پر توها، زمان نسبتاً کم پر تودهي (در حدود چند ده نانو ثانيه)، و کوچک بودن چشمهي گسیل پر تو (در حدود ۱mm^۳). این ویژگی ها باعث شده است تا کاربرد پر تو ایکس سخت این گونه دستگاه ها در زمینه های مختلفي از جمله راديو گرافي فرا سريع مطرح شود [۲۵-۲۷]. اين پژوهش، در رابطه با تأثیر تجربی پارامترهای مدار الکتریکی دستگاههای پلاسمای کانونی از این نوع مَدِر بر انرژی پر تو ایکس سخت گسیل شده است. برای انجام آن از دو دستگاه پلاسمای کانونی از این نوع استفاده شده است. ساختار هندسمی محفظ می خلأ اين دستگاهها كاملاً مشابه، ولي مدار الكتريكي آنهما كماملاً متفاوت است. این دستگاه ها با نام های MTPF-1 و MTPF-3 شیناخته می شوند و به ترتیب در سال های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در پژوهشکدهی پلاسما و گداخت هستهای سازمان انرژی اتمی ايران، طراحي و ساخته شدهاند.

۲. مروری بر کانونی شدن پلاسما

در حالت خیلی ساده، می توان 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 خلاً) تشکیل می دهند که با یک کلید اتصال سریع الکتریکی، به بانک خازنی وصل می شوند. شکل ۱، طرحواره ای تقریبی از محفظه ی خلاً یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مَدِر و لایه ی جریان^(۱) را نشان می دهد.



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 لحطات پایانی.

مراحل مختلف عملکرد این گونه دستگاه ها به این صورت است که در ابتدا محفظه ی خلا تخلیه شده و گاز مورد نظر به آن تزریق می شود. 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 می شود. این اختلاف پتانسیل، باعث پیدایش میدان الکتریکی در فضای بین آند و کاتد و آغاز تخلیه ی الکتریکی از روی سطح عایق می شود. به این ترتیب لایه ای از جریان الکتریکی (به نام لایه ی جریان) در مجاورت سطح عایق تشکیل می شود. وجود این لایه، باعث پیدایش یک میدان مغناطیسی سمتی، و متعاقباً به کار گیری نیروی لورنتس ($\overline{R} \times \overline{r} + \overline{R}) = \overline{T}$ بر خود لایه ی جریان و پلاسمای قرار گرفته در پیش روی آن می شود. به این ترتیب،

حرکت لایهی جریان باعث می شود تا در نهایت ستون نسبتا کوچکی از پلاسمای کانونی (و یا تنگیده) شده، حول محور تقارن شکل گیرد. این پلاسمای کانونی شده، پس از زمان کوتاهی (کم تر از ۱۰۰۳) در اثر به روز ناپایداری های پلاسما دچار واپاشی می شود. همان طور 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 پر توهای پرانرژی می شود. شکل ۲، طرحواره ای از ستون پلاسما و لایهی جریان در قسمت بالایی آند و کاتد را نشان می دهد. در این شکل، جهت میدان مغناطیسی سمتی نیز نشان داده شده است.



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

۳. معرفی دستگاهها

همان طور که قبلاً بیان شد، محفظه ی خلاً هر دو دستگاه کاملاً مشابه یک دیگرند. الکترود مرکزی (آند)، استوانه ای از جنس مس است و کاتد دستگاه ها از ۱۲ میله ی تشکیل شده مسی است که گرداگرد آند قرار گرفته اند. ارتفاع هر میله ی کاتد ۱۴٫۵cm و فاصله ی هر میله تا آند ۲٫۷cm است. عایق دستگاه نیز استوانه ای از جنس پیرکس با ضخامت ۲۸ ۲۸ و ارتفاع مؤثر m ۵ است. فاصله ی بین سطح بالایی آند تا لبه ی بالایی عایق نیز مرمص ۹٫۵cm و شعاع استوانه ی آند تا لبه ی بالایی عایق نیز عدد (۵۵ مار ۹۹ ۹٫۵ ۹٫۵ ۹٫۹ مسیری است که لایه ی جریان بر روی سطح آند می پیماید (طول ۵). شکل ۳، تصویری از محفظه ی خلاً و درون آن را نشان می دهد.

پارامترهای الکتریکی دو دستگاه، در جدول ۱ نشان داده شده اند. ستون دوم این جدول، ولتاژ تخلیه، ستون سوم ظرفیت شده اند. ستون دوم این جدول، ولتاژ تخلیه، ستون سوم ظرفیت بانک خازنی، ستون چهارم القائیدگی، ستون پنجم پارامتر $\sqrt{L_oC_o}$, ستون ششم تقریبی از مقاومت ظاهری مدار است که با استفاده از پارامتر پارامتر پارامتر آمده اند، و ستون هفتم نیز تقریبی از بیشنه ی جریان تخلیه است که با استفاده از پارامتر $\sqrt{V_oZ_o}$, محاسبه شده اند.

دو ستون آخر نیز به ترتیب دوره ی تناوب تخلیه و زمان یک چهارم متناوب $t_{1/F}$ (یا زمان صعود جریان tr) قرار دارند. در این جا باید به دو نکته نیز اشاره شود. نکته اول آن که پارامترهای ارائه شده در ستونهای ۵ الی ۹ ایس جدول، بر گرفته از پارامترهای ستونهای دوم تا چهارم هستند و صرفاً به منظور ساده سازی ارائه ی مطالب بعدی، بیان شدهاند. نکته دیگر آن است که پارامتر $\sqrt{L_o / C_o}$ دستگاه MTPF-1، ۰۶٪ کم تر است.

$t_{\rm r}$ (µs)	<i>T</i> (μs)	$I\square$ (kA)	$Z\square$ (m Ω)	$\sqrt{L_{o}C_{o}}$ μs	<i>L</i> □ (nH)	<i>С</i> □ (µF)	V□ (kV)	دستگاه
۲,۰۹	۵۳٫۸	١٧٧	۷۹	٣٣	1.0	۱۶/۸	14	MTPF-1
۳,۴۵	۸٫۳	7377	۵۹	۲,۲۰	13.	۳۷٫۲	14	MTPF-3

جدول ۱. پارامترهای الکتریکی دو دستگاه



شکل ٤. 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 بر گرفته شود تا تنگش در زمان مناسب رخ دهد. به عبارت دیگر بر $t_p \ge t_r$ باشد تا به این ترتیب، مقدار زیادی از انرژی بانک خازنی به پلاسما منتقل شود.

سامانهی تشخیصی دیگری که در این آزمایش ها استفاده شده است، یک مجموعهی سوسوزن پلاستیکی و تکثیر کنندهی فوتونی ۱۴ مرحلهای است که برای اندازه گیری نسبی انرژی پرتو ایکس سخت به کار رفته است. سوسوزن مورد استفاده، استوانه-ای با قطر و ارتفاع ۸۰۸ ((۲۱) است. در آزمایش های 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 ۲۲cm آمده است، سیگنال پرتو ایکس سخت حاصل از تخلیه های آمده است، سیگنال پرتو ایکس سخت حاصل از تخلیه های



شکل ۳. تصویری از محفظهی خلا دستگاهها.

مهم ترین سامانهی تشخیصی دستگاه های پلاسمای کانونی، پیچهای ساده است که پیچهی مشتق جریان نام دارد. این پیچه از چند دوره تشکیل شده است و در کنار قطب مثبت یکی از خازنهای بانک انرژی قرار می گیرد. نحوه قرار گیری پیچه به صورتی است که عبور خطوط میدان مغناطیسی ناشی از جریان تخلیهی خازن، باعث پیدایش یک جریان القائی در پیچه متناسب با مشتق جریان تخلیه می شود.

شکل ۴، نمونه ای از سیگنال مشتق جریان دستگاههای MTPF-1 و MTPF-3 را نشان می دهد. این دو سیگنال، حاصل آن تخلیه های الکتریکی هستند که در فشار بهینه ی گاز صورت گرفته و منجر به کانونی شدن نسبتاً قوی پلاسما شده اند. در هر دو تخلیه، گاز مورد استفاده آرگون، و اختلاف پتانسیل ۱۴ kV بوده است. قلهی تیز و منفی موجود در سیگنال های زیر، نشان دهنده ی زمان کانونی شدن پلاسما و یا به بیان دیگر، زمان رخداد تنگش پلاسما و است. علت پیدایش این قله های منفی، افزایش نسبتاً زیاد امپدانس مدار در لحظهی تنگش است.



٤. 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 تخلیه ی F، دوره تناوب تخلیه ی T، فشار گاز P، زمان تنگش _qt، و طول مسیری که لایه ی جریان بر روی سطح آند می پیماید b، را نشان می دهند. ستون هفتم جدول، سرعت متوسط حرکت لایه ی جریان بر روی آند دستگاه ها در فاصله زمانی بین شروع تخلیه تا زمان تنگش نشان می دهد. این سرعت با تقسیم طول مسیر b بر زمان تنگش _qt، به دست آمده است. با توجه به این که برای نظر شده است، بنابراین می توان این سرعت را به عنوان حداقل سرعت متوسط نیز معرفی کرد. ستون آخر جدول نیز بیشینه ی دامنه سیگنال های پر تو ایکس سخت را نشان می دهد که از شکل ۵ به دست آمده ای این جدول، که با استفاده از پارامترهای دو تخلیه با تنگش های نسبتاً قوی تهیه شده است نشان می دهند که:

جدول ۲. مقایسهی تخلیههای الکتریکی ۱۴k۷ در گاز آرگون (مربوط به شکلهای ۴ و ۵)

HXR (V)	سرعت متوسط (cm/µs)	d (cm)	t _p (μs)	P (Torr)	<i>T</i> (μs)	E (kJ)	دستگاه
-11/A	۴,۲۶	۹۵/۱۰	۲,۵۷	•,79	۸,۳۵	۱,۶۵	MTPF-1
- F /V	۲٫۷۹	۱۰,۹۵	۳/۹۳	٠٨١	۱۳,۸	۳,9۵	MTPF-3

- ۱) فشار بهینه گاز در دستگاه MTPF-1 کم تر است.
- ۲) سرعت متوسط حرکت لایه ی جریان در دستگاه MTPF-1
 بیش تر است.
- ۳) انرژی پرتو ایکس سخت دستگاه MTPF-1 بیش تر است.
 اکنون که روند کار مشخص شده است، می توان به بررسی
 دقیق تر موضوع پرداخت.

۵. بررسی دقیق تر سرعت متوسط و تولید پر تو ایکس به منظور بررسی دقیق تر موارد بیان شده، در این قسمت، دادههای بیش تری 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 ۲۴ kV بوده است. شکل ۶، تأثیر تغییر فشار گاز بر زمان تنگش مt دو دستگاه را نشان می دهد. اولین نقطهی هر یک از توابع این شکل، نشان-دهندهی حداقل فشار گاز قابل قبول است. به بیان دیگر، فشاری است که باعث می شود تا ۲۰٫۴=مt شود (Tor ۲۰٫۲ برای MTPF-1

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

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

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





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

جدول ٣. فشار بهينه و دامنه سيگنال پر تو ايكس سخت

HXR _{mean} (V)	سرعت متوسط (cm/µs)	P (Torr)	E (kJ)	V (kV)	دستگاه
۹٫۸±۱٫۰	۴,۲۵±۰,۱۵	۰,۲۹±۰,۰۸	1,90	14	MTPF-1
۳,·±۱,۱	۲/۹۵±۰/۱۰	۰,۸۱±۰,۰۳	۳,۶۵	۱۴	MTPF-3

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، ۴۵، برابر کم تر است.
- ۲) فشار بهینهی گاز در دستگاه MTPF-1، ۱٫۳۶ برابـر کـمتـر است.
- ۳) سرعت متوسط حرکت لایه یجریان در دستگاه ۱٫۴ ،MTPF-1 برابر بیش تر است.
- ۴) دامنه سیستگنال پرتو ایکس سخت در دستگاه
 ۴) ۲/۳ برابر بیش تر است.
 - ۲. بررسی فاکتور سرعت

یک گام دیگر به منظور مقایسه ی سرعت حرکت لایه ی جریان این دستگاه ها، مقایسه ی فاکتور سرعت $(\sqrt{P})/s = s = 1/(a\sqrt{P})$ آنها است. این فاکتور که به صورت نظری به دست آمده است [۸۸]، رابطه ای مستقیم با سرعت حرکت شعاعی لایه ی جریان بر روی سطح فوقانی آند دارد. در این رابطه I جریان لایه برحسب torr بری سطح فوقانی آند برحسب cm، و P فشار گاز برحسب است. از طرف دیگر، به صورت تقریبی می توان جریان I را تابعی از ⁶ (L/ $_{0}$) دانست و بنابراین نسبت فاکتورهای سرعت دو دستگاه به صورت تقریبی برابر است با :

(1)
$$\frac{S_{\tau}}{S_{\tau}} = \left(\frac{C_{o}L_{o\tau}P_{\tau}}{C_{o\tau}L_{o}P_{\tau}}\right)^{2} = 1/Y\Delta$$

در این رابطه، C_0 ظرفیت بانک خازنی، L_1 القائیدگی مدار و P₁ فشار گاز در دستگاه MTPF-1 ، و C_0 ظرفیت بانک خازنی، P_1 فشار گاز در دستگاه خازنی، L_0 القائیدگی مدار، و P_1 فشار گاز در دستگاه MTPF-3 است.

استفاده از مقادیر ظرفیتهای خازنی و القائیدگی (به جدول ۱ مراجعه شود) و نیز فشارهای بهینه گاز (به جدول ۳ مراجعه شود)، نسبت سرعت حرکت لایه بر روی سطح آند دو دستگاه یعنی ۶۱/۶۳، را ۱/۲ برابر به دست میدهد. با وجود این که این 2. Plexiglass

- 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 (Ex ~ 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 Xrays, *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 بیش تر بودن سرعت حرکت لایه در دستگاه MTPF-1، و حدود تفاوت سرعت است.

۲. بحث و نتیجه گیری

کمتر بودن پارامتر \int_{0}^{N} / C_{o} در دستگاه MTPF-1، طبیعتا باعث کمتر شدن دوره ی تناوب تخلیه، و بنابراین کمتر شدن زمان صعود جریان $t_{1/4}$ ، شده است. با توجه به این که زمان تنگش مناسب، با رابطه ی $t_{1/4} \leq t_p$ تعیین می شود، بنابراین کم تر بودن $t_{1/4}$ در دستگاه ITPF-1 باعث می شود تا زمان تنگش مناسب این دستگاه، از مقادیر کمتری بر خوردار باشد. برای مناسب این دستگاه، از مقادیر کمتری بر خوردار باشد. برای استفاده شود تا به این ترتیب لایه ی جریان بتواند با سرعت بیش تری حرکت کرده و زودتر به مرحله تنگش باید از فشار گاز کمتری لایه ی جریان نیز به نوبه ی خود باعث انجام بر خوردهای قوی تر ذرات پلاسما و افزایش انرژی پر تو ایکس سخت (که ناشی از نابش ترمزی است) شده است. بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که:

- با توجه به ثابت بودن پارامترهای ساختاری (هندسی)، بیش تر بودن محسوس سرعت حرکت لایه ی جریان و نیز انرژی پر تو ایکس سخت دستگاه MTPF-1، نشاندهنده ی تأثیر نسبتاً زیاد پارامترهای الکتریکی (ظرفیت خازنی و القائیدگی مدار) بر سرعت حرکت لایه ی جریان و انرژی پر تو ایکس سخت است.
- ۲) کم تر بودن پارامتر به میزان ۴۰٪ مقدار <u>ر</u> / رر / ر. باعث افزایش سرعت متوسط حرکت لایه یجریان به مقدار ۴۴٪ ، و انرژی پر تو ایکس سخت به مقدار ۲۲۷٪ شده است.
- ۳) تأثیر ۴۰٪ کم تر بودن مقدار رو / / را بر افزایش انرژی پر تو ایکس، بیش تر از تأثیر منفی ناشی از کم تر بودن ۵۵ ٪ انرژی تخلیه بوده است.
- ۴) در طراحی دستگاههای پلاسمای کانونی نوع مَدر، باید به این نکته توجه داشت که گسیل پرتو ایکس سخت با انرژی بیش تر، الزاماً هم تراز با مصرف انرژی بیش تر نیست.

پینوشتھا



- [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. Ghoranneviss, 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, Sadighzadeh, M.A. 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. Maslyaevet, 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. Zakaullah, 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 impolsion 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. Nasseri, 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 Xray 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.