



مشخصه‌یابی باریکه یونی هیدروژن دستگاه پلاسمای کانونی MTPF با استفاده از روش زمان پرواز و کد لی

داریوش رستمی فرد^{ID}، نوشین پیش بین^{ID*}، علی نصیری^{ID}، میرمحمد رضا سید حبشی^{ID}، مریم اکبری نساجی^{ID}
پژوهشکده پلازما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران - ایران

*Email: npishbin1985@gmail.com

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۴/۱۰ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۵/۲۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۳۱

چکیده

در مطالعه برهم‌کنش یون‌های هیدروژن گسیل یافته از دستگاه پلاسمای کانونی بر روی مواد منتخب برای دیواره اول توکامک، مشخصه‌یابی باریکه یونی از اهمیت فراوانی برخوردار است. بدین منظور، یک آشکارساز فارادی کاپ برای دستگاه پلاسمای کانونی MTPF طراحی، ساخته و پارامترهای الکتریکی آن استخراج گردید. در سیگنال‌های به‌دست آمده از فارادی کاپ دو پیک قابل مشاهده است که پیک اول، مربوط به برخورد پرتوایکس و پیک دوم نیز در اثر برخورد باریکه یونی هیدروژن به الکترود گرافیتی فارادی کاپ می‌باشد. با استفاده از روش زمان پرواز، انرژی میانگین باریکه یونی هیدروژن مقدار 46 keV همچنین پارامتر شار و شارش باریکه در محل روزنه ورودی فارادی کاپ به ترتیب مقدار $2.37 \times 10^{24} \text{ ions.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و $1.45 \times 10^{16} \text{ ions.m}^{-2}.$ به‌دست آمد. مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی MTPF در کد لی جای‌گذاری گردیده و نتایج کد برای مشخصات باریکه یونی تطابق خوبی با نتایج تجربی به‌دست آمده از سیگنال فارادی کاپ دارد. همچنین سایر مشخصات باریکه یونی هیدروژن نیز استخراج گردید.

کلیدواژه‌ها: فارادی کاپ، روش زمان پرواز، شار و شارش باریکه یونی، کد لی

Characterization of hydrogen ion beam emitted from MTPF plasma focus device using faraday cup and Lee code

D. Rostamifard, N. Pishbin*, A. Nasiri, M.M.R. SeyedHabashi, M. Akbari Nasaji

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 14399-51113, Tehran – Iran

Research Article

Received: 1.7.2023, Revised: 13.8.2023, Accepted: 22.8.2023

Abstract

In studying the interaction of hydrogen ions emitted from a plasma focus device with selected materials for the first wall of a tokamak, characterizing the ion beam is crucial. For this purpose, a Faraday-cup detector was designed and built for the MTPF plasma focus device, and its electrical parameters were extracted. The signals obtained from the Faraday-cup exhibited two peaks: the first peak corresponds to radiation impact, and the second peak is due to the impact of the hydrogen ion beam on the graphite electrode of the Faraday-cup. Using the time-of-flight (TOF) method, the average energy of the hydrogen ion beam was determined to be 46 keV. The flux parameters of the beam at the aperture of the Faraday-cup were $2.37 \times 10^{24} \text{ ions.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ and $1.45 \times 10^{16} \text{ ions.m}^{-2}.$, respectively. The specifications of the MTPF plasma focus device were incorporated into the Lee model code, and the resulting ion beam specifications from the code showed good agreement with the experimental results obtained from the Faraday-cup signal. Additionally, other characteristics of the hydrogen ion beam were extracted.

Keywords: Faraday-cup, Time of flight (TOF) method, Flux and fluence ion beam, Lee model code



۱. مقدمه

در مطالعه برهم‌کنش ذرات پرنرژی با سطح مواد در دیواره اول توکامک، دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان یک دستگاه تحقیقاتی بالارزش و کم‌هزینه به شمار می‌آید که توانسته است در این حوزه نقش بسزایی ایفا کند [۵-۱]. این دستگاه به عنوان شتاب‌دهنده پالسی یون‌ها در محدوده وسیعی از انرژی از چندکیلو الکترون‌ولت تا مگاالکترون‌ولت می‌تواند کار کند [۶-۱۰]. یون‌های تولید شده توسط ستون پینچ پلاسمای می‌توانند برای پژوهش در زمینه کاربرد مواد استفاده شوند. جالب‌ترین کاربردهای یون‌های تولید شده توسط PF، کاشت یون^۱ در مواد، ساخت نانومواد و مطالعات آسیب دیواره اول راکتور گداخت هسته‌ای است [۱۱-۱۶]. بنابراین مشخصه‌یابی باریکه یونی گسیل یافته از ستون پینچ دستگاه پلاسمای کانونی به مانند انرژی، چگالی و توزیع فضایی باریکه یونی از اهمیت فراوانی برخوردار است و در ادامه با داشتن این مشخصات و همچنین استخراج چگونگی تأثیرگذاری پارامترهای دستگاه پلاسمای کانونی (شامل هندسه الکترودها، ولتاژ و فشار گاز کاری) بر مشخصات باریکه یونی می‌توان در بهینه‌سازی، ارتقاء و اصلاح دستگاه‌های پلاسمای کانونی برای کاربرد در حوزه برهم‌کنش ذرات پرنرژی با مواد گام‌های مؤثری برداشت.

در این زمینه پژوهشگران با استفاده از کد لی به بررسی رابطه مشخصات باریکه یونی با انرژی تخلیه در دستگاه‌های پلاسمای کانونی در محدود ۰/۴ تا ۵۰۰ کیلوژول پرداخته و به این نتیجه رسیدند که پارامتر شار و شارش باریکه یونی مستقل از انرژی دستگاه بوده و جریان باریکه یونی در حدود ۱۴-۲۳ درصد از جریان پینچ پلاسمای می‌باشد [۱۷].

در پژوهش دیگری که به مشخصه‌یابی باریکه یونی در دستگاه پلاسمای کانونی پرداخته شده است حداکثر شار یونی برای یون‌های با انرژی‌های پایین‌تر و حداقل شار یونی برای یون‌هایی با انرژی بالاتر به دست می‌آید. بازدهی دستگاه پلاسمای کانونی به فشار گاز کاری بستگی دارد و مشخص شده است که پینچ خوب به گسیل یون‌های با انرژی بالاتر منجر می‌شود. بنابراین شار انرژی یونی به بازده دستگاه پلاسمای کانونی و همچنین فشار گاز کاری بستگی دارد [۱۸]. همچنین یافته‌های محققان نشان می‌دهد که مشخصات باریکه یونی (شامل انرژی، شار، شارش، تعداد یون، جریان، چگالی توان و ضریب آسیب) دارای محدوده‌های وسیعی بر اساس پارامترهای عملیاتی دستگاه پلاسمای کانونی هستند [۱۹]. بنابراین، با مشخصه‌یابی باریکه یونی می‌توان برای تعیین پارامترهای

دستگاه پلاسمای کانونی مناسب برای کاربردهای پردازش مواد مورد نظر استفاده کرد. بنابراین در این راستا، در قدم اول، مشخصه‌یابی باریکه یونی گسیل یافته از دستگاه پلاسمای کانونی از ضروریات اساسی پژوهش می‌باشد.

فارادی‌کاپ (FC^2) یک ابزار تشخیصی تجربی بسیار مفید برای به‌دست آوردن چگالی جریان باریکه یون/الکترون سریع و استفاده از روش اندازه‌گیری‌های زمان پرواز یون/الکترون در دستگاه‌های پلاسمای کانونی است که هر دستگاه بسته به انرژی و فشار گاز کاری خود، این آشکارساز را نصب و پارامترهای مربوط به باریکه یونی دستگاه را استخراج می‌کند [۲۰-۲۳].

در این مقاله، ابتدا یک آشکارساز فارادی‌کاپ برای دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر $MTPF^3$ طراحی و ساخته شد و مشخصات هندسی و الکتریکی این فارادی‌کاپ نیز استخراج گردید. در سیگنال‌های به‌دست آمده از فارادی‌کاپ دو پیک قابل مشاهده است که پیک اولیه مربوط به برخورد پرتوایکس و پیک دوم نیز در اثر برخورد باریکه یونی به الکتروگرافیتی می‌باشد. با استفاده از روش زمان پرواز و اختلاف زمانی بین دو پیک سیگنال مشاهده شده انرژی میانگین یون‌ها، شار^۴ و شارش^۵ باریکه یونی نیز به صورت تجربی به‌دست آمد. برای دستگاه پلاسمای کانونی، کد لی ابزار مفیدی برای محاسبه انرژی یون، چگالی، شار، شارش باریکه یونی و همچنین مشخصات جریان پلاسمای است [۲۲]. در ادامه با جای‌گذاری مشخصات هندسی و شرایط کاری دستگاه پلاسمای کانونی $MTPF$ (ولتاژ تخلیه و فشار گاز) در کد لی و با استفاده از سیگنال تجربی جریان تخلیه، پارامترهای f_c ، f_{mr} ، f_m و f_{cr} برای دستگاه پلاسمای کانونی $MTPF$ استخراج گردید. سپس با استفاده از سایر خروجی‌های کد لی، پارامترهای مهم باریکه یونی برای گاز کاری (هیدروژن) به‌دست می‌آید.

۲. چیدمان تجربی

۲.۲ مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی $MTPF$ و آشکارساز فارادی کاپ نصب شده بر روی آن

دستگاه پلاسمای کانونی $MTPF$ از نوع مدر (حداکثر انرژی ۱/۷ kJ) با خازنی به ظرفیت ۱۳/۵ μF ، حداکثر ولتاژ کاری ۱۶ kV، اندوکتانس ۱۵۲ nH و حداکثر جریان تخلیه ۱۵۰ kA به عنوان منبع تولید یون‌های پرنرژی برای پرتودهی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. سایر مشخصات این دستگاه در جدول ۱، آورده شده است.

2. Faraday Cup

3. Mather Type Plasma Focus

4. Flux

5. Fluence



$$f_{c=FC} \approx \frac{c}{\left(\pi \left(\frac{D+d}{2} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right)} \approx \Delta GHz \quad (5)$$

$$T = \sqrt{4\pi^2 L_{FC} C_{FC}} = 0.93 ns \quad (6)$$

با توجه به این که ظرفیت معادل مدار فارادی کاپ برابر با مجموع ظرفیت مدار راه‌انداز $CF=100 nF$ و ظرفیت خود فارادی کاپ $C_{FC}=3 pF$ می‌باشد که ظرفیت فارادی کاپ در مقابل با ظرفیت مدار ناچیز می‌باشد. همچنین با توجه به این که برای انتقال سیگنال از فارادی کاپ تا اسیلوسکوپ از کابل کوکسیال به شماره RG58 استفاده می‌شود بنابراین برای این که تضعیفی در محل اتصال فارادی کاپ و کابل انتقال دهنده سیگنال رخ ندهد باید اهم معادل این دو با هم برابر باشد. امپدانس کابل RG58 دارای مقاومت 50Ω است و بنابراین باید امپدانس فارادی کاپ نیز 50Ω باشد که با توجه به معادله ۳ این مقدار 50Ω برای فارادی کاپ نیز به دست آمده و در نتیجه در تطابق کامل با خط انتقال بوده و تضعیف سیگنالی چندانی در این محل اتصال رخ نمی‌دهد. مشخصات هندسی و الکتریکی این فارادی کاپ ساخته شده در جدول ۲، آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات هندسی و الکتریکی فارادی کاپ ساخته شده

ساختار	دو استوانه هم محور با عایق مابین
ابعاد استوانه بیرونی	قطر داخلی: ۲۰ mm ارتفاع: ۳۱ mm
ابعاد استوانه داخلی	قطر بیرونی: ۶ mm ارتفاع: ۱۷ mm
هندسی	ابعاد عایق مابین قطر: ۶ mm ارتفاع: ۲۲ mm
	روزنه ورودی قطر: ۱ mm
	جنس الکترودها استیل
	جنس عایق تفلون
	ولتاژ بایاس معکوس ۱۰۰ V
	امپدانس 50Ω
مشخصات الکتریکی	ظرفیت خازنی ۳ PF
	اندوکتانس ۷۴ nH
	ولتاژ شکست عایق ۷۸ kV
	فرکانس قطع ۵ GHz
	پاسخ زمانی ۰.۹۳ ns

جدول ۱. مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی MTPF

پارامتر	مقدار
ظرفیت خازنی	$13.5 \mu F$
ولتاژ کاری عملیاتی	۱۲-۱۶ kV
محدوده انرژی دستگاه	۱-۱.۷ kJ
جریان تخلیه	۱۱۰-۱۵۰ kA
اندوکتانس مداری	۱۵۲ nH
طول آند	۱۴.۵ cm
شعاع آند	۱.۴۵ cm
شعاع کاند	۳.۹۵ cm
دوره زمانی تخلیه	۹ μs
گاز کاری	هیدروژن

برای تعیین مشخصات باریکه یونی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF، یک آشکارساز فارادی کاپ طراحی و ساخته شد. فارادی کاپ ساخته شده برای دستگاه پلاسمای کانونی MTPF، از دو استوانه هم‌محور تشکیل شده است که استوانه بیرونی از جنس استیل و استوانه داخلی از جنس گرافیت بوده و عایق مابین این دو استوانه از جنس پلی اتیلن می‌باشد. و به دلیل حداقل بودن انتشار الکترون ثانویه، این الکترودها از گرافیت ساخته می‌شود. روزنه ورودی فارادی کاپ ۱ mm قطر دارد. مقدار ظرفیت خازنی، اندوکتانس و امپدانس فارادی کاپ ساخته شده از روابط زیر به دست می‌آید [۲۴]:

$$C_{FC} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln(D/d)} \cong 3 pF \quad (1)$$

$$L_{FC} = \frac{\mu_0\mu_r h}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \cong 74 nH \quad (2)$$

$$Z_{FC} = \sqrt{L_{FC} / C_{FC}} \cong 50 \Omega \quad (3)$$

که در این روابط، D ، قطر داخلی الکترودها بیرونی فارادی کاپ، d ، قطر بیرونی الکترودها داخلی فارادی کاپ و پارامتر h ، ارتفاع فارادی کاپ می‌باشد.

حداکثر ولتاژ اعمالی به فارادی کاپ توسط ولتاژ شکست عایق تنظیم می‌شود که برابر است با:

$$V_P = 0.5 S d_{in} \ln(D/d) \cong 78 kV \quad (4)$$

که پارامتر S ، ولتاژ شکست عایق تفلونی مابین دو الکترودها فارادی کاپ است. فرکانس قطع این فارادی کاپ ($f_{c=FC}$) و پاسخ زمانی آن نیز برابر است با [۲۵]:



برای تعیین موقعیت مناسب فارادی کاپ نسبت به سرآند دستگاه (محل تشکیل پینچ)، به صورت تجربی مشاهده گردید که با نزدیک شدن فارادی کاپ به سرآند دستگاه (محل تشکیل پینچ)، نویزهایی که بر روی سیگنال فارادی کاپ اثر می گذارند بیشتر می شوند (شکل ۲ ب) و برعکس با فاصله گرفتن فارادی کاپ از سطح آند، به دلیل واگرا شدن باریکه یونی، تعداد یون های کمتری به فارادی کاپ برخورد می کنند بنابراین دامنه سیگنال به وجود آمده نیز کاهش پیدا می کند.

بنابراین فاصله بهینه ای برای موقعیت فارادی کاپ نسبت به سرآند دستگاه وجود دارد که در دستگاه پلاسمای کانونی MTPF این فاصله به صورت تجربی در حدود ۶۰ cm به دست آمد و در این فاصله نسبت پارامتر سیگنال به نویز (S/N) به مراتب بهبود می یابد (شکل ۲ ج). بنابراین فارادی کاپ در فاصله ۶۰ cm از سر الکترود آند دستگاه MTPF قرار گرفت.

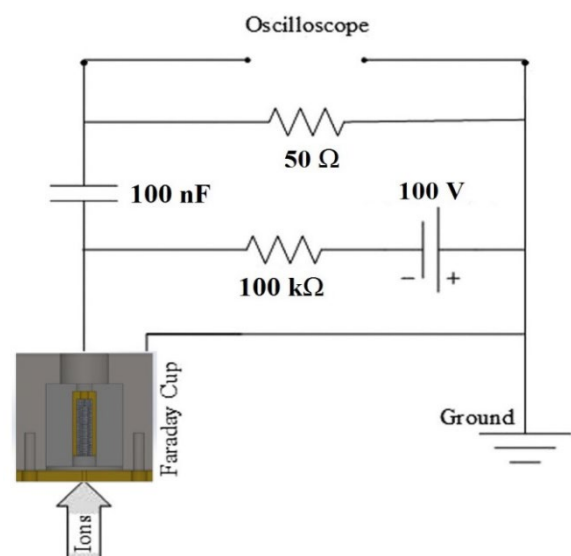
۳. نتایج تجربی

تصویر یک شات نوعی دستگاه پلاسمای کانونی با گاز کاری هیدروژن که توسط یک اسیلوسکوپ چهارکاناله ثبت شده است در شکل ۳، نشان داده شده است. در این شکل، سیگنال های مشتق جریان تخلیه، پرتو ایکس سخت و باریکه یونی هیدروژن که به ترتیب توسط یک پروب مغناطیسی، سنتیلاتور و فارادی-کاپ به دست آمده است را نشان می دهد. در شات های که با دستگاه زده می شود دو پیک در سیگنال فارادی کاپ مشاهده می شود که با توجه به مراجع [۲۶، ۲۲]، این دو پیک مربوط به پرتو ایکس که در زمان پینچ پلاسمای سرآند دستگاه گسیل و با الکترود گرافیتی برخورد می کند و پیک دوم در سیگنال فارادی-کاپ مربوط به باریکه یونی می باشد که از اختلاف زمانی این دو پیک برای شناسایی مدت زمان پرواز یون های گسیل یافته از ستون پینچ پلاسمای استفاده می شود.

همچنین در شکل ۳ مشاهده می شود که پیک ایکس ثبت شده توسط فنجان فارادی (نمودار بنفش رنگ- پیک اول) زودتر از پیک ایکس ثبت شده توسط سنتیلاتور (نمودار سبز رنگ) اتفاق افتاده است که از عوامل مهم در به وجود آمدن این تأخیر زمانی در اندازه گیری گسیل پرتوی ایکس، می تواند یکسان نبودن طول کابل انتقال دهنده سیگنال برای این دو آشکارساز و همچنین مدارات الکترونیک متفاوت این دو آشکارساز باشد.

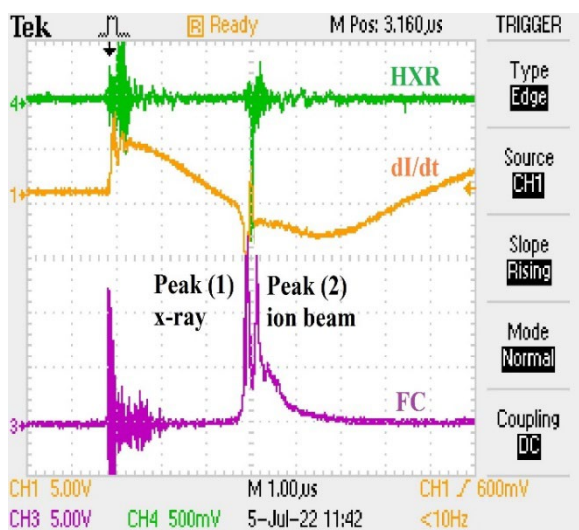
مدار راه انداز این فارادی کاپ نیز در شکل ۱، نشان داده شده است. برای جمع آوری یون ها، این آشکارساز به صورت منفی بایاس می شود. منبع تغذیه فارادی کاپ دارای یک ترانس ایزوله در قسمت ورودی خود است که خروجی این منبع از برق شهر ایزوله شده است. از طرفی دیگر اختلاف پتانسیل ۱۰۰V در منبع تغذیه فارادی کاپ به صورت پتانسیل زمین و پتانسیل ۱۰۰V- ساخته شده است. بایاس معکوس فارادی کاپ بدین صورت است که پتانسیل زمین منبع تغذیه به الکترود بیرونی متصل است و سر دیگر منبع تغذیه که پتانسیل ۱۰۰V- می باشد به الکترود داخلی متصل است. با توجه به این که در دستگاه پلاسمای کانونی، سر منفی ولتاژ تغذیه نیز به زمین وصل می شود که همین پتانسیل به الکترود بیرونی فارادی کاپ متصل است و بنابراین از لحاظ الکتریکی مشکل زمین کردن در بایاس معکوس نیز برطرف می شود.

فارادی کاپ ساخته شده، درون یک استوانه فلزی از جنس استیل به طول ۵۰cm قرار دارد که بر روی درپوش بالایی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF نصب شده است و فارادی کاپ می تواند درون این استوانه در موقعیت های مختلف نسبت به سرآند دستگاه تا فاصله ۶۰ cm قرار گیرد. این استوانه به همراه محفظه اصلی پلاسمای کانونی توسط یک پمپ روتاری تا فشار ۱۰^{-۲} تور خلأ می گردد. در شکل ۲، تصویر دستگاه پلاسمای کانونی MTPF و فارادی کاپ نصب شده بر روی آن و سیگنال های به دست آمده در طی یک شات نوعی را نشان می دهد.



شکل ۱. مدار راه انداز فارادی کاپ که این آشکارساز را در ولتاژ ۱۰۰V به صورت معکوس بایاس می کند.





شکل ۳. شات نوعی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF: سیگنال پرتو ایکس سخت (سبز)، نمودار مشتق جریان تخلیه (نارنجی) و سیگنال فارادی‌کاپ (بنفش). دو پیک مشاهده شده در سیگنال فارادی کاپ که مربوط به پرتوایکس و باریکه یونی می‌باشد.

در شکل ۴ تصویری از یک شات با پینچ ضعیف دستگاه پلاسمای کانونی MTPF را نشان می‌دهد که در طی این شات، شدت پرتوایکس به قدری ضعیف می‌باشد که توسط سنسیتلاتور (نمودار سبزرنگ در شکل ۴) ثبت نشده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد در این حالت، سیگنال به‌دست آمده از فارادی کاپ نیز تنها یک پیک کوچکی را نشان می‌دهد که در این حالت، سیگنال حاصل از فارادی کاپ (نمودار بنفش‌رنگ)، حاوی یک پیک نسبتاً پهن و ضعیف است که مؤید وجود تعدادی یون، حتی در حالت پینچ ضعیف است. در صورتی که شات دستگاه دارای پینچ قوی باشد (شکل ۳) سیگنال فارادی کاپ دارای دو پیک نسبتاً بزرگ می‌باشد که این دو پیک به ترتیب مربوط به برخورد پرتو ایکس قوی و یون‌های پرنرزی به فارادی کاپ می‌باشند.

۱.۳ اندازه‌گیری جریان و چگالی باریکه یون‌ها با استفاده از سیگنال فارادی کاپ

یون‌های گسیل یافته از دستگاه پلاسمای کانونی از طریق یک روزنه به قطر $(d_{FC}=1 \text{ mm})$ به الکترود داخلی گرافیتی فارادی-کاپ برخورد می‌کند و جریان الکتریکی (I) در مدار فارادی کاپ برقرار می‌گردد و این جریان از طریق یک مقاومت 50 اهم به ولتاژ تبدیل شده و این ولتاژ (V_{osc}) توسط اسیلوسکوپ ثبت می‌شود. بنابراین چگالی جریان باریکه یونی (J_b) در دهانه ورودی فارادی کاپ برابر است با:

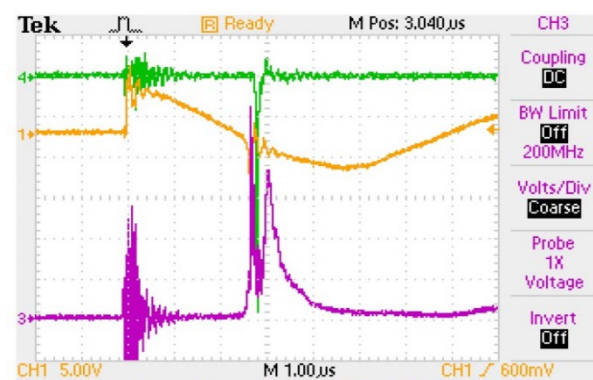
$$J_b = \frac{I}{A} = \frac{4V_{osc}}{50 \cdot (\pi d_{FC}^2)} \quad (V)$$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. (الف) تصویری از دستگاه پلاسمای کانونی MTPF و فارادی کاپ نصب شده بر روی آن، (ب) شات نوعی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF: سیگنال پرتو ایکس سخت (سبز)، نمودار مشتق جریان تخلیه (نارنجی) و سیگنال فارادی کاپ (بنفش) در فاصله 10 cm از سر آند دستگاه، (ج) شات نوعی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF: سیگنال پرتو ایکس سخت (سبز)، نمودار مشتق جریان تخلیه (نارنجی) و سیگنال فارادی کاپ (بنفش) در فاصله 60 cm از سر آند دستگاه.



۲.۳ اندازه‌گیری انرژی میانگین یون‌ها با استفاده از سیگنال فارادی-کاپ
 برای اندازه‌گیری انرژی میانگین یون‌ها از تکنیک زمان پرواز [۲۷] استفاده می‌شود. یون‌های گسیل یافته از ستون پلازما (در محل سر الکتروند آند دستگاه) پس از عبور از روزنه فارادی‌کاپ اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به شکل ۵، اختلاف زمانی بین زمان تشکیل پینچ پلازما (پیک اول در سیگنال فارادی‌کاپ مربوط به پرتوایکس که در زمان پینچ پلازما از سر آند دستگاه گسیل می‌شود) با زمان آشکارسازی یون‌ها (پیک دوم در سیگنال فارادی‌کاپ) می‌توان مدت زمان پرواز یون‌های با انرژی متوسط را به دست آورد. برای اندازه‌گیری انرژی میانگین یون‌ها، ده شات دستگاه در شرایط فشار و ولتاژ کاری انتخاب گردید. جرم اتمی هیدروژن برابر با مقدار 1.66×10^{-27} kg می‌باشد و با جای‌گذاری در رابطه ۹، انرژی متوسط یون‌های هیدروژن از طریق روابط زیر به دست می‌آید:

$$t_{TOF} = t_{ion(peak2)} - t_{HXR(peak1)} \cong 0.20 \mu s \quad (8)$$

$$E_{ion} = \frac{1}{2} m_H \left(\frac{X_{FC}}{t_{TOF}} \right)^2 \cong 46 \text{ keV} \quad (9)$$

۲.۳ اندازه‌گیری شار و شارش باریکه یون‌های هیدروژن با استفاده از سیگنال فارادی‌کاپ

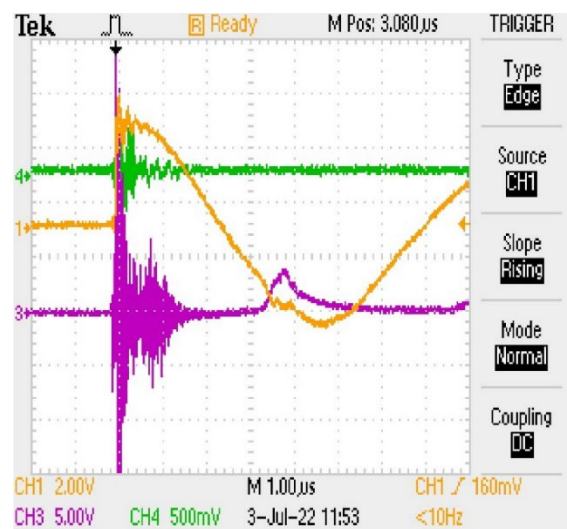
برای به دست آوردن شار و شارش باریکه یونی، با استفاده از رابطه $n = (\int I dt) / e$ می‌توان تعداد کلی یون‌ها را در هر شات به دست آورد که I جریان باریکه یونی است که توسط فارادی‌کاپ به دست آمده است (شکل ۵). بنابراین با انتگرال‌گیری از این نمودار، تعداد یون‌های هیدروژن که توسط فارادی‌کاپ اندازه‌گیری شده است برابر است با 1.14×10^{10} و با توجه به این‌که این تعداد یون از طریق یک روزنه به قطر ۱ mm وارد فارادی‌کاپ شده است بنابراین مقدار پارامتر شارش باریکه یونی هیدروژن در دهانه ورودی فارادی‌کاپ برابر است با:

$$\text{Fluence} = 1.45 \times 10^{16} \text{ (ions.m}^{-2}\text{)}$$

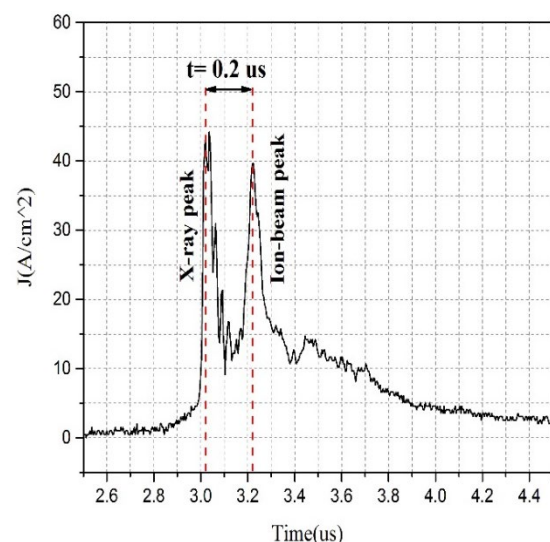
با توجه به نمودار مشتق جریان تخلیه (شکل ۳) که مدت زمان تشکیل پینچ (τ) و گسیل یون‌ها به طور میانگین در طی ده شات مقدار ۶/۱۱ نانوثانیه می‌باشد بنابراین پارامتر شار یونی باریکه هیدروژن نیز برابر است با:

$$\text{Flux} = \text{Fluence}/\tau = 2.37 \times 10^{24} \text{ (ions.m}^{-2}\text{.s}^{-1}\text{)}$$

در شکل ۵، نمودار چگالی جریان یونی مربوط به گاز هیدروژن به دست آمده از سیگنال فارادی‌کاپ را نشان می‌دهد. یکی از پارامترهای مهم که می‌توان از این شکل استخراج کرد اختلاف زمانی بین دو پیک ناشی از پرتوایکس و باریکه یونی می‌باشد که با توجه به این شکل این مقدار اختلاف زمانی بین این دو پیک برابر با مقدار $0.2 \mu s$ به دست می‌آید. از این اختلاف زمانی برای به دست آوردن انرژی میانگین یون‌ها که در قسمت بعدی توضیح داده شده است استفاده می‌شود. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد حداکثر چگالی جریان یونی (پیک دوم) در حدود 40 A/cm^2 می‌باشد.

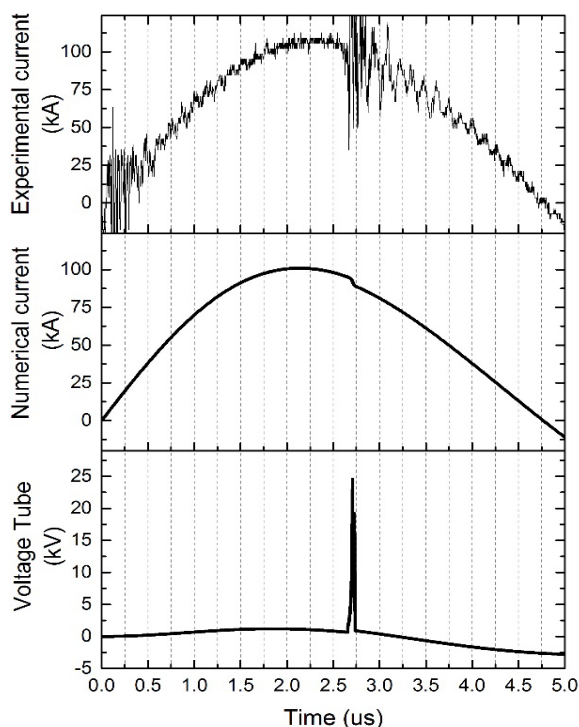


شکل ۴. شکل فوق نتایج حاصل از یک تنگش ضعیف در دستگاه پلازمای کانونی MTPF را نشان می‌دهد که منجر به گسیل پرتو ایکس نشده است. در این حالت، سیگنال حاصل از فارادی‌کاپ (نمودار بنفش‌رنگ)، حاوی یک پیک نسبتاً پهن و ضعیف است که مؤید وجود تعدادی یون، حتی در حالت پینچ ضعیف است.



شکل ۵. نمودار چگالی باریکه یون (J_b) هیدروژن که اختلاف زمانی بین دو پیک آن در حدود $0.2 \mu s$ به دست آمده است.





شکل ۶. نمودار جریان تخلیه به‌دست آمده از پیچه رگوفسکی و جریان تخلیه به‌دست آمده از کد مدل لی.

جدول ۳. پارامترهای استخراج شده از کد مدل لی برای گاز هیدروژن در فشار ۱/۱ تور برای جای‌گذاری در معادله ۱۰، ۱۱ و ۱۲

پارامتر	نماد	مقدار
ضریب جرمی محوری	f_m	۰/۷
ضریب جریان محوری	f_c	۰/۷
ضریب جرمی شعاعی	f_{mr}	50×10^{-3}
ضریب جریان شعاعی	f_{cr}	۰/۷
ضریب تبدیل انرژی	f_e	۰/۱۴
مدت زمان تنگش پلازما (نانوثانیه)	t	۱۰/۵
بار مؤثر	Z_{eff}	۱
جرم ملکولی گاز هیدروژن	M	۲
جریان پینچ پلازما (kA)	I_{pinch}	۵۸
مدت زمان تشکیل پینچ پلازما (ns)	τ	۱۰/۵
ولتاژ دیودی شتاب‌دهنده یونی	U	۳۹

همچنین با استفاده از داده‌های خروجی از کد لی می‌توان در مرحله شعاعی، نمودار موقعیت مکانی لایه جریان پلازما برحسب زمان را ترسیم نمود که در شکل ۷ نشان داده شده است. از طریق این شکل می‌توان مقدار شعاع پینچ پلازما (r_p) را استخراج کرد. همان‌طور این شکل ۷ نشان می‌دهد مقدار شعاع و ارتفاع پینچ پلازما به ترتیب ۱ mm و ۱۸ mm به‌دست می‌آید که پارامتر شعاع پینچ پلازما در محاسبه پارامترهای شار و شارش باریکه یونی (روابط ۱۰ و ۱۱) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴.۳ مشخصه‌یابی باریکه یونی با استفاده از کد لی

برای ارزیابی نتایج تجربی به‌دست آمده و همچنین استخراج سایر پارامتر باریکه یونی، از کد لی استفاده می‌شود. پارامترهای مهم باریکه یونی شامل شار و شارش باریکه یونی برای گاز کاری هیدروژن بر طبق روابط ۱۰ و ۱۱ به‌دست می‌آید [۱۹]:

$$Flux(ions.m^{-2}.s^{-1}) = J_b = 2.75 \times 10^{15} \cdot \frac{f_e \cdot \ln(b/r_p) \cdot I_{pinch}^2}{M^{1/2} \cdot Z_{eff}^{1/2} \cdot r_p^2 \cdot U^{1/2}} \quad (10)$$

$$Fluence(ions.m^{-2}) = J_b \cdot \tau = 2.75 \times 10^{15} \cdot \tau \cdot \frac{f_e \cdot \ln(b/r_p) \cdot I_{pinch}^2}{M^{1/2} \cdot Z_{eff}^{1/2} \cdot r_p^2 \cdot U^{1/2}} \quad (11)$$

در معادلات بالا، پارامتر f_e ضریب تبدیل انرژی، b شعاع کاتد، r_p شعاع پینچ پلازما، I_{pinch} جریان در لحظه پینچ پلازما، M جرم ملکولی گاز هیدروژن، Z_{eff} بار مؤثر، U ولتاژ دیودی شتاب‌دهنده به یون‌ها و τ مدت زمان تشکیل پینچ پلازما می‌باشد. همچنین انرژی میانگین یون‌ها و به تبع آن پارامتر متناظر آن یعنی دمای یون‌های هیدروژن را با استفاده از کد لی و بر طبق رابطه زیر می‌توان به‌دست آورد [۲۸]:

$$T = \frac{\mu}{\lambda \pi^2 k} I^2 f_c^2 / (DN_0 a^2 f_{mr}) \quad (12)$$

در معادله بالا، پارامتر k ثابت بولتزمن، I جریان تخلیه، f_c ضریب جریان محوری، f_{mr} ضریب جرمی شعاعی، D عدد تفکیک، N_0 چگالی گاز کاری و a شعاع آند دستگاه می‌باشد. حال، برای به‌دست آوردن پارامترهای ذکر شده در روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ از کد لی استفاده می‌شود.

بدین منظور، ابتدا با جای‌گذاری مشخصات هندسی و شرایط کاری (ولتاژ تخلیه و فشار گاز) دستگاه پلاسمای کانونی MTPF در کد لی و با استفاده از سیگنال تجربی جریان تخلیه، پارامترهای f_m ، f_{mr} ، f_c و f_{cr} برای دستگاه پلاسمای کانونی MTPF برای گاز هیدروژن استخراج گردید.

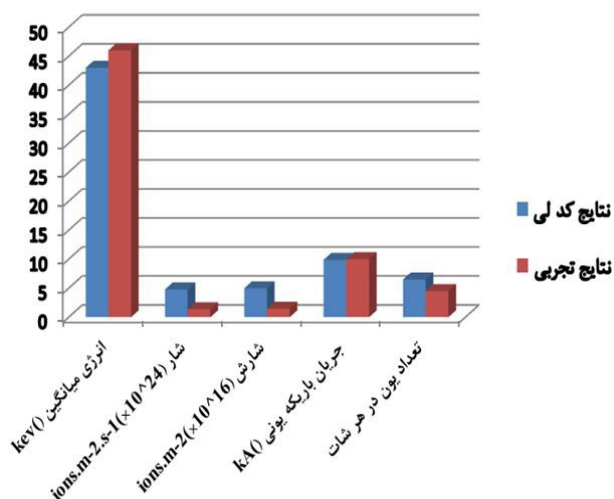
همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد با مقایسه سیگنال تجربی جریان تخلیه که از پیچه رگوفسکی به‌دست می‌آید با سیگنال جریان شبیه‌سازی شده توسط کد لی، پارامترهای مدنظر مطابق با جدول ۳، به‌دست می‌آید.

1. Dissociation Number



جدول ۴. مشخصه‌یابی باریکه یونی برای گاز هیدروژن به‌دست آمده از فارادی‌کاپ و کد مدل لی برای دستگاه MTPF در محل روزه ورودی فارادی کاپ

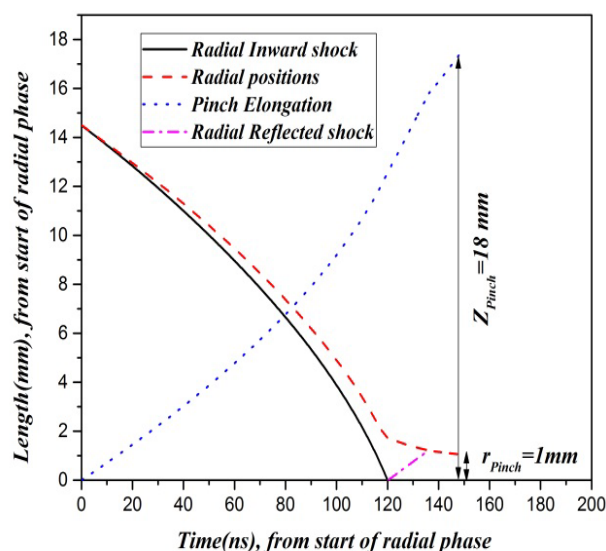
پارامتر	خروجی کد لی	نتایج تجربی
انرژی میانگین باریکه یونی (keV)	۴۳	۴۶
شار یونی ($\text{ions.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	4.8×10^{24}	2.37×10^{24}
شارش باریکه یونی (ions.m^{-2})	5.0×10^{16}	1.45×10^{16}
جریان باریکه یونی (kA)	۹٫۹	۱۰
تعداد یون‌ها در هر شات	6.5×10^{14}	4.5×10^{14}



شکل ۸. مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های کد لی در مشخصه‌یابی باریکه یونی هیدروژن دستگاه پلاسمای کانونی MTPF.

۴. نتیجه‌گیری

برای ارزیابی نتایج به صورت تجربی، یک آشکارساز فارادی‌کاپ برای دستگاه پلاسمای کانونی MTPF طراحی و ساخته شد و مشخصات هندسی و الکتریکی این فارادی‌کاپ (جدول ۳) نیز استخراج گردید. در سیگنال‌های به‌دست آمده از فارادی کاپ دو پیک قابل مشاهده است که پیک اولیه مربوط به برخورد پرتوایکس و پیک دوم نیز در اثر برخورد باریکه یونی به الکتروگرافیتی می‌باشد. با استفاده از روش زمان پرواز و اختلاف زمانی بین دو پیک سیگنال مشاهده شده انرژی میانگین یون‌ها، شار و شارش باریکه یونی به صورت تجربی مطابق با جدول ۴ به‌دست آمد که تطابق خوبی با نتایج خروجی کد لی دارد. انرژی میانگین یون‌های هیدروژن در حدود ۴۶ keV به‌دست آمد و نشان می‌دهد که ولتاژ القا به‌وجود آمده در لحظه پینچ پلاسمای که به یون‌ها شتاب می‌دهد بسیار بیشتر از ولتاژ تخلیه بانک خازنی (۱۲ kV) می‌باشد. همچنین با توجه به این‌که جریان باریکه یونی در حدود ۲۳-۱۴ درصد از جریان پینچ پلاسمای می‌باشد [۱۷] که این نسبت در دستگاه MTPF نیز حدود ۱۷ درصد است که برای افزایش این نسبت می‌بایستی پارامترهای تأثیرگذار دستگاه به مانند فشار گاز و همچنین هندسه الکتروود آند دستگاه مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۷. نمودار موقعیت مکانی لایه جریان پلاسمای برحسب زمان در مرحله شعاعی که با استفاده از کد مدل لی برای دستگاه پلاسمای کانونی MTPF در ولتاژ تخلیه ۱۲ kV و فشار ۱/۱ torr گاز هیدروژن به‌دست آمد که برای این شرایط کاری، شعاع پینچ و ارتفاع ستون پلاسمای به ترتیب ۱ mm و ۱۸ mm به‌دست می‌آید.

اطلاعات به‌دست آمده از کد لی که در جدول ۳ آمده است در روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ جای‌گذاری گردیده و پارامترهای مهم باریکه یونی شامل شار و شارش و انرژی میانگین باریکه یونی برای گاز کاری هیدروژن استخراج شده به همراه سایر نتایج خروجی از کد لی در جدول ۴ آورده شده است.

برای مقایسه بهتر بین داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از کد لی، نمودارهای حاصل از این داده‌های در شکل ۸ در کنار هم ترسیم شده است.

همان‌طور که شکل ۸ نشان می‌دهد اختلاف بیشتری در پارامتر شارش یونی بین این دو نوع داده وجود دارد که مهمترین دلیل این اختلاف ناشی از اختلاف در مدت زمان تشکیل پینچ (τ) است که این مدت زمان مطابق با جدول ۳ و با استفاده از کد لی برابر با ۱۰/۵ ns به صورت تجربی در حدود ۶/۱۱ ns به‌دست آمده است. با توجه به این‌که کد لی تمام ناپایداری‌هایی که در زمان تشکیل پینچ در پلاسمای به‌وجود می‌آید را شامل نمی‌شود بنابراین در تخمین دقیق مدت زمان تشکیل پینچ همواره با مقادیر تجربی مقداری خطا وجود دارد. که با توجه به رابطه ۱۱ و نقش این پارامتر مدت زمان تشکیل پینچ در محاسبه شارش باریکه یونی، باعث به‌وجود آمدن اختلاف بیشتر در داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از کد لی برای پارامتر شارش باریکه یونی می‌شود.



مراجع

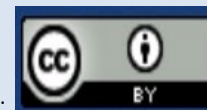
1. Akel M, Alsheikh Salo S, Ismael S, Saw SH, Lee S. Deuterium plasma focus as a tool for testing materials of plasma facing walls in thermonuclear fusion reactors. *J. Fusion Energ.* 2016;35:694.
2. Shirokova V, Laas T, Ainsaar A, Priimets J, Ugaste Ü, Demina E.V, Pimenov V.N, Maslyaev S.A, Dubrovsky A.V, Gribkov V.A, Scholz M, Mikli V. Comparison of damages in tungsten and tungsten doped with lanthanum-oxide exposed to dense deuterium plasma shots. *Journal of Nuclear Materials.* 2013;435:181.
3. Seyedhabashi M.M.R, Asgarian M.A, Rasouli C, Sedighi F. Radiation damage of graphite surface, used in first-wall and divertor of tokamaks, irradiated by hydrogen and argon in plasma focus device. *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2022;50.
4. Gribkov V.A, Demina E.V, Kazilin E.E, Latyshev S.V, Maslyaev S.A, Pimenov V.N, Paduch M, Zielinska E, Laas T. Testing of materials perspective for nuclear fusion reactors with inertial plasma confinement by Plasma Focus and laser devices. *J. Phys.2019;Conf. Ser.* 1347,012071.
5. Latyshev S.V, Gribkov V.A, Maslyaev S.A, Pimenov V.N, Paduch M, Zielinska E. Generation of shock waves in materials science experiments with dense plasma focus device. *Inorganic Materials: Applied Research.* 2015;6:91.
6. Soto L, Silva P, Moreno J, Silvester G, Zambra M, Pavez C, Altamirano L, Bruzzzone H, Barbaglia M, Sidelnikov Y, Kies W. Research on pinch plasma focus devices of hundred of kilojoules to tens of joules. *J. Phys.* 2004;34:1814.
7. Verma R, Rawat R.S, Lee P, Tan A.T.L, Shariff H, Ying G.J, Springham S.V, Talebitaher A, Ilyas U, Shyam A. Neutron emission characteristics of nx-3 plasma focus device: speed factor as the guiding rule for yield optimization. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2012;40:3280.
8. Dubrovsky A.V, Gribkov V.A, Pimenov V.N, Scholz M. Comparative characteristics of four small dense plasma focus devices. *AIP Conf. Proc.* 2008;996:103.
9. Freeman B. In Proceedings of the 4th Symposium on Current Trends in International Fusion Research. *National Research Council of Canada.* 2007.
10. Bhuyan M, Neog N.K, Mohanty S.R, Rao C.V.S, Raole P.M. Characterization of the neon ion beam emitted from plasma focus device. *Phys. Plasmas.* 2011;18:033101.
11. Tan K.S, Mah R.J, Rawat R.S. Dense plasma focus device based high growth rate room temperature synthesis of nanostructured zinc oxide thin films. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015;43:2539.
12. Khan I.A, Hassan M, Hussain T, Ahmad R, Zakaullah M, RS Rawat R.S. Synthesis of nano-crystalline zirconium aluminium oxynitride (ZrAlON) composite films by dense plasma Focus device. *Appl. Surf. Sci.* 2009;255:6132.
13. Siddiqui J, Hussain T, Ahmad R, Ali W, Hussnain A, Ayub R. Growth and study of plasma assisted nanostructured hard tantalum nitride thin films. *J. Fusion Energ.* 2015;34:1193.
14. Siddiqui J, Hussain T, Ahmad R, Khalid N. Synthesis of ZrSiN composite films using a plasma focus device. *Chin. Phys. B* 2015;24:065204.
15. Rawat R.S. Dense plasma focus from alternative fusion source to versatile high energy density plasma source for plasma nanotechnology. *J. Phys: Conf. Ser.* 2015;591:012021.
16. Khan I.A, Jabbar S, Hussain T, Hassan M, Ahmad R, Zakaullah M, Rawat R.S. Deposition of zirconium carbonitride composite films using ion and electron beams emitted from plasma focus device. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 2010;268:2228.
17. Lee S, Saw S.H. Plasma focus ion beam fluence and flux—Scaling with stored energy. *Physics of Plasmas.* 2012;19:112703.
18. Akel M, Salo S.A, Saw S.H, Lee S. Properties of Ion Beams Generated by Nitrogen Plasma Focus. *J. Fusion Energ.* 2014;33:189.
19. Akel M, AL-Hawat S, Ahmad M, Ballul Y, Shaaban S. Features of Pinch Plasma, Electron, and Ion Beams That Originated in the AECS PF-1 Plasma Focus Device. *Plasma.* 2022;5:184.
20. Barbagli M, Giovachini R, Milanese M. Dense plasma focus: different cathode geometries and their influence on the hard x-ray production. *Plasma Physics and Controlled Fusion.* 2023;65.
21. Etminan M, Aghamir M. Angular distribution of ion beams energy and flux in a plasma focus device operated with argon gas. *Vacuum.* 2021;191:110352.
22. Damideh V, Ali J, Saw S.H, Rawat R.S, Lee P. Fast Faraday cup for fast ion beam TOF measurements in deuterium filled plasma focus device and correlation with Lee model. *Physics of Plasmas.* 2017;24:063302.
23. Mohanty S.R, Bhuyan H, Neog N.K, Rout R.K, Hotta E. Development of Multi Faraday Cup Assembly for Ion Beam Measurements from a Low Energy Plasma Focus Device. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005;44:51992005.
24. Pestehe S.J, Mohammadnejad M, Irani Mobaraki S. Dynamic Faraday cup signal analysis and the measurement of energetic ions emitted by plasma focus. *Physics of Plasmas.* 2014;21:033504.



25. Mal K, Kumar S, Rodrigues G, Singh R. Study and improvements of a radially coupled coaxial Fast Faraday cup design toward lower intensity beams. *AIP Advances*. 2022;12:125223.
26. Bhuyan H, Chuaqui H, Favre M, Mitchell I, Wyndham E. Ion beam emission in a low energy plasma focus device operating with methane. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005;38:1164.
27. Gerdin G, Stygar W, Venneri F. Faraday cup analysis of ion beams produced by a dense plasma focus. *Journal of Applied Physics*. 1981;52:3269.
28. Lee S. Plasma Focus Radiative Model: Review of the Lee Model Code. *J. Fusion Energ.* 2014;33:319.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

رستمی فرد، داریوش، پیش بین، نوشین، نصیری، علی، سیدحبشی، میرمحمد رضا، اکبری نساجی، مریم. (۱۴۰۳)، مشخصه‌یابی باریکه یونی هیدروژن دستگاه پلاسمای کانونی MTPF با استفاده از روش زمان پرواز و کد لی. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*. ۱۱۰(۴)، ۴۸-۵۷.

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1590.html .DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1590>

