

دستیابی به فشار بهینه به منظور افزایش راندمان بالاتر تابش ایکس سخت در سیستم پلاسمای کانونی ۲/۴ کیلوژول با سیستم پیش یونش

سمانه فاضل پور*، امیر چخماچی دوم و علی نصیری

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

تهران، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، کدپستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵.

پست الکترونیکی: samanehfazelpour@ymail.com

چکیده

در این مقاله، به بررسی تجربی همزمان تأثیر سیستم پیش یونش و تغییرات فشار بر تابش اشعه ایکس سخت تولیدی از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر پرداخته شده است. سیستم پیش یونش به کاررفته در این آزمایش، یک مدار مقاومت ۳۳۰ مگا اهم بوده که به صورت موازی با سیستم اسپارک گپ در مدار شارژر سیستم بسته می شود. ولتاژ شارژر توسط خازن برابر با ۱۲ کیلوولت و گاز تزریقی از نوع هیدروژن است. در این کار، شرایط تشکیل پینچ و تابش ایکس سخت تولیدی در ۵ فشار متفاوت ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸۲، ۰/۸۵ و ۰/۹۵ تور در دو حالت با و بدون سیستم پیش یونش مورد بررسی قرار گرفته شده است. براساس نتایج تجربی در فشار بهینه، پینچ قوی تر، ایکس سخت با شدت بالاتر و در عین حال در زمان کمتری برای حالت با پیش یونش نسبت به حالت بدون پیش یونش را به دست آمده است. مطالعات تجربی در این مقاله نشان می دهد که در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر ۲/۴ کیلوژول با سیستم پیش یونش مدار مقاومت شنت ۳۳۰ مگا اهم و گاز کاری هیدروژن، این فشار بهینه برابر با ۰/۸۵ تور تخمین زده شده است.

کلیدواژه‌گان: پلاسمای کانونی، سیستم پیش یونش، پینچ، ایکس سخت.

۱. مقدمه

[۴-۲]. فرآیند تشکیل پلاسما در این سیستم‌ها شامل سه فاز شکست، شتابدهی و فروپاشی است. در فاز شکست، پتانسیل ولتاژ بالا (چند ده کیلوولت) توسط سیستم الکتریکی اسپارک گپ بین یک جفت الکترود محوری استوانه ای به نام به عنوان آند و کاتد تخلیه شده و شکست گاز در سطح عایق بین الکترودها صورت می گیرد [۵].

منابع تولید اشعه ایکس به منظور استفاده در بسیاری از کاربردهای لیتوگرافی و رادیوگرافی برای صنایع متفاوت و همچنین پزشکی مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته اند [۱]. دستگاه‌های پلاسمای کانونی را می توان به عنوان یک منبع اشعه ایکس در نظر گرفت که قادر به تولید تابش‌هایی با طول پالس در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ نانوثانیه است. دستگاه‌های پلاسمای کانونی توانایی تولید پلاسمای فوق نوع چگال و دمای بالا در مدت زمان بسیار کوتاه به محدوده چند صد نانوثانیه را دارند

اصل کار این سیستم ها در استفاده از انرژی ذخیره شده در یک بانک خازن برای ایجاد پلاسمای کم چگالی است که به صورت الکترومغناطیسی شتاب می گیرد و متعاقباً توسط نیروی لورنتس مرتبط با جریان تخلیه فشرده (تنگش) می شود. در طول فاز تنگش، یک پرتو شدید با همسویی بالا از الکترون های نسبتی معمولاً به سمت آند گسیل می شود. همچنین مدت زمان فرایند تنگش، معمولاً چند دهم نانوثانیه به طول می انجامد. پرتوهای ایکس سخت از برخورد الکترون های فراری به یک هدف فلزی که معمولاً در داخل آند (توخالی) قرار دارد و یا سطح خود آند (توپر)، تولید می شوند. ویژگی های اشعه ایکس با توجه به مخلوط گاز مورد استفاده در تنگش (پینچ) و همچنین پیکربندی الکتروود مرکزی (آند) مشخص می شود. این در حالی است که به منظور تقویت پارامترهای اصلی دستگاه پلاسمای کانونی، کاهش غیریکنواختی ها، کاهش آلودگی، دستیابی به پلاسمای یکنواخت تر و افزایش پایداری پلاسمای تنگش، نیاز به روش هایی است که بتوان به نوبه خود در راندمان هر یک از پارامترهای پلاسمای بهبود ایجاد کند.

در چند سال اخیر مطالعات تجربی و نظری بسیاری در زمینه افزایش راندمان عملکردی دستگاه های مبتنی بر تنگش توسط محققان با استفاده از روش های متفاوت همچون به کارگیری تارگت هایی با عدد اتمی بالا روی آند، تغییر هندسه آند و جنس آن انجام شده است. از جمله این تحقیقات می توان به موارد ذیل اشاره نمود. اوزو^۱ به ارائه روشی جهت تقویت تابش اشعه ایکس نرم تابش شونده از یک سیستم پلاسمای کانونی با پلاسمای چرخان توسط یک پوشش ۱۰۰ میکرومتری از طلا روی آند (توسط لیزر) پرداخته شده است [۶]. در این مطالعه تجربی از یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر با خازن ۳/۴ نانو فارادی و با قابلیت شارژ ۶۰ کیلوولت استفاده شده است.

شفیق^۲ و همکارانش، با استفاده از تارگت های با عدد اتمی بالا بر روی نوک آند به بررسی تقویت اشعه ایکس در یک دستگاه پلاسمای کانونی پرداختند [۷]. جین^۳ و همکارانش به بررسی تأثیر تغییر هندسه الکتروود روی تابش ایکس، اندوکتانس پلاسمای و سیگنال های مشتق جریان در دستگاه پلاسمای کانونی پرداختند [۸].

در کنار روش های متفاوت ذکر شده در بالا، به منظور تقویت عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی از سیستم های پیش یونش قبل از فاز اول تشکیل پلاسمای می توان استفاده نمود. بنابراین، سیستم پیش یونش می تواند تأثیر مثبت و حائز اهمیتی بر مشخصات تابشی اشعه ایکس سخت تولیدی پلاسمای کانونی داشته باشد [۹]. چندین روش پیش یونیزاسیون در دستگاه پلاسمای کانونی وجود دارد که تاکنون توسط محققین بررسی شده است. روش های پیش یونش در سیستم پلاسمای کانونی عبارتند از [۱۰-۱۴]:

- استفاده از رینگ اورنیوم
- استفاده از باریکه الکترون
- استفاده از مدار مقاومت شنت

روش استفاده از مقاومت شنت از مابقی روش های پیش یونش در دستگاه پلاسمای کانونی از نظر اقتصادی و عدم نیاز به حفاظ سازی مناسب تر است.

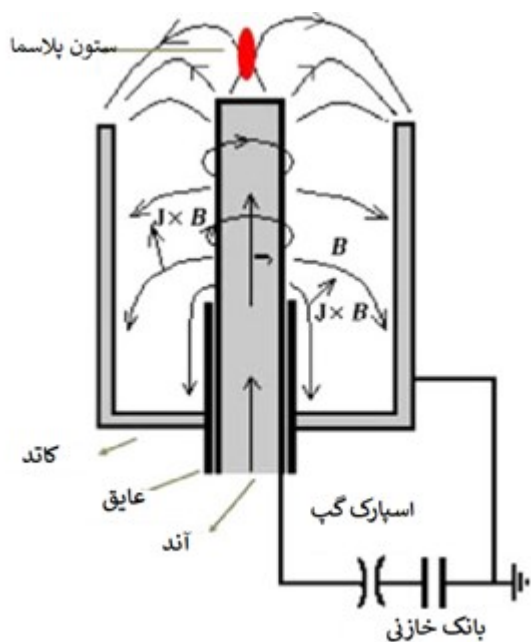
بررسی تأثیر پیش یونش بر شدت اشعه ایکس تولیدی در یک پلاسمای کانونی برای فشارهای متفاوت توسط پیریایی^۴ و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت [۱۵]. در این کار تجربی، از یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر با خازن ۱۰ میکروفارادی و ولتاژ شارژ حداکثری تا ۳۰ کیلوولت و مقاومت شنت ۲۰۰ مگا اهم در فشارهای متفاوت ۰/۲ تا ۱ تور برای گاز تریقی آرگون استفاده شده است. با استفاده از یک مقاومت شنت ۷۱

³ Jain

⁴ Piriaei

¹ Ohzu

² Shafiq



شکل (۱): نمایی از دستگاه پلاسمای کانونی MTPF2.4KJ و مدار

معادل آن [۱۲].

سیستم پیش یونش به کاررفته در این آزمایش، از یک مدار با مقاومت بالا (۳۳۰ مگا اهم) و جریان کم (چند دهم میلی آمپر) که به صورت موازی با اسپارک گپ بسته شده است، تشکیل شده

مگاهی به عنوان سیستم پیش یونش مطالعه ای در زمینه افزایش عملکرد دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر و تقویت اشعه ایکس توسط احمد^۱ و همکارانش انجام شد [۱۲]. تقویت اشعه ایکس تولیدی از یک دستگاه Z پینچ با گاز کاری زنون به کمک سیستم پیش یونش رادیوفرکانسی جهت بکار بردن در لیتوگرافی توسط McGeoch مورد مطالعه قرار گرفت [۱۶].

در این مقاله، به ارائه شرایط مناسب جهت دستیابی به راندمان بالاتر سیستم پلاسمای کانونی ۲/۴ کیلوژول در تابش ایکس سخت با استفاده از سیستم پیش یونش مدار مقاومت شنت پرداخته شده است. در این کار تحقیقاتی، بهینه ترین شرایط تشکیل تنگش در دو حالت با و بدون سیستم پیش یونش برای فشارهای متفاوت مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. براساس شرایط تشکیل تنگش، بهینه ترین فشار جهت تقویت اشعه ایکس سخت تولیدی از پلاسمای کانونی نوع مدر مورد مطالعه بدست آمده است.

۲. چیدمان آزمایشگاهی

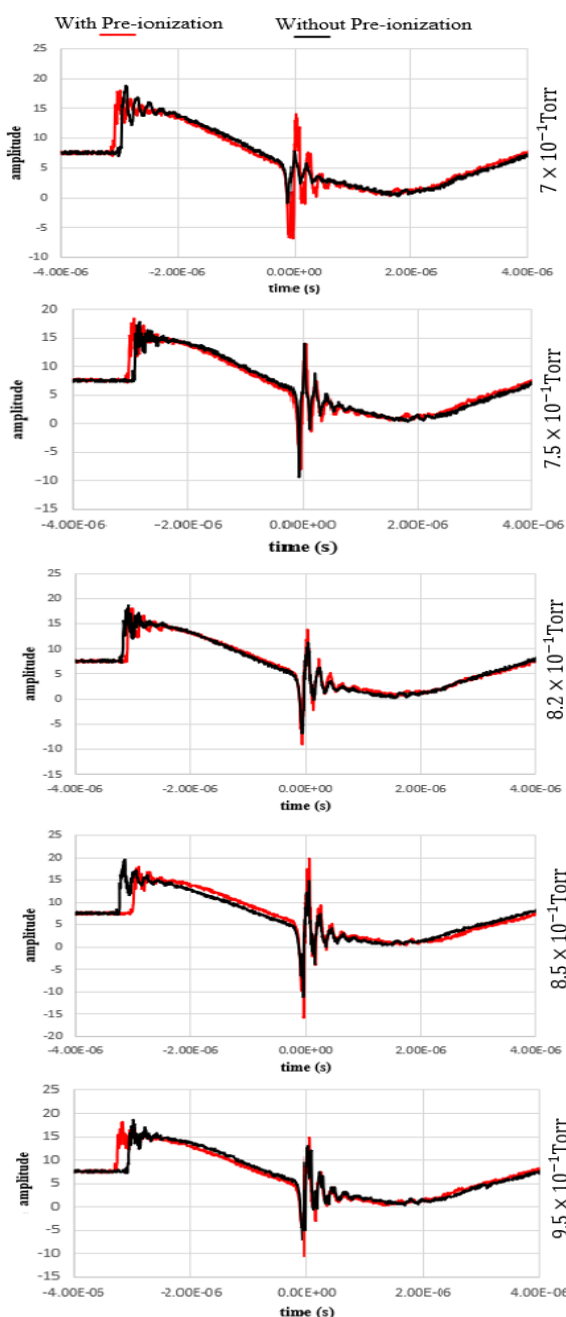
دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر MTPF2.4KJ با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ در این آزمایش مورد استفاده گرفته است. در شکل ۱ نمایی از دستگاه پلاسمای کانونی MTPF2.4KJ و مدار معادل آن نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر

MTPF2.4KJ

الکتروود	خازن
یک آند با شعاع ۱۴/۵ میلی متر و طول ۹۵ میلی متر	ظرفیت ۱۲
شش کاتد با شعاع ۵ میلی متر و طول ۱۴۵ میلی متر	میکروفاراد با
	ولتاژشارژ ۲۰ کیلوولت

پیش یونش از نظر زمانی زودتر اما پینچ تشکیل شده در حالت بدون پیش یونش قوی تر است.



شکل (۲): تغییرات مشتق جریان برای دو حالت با سیستم پیش یونش (رنگ قرمز) و بدون سیستم پیش یونش (رنگ سیاه) در ۵ فشار متفاوت ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸۲، ۰/۸۵ و ۰/۹۵ تور.

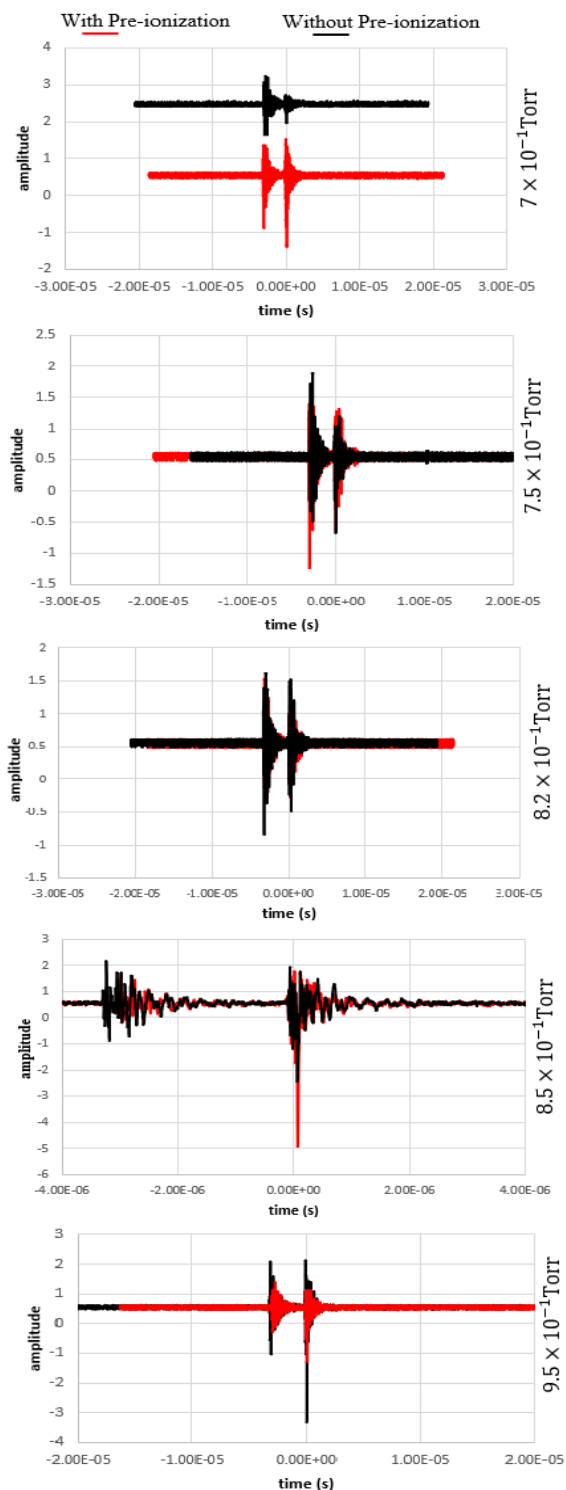
براساس نتایج به دست آمده از شکل ۲، سیستم پیش یونش در فشار مناسب می‌تواند بهترین و بهینه ترین شرایط را برای تشکیل پینچ یک سیستم پلاسمای کانونی را ایفا کند. در این کار تجربی،

در حالت با پیش یونش، زمانی که بانک خازنی شارژ می‌شود، جریان از مسیر مقاومت شنت بین آند و کاتد جاری خواهد شد و ولتاژ برقرار شده باعث یونیزه شدن گاز در محل نزدیک آند و کاتد می‌شود. ابزارهای تشخیصی مورد استفاده در این آزمایش شامل پروب مشتق جریان، پروب رگوفسکی (پروب جریان) و آشکارساز سوسوزن پلاستیکی Ne^{102} هستند که به ترتیب برای اندازه‌گیری پارامترهای مشتق جریان تخلیه، جریان تخلیه و پرتو ایکس سخت تولیدی به کار می‌روند.

۳. بحث و نتایج

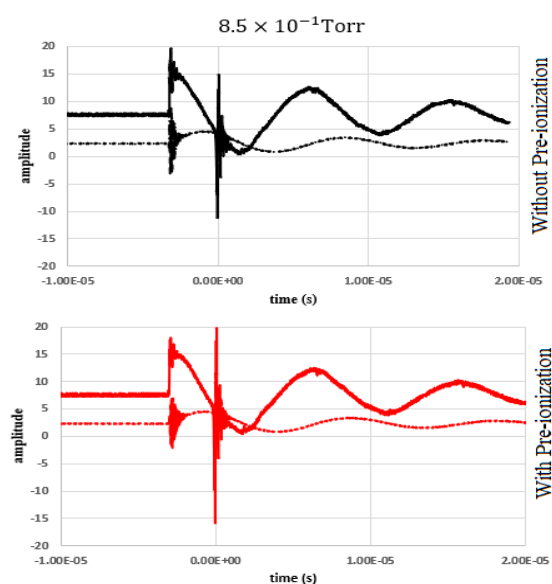
در این آزمایش، عملکرد سیستم پلاسمای کانونی با گاز تزریقی هیدروژن در فشارهای متفاوت در دو حالت با و بدون وجود سیستم پیش یونش مورد بررسی قرار گرفته شد. ابتدا پارامتر مشتق جریان سیستم پلاسمای کانونی با استفاده از پروب مخصوص در ۵ فشار به منظور بررسی هم‌زمان تأثیر سیستم پیش یونش و فشار بر شرایط تشکیل پینچ مورد مطالعه قرار گرفته شد. در شکل ۲، تغییرات مشتق جریان برای دو حالت با سیستم پیش یونش (رنگ قرمز) و بدون سیستم پیش یونش (رنگ سیاه) در فشارهای متفاوت ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸۲، ۰/۸۵ و ۰/۹۵ تور نشان داده شده است.

براساس شکل ۲، در فشار ۰/۷ تور در حالت با سیستم پیش یونش، پینچ قوی تری نسبت به حالت بدون پیش یونش تشکیل شده است اما این در حالی است که زمان تشکیل پینچ برای حالت بدون سیستم پیش یونش زودتر از حالت با پیش یونش مشاهده شده است. در فشارهای ۰/۷۵ و ۰/۸۲ تور، شرایط تشکیل پینچ در حالت با سیستم پیش یونش در زمان زودتر اما با قدرت تقریباً برابر با حالت بدون پیش یونش صورت گرفته است. در ادامه، در فشار ۰/۸۵ تور شرایط تشکیل پینچ هم از نظر زمانی زودتر و هم قوی‌تر از حالت بدون سیستم پیش یونش است. این در حالی است که در فشار ۰/۹۵ تور، در حالت با



شکل (۴): تغییرات اشعه ایکس سخت برای دو حالت با سیستم پیش یونش (رنگ قرمز) و بدون سیستم پیش یونش (رنگ سیاه) در ۵ فشار متفاوت ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸۲، ۰/۸۵ و ۰/۹۵ تور.

مشخص شد که در فشار بهینه ۰/۸۵ تور گاز تزریقی هیدروژن برای مقاومت شنت ۳۳۰ مگااهم، پینچ مناسب تری را هم از نظر زمانی و هم از نظر قوی بودن را خواهیم داشت. بنابراین به نظر می‌رسد که فشار کاری ۰/۸۵ تور از نظر تشکیل پینچ قوی، با وجود مدار پیش یونش، فشار بهینه باشد. در شکل ۳، تغییرات جریان (نقطه چین) و مشتق جریان (خط پر) برای دو حالت با و بدون سیستم پیش یونش در فشار ۰/۸۵ تور نشان داده شده است.



شکل (۳): تغییرات جریان (نقطه چین) و مشتق جریان (خط پر) برای دو حالت با و بدون سیستم پیش یونش در فشار ۰/۸۵ تور.

در ادامه، به بررسی تأثیر همزمان تغییرات فشار و سیستم پیش یونش بر اشعه ایکس سخت گسیلی از سیستم پلاسمای کانونی پرداخته شده است. در شکل ۴، تغییرات اشعه ایکس سخت برای دو حالت با سیستم پیش یونش (رنگ قرمز) و بدون سیستم پیش یونش (رنگ سیاه) در ۵ فشار متفاوت ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸۲، ۰/۸۵ و ۰/۹۵ تور نشان داده شده است.

نتایج شکل ۴، نشان می‌دهد که بالاترین شدت اشعه ایکس برای حالت با سیستم پیش یونش در فشار ۰/۸۵ تور به دست آمده است.

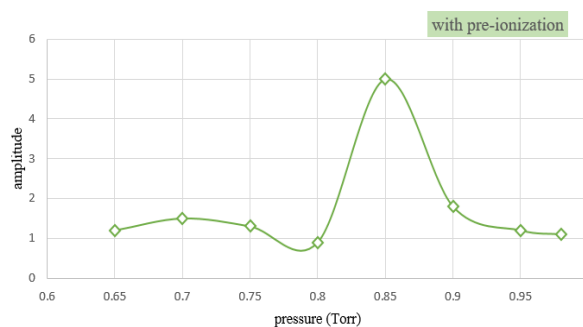
۴. نتیجه گیری

به طور خلاصه، مطالعه تجربی حاضر تصدیق می کند که اثرات پیش یونش بر کاهش نایکنواختی ها، کاهش ناخالصی و آلودگی ها، افزایش پایداری پلاسما، تقویت پینچ و تقویت بازده اشعه ایکس سخت در یک سیستم پلاسمای کانونی نوع مدار می تواند بسیار حائز اهمیت باشد. در این تحقیق، از یک مدار مقاومت ۳۳۰ مگا اهم برای پیش یونش پلاسمای کانونی MTPF_{۲.۴}KJ استفاده شده و تأثیر فشار گاز تزریقی هیدروژن بر شرایط تشکیل پینچ و اشعه ایکس سخت مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج نشان می دهد، به کارگیری سیستم پیش یونش منجر به تقویت پینچ نسبت به حالت بدون پیش یونش خواهد بود این در حالی است که انتخاب فشار بهینه می تواند علاوه بر پینچ قوی تر منجر به تشکیل پینچ در زمان کمتری نسبت به حالت بدون پیش یونش می شود. علاوه بر بررسی شرایط تشکیل پینچ، در فشار بهینه و در حالت پیش یونش تمامی نتایج نشان می دهند که تقویت چندین برابری اشعه ایکس سخت را به دست خواهیم آورد. براساس این بررسی تجربی، در این پلاسمای کانونی با سیستم پیش یونش مدار مقاومت شنت ۳۳۰ مگا اهم و گاز کاری هیدروژن، این فشار بهینه برابر با ۰/۸۵ تور تخمین زده می شود.

۵. مراجع

1. P. Knoblauch, V. Raspa, F. Di Lorenzo, A. Clausse, C. Moreno. Hard X-ray dosimetry of a plasma focus suitable for industrial radiography. *Radiat. Phys. Chem.* 145 (2018) 39-42.
2. V. A. Gribkov, I. V. Borovitskaya, E. V. Demina, E. E. Kazilin, S. V. Latyshev, S. A. Maslyayev, V. N. Pimenov, T. Laas, M. Paduch, S. V. Rogozhkin. Application of dense plasma focus devices and lasers in the radiation material sciences for the goals of inertial fusion beyond ignition. *Matter Radiat. Extremes* 5 (4) (2020) 045403.
3. V. I. Krauz. Progress in plasma focus research and applications. *Plasma Phys. Controlled Fusion* 48 (12B) (2006) B221.

جهت روشن تر شدن نتایج شکل ۴ در ادامه، در شکل ۵، روند تغییرات بیشینه دامنه شدت اشعه ایکس سخت گسیلی دستگاه در فشارهای متفاوت گاز هیدروژن با سیستم پیش یونش ترسیم شده است.



شکل (۵): تغییرات دامنه شدت اشعه ایکس سخت در فشارهای متفاوت گاز هیدروژن با حالت سیستم پیش یونش.

براساس نتایج شکل های ۴ و ۵، از این بررسی تجربی، می توان نتیجه گرفت که پلاسمای کانونی با پیش یونیزاسیون اشعه ایکس سخت با شدت بالاتر نسبت به حالت بدون پیش یونش تولید می کند. این کار فقط از یک آشکارساز اشعه ایکس استفاده شد که کل اشعه ایکس سخت را ثبت کرد. شکل های ۴ و ۵ به وضوح مقادیر بالاتر دامنه پالس اشعه ایکس را هنگامی که پیش یونیزاسیون اعمال شده است نشان می دهد. از سوی دیگر نتایج شکل های ۴ و ۵ نشان می دهند راندمان دستگاه در تولید و گسیل اشعه ایکس سخت با وجود مدار پیش یونش مقاومت شنت در فشار ۰/۸۵ تور برای گاز هیدروژن بیشینه مقدار ممکن است. که مطابق نتایج شکل ۲، در این فشار دستگاه بهترین عملکرد را نیز در تشکیل پینچ قوی دارد. بنابراین، در پلاسمای کانونی MTPF_{۲.۴}KJ با سیستم پیش یونش مدار مقاومت شنت ۳۳۰ مگا اهم و گاز کاری هیدروژن، فشار بهینه جهت عملکرد بهینه دستگاه برابر با ۰/۸۵ تور تخمین زده می شود.

4. S. Auluck, K. Pavel Kubes, Marian Paduch, Marek J. Sadowski, Vyacheslav I. Krauz, Sing Lee, Leopoldo Soto, et al. Update on the scientific status of the plasma focus. *Plasma* 4 (3) (2021) 450-669.
5. V. I. Krauz, M. Paduch, K. Tomaszewski, K. N. Mitrofanov, A. M. Kharrasov, A. Szymaszek, E. Zielinska. Generation of compact plasma objects in plasma focus discharge. *Europhysics Letters* 129 (1) (2020) 15003.
6. A. Ohzu, K. Ito. Soft x-ray output from a pinch plasma using laser-induced Au plasma. *Rev. Sci. Instrum.* 73 (8) (2002) 3131-3132.
7. M. Shafiq, S. Hussain, A. Waheed, M. Zakaullah. X-ray emission from a plasma focus with high-Z inserts at the anode tip. *Plasma Sources Sci. Technol.* 12 (2) (2003) 199.
8. J. Jain, J. Moreno, B. Bora, L. Soto. Influence of electrode geometry on x-ray emission, plasma inductance, voltage, and current derivative signals obtained from a plasma focus device. *Results Phys.* 23 (2021) 104016.
9. H. U. Khan, M. Shafiq. Effect of preionization on the dynamics of current sheath in a small plasma focus device. *Radiat. Effects Defects Solids* 167 (11) (2012) 834-840.
10. S. Ahmad, S. S. Hussain, M. Sadiq, M. Shafiq, A. Waheed, M. Zakaullah. Enhanced and reproducible neutron emission from a plasma focus with pre-ionization induced by depleted uranium (U238). *Plasma Phys. Control. Fusion* 48 (6) (2006) 745.
11. M. Zakaullah A. Waheed, S. Ahmad, S. Zeb and S. Hussain. Study of neutron emission in a low-energy plasma focus with β -source-assisted breakdown. *Plasma Sources Sci. Technol* 12 (3) (2003) 443.
12. S. Ahmad, M. Sadiq, M. Shafiq, A. Waheed, P. Lee, M. Zakaullah. The effect of pre-ionization by a shunt resistor on the reproducibility of plasma focus x-ray emission. *Plasma Sources Sci. Technol* 15 (3) (2006) 314.
13. H. U. Khan, M. Shafiq, S. S. Hussain, M. Zakaullah. Effect of preionization on soft x-ray emission and plasma dynamics in a small plasma focus system. *J. Appl. Phys.* 107 (7) (2010) 073301.
14. E. J. Lerner, H. R. Yousefi. Runaway electrons as a source of impurity and reduced fusion yield in the dense plasma focus. *Phys. Plasmas* 21 (10) (2014) 102706.
15. D. Piriaei, H. R. Yousefi, T. D. Mahabadi, A. Salar Elahi, M. Ghoranneviss. The effects of pre-ionization using a shunt resistor on reproducibility of the x-ray emission in a dense plasma focus device. *Phys. Plasmas* 24 (8) (2017).
16. M. McGeoch. Radio-frequency-preionized xenon z-pinch source for extreme ultraviolet lithography. *Appl. Optics* 37 (9) (1998) 1651-1658.