



## مطالعه تجربی گسیل ایکس دستگاه پلازما کانونی مدر ۵ kJ

داریوش رستمی فرد، نوشین پیش بین<sup>\*</sup>، مریم اکبری نساجی، علی نصیری  
پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران- ایران

\*Email: npishbin1985@gmail.com

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۱۵

### چکیده

در این پژوهش گسیل پرتو ایکس نرم و سخت دستگاه پلازما کانونی مدر ۵ کیلو ژول توسط آشکارساز پین دیود و سوسوزن پلاستیک  $Ne^{102}$  به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایشات در بازه‌ای از فشار کاری بهینه و در ولتاژ ۱۴ کیلو ولت با گاز آرگون انجام شده است. سیگنال‌های دریافتی از آشکارساز پیچه روگوفسکی، پین دیود و سوسوزن پلاستیک ثبت و تحلیل شده است. نقاط بهینه در محدوده فشار ۳-۴ تور حاصل شد. بهترین تنگش در فشار ۳ تور و قوی‌ترین پرتو ایکس نرم و سخت به ترتیب در فشار ۳/۵ تور و ۳ تور ثبت شد.

**کلیدواژه‌ها:** دستگاه پلازما کانونی، تنگش، ایکس نرم، ایکس سخت، پین دیود، سوسوزن پلاستیک

## Experimental study of X-ray emission of Mather plasma focus device 5kJ

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

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

### Research Article

Received 11.1.2023, Accepted 4.4.2023

### Abstract

In this work, some experimental results as the behaviour of hard X-ray (HXR) and soft X-ray (SXR) signals related to Argon plasma in a Mather-type plasma focus device (MTPF) 5KJ, is presented. Experiments have been carried out in a range of working pressure and voltage of 14kV. The signals from the Rogowski coil detector, PIN diode and  $Ne^{102}$  plastic scintillator are recorded and analyzed. The optimum operating pressure is in the range of 3–4 torr. The best pinch was recorded at 3 torr pressure, and the most essential soft and hard X-ray was recorded at 3.5 torr and 3 torr pressure, respectively.

**Keywords:** Plasma focus devise, Pinch, Soft X-ray, Hard X-ray, Pin diode, Scintillator



## ۱. مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی در ابتدا به عنوان ماشین گداخت مورد استفاده قرار گرفت. اما پس از مدتی، بیش‌تر مطالعات بر روی پلاسمای کانونی با گاز هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن انجام شد. تابش پرتو ایکس دستگاه پلاسمای کانونی در رابطه با تابش نوترونی آن و به هدف یافتن سازوکار تولید نوترون مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا گسیل پرتو ایکس نرم سبب نگرانی بود، زیرا نشان‌دهنده ناخالصی‌هایی سنگین‌تر از دوتریوم بود که از الکترودها ایجاد می‌شد و یا در گاز پرکننده وجود داشت [۱]. اما بعدها گازهای سنگین به ایزوتوپ‌های هیدروژن اضافه شد تا تولید پرتو ایکس نرم افزایش یابد. پس از آن، باگذشت زمان و انجام پژوهش‌های متعدد، دستگاه پلاسمای کانونی به دلیل سادگی و ارزان بودن و نیز نگهداری آسان و کم‌هزینه، به عنوان یک مولد قوی پرتو ایکس مورد توجه قرار گرفته است. نتایج تجربی آزمایش‌ها نشان داده است که طیف پرتو ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی، ناحیه وسیعی از انرژی‌های کم‌تر از  $1 \text{ keV}$  تا بیش از  $500 \text{ keV}$  را پوشش می‌دهد [۲]. بنابراین قابل استفاده در کاربردهای نظیر رادیوگرافی پرتو ایکس از نمونه‌های زیستی، فلزی و ...، رادیوگرافی ایکس سریع، لیتوگرافی با پرتو ایکس، میکروسکوپی با پرتو ایکس نرم با استفاده از گاز نیتروژن، انجام آزمایش‌های غیرمخرب با استفاده از پرتو ایکس و تحقیقات فیزیک پلازما، می‌باشند. اگر چه پلاسمای تنگیده در این دستگاه، شبیه یک ستون در راستای محور آند دیده می‌شود ولی مانند یک مولد نقطه‌ای عمل می‌کند. به همین دلیل این دستگاه جهت استفاده به عنوان یک چشمه نقطه‌ای پالسی مناسب است. پلاسمای تنگش به صورت مولدهای پالسی پرتو ایکس نرم، با پهنای زمانی معادل چند نانو ثانیه تا چند صد نانو ثانیه عمل می‌کنند. دستگاه‌های پلاسمای کانونی را می‌توان به عنوان چشمه‌های پالسی برای تولید پرتوهای نسبتاً پراثری و با شدت نسبتاً زیاد نیز در نظر گرفت. مهم‌ترین این پرتوها عبارتند از پرتو ایکس نرم با انرژی‌های کم‌تر از  $10 \text{ keV}$  و پرتو ایکس سخت با انرژی‌های بیش‌تر از  $10 \text{ keV}$ . گسیل پرتو ایکس نرم عمدتاً به علت برانگیختگی و وانگیختگی اتم‌های گاز و گسیل پرتو ایکس سخت به علت برخورد الکترون‌های پراثری پلازما با آند دستگاه و تحت تأثیر پدیده تابش ترمزی انجام می‌پذیرد [۳، ۴]. با توجه به کاربرد گسترده دستگاه‌های پلازما کانونی تاکنون پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است.

میرعماد و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۷، انرژی مؤثر پالس گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر را با آندهای مسمی در محدوده انرژی  $2-3 \text{ kJ}$  توسط رادیوگرافی پرتو ایکس اندازه‌گیری کردند. همین گروه [۶] در سال ۲۰۱۸، اثر فلز گذاشته شده در نوک آند را بر شکل‌گیری منطقه انتشار پالس ایکس از دستگاه پلاسمای کانونی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. صبری و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۶، یک دستگاه پلاسمای کانونی  $375 \text{ kJ}$  با ولتاژ کاری  $13.5 \text{ kV}$  را به منظور بررسی چشمه گسیل ایکس برای کاربردهای رادیوگرافی مورد بررسی قرار داده و طیف حاصل را مشخصه‌یابی کردند. در این مطالعه، پرتو ایکس توسط یک فیلم ماموگرافی با استفاده از روش رادیوگرافی آشکار شده است. دیاب و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶، گسیل پرتو ایکس از دستگاه پلاسمای کانونی مدر  $1 \text{ kJ}$  و کاربردهای آن را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه پلاسمای کانونی طراحی و ساخته شده توسط خازن‌های  $30.84 \mu\text{f}$  و تا ولتاژ  $8 \text{ kV}$  شارژ شده و بیشینه جریان تخلیه  $150 \text{ kA}$  را دارد. اندازه‌گیری و آنالیز پرتو ایکس گسیل شده با استفاده از آشکارساز پین دیود و با استفاده از فیلتر آلومینیوم با ضخامت‌های مختلف، اندازه‌گیری شد. جین و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۸ اندازه‌گیری‌های دزیمتری را به منظور مشخصه‌یابی دز ایکس گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی  $400 \text{ J}$  انجام دادند. راسپا و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۸ دزیمتری اشعه ایکس سخت از دستگاه پلاسمای کانونی  $4.7 \text{ kJ}$  را به منظور کاربردهای رادیوگرافی صنعتی اندازه‌گیری کردند. احمد و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۹، آزمایشات عددی را به منظور بهینه‌سازی پرتو ایکس نرم گسیل شده از یک دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر با انرژی پایین ( $2.2 \text{ kJ}$ )، انجام دادند. در این پژوهش علاوه بر ساخت یک روش خودکار بهینه‌سازی دستگاه پلاسمای کانونی، به بررسی نقش تغییر شعاع الکتروود خارجی و نسبت شعاع خارجی به داخلی بر پارامترهای دستگاه پلاسمای کانونی مانند شدت یون، مدت زمان تنگش و طول ستون و درنهایت چگونگی ارتباط آن‌ها با بیشینه پرتو ایکس نرم حاصل شده، پرداخته شده است. در راستای ادامه تحقیقات انجام شده، در این پژوهش گسیل پرتو ایکس نرم و سخت دستگاه پلازما کانونی مدر  $5 \text{ kJ}$  به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور اندازه‌گیری ایکس نرم، آشکارسازی بر مبنای فوتودیود طراحی و ساخته شده است و برای اندازه‌گیری ایکس سخت، از آشکارساز سنتیلاتور  $Ne^{102}$  استفاده شده است پس از نصب آشکارسازها بر روی دستگاه پلاسمای کانونی، سیگنال‌های استخراج شده از آشکارساز ثبت و تحلیل شده است.



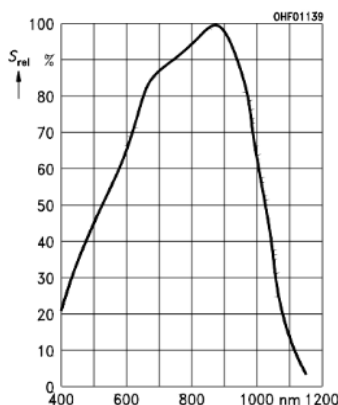
## ۲. مفاهیم فیزیکی

الکترون - حفره است. در اثر اعمال میدان الکتریکی، حفره‌ها و الکترون‌ها از هم جدا شده و توسط شارش الکترون‌ها در مدار خارجی یک تپ الکتریکی تولید می‌شود. از مزایای آشکارسازهای نیمه‌رسانا می‌توان به شمارش خیلی سریع ناشی از زمان تفکیک بسیار کوتاه (از مرتبه نانوثانیه)، توان تفکیک بالای انرژی و ولتاژ کاری نسبتاً پایین در حدود ۵۰ ولت، اشاره کرد.

در این پژوهش، به منظور آشکارسازی پرتو ایکس نرم دستگاه پلاسمای کانونی از آشکارساز نیمه‌رسانا از نوع پین‌دیود با شماره BPX۶۵، که یک نیمه‌رسانای سلیسیمی است، استفاده شده است. این پین‌دیود در ناحیه پرتو ایکس نرم کارایی و بازده مناسبی داشته و در بازار نیز با قیمت مناسب وجود دارد. ولتاژ تغذیه مورد نیاز برای این پین‌دیود در حدود ۴۵ ولت DC و به صورت معکوس بایاس می‌گردد. مشخصات فنی پین‌دیود در جدول ۱ و منحنی پاسخ بر حسب طول موج و شکل ظاهری پین‌دیود در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود طیف پرتو ایکس نرم بر حسب طول موج در گستره حدود ۱۲۰۰-۴۰۰ nm قرار می‌گیرد.

جدول ۱. مشخصات فنی پین‌دیود BPX۶۵

مساحت حساس	۱ mm <sup>۲</sup>
ضخامت ویفر سیلیکونی	۱۰ μm
ضخامت لایه مرده	۰٫۵ μm
زمان صعود	۰٫۵ ns
جریان در تاریکی	۵ nA



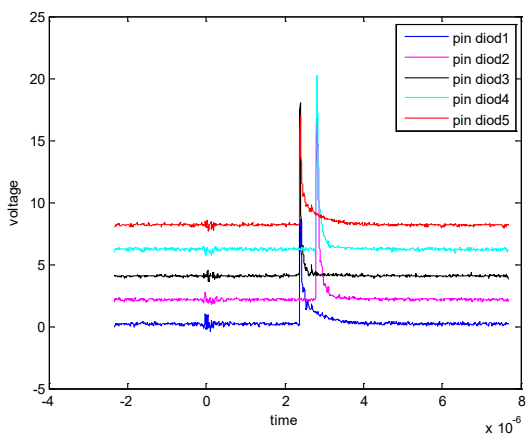
شکل ۱. نمودار حساسیت BPX۶۵ بر حسب طول موج و شکل ظاهری پین‌دیود [۱۲].

چگالی و دمای نسبتاً زیاد پلازما در دستگاه پلازما کانونی باعث گسیل پرتوهای پرنرژی 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 پرنرژی که تحت شرایط مناسب تولید می‌شوند. گسیل پرتو ایکس نرم عمدتاً به علت برانگیختگی و به دنبال آن واکنش‌های اتم‌های گاز و یا اتم‌های آند انجام می‌پذیرد. گسیل پرتو ایکس سخت نیز به علت برخورد ذرات پرنرژی پلازما و تحت تأثیر پدیده تابش ترمزی انجام می‌شود. انجام واکنش‌های گداخت هسته‌ای نیز عامل گسیل نوترون‌ها می‌باشند. دستگاه پلاسمای کانونی با سه سازوکار تابش ترمزی (انتقال آزاد- آزاد)، الحاق مجدد (انتقال آزاد- مقید) و برانگیختگی (انتقال مقید- مقید)، پرتو ایکس گسیل می‌کند. دو سازوکار اول منجر به تولید پرتو ایکس با طیف پیوسته شده در حالی که سومین فرایند منبع تابش‌های مشخصه ماده پلازما یا الکترودها است. طیف گسیل شده برای هر تراز انرژی با فرکانس کم، یک طیف پیوسته می‌باشد. محدودیت‌های انتقال آزاد- مقید مربوط به حداقل انرژی مورد نیاز برای آزاد کردن الکترونی از تراز انرژی خود می‌باشد. شکل طیف گسیل شده بستگی به توزیع انرژی الکترون آزاد و سطح مقطع جذب در هر تراز انرژی دارد.

بازه زمانی تولید پرتو ایکس سخت در دستگاه پلازما کانونی از مرتبه چند صد نانو ثانیه است. بنابراین برای مشاهده و اندازه‌گیری آن باید از آشکارسازی استفاده کرد که پاسخ زمانی سریع داشته باشد. بر مبنای مطالعات انجام شده، در این پژوهش برای اندازه‌گیری پرتو ایکس سخت دستگاه پلازما کانونی از آشکارساز سوسوزن پلاستیک Ne۱۰۲ استفاده شده است. این آشکارساز یک سوسوزن با کاربرد چندگانه است و در انواع مختلف میله‌ای، شمش و صفحات نازک موجود است.

پرتوی ایکس نرم گسیل شده از پلازما حاوی اطلاعات ارزشمندی از ناپایداری پلازما، نوسانات، توان اتلافی و غیره می‌باشد. دو روش متداول اندازه‌گیری پرتو ایکس نرم عبارتند از: (۱) استفاده از آشکارسازهای نیمه‌رسانا و (۲) استفاده از بیناب‌سنج‌های بلوری. از آن‌جا که در آشکارساز نیمه‌رسانای سلیسیمی، برای تولید هر زوج الکترون- حفره فقط انرژی متوسطی در حدود ۳٫۵ eV مورد نیاز است، بنابراین این نوع نیمه‌رسانا قادر به آشکارسازی در محدوده پرتو ایکس نرم می‌باشد. اساس کار آشکارسازهای نیمه‌رسانا، تابیدن پرتو ایکس به ناحیه حساس (ناحیه تهی) نیمه‌رسانا و تولید زوج‌های





شکل ۴. سیگنال‌های حاصل شده از ۵ پین دیود در حضور فیلتر آلومینیوم-مایلار در دستگاه پلاسما کانونی ۵ kJ.

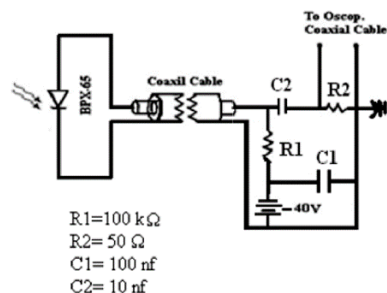
هم‌چنین به منظور دستیابی به پرتو ایکس نرم، از فیلترهای تضعیف‌کننده برلیوم ۱۰ میکرون و برلیوم ۲۳۰ میکرون و آلومینیوم-مایلار ۱۲ میکرون استفاده کرده‌ایم. در شکل ۵ سیگنال‌های مربوط به ایکس نرم پین دیود مرکزی با فیلترهای مذکور نشان داده شده است. ولتاژ شارژ بانک خازنی ۱۴ کیلو ولت و ظرفیت بانک خازنی ۲۳۰ میکروفاراد است. گاز مورد استفاده آرگون با فشار ۳/۵ تور است. پین دیود از نوع BPX-۶۵ است.

پارامترهای متعددی در سیگنال پاسخ آشکارساز فوتودیود و اندازه‌گیری بازدهی پرتو ایکس دستگاه مؤثر هستند. هندسه آشکارساز، بازدهی کوانتومی فوتودیود (تابع پاسخ پین دیود)، فیلترهای جاذب مقابل آشکارساز و طیف پرتوهای ایکس تابش شده از گاز کاری دستگاه.

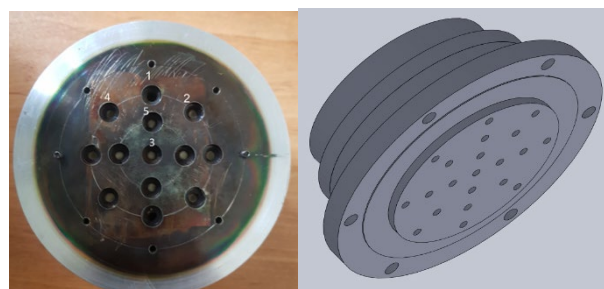
پس از طراحی و ساخت آشکارساز پرتو ایکس نرم و هم‌چنین مدار راه‌انداز آن، این آشکارساز در بالای سر آند دستگاه‌های پلاسما کانونی نصب گردید. با توجه به تعداد سیگنال‌های گرفته شده از پین دیودها، سوسوزن و نیز سیگنال مشتق جریان، از دو عدد اسیلوسکوپ دیجیتال چهارکاناله استفاده شد. در شکل ۶ چیدمان دستگاه پلاسما کانونی با قراردادی پین دیود و سوسوزن نشان داده است.

شکل ۷ سیگنال مشتق جریان و ایکس نرم و سخت دستگاه پلاسما کانونی ۵ kJ را نشان می‌دهد. در این شکل سیگنالی که از پین دیود واقع در مرکز چیدمان (شماره ۳) حاصل شده است نشان داده شده است. این سیگنال نشان از عملکرد صحیح آشکارساز در ناحیه ایکس را می‌دهد و به نوعی اطمینان از کارکرد آشکارساز را نیز نشان می‌دهد.

در ادامه در جدول ۱ مشخصات فنی پین دیود BPX۶۵ نشان داده شده است. این نکته قابل توجه است که، در راه‌اندازی پین دیود BPX۶۵ باید از بایاس معکوس در تغذیه آن استفاده شود زیرا با این کار ناحیه تهی آن افزایش یافته و امکان جذب فوتون را بیشتر می‌کند. در شکل ۲ مدار مربوط به راه‌اندازی آشکارساز پین دیود BPX۶۵ نشان داده شده است. در این پژوهش، یک آرایه ۸ تایی پین دیود ساخته شد. در مطالعه حاضر از ۵ عدد پین دیود به طور هم‌زمان استفاده شده است. این آرایه طوری طراحی شده است که قابلیت گذاشتن فیلترهای مختلف در مقابل هر پین دیود را دارد. در شکل ۳ محفظه فوتودیود چند کاناله و شماتیک آن نشان داده شده است. بر اساس آزمایشات انجام شده، بهترین سیگنال خروجی ایکس نرم در پین دیود شماره ۳ قرار می‌گیرد. این پین دیود واقع در مرکز چیدمان حاصل شده است.



شکل ۲. شماتیک مدار مربوط به راه‌اندازی آشکارساز فوتو دیود BPX۶۵ و نمونه قرار گرفته مدار در جعبه آلومینیومی.

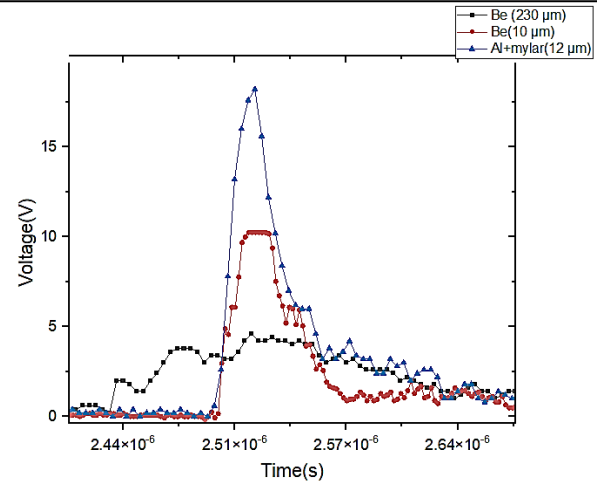


شکل ۳. چیدمان آرایه ۸ تایی آشکارساز پین دیود. الف) شماتیکی از آرایه پین دیود، ب) تصویر واقعی محفظه پین دیود چند آرایه‌ای ساخته شده.

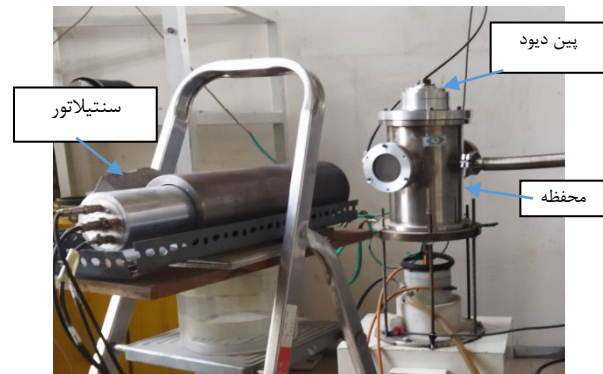


به منظور تحلیل سیگنال‌های به‌دست آمده، به تمام سیگنال‌ها در بازه زمانی رویداد تنگش و گسیل ایکس، با استفاده از نرم‌افزار متلب منحنی گاوسی برازش شده است. نمونه‌ای از برازش منحنی گاوسی بر سیگنال مشتق جریان دستگاه پلاسمای کانونی در شکل ۸ نشان داده شده است. سیگنال مشتق می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص سرعت تراکم ستون پلاسمای، دما و شعاع نهایی ستون پلاسمای را تعیین کند. لذا اغلب نتیجه‌گیری‌ها در زمینه کیفیت و چگونگی رخداد تنگش بر پایه بررسی سیگنال جریان و مشتق آن انجام می‌پذیرد. جدول ۲ پارامترهای به‌دست آمده از سیگنال مشتق جریان را نشان می‌دهد.

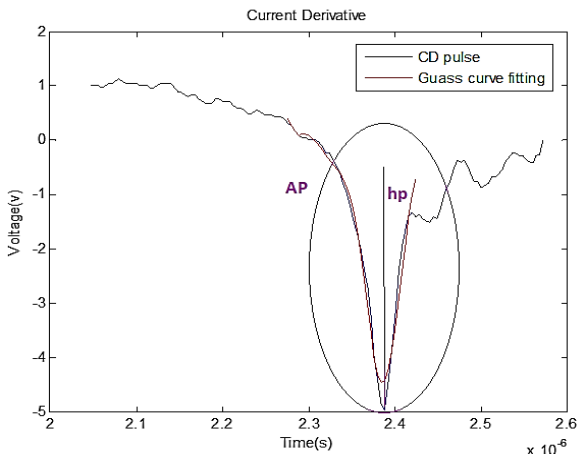
نماد AP نشانگر سطح زیر نمودار سیگنال مشتق جریان و HP ارتفاع نمودار برازش شده (عمق تنگش) است. پهنای کامل در عمق نیم‌بیشینه (FWHM) معیاری از طول عمر ستون پلاسمای است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در محدوده فشارهای مورد آزمایش، سیگنال مشتق جریان در فشار ۳ torr بیشترین مقدار را دارد. البته دامنه تغییرات آن اندک است. عمق تنگش نیز در فشار ۳ torr بیشترین مقدار را دارد که نشان از رخداد تنگش قوی‌تر است. قابل ذکر است که برای به‌دست آمدن نتایج قابل استناد از آزمایشات، تعداد نسبتاً زیادی تخلیه الکتریکی بر روی دستگاه پلاسمای کانونی انجام شد. هر شرایط آزمایشگاهی برای انجام تخلیه الکتریکی حداقل سه بار تکرار شده است و میانگین آن‌ها مد نظر قرار گرفته است.



شکل ۵. نمودار ایکس نرم سیستم پلاسمای کانونی در شات ۱۴ کیلو ولت با استفاده از پین دیود ( فیلترهای برلیوم ۲۳۰ میکرون و آلومینیوم- مایلار ۱۲ میکرون و برلیوم ۱۰ میکرون).



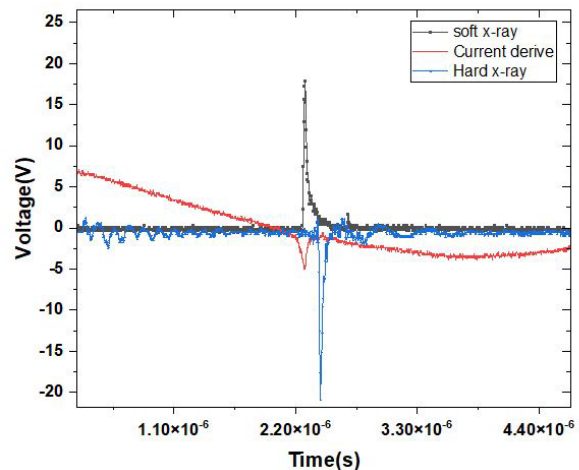
شکل ۶. چیدمان پلاسمای کانونی و اندازه‌گیری ایکس نرم با پین دیود و سوسوزن.



شکل ۸. سیگنال مشتق جریان و برازش منحنی گاوسی بر روی آن در دستگاه پلاسمای کانونی ۵ kJ با گاز آرگون در فشار ۳٫۵ torr ولتاژ ۱۴ kV.

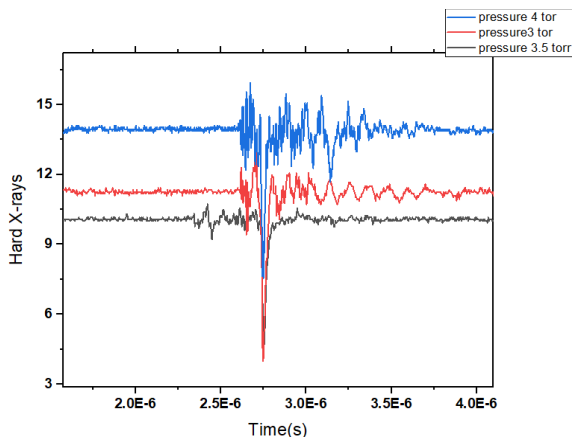
جدول ۲. پارامترهای سیگنال مشتق جریان پلاسمای کانونی ۵ kJ با گاز آرگون در ولتاژ ۱۴ kV

فشار (تور)	۳	۳٫۵	۴
میانگین (FWHM)	$0.7436 \times 10^{-7}$	$0.6897 \times 10^{-7}$	$0.5129 \times 10^{-8}$
میانگین Hp	۱۹٫۸۶	۱۸٫۲۶	۱۲٫۶۳
میانگین Ap	$1.8754 \times 10^{-6}$	$1.6476 \times 10^{-6}$	$5.2329 \times 10^{-7}$



شکل ۷. سیگنال ایکس نرم (مشکی)، ایکس سخت (آبی) و مشتق جریان (قرمز) از پلاسمای کانونی ۵ kJ در فشار ۳٫۵ تور و ولتاژ تخلیه ۱۴ کیلو ولت با گاز کاری آرگون.





شکل ۱۰. نمودار ایکس سخت بر حسب تغییرات فشار دستگاه پلاسما کانونی ۵ kJ با گاز آرگون و در ولتاژ کاری ۱۴ kV.

در فشارهای پایین تر قله‌های مربوط به ایکس سخت دیده می‌شوند و با افزایش فشار گسیل ایکس‌های نرم بیشتر شده و گسیل پرتوهای ایکس سخت کم‌تر می‌شود. از آن‌جا که فشار گاز و چگالی اتمی باهم متناسب هستند و با دما رابطه عکس دارند؛ در فشارهای کم که دمای پلاسما و به تبع آن دمای الکترون‌ها زیاد است، تابش ایکس سخت که ناشی از برخورد الکترون‌های سریع به سطح آند مسی است بیشتر می‌شود ولی با افزایش فشار کاهش می‌یابد.

#### ۵. نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این مقاله مطالعه تجربی ایکس دستگاه پلاسما کانونی مدر ۵ کیلوژول با استفاده آشکارساز پین دیود است. برای اندازه‌گیری‌ها نیاز به آشکارساز پین دیود چند کاناله بوده است. به همین منظور و در راستای بومی‌سازی، این سامانه در پژوهشکده گداخت سازمان انرژی اتمی ساخته شد. گاز کاری مطالعه شده آرگون با ولتاژ تخلیه ۱۴ کیلو ولت است. داده‌های مربوط به فشارهای ۳ تا ۴ تور با استفاده از سطح زیر نمودار مطالعه شد. نتایج مربوط به پنج کانال مطالعه و با هم مقایسه شدند. سیگنال خروجی ایکس کانال ۳ به دلیل قرارگیری در زاویه بهتر نسبت به نوک آند، نتایج بهتری می‌دهد. مشاهده تغییرات شدت پرتو ایکس در فشارهای مختلف نشان می‌دهد در ولتاژ تخلیه ۱۴ کیلو ولت در فشار ۳/۵ تور برای تمام فوتو دیودها بیش‌ترین مقدار پرتو ایکس نرم را داریم. پینچ بهتر در دستگاه پلاسما کانونی را می‌توان با توجه به عمق (میزان فرورفتگی) تنگش و شیب منفی آن در سیگنال مشتق جریان مشخص کرد. با مطالعه تجربی دستگاه پلاسما کانونی مدر ۵ kJ، قوی‌ترین تنگش در ولتاژ ۱۴ کیلو ولت و فشار ۳ تور رخ داد. علاوه بر آن، در مطالعه اثر فشار بر پرتو ایکس گسیل شده، در ولتاژ ۱۴ کیلو ولت قوی‌ترین سیگنال ایکس سخت نیز در فشار ۳ تور حاصل شد.

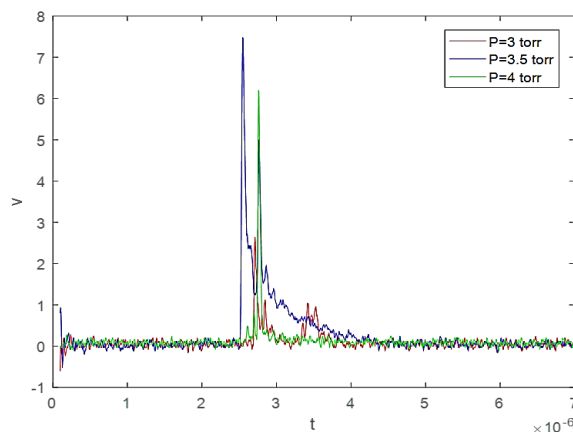
### ۳. مطالعه تجربی اثر فشار گاز بر پرتو ایکس نرم

مشخصه‌های گسیل پرتو ایکس به شدت بستگی به پارامترهای مشخصه و رژیم آزمایش دستگاه پلاسما کانونی (فشار، ترکیب گاز، انرژی تخلیه شده و جریان آن، امیدانس، جنس و شکل الکترودها) بستگی دارد. از پارامترهای عملکردی مهم و تأثیرگذار بر تنگش و بنابراین بهینه‌سازی مشخصه‌های ایکس گسیلی از دستگاه پلاسما کانونی، فشار کاری دستگاه می‌باشد. در ادامه نمودار سیگنال ایکس نرم بر حسب تغییرات فشار کاری آورده شده است (شکل ۹).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در محدوده فشار کاری، قوی‌ترین سیگنال ایکس نرم در فشار ۳/۵ torr حاصل شده است. قابل ذکر است که در این‌جا فیلتر مورد استفاده آلومینیوم با ضخامت ۵۰ میکرومتر بوده است. نتایج برازش منحنی گاوسی و تعیین پهنای نیم‌بیشینه و مساحت زیر نمودار و ارتفاع پیک در جدول ۳ آورده شده است.

### ۴. مطالعه تجربی اثر فشار گاز بر پرتو ایکس سخت

برای مطالعه مکانیسم گسیل پرتوهای ایکس سخت و تغییرات آن در فشارهای مختلف به مقایسه سیگنال‌های آشکارساز سوسوزن در فشارهای مختلف پرداخته‌ایم. به این ترتیب سیگنال‌ها را در ولتاژ ۱۴ کیلو ولت با گاز آرگون در فشارهای ۳، ۳/۵ و ۴ تور باهم مقایسه کرده ایم (شکل ۱۰).



شکل ۹. نمودار ایکس نرم بر حسب تغییرات فشار دستگاه پلاسما کانونی ۵ kJ با گاز آرگون و در ولتاژ کاری ۱۴ kV.

جدول ۳. نتایج تحلیل سیگنال ایکس نرم پلاسما کانونی ۵ kJ با گاز آرگون در ولتاژ ۱۴ kV

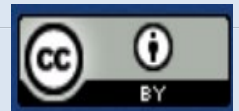
فشار (تور)	۴	۳٫۵	۳
میانگین (FWHM)	$3,1875 \times 10^{-9}$	$1,8577 \times 10^{-8}$	$1,7462 \times 10^{-8}$
میانگین Hp	۰٫۲۷۳۷	۶٫۳۳۱۸	۰٫۳۴۹۴
میانگین Ap	$7,0044 \times 10^{-9}$	$2,2545 \times 10^{-7}$	$5,1479 \times 10^{-9}$



- Bing S. Comparative study of dynamics and X-ray emission of several plasma focus devices. *in school of science, Nanyang Technological University*. 2000.
- Norouzi M. Investigating factors affecting pinch in focal plasma device, master's thesis in nuclear engineering. *Shahid Beheshti University*. 2017 [In Persian].
- Habibi M, Mahtab M. Experimental study of soft X-ray intensity with different anode tips in Amirkabir plasma focus device. *Pramana*. 2016;87(1):1-5.
- Zhang T, Lin X, Chandra K.A, Tan T.L, Springham S. V, Patran A, Lee P, Lee S, Rawat R.S. Current sheath curvature correlation with the neon soft X-ray emission from plasma focus device. *Plasma Sources Science and Technology*. 2005;14(2):368.
- Miremad S.M, Shirani Bidabadi B. Measurement of the effective energy of pulsed X-rays emitted from a Mather-type plasma focus device. *Appl Radiat Isot*. 2017;125:169-175.
- Miremad S.M, Shirani Bidabadi B. Effect of inserted metal at anode tip on formation of pulsed X-ray emitting zone of plasma focus device. *Radiation Physics and Chemistry*. 2018;145:58-63.
- Sabri R.M, Baijan A.H, A'iasah Hashim S, Chulan M.R.M, Wah L.K, Mokhtar M. Plasma Focus Device As A X-Ray Source For Radiography Applications In Nuclear Malaysia. *Jurnal Sains Nuklear Malaysia*. 2016;28(1):30-33.
- Diab F, El-Kashef G.M. Emission of X-ray from 1 kJ Plasma Focus Device and its Preliminary Applications. *Int. J. New. Hor. Phys*. 2016;3(2):39-47.
- Jain J, Moreno J, Avila R.E, Avaria G, Pavez C, Bora B, Davis S, Soto L. Pulsed X-rays dose measurements from a hundred joules plasma focus device. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018;1043:012048.
- Knoblauch P, Raspa V, Lorenzo F.Di, Classe A, Moreno C. Hard X-ray dosimetry of a plasma focus suitable for industrial radiography. *Radiation Physics and Chemistry*. 2018;145:39-42.
- Ahmed K.M, Allam T.M, El-Sayed H.A, Diab F.B, Soliman H.M. Numerical Experiments to Optimize Argon Soft X-Ray Yield in a Low-Energy Plasma Focus. *Ieee Transactions on Plasma Science*. 2019;47(6).
- Patran A. PhD. Thesis, Electron and Medium Energy X-ray Emission from a Dense Plasma Focus. *Nanyang Technological University*. 2002.

**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، پیش‌بین، نوشین، اکبری نساچی، مریم، نصیری، علی. (۱۴۰۳)، مطالعه تجربی گسیل ایکس دستگاه پلاسما کانونی مدر  $k_j$  ۵. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*. ۱۰۸(۲)، ۱۵۵-۱۶۱. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1559>. Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1559.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1559.html)

