



بررسی تجربی مشخصه‌های گسیل نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1

بابک شیرانی، فریدون عباسی دوانی*

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران-ایران

چکیده: در این تحقیق، نوترون‌دهی پلاسمای کانونی نوع مَدِر SBUPF1 با مشخصات ($E=2.5\text{kJ}$ و $C=8.6\mu\text{F}$) در فشارهای مختلف گاز دوتریم و برای دو آند با اندازه‌های مختلف ۱۲ و ۱۸ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. از سه شمارگر فعال‌سازی نقره که یکی از آن‌ها بالای سر آند و دوتای دیگر در زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به محور آند قرار داده می‌شدند، برای شمارش نوترون و تعیین تقریبی توزیع زاویه‌ای گسیل نوترون استفاده شده است. هم‌چنین یک آشکارساز سوسوزن پلاستیکی ($5\times 5\text{cm}$) برای ثبت تپ نوترون و پرتو ایکس سخت و تعیین انرژی میانگین نوترون‌ها به کار گرفته شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان دادند که برای آند با طول بزرگ‌تر، فشار بهینه‌ی گاز برای تولید نوترون کم‌تر شده و بهره‌ی نوترون در این فشار بهینه افزایش می‌یابد. در این شرایط، فشار بهینه‌ی گاز دوتریم برای تولید نوترون، ۶ mbar، بهره‌ی نوترون در این فشار بهینه به طور متوسط حدود 6.4×10^7 نوترون در هر تپ و انرژی میانگین نوترون‌ها ۲.۲۴ MeV است.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای کانونی، هم‌جوشی، نوترون، فشار بهینه، شمارگر فعال‌سازی

Experimental Study of Neutron Emission Characteristics in SBUPF1 Plasma Focus Device

B. Shirani, F. Abbasi Davani*

Radiation Application Department, Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran

Abstract: In this work, neutron production of SBUPF1 (a 2.5 kJ Mather type plasma focus device) at various pressures of deuterium and two different anode lengths (12 cm, 18 cm) were studied. Three silver activation counters were used at three different angles (0° , 45° and 90°) in order to determine the angular distribution of neutrons. The neutron and hard x-ray pulses were registered by a $5\times 5\text{cm}$ plastic scintillator. These pulses were further used to determine the average energy of the detected neutrons. Experiments showed that for the 18cm anode at the optimum gas pressure, the neutron generation has decreased while the neutron yield at this pressure has increased. Under these conditions, the optimum pressure is 6 mbar, the neutron yield at the optimum pressure is about 6.4×10^7 per pulse, and the average energy of neutrons is 2.24 MeV.

Keywords: Plasma Focus, Fusion, Neutron, Optimum Pressure, Activation Counter

*email: fabbasi@sbu.ac.ir



۱- مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی در سال ۱۹۶۵ توسط مدر در آمریکا [۱] و فیلیپوف در شوروی سابق [۲] به طور جداگانه طراحی و ابداع شد. البته این دو دستگاه از نظر مشخصات هندسی کاملاً با یکدیگر متفاوت بودند. در هر دو نوع دستگاه، یک لایه پلاسمای شتاب داده شده به وسیله میدان مغناطیسی به یک رشته‌ی بسیار چگال به چگالی 10^{19} cm^{-3} ، داغ به انرژی 1 keV و کم دوام (۵۰ تا ۲۰۰ نانو ثانیه) تبدیل می‌شود.

دستگاه پلاسمای کانونی (PF)^(۱)، مولد پرتوهای مختلف از قبیل پرتو ایکس، الکترون، یون و نوترون (زمانی که گاز دوتریم به داخل دستگاه تزریق شود) می‌باشد و در سه دهه‌ی گذشته به عنوان یکی از چشمه‌های نوترون آزمایشگاهی در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است [۳ تا ۹].

هر چند ساز و کار تولید نوترون در پلاسمای کانونی هنوز به طور دقیق مشخص نشده است [۳]، تاکنون سه ساز و کار زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- نوترون‌ها در نتیجه‌ی واکنش هم‌جوشی گرماسته‌ای^(۲) در ستون پلازما در حین گسترش ناپایداری $m=0$ تولید می‌شوند [۴]. این مدل نمی‌تواند نایکنواختی شار نوترون گسیل شده در زوایای مختلف را توجیه کند.
- مدل باریکه-هدف^(۳) نشان می‌دهد که نوترون در اثر شتاب‌گیری یون‌های غیر گرمایی از طریق القای میدان‌های الکتریکی قوی در ستون پلازما و برخورد با یکدیگر تولید می‌شود [۵].
- مدل یون همگرا^(۴) پیشنهاد می‌کند که نوترون‌ها وقتی تولید می‌شوند که یون‌ها به داخل فضای کوچکی در مرکز ناحیه‌ی فروریزی پلازما وارد شده و با یون‌های موجود در پلازما برخورد کنند [۶].

با وجود این که هنوز مدل جامع و قانع‌کننده‌ای برای تولید نوترون در پلاسمای کانونی ارائه نشده است، با استفاده از آزمایش‌های تجربی، ساز و کارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند و بدین وسیله کارآیی نوترون‌دهی دستگاه‌های پلاسمای کانونی بهبود یافته است [۳ تا ۱۱].

وابستگی بهره‌ی نوترون دستگاه پلاسمای کانونی به فشار گاز دوتریم به طور گسترده در آزمایشگاه‌های سراسر جهان مورد

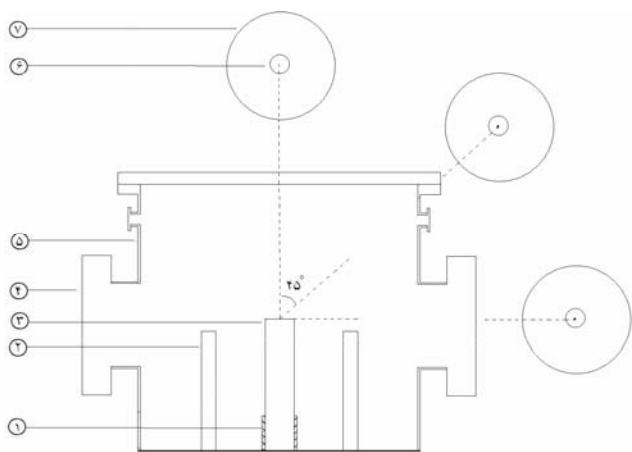
بررسی قرار گرفته است. زکاء... و همکارانش [۷، ۸ و ۹] رابطه‌ی بهره‌ی نوترون و فشار گاز دوتریم در دستگاه‌های پلاسمای کانونی را در محدوده‌ی انرژی پایین (10 kJ) مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که نوترون به وسیله دو ساز و کار گرماسته‌ای و باریکه-هدف تولید می‌شود.

مشخصات دستگاه SBUPF1، سیستم‌های تشخیصی و چیدمان آزمایش در بخش دوم توضیح داده شده‌اند. در بخش سوم به روش محاسبه‌ی بهره‌ی نوترون در هر آزمایش و محاسبات مربوط به آن پرداخته می‌شود. در بخش چهارم نتایج آزمایش‌ها ارائه شده‌اند. جمع‌بندی نتایج و تحلیل آن‌ها و هم‌چنین پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده، موضوع بخش پنجم می‌باشند.

۲- مشخصات دستگاه SBUPF1 و ابزار اندازه‌گیری

در دستگاه SBUPF1 از یک خازن استوانه‌ای با مشخصات ($V=25 \text{ kV}$ و $C=8.6 \mu\text{F}$) به عنوان منبع ذخیره‌ی انرژی استفاده می‌شود. این انرژی از طریق یک گاف جرقه‌ی صفحه‌ی موازی و با طراحی از نوع تریگاترون، بر روی الکترودهای دستگاه تخلیه می‌شود. این گاف جرقه شامل دو صفحه‌ی برنجی به قطر 6 cm است که به فاصله‌ی 13 mm از هم قرار گرفته‌اند. این فاصله، برای اطمینان از تخلیه در زمان مناسب و هم‌چنین جلوگیری از تخلیه‌های خودبه‌خودی در فاصله‌ی ولتاژ $18-25 \text{ kV}$ تنظیم شده است. رهاسازی تپ برای شروع عمل تخلیه، توسط یک مدار رهاساز تایم‌ترونی تأمین می‌شود. این تپ توسط الکتروده رهاساز که در مرکز صفحه‌ی بالایی گاف جرقه قرار گرفته است به فضای بین گاف جرقه اعمال می‌شود.

شارژ خازن توسط یک ترانس $20 \text{ kV}-220 \text{ V}$ ، یک پل دیودی یک‌سوساز ولتاژ زیاد و یک مقاومت $10 \text{ k}\Omega$ ، 10 kW انجام می‌شود. زمان شارژ خازن تا رسیدن به ولتاژ 25 kV حدود یک دقیقه می‌باشد. آند، از جنس مس به قطر 2.2 cm و طول 12 cm ساخته شده است. کاتد شامل 12 میله‌ی مسی به قطر 1 cm است که به شکل دایره حول آند قرار گرفته‌اند. فاصله‌ی مرکز کاتد تا مرکز آند، 3.6 cm است. اندوکتانس کل مسیر تخلیه‌ی دستگاه، شامل اندوکتانس خازن، اندوکتانس الکترودها و کابل‌های رابط خازن به صفحه‌ی کاتد، حدود 190 nH می‌باشد.



شکل ۱- محفظه‌ی پلاسمای کانونی و چیدمان شمارگرها؛ ۱- عایق، ۲- کاتد، ۳- آند، ۴- پنجره‌ی محفظه برای تصویربرداری ایکس سخت، ۵- بدنه‌ی محفظه، ۶- محل قرارگیری گایگر، دیواره‌ی نازک و ۷- استوانه‌ی پلی اتیلنی.

فشارسنج مورد استفاده برای اندازه‌گیری‌های نوترونی دستگاه، از ترکیبی از سیستم‌های اندازه‌گیری کاتد سرد و پیرانی برای اندازه‌گیری فشار استفاده می‌کند و خطای اندازه‌گیری آن، $\pm 30\%$ است.

۳- روش اندازه‌گیری بهره‌ی نوترون دستگاه

برای تعیین بهره‌ی کلی نوترون علاوه بر اندازه‌گیری شار نوترون، توزیع زاویه‌ای گسیل نوترون نیز باید تعیین شود. نوترون‌های گسیل شده از پلاسمای فشرده شده‌ی گاز دوتریم در دستگاه پلاسمای کانونی، از نظر فضایی، همسانگرد نیست. ثابت شده است که فرایندهای مختلفی در تولید نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی اثر دارند [۶]. نوترون‌های تولید شده در اثر فرایند برخورد باریکه-یون در زاویه‌ی صفر درجه (در جهت بالای آند) دارای بیش‌ترین شار هستند. بنابراین تعیین توزیع زاویه‌ای نوترون‌ها علاوه بر این که برای تعیین بهره‌ی نوترون دستگاه ضروری است، کمک زیادی به بررسی فرایندهای تولید نوترون خواهد کرد.

درجه‌بندی شمارگرها به روش حذف چشمه [۱۳] و با استفاده از یک چشمه‌ی نوترونی Am-Be (۵Ci) انجام شد. بهره‌ی نوترون با در نظر گرفتن گسیل ناهمسانگرد نوترون و با استفاده از ضرایب درجه‌بندی اندازه‌گیری شده توسط هر سه شمارگر محاسبه شد.

با توجه به این که در دستگاه پلاسمای کانونی، لایه‌ی پلاسمای به وسیله‌ی نیروی $J \times B$ راه‌اندازی می‌شود، اساسی‌ترین اندازه‌گیری در هر دستگاه پلاسمای کانونی، اندازه‌گیری جریان تخلیه است که از پلاسمای عبور می‌کند. متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری جریان تخلیه‌ی پلاسمای کانونی، استفاده از پیچ‌های روگوفسکی است.

در آزمایش‌های مربوط به دستگاه SBUPF1 از یک پیچ‌های روگوفسکی و یک مدار انتگرال‌گیر RC با ثابت زمانی $60 \mu s$ برای ثبت سیگنال جریان تخلیه استفاده شده است. ثابت درجه‌بندی پیچ‌ها به همراه مدار انتگرال‌گیر، که برای اندازه‌گیری دامنه‌ی جریان تخلیه توسط سیگنال ولتاژ خروجی پیچ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، $37 kA/V$ است. برای اندازه‌گیری ثابت درجه‌بندی روگوفسکی از روش ارائه شده توسط پاتران [۱۲] استفاده شده است.

اسیلوسکوپ مورد استفاده برای ثبت جریان، دارای دو کانال ورودی با فرکانس $60 MHz$ و آهنگ نمونه‌برداری $1 GS/s$ می‌باشد. برای مشاهده‌ی مشتق جریان، خروجی پیچ‌ها به وسیله‌ی یک تضعیف‌کننده‌ی 1Ω به طور مستقیم به کانال دیگر اسیلوسکوپ اعمال می‌شود.

بازه‌ی زمانی تولید پرتو ایکس سخت و نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی از مرتبه‌ی چندصد نانو ثانیه است. یکی از مناسب‌ترین آشکارسازها برای تعیین توزیع زمانی گسیل ایکس سخت و نوترون در پلاسمای کانونی، آشکارساز سوسوزن پلاستیکی است. در این تحقیق از یک سوسوزن پلاستیکی ($5'' \times 05''$) استفاده شده است.

شمارگرهای فعال‌سازی نقره شامل یک استوانه‌ی پلی اتیلنی به قطر $14 cm$ و ارتفاع $23 cm$ برای کاندسازی نوترون‌ها، یک ورقه‌ی نقره به ضخامت $3 mm$ برای جذب نوترون‌های گرمایی و یک شمارگر گایگر دیواره نازک برای شمارش بتاهای حاصل از واپاشی اتم‌های نقره‌ی فعال شده می‌باشند.

سه عدد شمارگر از این نوع در زوایای 0° ، 45° و 90° درجه نسبت به محور آند و با فاصله‌ی حدود $30 cm$ از انتهای آند برای شمارش نوترون‌های گسیل شده در این سه زاویه قرار گرفتند. در شکل ۱ ساختار محفظه‌ی پلاسمای کانونی و اجزای داخل آن به همراه نحوه‌ی چیدمان شمارگرها در اطراف محفظه نشان داده شده است.



$$Y_T = 4\pi r^2 A + 2\pi r^2 \int_0^\pi \frac{B}{\omega\sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2\frac{\theta^2}{\omega^2}\right] d\theta \quad (2)$$

که در آن، Γ فاصله‌ی شمارگرهای گایگر تا نوک آند است. جمله‌ی اول این معادله، قسمت همسانگرد و جمله‌ی دوم، قسمت ناهمسانگرد نوترون‌های تولید شده را نشان می‌دهد.

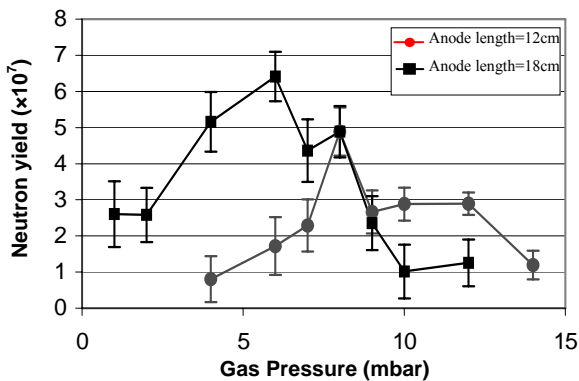
۴- نتایج و بحث

۴-۱ بررسی ارتباط بهره‌ی نوترون با فشار گاز دوتریم و تعیین

فشار بهینه

در این آزمایش، گاز دوتریم در فشارهای ۱ تا ۱۸ میلی‌بار و در انرژی ۲,۵kJ مورد آزمایش قرار گرفت. هدف اصلی این بخش تعیین بهره‌ی نوترون و توزیع زاویه‌ای نوترون‌ها در فشارهای مختلف و تعیین فشار بهینه است. به این منظور در شرایط ذکر شده و برای دو آند با طول‌های ۱۲ و ۱۸ سانتی‌متر، حدود ۲۲۰ آزمایش در فشارهای ۱ تا ۱۸ میلی‌بار انجام شد. مقادیر بهره‌ی نوترون در فشارهای مختلف برای هر دو آند در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده با آند ۱۲cm می‌توان نتیجه گرفت که فشار بهینه‌ی دستگاه برای تولید بیش‌ترین بهره‌ی نوترون در این شرایط، ۸ میلی‌بار است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش طول آند فشار بهینه به سمت فشارهای کم‌تر کشیده شده و بهره‌ی نوترون در فشار بهینه افزایش یافته است. هم‌چنین در محدوده‌ی فشارهای ۴ تا ۸ میلی‌بار در ۸۸ درصد از موارد نوترون تولید شده است. بنابراین ۴ تا ۸ میلی‌بار به عنوان محدوده‌ی بهینه فشار برای نوترون‌دهی پیشنهاد می‌شود.



شکل ۲- مقایسه‌ی بهره نوترون در فشارهای مختلف برای دو آند.

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های تولید نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی، نایکنواخت بودن شار نوترون گسیل شده در زوایای مختلف نسبت به محور آند است. بنابراین در نظر گرفتن توزیع زاویه‌ای نایکنواخت نوترون اهمیت زیادی در تعیین دقیق بهره‌ی نوترون یک دستگاه پلاسمای کانونی دارد. در اندازه‌گیری‌های مربوط به این مقاله، شار نوترون فقط در سه زاویه اندازه‌گیری و در زوایای دیگر، با استفاده از داده‌های این زوایای خاص تخمین زده شده است. یکی از بهترین توابعی که برای این کار معرفی شده است و به خوبی با نتایج تجربی برازش می‌شود، تابع گاوسی می‌باشد. آنتاناشیرویک [۱۰] و کاستیلو [۱۱] نشان داده‌اند که وقتی گاز دوتریم خالص به داخل دستگاه تزریق می‌شود، توزیع زاویه‌ای نوترون‌ها با تقریب بسیار بالایی با مجموع یک تابع گاوسی و یک مقدار ثابت برازش می‌شود. مقدار ثابت A ، نشان‌دهنده‌ی مؤلفه‌ی همسانگرد نوترون‌های گسیل شده است که توسط فرایند هم‌جوشی گرماسته‌ای تولید شده‌اند و توزیع گاوسی، مؤلفه‌ی ناهمسانگرد نوترون‌ها را نشان می‌دهد که در اثر ساز و کار باریکه-هدف تولید شده‌اند.

شار نوترون اندازه‌گیری شده در بالای سر آند دارای بیش‌ترین مقدار بوده و با افزایش زاویه‌ی قرارگیری آشکارساز نسبت به محور آند، کاهش می‌یابد. به همین دلیل با توجه به این که در آزمایش‌های مربوط به این تحقیق از گاز دوتریم خالص استفاده شد، برای انجام تصحیح مربوط به گسیل ناهمسانگرد نوترون و تعیین بهره‌ی کلی دستگاه، از رابطه‌ی (۱) که مجموع یک تابع گاوسی و یک مقدار ثابت است برای تخمین توزیع نوترون در زوایای مختلف استفاده شده است [۳].

$$f(\theta) = A + \frac{B}{\omega\sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2\frac{\theta^2}{\omega^2}\right] \quad (1)$$

که در آن، A و B مقادیر ثابت، ω مقداری متناسب با پهنای نیم ارتفاع FWHM تابع گاوسی با یکای رادیان و θ زاویه برحسب رادیان است. بهره‌ی نوترون پلاسمای کانونی (Y_T) را می‌توان با انتگرال‌گیری از معادله‌ی (۱) و برای هندسه‌ی کروی به این شکل محاسبه کرد

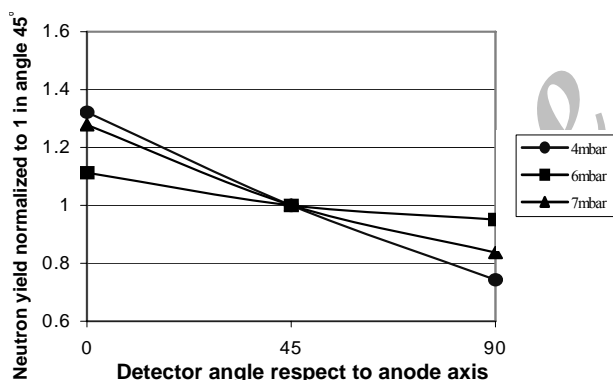


محور عمودی، بهنجار شده‌اند و بهره‌ی نوترون را نشان نمی‌دهند. در شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد که در فشار ۶ میلی‌بار، توزیع زاویه‌ای نوترون‌ها متقارن‌تر شده ولی در فشارهای کم‌تر و بیش‌تر از آن، این توزیع، ناهمسانگردتر است.

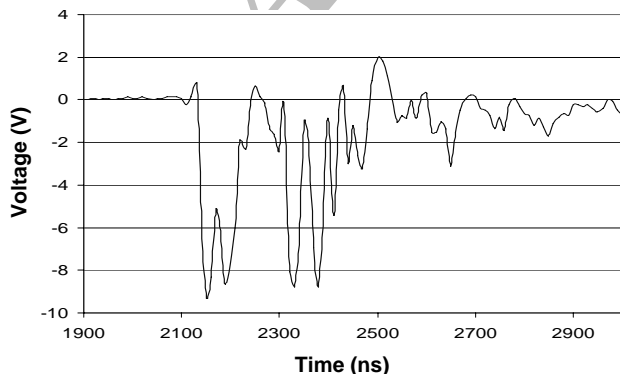
۴-۳ اندازه‌گیری انرژی میانگین نوترون‌ها

آشکارساز سوسوزن در فاصله‌ی حدود ۴ متر از نوک آند روی یک پایه، دقیقاً مقابل پنجره‌ی محفظه‌ی پلاسمای کانونی قرار داده شد. این آشکارساز، ورود پرتو ایکس سخت و نوترون‌ها را به صورت دو تپ جداگانه ثبت می‌کرد. از آن جا که فوتون‌های ایکس سریع‌تر می‌رسند، پالس اول مشاهده شده مربوط به پرتوهای ایکس و پالس دوم مربوط به نوترون‌ها بود.

یکی از سیگنال‌های دریافت شده توسط سوسوزن در شرایط بهینه‌ی کار دستگاه، در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل ۴ قله مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی تولید نوترون در دو فاز جداگانه است.



شکل ۳- مقایسه‌ی توزیع زاویه‌ای نوترون گسیل شده در سه فشار مختلف.



شکل ۴- سیگنال ثبت شده توسط سوسوزن پلاستیکی (۵×۵) در فاصله‌ی ۴ متری از محل تولید نوترون (طول آند ۱۸cm و فشار ۱۸mbar).

با تغییر طول آند زمان فاز حرکت محوری لایه‌ی جریان افزایش خواهد یافت. در این صورت موقعیت زمانی پینچ نسبت به بیشینه‌ی جریان تغییر می‌کند. با تغییر طول آند، فشار بهینه برای هم‌زمان شدن پینچ با بیشینه‌ی جریان تغییر می‌کند. هر چه طول آند بیش‌تر شود، فشار بهینه کاهش می‌یابد. میزان این کاهش را می‌توان توسط مدل اسنوویلو^(۵) پیش‌بینی کرد [۱۴].

شرایط بهینه‌ی کار دستگاه پلاسمای کانونی، شرایطی است که در آن زمان حرکت محوری، برابر با ربع دوره‌ی تناوب سیگنال جریان تخلیه باشد.

با در نظر گرفتن این مدل می‌توان نتیجه گرفت که برای یک دستگاه پلاسمای کانونی با شرایط هندسی ثابت و یک گاز مشخص، حاصل ضرب فشار بهینه‌ی گاز و طول آند، مقداری ثابت است [۹]. به عبارت دیگر برای دو طول مختلف آند خواهیم داشت: $P_1 Z_1 = P_2 Z_2$. با توجه به این که فشارهای انتخاب شده در این آزمایش‌ها، ۱mbar از هم فاصله دارند، این مقدار ثابت برای آند ۱۲ سانتی‌متری برابر با 12 ± 96 می‌باشد. با افزایش طول آند به ۱۸cm طبق پیش‌بینی این مدل، فشار بهینه باید در حدود 5.3 ± 0.67 باشد. همان‌طور که گفته شد، در آزمایش‌های انجام شده، فشار بهینه برای این آند برابر با 1 ± 6 به دست آمد که با پیش‌بینی این مدل تطابق قابل قبولی دارد.

۴-۲ تعیین توزیع زاویه‌ای گسیل نوترون

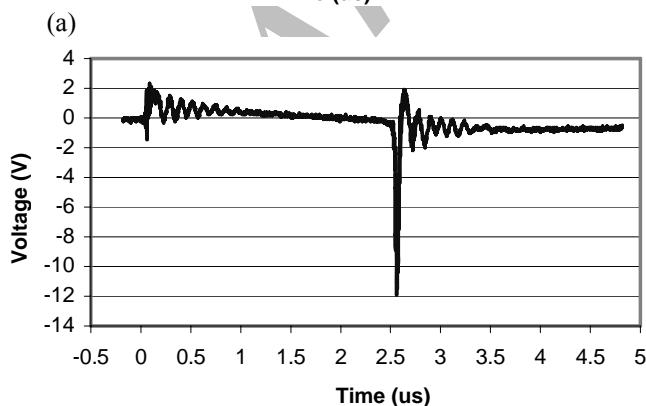
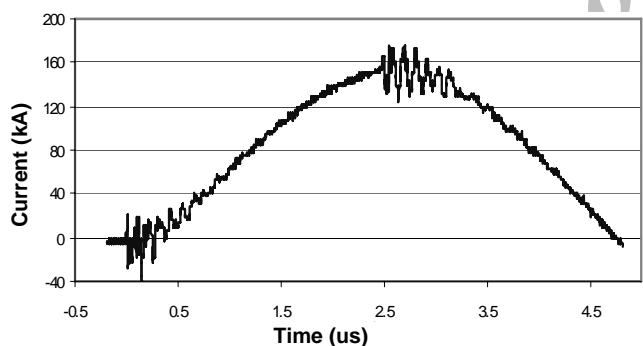
یکی دیگر از اهداف این اندازه‌گیری‌ها تعیین توزیع زاویه‌ای نوترون‌های دستگاه SBUPF1 بود. برای این منظور، بهره‌ی نوترون اندازه‌گیری شده توسط هر شمارگر را به عنوان معیار انتخاب و تغییرات آن برای سه زاویه‌ی ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه را به عنوان معیاری از توزیع ناهمسانگرد نوترون دستگاه پلاسمای کانونی در نظر گرفتیم. این تغییرات در شکل ۳ برای آند ۱۸cm و برای سه فشار انتخابی ۴ میلی‌بار (کم‌تر از فشار بهینه)، ۶ میلی‌بار (نزدیک فشار بهینه) و ۸ میلی‌بار (بیش‌تر از فشار بهینه) نشان داده شده‌اند. البته برای این که توزیع زاویه‌ای برای سه منحنی را بتوان راحت‌تر با هم مقایسه کرد بهتر است که نقطه‌ی وسط هر سه منحنی (یعنی زاویه ۴۵ درجه) بر روی یک عدد مشخص تنظیم شود و بقیه‌ی نقاط براساس آن بهنجار شوند. این کار در شکل ۳ انجام شده است. بنابراین در این شکل، مقادیر



۴-۴ ارتباط بین عمق کانونی سازی و بهره‌ی نوترون دستگاه

یکی از نتایج جالب این تحقیق، مشاهده‌ی ارتباط مستقیم بین عمق کانونی سازی و بهره‌ی نوترون (برای فشارهای ۲ تا ۱۰ mbar) در هر آزمایش است. عمق کانونی سازی، سرعت کاهش جریان در زمان پینچ است که توسط سیگنال مشتق جریان اندازه گیری می شود. عمق کانونی سازی دو نمونه از سیگنال‌های جریان و مشتق جریان مربوط به دو آزمایش مختلف در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. عمق کانونی سازی در شکل‌های ۵b و ۶b، به ترتیب، حدود ۱۲ و ۸۷ است. نتایج اندازه گیری بهره‌ی نوترون نشان می‌دهند که بهره‌ی نوترون در آزمایش مربوط به شکل ۵ حدود ۳٫۵ برابر بهره‌ی نوترون در آزمایش نظیر شکل ۶ است.

عمق کانونی سازی نشان‌دهنده‌ی سرعت افزایش امپدانس پلاسما است. با افزایش دمای پلاسما در زمان کانونی سازی امپدانس پلاسما نیز افزایش می‌یابد. در دماهای بالاتر (در فشار بهینه) تعداد واکنش‌های گداخت بیش تر است و بهره‌ی نوترون افزایش می‌یابد.



شکل ۵- (a) سیگنال جریان، (b) سیگنال ولتاژ متناظر با مشتق جریان. فشار ۸ میلی‌بار، طول آند ۱۲ cm، بهره‌ی نوترون 8.1×10^7

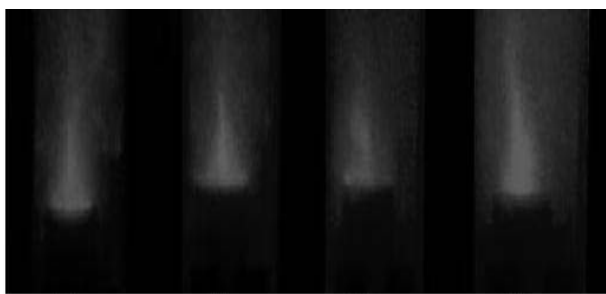
فاز فشردگی شعاعی پلاسما در دستگاه پلاسما کانونی از زمان رسیدن لایه‌ی پلاسما به انتهای آند و شروع حرکت شعاعی آن تا لحظه‌ی فروریزی پلاسما ادامه دارد و بازه‌ی زمانی این فاز، ۵۰ تا ۲۰۰ نانو ثانیه است. این فاز به ۴ زیرفاز تقسیم می‌شود [۱۵]:

- فاز فشردگی،
- فاز سکون،
- فاز ناپایداری،
- فاز فروریزی.

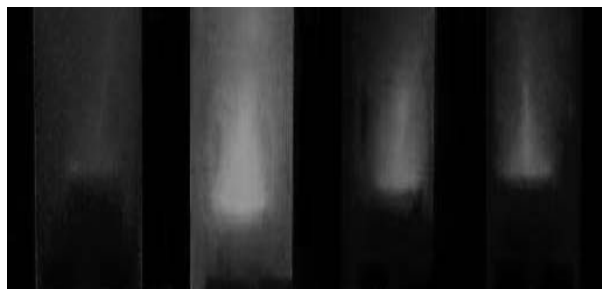
فاز ناپایداری، غنی‌ترین فاز از نظر تولید پرتو ایکس نرم و سخت است. ولی در فاز فروریزی نیز امکان فشردگی پلاسما وجود دارد [۱۵]. در بعضی از آزمایش‌ها، فشردگی پلاسما و گسیل پرتو ایکس و نوترون در دو فاز جداگانه مشاهده می‌شود که فاصله‌ی زمانی بین آن‌ها از مرتبه‌ی چند ده نانو ثانیه است.

در شکل ۴ دو قله‌ی اول مربوط به پرتو ایکس سخت و دو قله‌ی دوم مربوط به نوترون‌های تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی هستند. بنابراین فاصله‌ی زمانی بین دو فاز تولید نوترون حدود ۴۰ تا ۵۰ نانو ثانیه است.

با توجه به فاصله‌ی زمانی بین تپ‌های نوترون و ایکس، که $180 \pm 20 \text{ ns}$ می‌باشد انرژی نوترون‌ها برابر $2.24 \pm 0.5 \text{ MeV}$ به دست می‌آید. با اندازه گیری انرژی نوترون‌های دستگاه پلاسما کانونی، گستره‌ی طیف انرژی نوترون‌ها از 2.1 MeV تا 2.6 MeV نیز گزارش شده است [۴ و ۱۶]. علت اختلاف بین انرژی اندازه گیری شده و مقدار 2.45 MeV را می‌توان در فرایند تولید نوترون جستجو کرد. به طور خلاصه می‌توان گفت که در ساز و کار باریکه-هدف، انرژی هسته‌های دوتریم که شتاب گرفته و وارد ناحیه‌ی پلاسما داغ می‌شوند به انرژی محصولات واکنش اضافه شده و نوترون‌هایی با انرژی بیش تر از 2.45 MeV تولید می‌شوند. هم‌چنین با توجه به بالا بودن چگالی هسته‌ها در ناحیه‌ی پلاسما داغ، احتمال برخورد نوترون‌ها با هسته‌های موجود در پلاسما زیاد بوده و فرایند پراکندگی باعث کاهش انرژی نوترون‌ها می‌شود.



(a) (b) (c) (d)

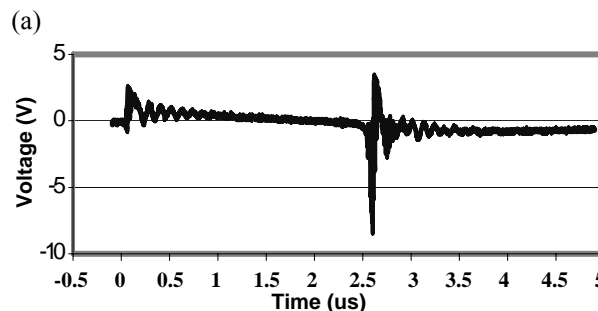
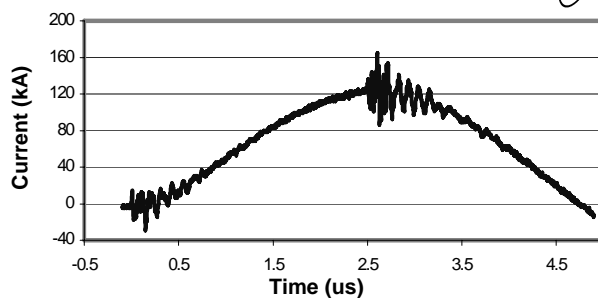


(e) (f) (g) (h)

شکل ۷- تصاویر انتگرالی پرتو ایکس سخت تولید شده در پلاسمای کانونی گاز دوتریم در انرژی ۲,۵kJ و فشارهای (a) ۳ میلی‌بار، (b) ۲ میلی‌بار، (c) ۱ میلی‌بار، (d) ۴ میلی‌بار، (e) ۹ میلی‌بار، (f) ۵ میلی‌بار، (g) ۸ میلی‌بار و (h) ۲ میلی‌بار.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- PF: Plasma Focus
- ۲- Thermonuclear Fusion
- ۳- Beam Target
- ۴- Converging Ion Model
- ۵- Snowplow



شکل ۶- (a) سیگنال جریان، (b) سیگنال ولتاژ متناظر با مشتق جریان؛ فشار ۸ میلی‌بار، طول آند ۱۲cm، بهره‌ی نوترون $10^7 \times 2.3$.

۴-۵ ثبت تصاویر انتگرالی پرتو ایکس سخت دستگاه با استفاده از دوربین عکاسی

چند نمونه از تصاویر انتگرال زمانی پرتو ایکس سخت تولید شده در فشارهای مختلف گاز دوتریم که با دوربین عکاسی گرفته شده است در شکل ۷ مشاهده می‌شود. برای ثبت این تصاویر، یک فیلتر نور مرئی بر روی لنز دوربین عکاسی قرار داده شده است. قبل از انجام آزمایش، دیافراگم دوربین باز شده و پس از تخلیه‌ی خازن، بسته شده است. بدین ترتیب تصویر انتگرال زمانی پرتو ایکس سخت گسیل شده از پلاسمای کانونی بر روی فیلم ثبت شده است. این تصاویر مربوط به آزمایش‌های انجام شده با آند ۱۲ سانتی‌متری است. با افزایش فشار تا رسیدن به فشار ۵ میلی‌بار، تقریباً یک روند قابل تشخیصی در افزایش مساحت نقاط نورانی مشاهده می‌شود یعنی، میزان تولید پرتو ایکس سخت افزایش یافته است. به نظر می‌رسد فشار بهینه برای تولید پرتو ایکس، کم‌تر از فشار بهینه برای تولید نوترون است. در فشار بهینه، شرایط دمایی مناسب برای تولید پرتو ایکس برقرار شده و بهره‌ی آن بیش‌ترین است.



References:

1. J.W. Mather, Phys. Fluids, V. **8**(2), 366 (1965).
2. N. Filippov, T. Filipova, V. Vinogradov, N. Fusion Suppl. Pt, **2**, 577 (1962).
3. H.J. Woo, K.S. Chung, M.J. Lee, Plasma Phys. Control. Fusion, **46**, 1095-1104 (2004).
4. V.V. Vikhrev, Sov. J. Plasma Phys, **12**-262 (1986).
5. M.J. Bernstein, Phys. Rev. Lett, **24**-724 (1970).
6. J.H. Lee, L.P. Shomo, M.D. Williams, H. Hermansdorfer, Phys. Fluids, **14**-2217 (1971).
7. M. Zakaullah, I. Akhtar, G. Murtaza, A. Waheed, Phys. Plasmas, **6**-3188 (1999).
8. M. Zakaullah, I. Akhtar, A. Waheed, K. Alamgir, A.Z. Shah, G. Murtaza, Plasma Sources Sci. Technol, **7**-206 (1998).
9. M. Zakaullah, G. Murtaza, I. Ahmad, F.N. Beg, M.M. Beg, M. Shabbir, Plasma Sources Sci. Technol, **4**-117 (1995).
10. R. Antanasijevic, Z. Maric, R. Banjanac, A. Dragic, J. Stanojevic, D. Aoraevic, D. Joksimovic, V. Udovicic, Vokovic, J. Radiat. Meas, **31**-443 (1999).
11. F. Castillo, J.J.E. Herrera, J. Rangel, M. Milanese, R. Moroso, J. Pouzo, J.I. Golzarri, G. Espinosa, Plasma Phys. Control. Fusion, **45**-289 (2003).
12. A.C. Pătran "Electron and medium energy X-ray emission from a dense plasma focus," PHD Thesis National Institute of Education, Nanyang Technological University in fulfilment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy (2002).
13. A. Gentilini, J.P. Rager, K. Steinmetz, M. Tacchi, D. Antonini, B. Arcipiani, P. Moioli, E. Pedretti, R. Scafe, Nucl. Instr. and Meth. **172**, 541-552 (1980).
14. S. Lee and A. Serban, IEEE Trans. on Plasma Phys, **24**(3), 1101 (1996).
15. Shan Bing "Comparative study of dynamics and X-ray mission of several plasma focus devices," PHD Thesis Physics Division, School of Science Nanyang Technological University (2000).
16. J.W. Mather, 4th Conf. On Plasma Physics and Nuclear Fusion, Wisconsin (1971b).