

بررسی تجربی بهبود بهره نوترونی گداخت D-D با افزودن گاز کریپتون در دستگاه پلاسمای کانونی

بابک، شیرانی^۱؛ رحمت، اظهري^{۱*}؛ محسن، نیکبخت^۲

۱-دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه مهندسی هسته ای

۲-دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده

بهره نوترونی و سیگنال مشتق جریان دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی پایین (نوع مدر و انرژی $1/Mkj$) در فشارهای متفاوت گاز دوتریوم و با اضافه کردن ۱٪ کریپتون اندازه گیری و تحلیل شد. مقایسه سیگنال جریان و شار نوترونی پس از افزودن ۱٪ گاز کریپتون به دوتریم، حاکی از افزایش قابل توجه در عمق پینچ و بهره نوترون نسبت به حالتی می باشد که دستگاه با دوتریم خالص کار می کند. همچنین نتایج این مجموعه آزمایش ها نشان می دهند که چنانچه عمق پینچ از مقدار تقریبی ۲۵ کیلوآمپر بر میکرو ثانیه بالاتر باشد، به طور حتمی گسیل نوترون خواهیم داشت و همچنین اگر نمودار شمارش نوترون بر حسب عمق پینچ رسم شود، این نمودار از رابطه تقریبی $Y_n = k \cdot d^{3.5}$ تبعیت می کند. واژه های کلیدی: پلاسمای کانونی، شمارشگر فعال سازی، هم جوشی، نوترون، پینچ

مقدمه

سالیان متمادی تلاش ها و مطالعات بسیاری در جهت دستیابی به همجوشی گرما هسته ای کنترل شده بر روی سیستم های تخلیه الکتریکی متمرکز بوده است. نخست در سال ۱۹۳۴ با در نظر گرفتن پدیده تنگش جریان الکتریکی توسط میدان مغناطیسی ناشی از خود جریان، این نوع تحقیقات سمت و سوئی تازه یافت که نهایتا منجر به ساخت سیستم هایی چون تنگش Z، تنگش θ و پلاسمای کانونی گردید. نقطه عطف تحولات پلاسمای کانونی به سال های ۱۹۶۰ و ۱۹۶۵ بر می گردد که در این سال ها به ترتیب فیلیپوف [۱] و مدر [۲] نتایج کارهایشان را که به طور مستقل از یکدیگر انجام شده بود منتشر کردند و به این ترتیب دو ساختار مختلف پلاسمای کانونی تحت عنوان های مدل فیلیپوف و مدر مطرح شدند. بطور خلاصه می توان گفت که دستگاه های پلاسمای کانونی می توانند پلاسمایی داغ (با دمایی در حدود ۱ keV) و چگال (با چگالی در حدود 10^{19}cm^{-3}) با طول عمری در حدود ۲۰۰-۵۰ ns تولید نمایند.

عموما دو مکانیزم برای انتشار نوترون از دستگاه پلاسمای کانونی مطرح شده است. نخست، مکانیزم گرما هسته ای، که در آن نوترون ها از پلاسمای دوتریوم با توزیع ماکسولی تولید می شوند که در واقع این مدل نمی تواند غیر یکنواختی شار نوترون گسیل شده در زوایای مختلف را توجیه کند و دومین روش، مکانیزم پرتو



هدف می باشد که در آن زمانی که یک دسته از یون های دوتریوم پر انرژی با پلاسمای سرد بعنوان یک هدف برخورد می کنند منجر به اندرکنش های همجوشی و تولید نوترون می گردد.

یکی از چالش های موجود در استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان یک چشمه نوترون، ناپایداری بهره نوترون در شات های متوالی است به طوری که حتی در دو آزمایش با شرایط مشابه، در یک شات، بهره نوترون بالایی مشاهده می شود و در شات دیگر نوترون تولید نمی شود. یکی از ایده هایی که برای افزایش پایداری نوترون دهی و همچنین افزایش بهره نوترونی دستگاه پلاسمای کانونی ارائه شده، تزریق درصد کمی از یک گاز با عدد اتمی بالا مانند کریپتون به همراه دوتریوم است [۴].

در این پژوهش نتایج مطالعات آزمایشگاهی روی نوترون های گسیلی از یک دستگاه پلاسمای کانونی کم انرژی ارائه گردیده است. نحوه گسیل و توزیع نوترون ها با استفاده از گاز دوتریوم و تزریق درصد های مختلفی از گاز کریپتون به منظور دستیابی به بیشینه شار نوترونی مورد بررسی قرار می گیرد.

در قسمت های ذیل ابتدا شرح مختصری از دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده و سیستم های تشخیصی و چیدمان آزمایش ارائه شده است. سپس روش انجام آزمایش بیان شده و در انتها جمع بندی نتایج و تحلیل آن ها ارائه گردیده است.

روش کار

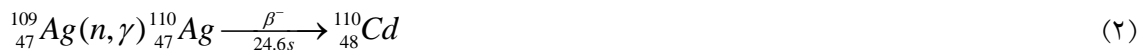
این آزمایش ها در محدوده فشار $2/7-3/6 \text{ mbar}$ گاز دوتریوم و ولتاژ تخلیه 15 kV انجام شدند و در هر شات، سیگنال مشتق جریان با استفاده از پیچ روگوفسکی به منظور مشاهده ساختار زمانی پینچ، و شمارش نوترون با استفاده از شمارنده فعال سازی نقره ثبت شده اند. سیگنال جریان تخلیه نیز با انتگرال گیری عددی از سیگنال مشتق جریان به دست آمده است. مهمترین پارامتر در بهینه سازی نوترون دهی یک دستگاه پلاسمای کانونی، تعیین فشار بهینه گاز دوتریوم است. فشار بهینه برای دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده، در ولتاژ 15 kV ، حدود $3/5 \text{ mbar}$ است. همچنین به منظور دستیابی به درصد بهینه تزریق کریپتون به گاز دوتریم، گاز کریپتون با نسبت های حجمی مختلف به محفظه تزریق شده است و فشار بهینه گاز کریپتون برای فشار $3/5 \text{ mbar}$ دوتریوم حدود $0/02$ تا $0/03$ میلی بار به دست آمده است. بنابراین در این تحقیق، گاز کریپتون در این محدوده فشار به داخل دستگاه تزریق شده است. در ادامه این بخش، دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده در این تحقیق و شمارنده های فعال سازی که برای آشکارسازی و شمارش نوترون ها بکار رفته اند، توصیف شده اند.

الف-دستگاه پلاسمای کانونی

در این آزمایش از دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه شهید بهشتی SBUPF^۱ استفاده شد. در این دستگاه از یک خازن $15\mu\text{F}$ ، 15kV به عنوان منبع ذخیره انرژی استفاده می شود که در بالاترین ولتاژ شارژ بانک خازنی، انرژی 1kJ را برای دستگاه تامین می کند. دو صفحه از جنس برنج به عنوان صفحات آند و کاتد جهت برقراری ارتباط بین بانک خازنی و الکترودها مورد استفاده قرار گرفته اند. آند این دستگاه یک استوانه از جنس مس OFHC است و کاتد نیز از ۶ عدد میله مسی که بطور متقارن حول آند قرار گرفته اند تشکیل شده است. یک عایق از جنس پیرکس بصورت پوششی در اطراف آند قرار گرفته است که هدف از قرار گیری آن، ایجاد عایق الکتریکی بین آند و صفحه کاتد به منظور فراهم کردن شرایط برای ایجاد یونیزاسیون کافی گاز قبل از فاز شکست می باشد. Mannucci و همکاران نشان دادند که استفاده از یک صفحه کاتد کوچکتر و دارای لبه چاقویی، بر روی صفحه کاتد اصلی، باعث افزایش محدوده بالایی فشار بهینه فاز شکست شده و می تواند قدرت فشرده سازی پلاسما را تا ۲ برابر افزایش دهد [۳]. به همین دلیل در این دستگاه نیز یک صفحه کاتد لبه چاقویی به منظور افزایش کارایی دستگاه در فشرده سازی پلاسما و تولید رادیوایزوتوپ استفاده شده است.

ب- شمارنده فعال سازی نقره

شمارنده مورد استفاده برای این تحقیق بر اساس فعال سازی ورقه نقره و سپس شمارش پرتو بتا حاصل از واپاشی نقره توسط آشکارساز گایگر دیواره نازک عمل می کند. نقره دارای دو ویژگی مطلوب جهت استفاده در شمارنده های فعال سازی است: سطح مقطع بالای نقره برای جذب نوترون های حرارتی و نیمه عمر مناسب رادیوایزوتوپ های نقره (^{107}Ag ، 14.6s و ^{109}Ag ، 24.6s). یک استوانه به قطر 14cm از جنس پلی اتیلن، برای کند سازی نوترون های 2.45MeV استفاده شده است. ورقه نقره با ضخامت 0.3 میلی متر اطراف گایگر پیچیده شده و درون یک حفره استوانه ای در مرکز این پلی اتیلن قرار گرفته است. انتخاب قطر پلی اتیلن بر مبنای بیشترین جذب نوترون توسط ورقه نقره و توسط کد MCNP انجام شده است. نوترون های کند شده، یک ورقه نقره طبیعی (شامل ^{107}Ag ۵۱/۸٪ و ^{109}Ag ۴۸/۲٪) را طبق واکنش های:

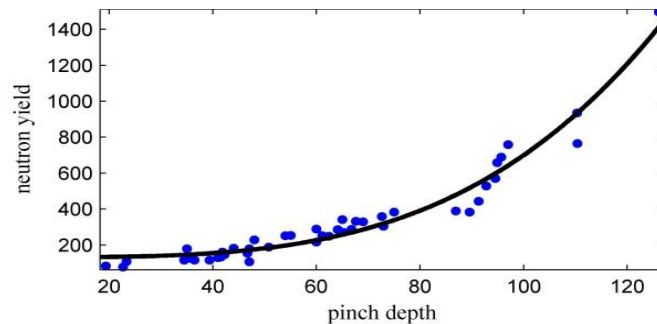


(به ترتیب با سطح مقطع های 13 ± 113 بارن و 4 ± 45 بارن) فعال می کنند. آشکارساز گایگر توسط منبع تغذیه ولتاژ بالا در ولتاژ 550V تغذیه می شود و پالس های خروجی آشکارساز توسط یک دستگاه شمارنده ثبت می شوند. ضریب کالیبراسیون شمارنده برای این شرایط هندسی توسط کد MCNP با در نظر گرفتن همه جزئیات هندسی محاسبه شده است.

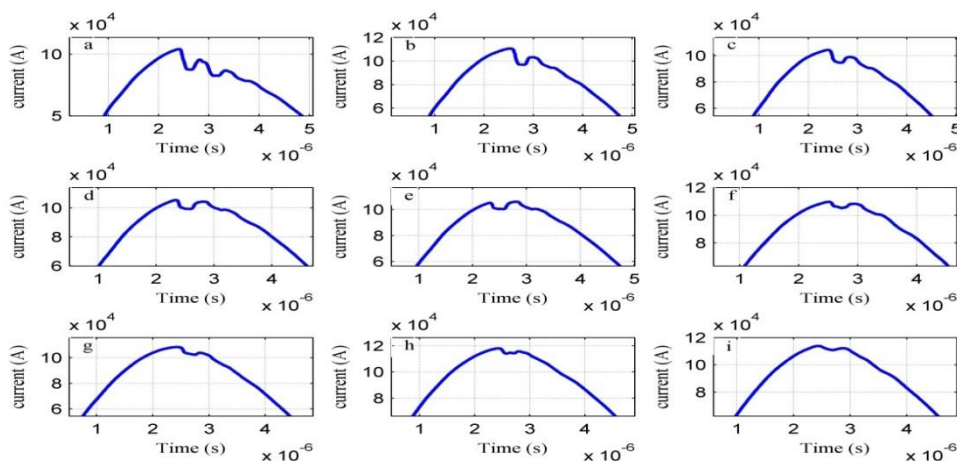


نتایج

نتایج سیگنال‌های مشتق جریان ثبت شده در این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که این سیگنال معمولاً دارای چهار قله می‌باشد که دو قله نخست آن مربوط به گسیل پرتوی ایکس سخت و دو قله دوم مربوط به تولید نوترون می‌باشد که بیانگر تولید نوترون غیر حرارتی در دو فاز جداگانه بوده و در واقع از فاز سکون آغاز و تا فروریزش ستون پلازما ادامه می‌یابد. مشاهده می‌شود که افزودن 0.3 mbar گاز کریپتون به فشارهای محدوده $3/6 \text{ mbar}$ - $2/7 \text{ mbar}$ گاز دوتریم، باعث بهبود شار نوترونی می‌شود و همچنین، در فشار $3/5 \text{ mbar}$ دوتریم، بهترین پینچ و بیشترین شار نوترونی ثبت شده است. یکی از نتایج جالب این تحقیق، مشاهده ارتباط مستقیم عمق پینچ با بهره نوترونی می‌باشد. به این ترتیب که هر چه عمق پینچ بیشتر باشد شار نوترونی بالاتری گسیل می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: شمارش نوترون بر حسب عمق پینچ حاصل از تزریق ۱٪ گاز کریپتون به دوتریم



شکل ۲: نمایش روند نزولی عمق پینچ و از بین رفتن ماکزیمم‌های دو پالس (یا چند پالس) با کاهش عمق کانونی سازی

به علاوه، ارتباط بین پارامتر عمق پینچ و بهره نوترون از رابطه تقریبی $Y_n = k \cdot d^{3.51}$ تبعیت می‌کند، که Y_n بیانگر شمارش نوترون، k ضریب ثابتی با مقدار تقریبی 5.38×10^{-5} و d عمق پینچ بر حسب کیلو آمپر بر میکرو ثانیه می‌باشد. عمق کانونی سازی در واقع سرعت کاهش جریان در لحظه تشکیل پینچ است که توسط



سیگنال مشتق جریان حاصل از پیچه روگوفسکی و یا از سیگنال انتگرال گیری شده آن اندازه گیری می شود. عمق پینچ در سیگنال جریان از طریق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$p.d = (I - I_{min}) / (t_{pinch} - t_{min}) \quad (3)$$

که I جریان پینچ، I_{min} جریان مینیمم پینچ، t_{pinch} زمان وقوع پینچ و t_{min} زمان مینیمم جریان پینچ می باشد. با توجه به اینکه در لحظه پینچ جریان تخلیه قطع می شود، عمق کانونی سازی (شیب منحنی مشتق جریان در لحظه پینچ) نشان دهنده تغییرات امیدانس پلاسما می باشد. همچنین مشاهده شده است که از بین کلیه شات هایی که منجر به تولید نوترون شده است، تقریباً ۴۵٪ از سیگنال ها در بیشینه فاز فشردگی دارای دو پالس متوالی می باشند، که در واقع این سیگنال ها انطباق بسیار خوبی با شمارش های حاصل از شمارنده فعال سازی نقره دارد که در آن شار نوترونی بالایی را نسبت به سیگنال های تک پالس نشان می دهد. شکل ۲ به خوبی ارتباط بهره نوترونی با عمق پینچ حاصل از سیگنال جریان را نشان می دهد. در این شکل، منحنی های a تا i به ترتیب، همزمان با کاهش عمق پینچ، شمارش نوترونی حاصل از شمارنده که متناظر با سیگنال مربوطه می باشد نیز کاهش می یابد. اطلاعات مربوط به این شکل، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به عمق پینچ و شار نوترون متناسب با هر سیگنال شکل ۲

نام منحنی	جریان پینچ (آمپر)	زمان پینچ (ثانیه)	عمق پینچ (کیلوآمپر / میکروثانیه)	نوترون شمارش شده
a	$1/05 \times 10^5$	$2/21 \times 10^{-6}$	۱۱۰/۳۷	۷۶۵
b	$1/106 \times 10^5$	$2/43 \times 10^{-6}$	۹۴/۵	۵۷۱
c	$1/054 \times 10^5$	$2/29 \times 10^{-6}$	۹۲/۷۷	۵۲۹
d	$1/058 \times 10^5$	$2/2 \times 10^{-6}$	۸۶/۹۲	۳۹۰
e	$1/054 \times 10^5$	$2/22 \times 10^{-6}$	۶۸/۹۶	۳۲۹
f	$1/117 \times 10^5$	$2/44 \times 10^{-6}$	۵۴	۲۵۲
g	$1/085 \times 10^5$	$2/53 \times 10^{-6}$	۴۴	۱۸۳
h	$1/164 \times 10^5$	$2/54 \times 10^{-6}$	۴۲/۲۲	۱۴۷
i	$1/155 \times 10^5$	$2/36 \times 10^{-6}$	۱۲/۷۲	۰

همچنین با مشاهده سیگنال های جریان می توان به این نتیجه رسید که در شارهای نوترونی بالاتر، (تقریباً از ۳۵۰ شمارش به بالا)، سیگنال در زمان $\frac{T}{4}$ (وقوع پینچ) دارای ساختار دو پینچ می باشد، که در شکل a-۲ به خوبی مشخص است. همچنین بر اساس مشاهدات تجربی، می توان ادعا کرد چنانچه عمق پینچ از مقدار تقریبی ۲۵ کیلوآمپر بر میکروثانیه بیشتر باشد، تولید نوترون در آن شات، قطعی می باشد.

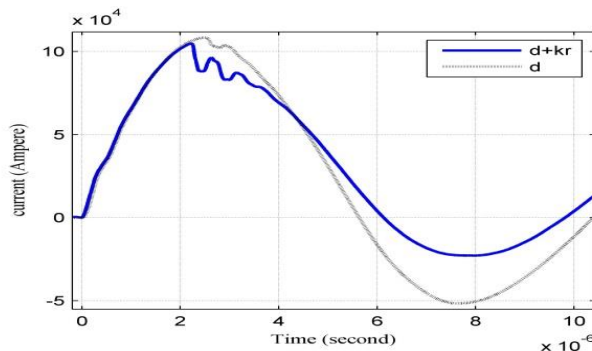
بحث و نتیجه گیری

استفاده از گاز دوتریم و انجام واکنش گداخت در پلاسما کانونی، این دستگاه را در زمره منابع غنی نوترونی قرار می دهد و چنانچه حدود ۱٪ از گازهای سنگین نظیر کریپتون به دوتریم افزوده شود، بهره نوترونی و به طور کلی عملکرد دستگاه به طور چشمگیری بهبود خواهد یافت. با مشاهده سیگنال های جریان اندازه گیری



شده و نیز بررسی همزمان شمارش های نوترونی با سیگنال جریان، و مقایسه آن ها با یکدیگر می توان نتایج زیر را استخراج کرد:

(۱) با تزریق کریپتون به گاز دوتریم نه تنها پینچ بهتری ایجاد می شود، بلکه در صورت انجام آزمایش در فشار بهینه احتمال ایجاد ماکزیم های دو یا چند پالسی نیز وجود دارد. شکل ۳ به خوبی این موضوع را نشان می دهد.



شکل ۳: بهبود وضعیت پینچ و ایجاد ماکزیم دو پالسی در اثر تزریق گاز کریپتون به دوتریم

(۱) با مقایسه دقیق عمق پینچ های محاسبه شده و شار نوترونی متناظر با آن ها، ارتباط مستقیم عمق پینچ و شار نوترونی، چنان که در شکل ۱ نشان داده شده است، مشاهده می شود و این ارتباط از فرمول تقریبی $Y_n \approx k \cdot d^{3.51}$ پیروی می کند.

(۲) چنانچه سیگنال های جریان دارای ماکزیم های دو پالسی را همزمان با شار نوترونی مربوطه در نظر بگیریم، به خوبی می توان ارتباط مستقیم بهره نوترونی با ایجاد بیشینه های دو پالسی در سیگنال جریان را مشاهده کرد.

(۳) مقادیر عددی عمق پینچ و شمارش نوترونی نشان می دهند که چنانچه عمق پینچ از مقدار ۲۵ کیلوآمپر بر میکروثانیه فراتر برود، گسیل نوترون در آن آزمایش حتمی می باشد.

مرجع ها

- [۱] J.W.Mather, "Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus"; *Physics of Fluids*, ۸, (۱۹۶۴) ۳۶۶.
- [۲] N. V. Filippov, T.I. Filippov, and V.P. Vinogradov, "Dense High-Temperature Plasma in a Noncylindrical Ψ - Pinch Compression"; *Nuclear Fusion. Supplement*, ۲, (۱۹۶۲) ۵۷۷.
- [۳] S., Mannucci et al., "Effect of a cathodic knife edge on the PFMA-۱ pinch performance", *Plasma Sources Sci. T.*, vol. ۱۸, no. ۲, pp. ۱-۷, ۲۰۰۹
- [۴] R.Verma, "Order Of Magnitude Enhancement With Deuterium-Krypton Admixture Operation in Miniature Plasma Focus Device"; *Appl Phys Lett* ۹۳, ۱۰۱۵۰۱ (۲۰۰۸)