

اندازه‌گیری و بررسی توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 با آرایه فنجان فارادی

علی عبادی^۱ - فریدون عباسی دوانی^{۱*} - غلام رضا اطاعتی^۲ - بابک شیرانی^۱

^۱ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

^۲ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این تحقیق، توزیع زمانی و توزیع زاویه‌ای باریکه‌های یون نیتروژن گسیل شده از دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 (با انرژی تخلیه ۳/۳ kJ) با استفاده از آرایه‌ای متشکل از ۵ عدد فنجان فارادی در زوایای 0° ، 25° و 50° نسبت به محور مرکزی دستگاه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق، وجود ناهمسانگردی و عدم تقارن در توزیع زاویه‌ای یون‌ها را نشان می‌دهد. ضریب ناهمسانگردی در زاویه 50° ، در فشار گاز ۰/۸ mbar و ولتاژ اعمالی ۲۴ kV، حدود ۱۱/۳ بدست آمد. همچنین شار یون در شرایط مذکور در زاویه 25° برابر ۴/۹ و در زاویه 25° - برابر با ۲/۴ بدست آمد که این اختلاف شار یون نشان دهنده عدم تقارن در توزیع زاویه‌ای یون‌های گسیلی است. با اندازه‌گیری همزمان جریان تخلیه دستگاه مشاهده شد که لحظه شروع سیگنال یون فنجان‌های فارادی، همیشه با یک تأخیر در حدود ۱۵۰-۱۰۰ ns بعد از لحظه شروع تنگش رخ می‌دهد.

کلمات کلیدی: دستگاه پلاسمای کانونی، توزیع زاویه‌ای باریکه‌های یونی، فنجان فارادی، یون نیتروژن، جریان تخلیه

مقدمه:

دستگاه پلاسمای کانونی بدلیل ویژگی‌های خاص خود به‌عنوان یکی از منابع قوی تولید نوترون، الکترون نسبیته، یون‌های پر انرژی و اشعه ایکس (نرم و سخت)، چندین دهه است که بسیار مورد بررسی قرار گرفته است. در گذشته مطالعات گوناگونی بر روی مشخصات اصلی گسیل باریکه یون در دستگاه پلاسمای کانونی انجام شده است [۱-۴]. اگرچه مدل‌های تئوری و محاسباتی متعددی در زمینه مکانیزم تولید و شتابدهی یون برای تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی ارائه شده است [۵-۷]، اما یک توضیح کامل مبنی بر مکانیزم گسیل یون در بازه‌ی مختلف انرژی بانک پلاسمای کانونی هنوز در دسترس نیست. مدل‌های مختلف، به‌عنوان مثال مدل کلی هدف-باریکه با شتاب میدان متقاطع، حرکت مدل پلاسمای حرارتی و مدل یون همگرا، تا حدودی توضیح برای مکانیزم تولید دارند، اما مدل‌های فردی است که مناسب‌ترین راه حل برای یک محدوده انرژی پلاسمای کانونی خاص است. گزارش شده است که دستگاه‌های پلاسمای کانونی با بازه‌ی انرژی از چندین kJ تا چند MJ قادرند تا یون‌های با انرژی حدود چند صد keV تا ده‌ها MeV تولید کنند [۸]. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای از پرتوهای یون ساطع شده از دستگاه‌های پلاسمای کانونی مختلف انرژی کوچک (۵-۵۰ کیلوژول) نشان داد که شدت پرتوهای یون به هندسه الکتروود، انرژی بانک، نوع گاز

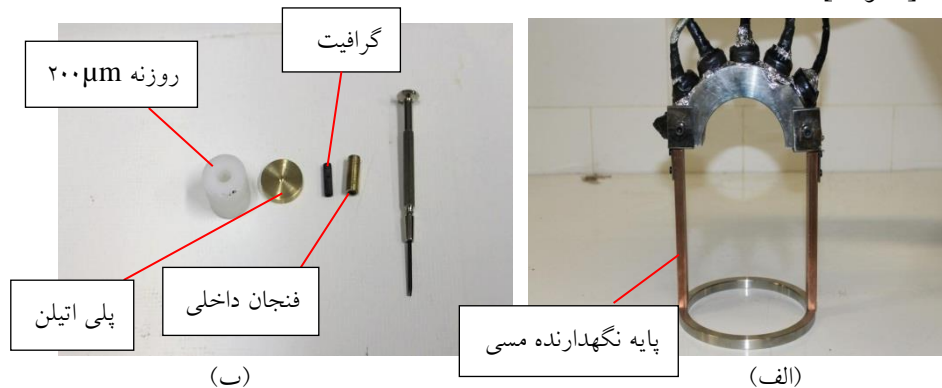
19 th Iranian's Nuclear Conference

کاری و فشار آن بستگی دارد [۹]. Bostick و همکارانش [۲]، پهنای (FWHM) پالس‌های یونی ثبت شده به وسیله‌ی فنجان فارادی را حدود ۶۰ - ۴۰ ns گزارش دادند. همچنین بررسی توزیع ناهمسانگردی یون‌های پرنرژی در دستگاه پلاسمای کانونی توسط چندین محقق صورت گرفته است. عدم تقارن و توزیع زاویه‌ای یون‌های سریع توسط S.R.Mohanty و همکارانش [۴]، بررسی شد. آن‌ها نشان دادند که عدم تقارن می‌تواند ناشی از این باشد که یون‌ها از چشمه‌های میکرونی مختلف که در ستون پلاسمای چگال بوجود می‌آیند، تولید می‌شوند. این میکرو چشمه‌ها ضرورتاً نسبت به محور آند متقارن نیستند و وابسته به پارامترهای مکانی مختلفی هستند.

فنجان فارادی را می‌توان یکی از مهم‌ترین و پر کاربردترین ابزارهای تشخیصی باریکه‌های یونی که توانایی تعیین طیف انرژی یون‌ها به روش زمان پرواز را نیز دارد به شمار آورد. با طراحی مناسب آرایه‌ای از فنجان فارادی می‌توان توزیع زاویه‌ای یون‌های گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی را نیز اندازه‌گیری کرد. در این تحقیق، توزیع زاویه‌ای باریکه‌های یونی گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 در فشار گاز و زوایای مختلف اندازه‌گیری و بررسی شد.

روش کار :

در این پژوهش، آزمایش‌ها بر روی دستگاه پلاسمای کانونی کم انرژی نوع مدر (SBUPF1) با بیشینه انرژی اعمالی kJ ۳/۲ انجام شد [۱۲]. انرژی این دستگاه به وسیله‌ی بانک خازنی $10 \mu F$ با بیشینه ولتاژ ۲۵ kV تأمین می‌شود. برای اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای باریکه‌های یونی گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی از یک آرایه‌ای متشکل از ۵ عدد فنجان فارادی استفاده شد. فنجان‌های فارادی معمولاً شامل یک روزنه‌ی کوچک و یک جمع‌آوری‌کننده عمیق هستند. برای کاهش میزان پس پراکندگی یون‌های برخورد کننده به سطح جمع‌آوری‌کننده و کاهش میزان گسیل الکترون‌های ثانویه، معمولاً جمع‌آوری‌کننده با یک ولتاژ معکوس، بایاس می‌شود. ساختار آرایه فنجان فارادی و اجزای اصلی آن در شکل شماره (۱) نشان داده شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که میزان تولید الکترون‌های ثانویه در گرافیت به مراتب کمتر از برنج است. بنابراین لایه‌ای از جنس گرافیت برای کاهش تولید الکترون‌های ثانویه، درون فنجان داخلی قرار داده شده است [۱۰ و ۱۱].



شکل شماره (۱). (الف) آرایه فنجان فارادی بر روی پایه نگهدارنده (ب) اجزای اصلی فنجان فارادی.

فنجان فارادی دارای یک درپوش با روزنه‌ای به قطر $200 \mu\text{m}$ بوده و به وسیله‌ی پلی اتیلن عایق شده است. بر اساس تئوری انتقال توان، مقدار بیشینه‌ی توان زمانی قابل انتقال است که مقاومت دو مدار متصل به هم، یکسان باشد. برای رعایت شرط انتقال بیشینه‌ی توان، ابعاد فنجان فارادی به گونه‌ای طراحی شده است که جهت ایجاد تطبیق امپدانس با کابل انتقال اطلاعاتی RG58، یک مقاومت ظاهری 51Ω ایجاد کند.

به منظور بررسی توزیع زمانی و اندازه‌گیری اشعه ایکس سخت، یک آشکارساز سوسوزن پلاستیکی سریع NE 102A در کنار دستگاه پلاسمای کانونی به صورت افقی (در زاویه 90° درجه نسبت به محور دستگاه) قرار داده شد. جریان تخلیه دستگاه نیز توسط یک پروب مغناطیسی اندازه‌گیری شده است. همچنین برای ثبت سیگنال‌های الکتریکی حاصل از پروب مغناطیسی و آشکارسازهای فنجان فارادی از ۲ عدد دستگاه اسیلوسکوپ ۴ کانال با فرکانس نمونه برداری Gs/s ۱ استفاده شد.

در این تحقیق، مشخصات باریکه‌های یون نیتروژن گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی بوسیله‌ی آرایه‌ای به شکل یک نیم دایره به شعاع ۷ سانتی‌متر (به منظور قرار گرفتن آرایه فنجان فارادی در فاصله ۷ سانتی‌متری نسبت به رأس آند) و متشکل از ۵ عدد فنجان فارادی در زوایای 0° ، $25^\circ \pm$ و $50^\circ \pm$ نسبت به محور آند دستگاه پلاسمای کانونی بدست آمد. نحوه قرار گرفتن آرایه درون دستگاه در شکل شماره (۲) نشان داده شده است. فنجان‌های فارادی با ولتاژ 200 V - بایاس شدند. برای کاهش نویز و امواج الکترومغناطیسی، اتصال‌ها و کابل‌ها به وسیله‌ی ورقه‌های آلومینیومی متصل به زمین، محافظت شدند. یکی از مهمترین عوامل در ایجاد پینچ در دستگاه پلاسمای کانونی ایجاد خلاء مناسب در محفظه‌ی دستگاه است. در این آزمایش‌ها ایجاد خلاء توسط یک پمپ روتاری و تا فشار 10^{-3} mbar قبل از هر آزمایش انجام شد.



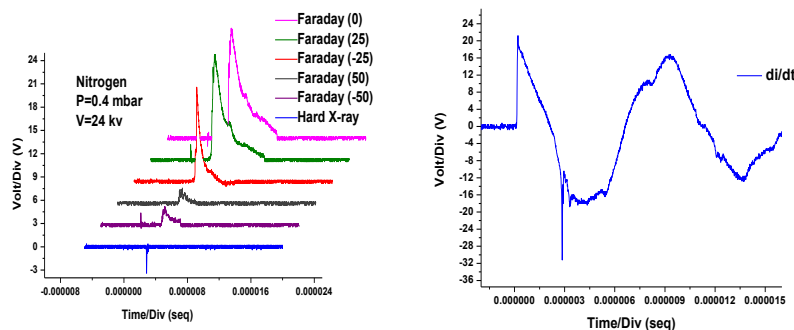
شکل شماره (۲). آرایه فنجان فارادی در محفظه اصلی دستگاه پلاسمای کانونی

نتایج و تحلیل داده‌ها:

19 th Iranian's Nuclear Conference

آزمایش‌ها بر روی گاز کاری نیتروژن، ولتاژ اعمالی ۲۴ kV، در بازه‌ی فشار گاز ۱/۲-۰/۲ mbar با تغییرات فشار ۰/۲ mbar و با ثابت نگه داشتن سایر شرایط انجام شد. نمونه‌ای از سیگنال مربوط به آشکارساز سوسوزن، پروب مغناطیسی و آرایه فنجان فارادی در فشار گاز ۰/۴ mbar در شکل شماره (۳) نشان داده شده است. در فشارهای ۱/۵ mbar و بیشتر از آن (دور از فشار بهینه)، هیچ اثری از تنگش پلازما در سیگنال مشتق جریان مشاهده نشد. از این سیگنال‌ها می‌توان نتیجه گرفت که گسیل اشعه ایکس سخت همیشه همزمان با لحظه شروع تنگش که در سیگنال مشتق جریان پروب مغناطیسی قابل اندازه‌گیری است، رخ می‌دهد اما همیشه همزمان با گسیل یون نیست. با این حال، این نتیجه بدان معنا نیست که گسیل اشعه ایکس سخت و یون به‌طور کامل مستقل از هم هستند، بدلیل آنکه ارتفاع اشعه ایکس سخت متناسب با شدت باریکه‌های یونی ثبت شده است. تقریباً در تمام آزمایش‌ها سیگنال یونی با یک تاخیر ۱۵۰-۱۰۰ ns نسبت به لحظه شروع تنگش که در سیگنال مشتق جریان پروب مغناطیسی قابل اندازه‌گیری است، شروع می‌شود. تاخیر سیگنال یونی نسبت به لحظه شروع پینچ نشان دهنده گسیل یون‌ها در انتهای فاز فشردگی پلازما و پس از گسترش ناپایداری‌ها و فروپاشی پلازما می‌باشد.

مساحت زیر منحنی سیگنال فارادی، در شرایط ثابت مداری برای شات‌های مختلف، متناسب با تعداد یون‌های نیتروژن جذب شده توسط فنجان فارادی است. به منظور مطالعه توزیع زاویه‌ای و ناهمسانگردی یون‌های گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی، نیاز به آن است تا فنجان‌های فارادی بصورت نسبی نرمال شوند. بنابراین هر یک از فنجان‌های فارادی بصورت مجزا در زاویه ۰° نسبت به محور آند قرار داده شد و با ثابت نگه داشتن سایر شرایط ۵ تخلیه صورت گرفت. تفاوت بین سطح زیر پیک سیگنال‌های فنجان‌ها در شرایط یکسان ناشی از اندک تفاوت بدیهی در ساختار آن‌هاست که در هنگام فرآیند ساخت بوجود آمده است. یک ضریب تصحیح برای هر یک از فنجان‌ها بدست آمد و در نتیجه نسبت به دیگر فنجان‌ها کالیبره شد.



(ب)

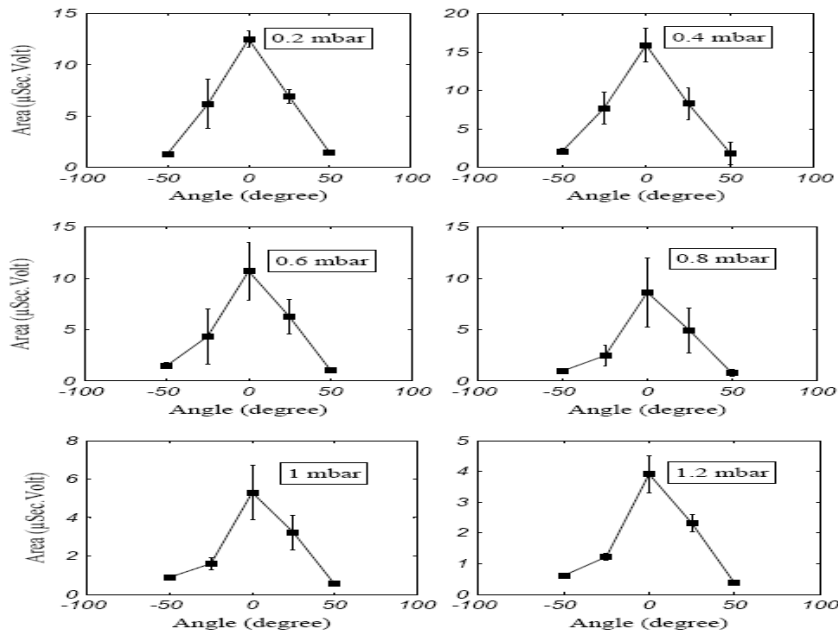
(الف)

شکل شماره (۳). (الف) سیگنال پروب مغناطیسی (ب) سیگنال‌های آرایه فنجان فارادی و HXR

برای بررسی توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن، مساحت زیر منحنی سیگنال‌های یونی ثبت شده اندازه‌گیری شدند و به صورت نمودار ترسیم شدند. این نمودارها در شکل شماره (۴) نشان داده شده است. توزیع زاویه‌ای یون‌های سریع، ویژگی‌هایی مانند ناهمسانگردی شدید، عدم تقارن نسبت به محور دستگاه (زاویه ۰°) و افت مشخص در زاویه خاص

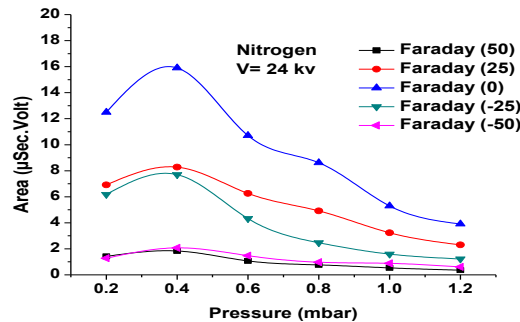
19 th Iranian's Nuclear Conference

را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش و یا کاهش فشار گاز اعمالی نسبت به فشار بهینه، شار یون‌های ثبت شده بوسیله هر فنجان فارادی به سرعت کاهش می‌یابد. این رفتار احتمالاً ناشی از تغییرات ناگهانی در اندوکتانس الکتریکی مسیر جریان تخلیه در دستگاه پلاسمای کانونی است که در طول فاز فشردگی پلاسمای وجود می‌آید. افزایش در میدان الکتریکی القایی تولید شده بوسیله ناپایداری $m=0$ یون‌ها و الکترون‌ها را تا انرژی بسیار بالایی شتاب می‌دهد. اما در فشارهای دور از فشار بهینه، قدرت عملکرد پلاسمای کانونی کاهش می‌یابد که منجر به تضعیف عملکرد مکانیسم شتابدهی یون می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار یون‌های گسیلی در زاویه 0° است. این بدان معناست که میدان مغناطیسی پلاسمای برای گسیل و شتابدهی یون در مجاورت محور مرکزی دستگاه رخ می‌دهد.



شکل شماره (۴). توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن در ولتاژ تخلیه ۲۴ kV و فشارهای ۰/۲-۱/۲ mbar

سطح زیر منحنی سیگنال‌های فنجان فارادی در شکل شماره (۵) نشان داده شده است.



شکل شماره (۵). توزیع شدت یون‌های نیتروژن بر حسب فشار در زوایای مختلف برای ولتاژ ۲۴ kV

همانگونه که در شکل شماره (۵) مشاهده می‌شود، بیشترین شار یون در فشار گاز 0.4 mbar گسیل شده است و با دور شدن از فشار بهینه، مقدار آن کاهش می‌یابد. عبور باریکه یون از گاز بین محل وقوع تنگش پلاسما و فنجان فارادی نقش مهمی در خصوصیات باریکه یون ایفا می‌کند. برخورد باریکه‌های یون با مولکول‌های گاز داخل محفظه دستگاه، موجب تبادل انرژی جنبشی بین یون‌ها و مولکول‌های گاز شده و در نتیجه بر اثر پدیده‌ی چند پراکندگی، یون‌ها قسمتی از انرژی جنبشی خود را از دست داده و کند می‌شوند.

بحث و نتیجه گیری:

در این تحقیق، اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن گسیلی از دستگاه پلاسما یون SBUPF1 بوسیله‌ی آرایه‌ای از ۵ عدد فنجان فارادی در زوایای 0° ، $\pm 25^\circ$ و $\pm 50^\circ$ نسبت به محور آند دستگاه، در بازه‌ی فشار گاز 0.2 mbar تا 1.2 mbar با تغییرات فشار 0.2 mbar و ولتاژ اعمالی 24 kV انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که شار یون‌های گسیلی از دستگاه پلاسما یون به شدت وابسته به موقعیت زاویه‌ای و فشار گاز کاری است. بیشینه شار یون‌ها در زاویه 0° و فشار 0.4 mbar بدست آمد. همچنین با افزایش و یا کاهش فشار گاز اعمالی نسبت به فشار بهینه (0.4 mbar)، شار یون‌ها به شدت کاهش یافت. توزیع زاویه‌ای یون‌ها یک ناهمسانگردی شدید را نشان می‌دهد. ضریب ناهمسانگردی در زاویه 50° در فشار گاز 0.8 mbar و ولتاژ اعمالی 24 kV حدود $11/3$ بدست آمد.

گسترش کاربردهای باریکه یونی دستگاه پلاسما یون نیازمند بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر بر روی مشخصه‌های یونی دستگاه پلاسما یون است. مسلماً نتایج تجربی بدست آمده در این تحقیق نیازمند تحلیل‌های کامل‌تر بر مبنای مدل‌های تئوری ارائه شده برای پلاسما یون است.

مراجع:

1. Sadowski M, Zebrowski J, Rydygier and Kucinski J 1988 Plasma Phys. Control. Fusion 30
2. Bostick W H, Kilic H, Nardi V and Powell C W 1993 Nucl. Fusion 33 413
3. Mozer A, Sadowski M, Herold H and Schmidt H 1982 J. Appl. Phys. 53 2959
4. Mohanty S R, Bhuyan H, Neog N, Rout R K and Hotta E 2005 Japan. J. Appl. Phys. 44 5199
5. Gary S P 1974 Phys. Fluids 17 2135
6. Mather J W 1971 Methods of Experimental Physics vol 9B ed H Griem and R H Lovberg (New York: Academic) 187
7. Lee J H, Shomo L P, Williams M D and Hermans-Dorfer H 1971 Phys. Fluids 14 2217
8. H. Bhuyan et al., Indian J. Pure Appl. Phys. 39, 698 (2001).
9. M. Sadowski et al., Nukleonika 45, 179 (2000).
10. G. R. Etaati et al., Journal of Fusion Energy, vol 30, No. 22, (2010).
۱۱. اطاعتی، غلامرضا؛ "بررسی گسیل پرتوهای ایکس نرم، سخت و یون در دستگاه پلاسما یون نوع مدر"، رساله دکترای مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هسته‌ای و فیزیک، ۱۳۸۹.
۱۲. شیرانی، بابک؛ "بهینه سازی نوترون دهی دستگاه پلاسما یون SBUMTPF1"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی تهران، شهریور ماه ۱۳۸۷.