



## تعیین توزیع انرژی و زاویه‌ای یون‌های نیتروژن دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF1 با استفاده از لایه‌نشانی آلومینیم بر روی آشکارسازهای رد هسته‌ای CR-39

بهجت قاسمی\*، حامد روحی، فریدون عباسی دوانی، زهرا شهبازی‌راد  
گروه کاربرد پرتوها، دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

**چکیده:** در این پژوهش توزیع انرژی و توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF1 با استفاده از آشکارساز رد هسته‌ای CR-39 تعیین و نتایج با نتایج حاصل از آشکارساز رد هسته‌ای پلی‌کربنات مقایسه شد. برای این منظور، با بهره‌گیری از نرم‌افزار SRIM بُرد یون‌های نیتروژن در آلومینیم محاسبه و با استفاده از روش لایه‌نشانی بخار فیزیکی (PVD) ضخامت‌های مختلفی از صافی آلومینیمی بر روی آشکارسازها نشانده شد. با استفاده از فیلم‌های لایه‌نشانی شده، ناهم‌سانگردی توزیع یون‌های نیتروژن مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین تغییرات چگالی یون‌ها در بازه‌های مختلف انرژی بررسی شد. بررسی منحنی توزیع زاویه‌ای گسیل یون نیتروژن در این دستگاه، قله‌ای را در زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به محور آند نشان داد که با نتایج آزمایش انجام شده با استفاده از آشکارساز پلی‌کربنات برای این دستگاه کاملاً تطابق داشت.

**کلیدواژه‌ها:** پلاسمای کانونی، آشکارساز CR-39، توزیع انرژی و زاویه‌ای، SRIM، PVD

## Energy and Angular Distribution Determination of Energetic Nitrogen Ions of Plasma Focus Device SBUMTPF1 by Aluminum Filters Coated on CR-39 Nuclear Track Detector

B. Ghasemi\*, H. Rouhi, F. Abbasi Davani, Z. Shahbazi Rad

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

**Abstract:** In this study, the energy and angular distributions of nitrogen ions produced in a plasma focus device, SBUMTPF1, were determined using CR-39 nuclear track detectors and the results were compared with those of the polycarbonate track detectors. For this purpose, by the use of the SRIM software, the ranges of nitrogen ions were calculated in aluminum and subsequently by applying the PVD method, layers of aluminum filters of different thicknesses were deposited on the detectors. By the use of the coated films, the anisotropic distribution of nitrogen ions was investigated by the detectors. The variation of density of the ions was also investigated in different ranges of energy. The study of the SBUMTPF1 angular distribution profiles shows a peak value at an angle of 30° with respect to the anode axis. The results found to be consistent with those obtained for the polycarbonate track detectors.

**Keywords:** Plasma Focus, CR-39 Nuclear Track Detector, Energy and Angular Distribution, PVD, SRIM



## ۱. مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان یک دستگاه مولد پرتو قادر به تولید یون، نوترون، امواج الکترومغناطیسی و الکترون است. آشکارسازهای رد هسته‌ای با توجه به این که به امواج الکترومغناطیسی و الکترون حساس نیستند، به عنوان ابزاری قوی برای بررسی پدیده‌ی هم‌جوشی در دستگاه پلاسمای کانونی استفاده می‌شوند. به دلیل کاربردهای فن‌شناختی مختلف یون‌های تولیدی دستگاه پلاسمای کانونی، تعیین توزیع زاویه‌ای و انرژی یون‌های گسیلیده در هر دستگاه دارای اهمیت است. از جمله‌ی این کاربردها، می‌توان به اصلاح سطح آلومینیم به روش پرتودهی با یون کربن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی [۱] و تولید رادیوایزوتوپ  $^{13}\text{N}$  از طریق واکنش (d, n) بر روی  $^{12}\text{C}$  با دوترون‌های با حداقل انرژی ۳۰۰ keV اشاره کرد [۲]. در همی این موارد بسته به مقدار شار مورد نیاز، هدف‌ها در زاویه‌های مختلف از محور آند قرار داده می‌شوند. آشکارسازهای رد هسته‌ای در اثر برخورد تعداد زیاد یون با انرژی‌های مختلف اشباع می‌شوند؛ برای جلوگیری از این امر، با استفاده از صافی آلومینیمی در جلوی آشکارساز می‌توان یون‌های انرژی-پایین را حذف کرد [۳، ۴، ۵، ۶، ۷].

کلی و همکاران [۸، ۹] با استفاده از فنجان فارادی و طیف‌سنج تاسون مجهز به آشکارساز رد هسته‌ای، طیف یون‌های نیتروژن در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر (۳۰ kV)، را در فشار عملیاتی ۰/۴ torr به دست آوردند. به طور مشابه تاکائو و همکاران [۱۰] با استفاده از طیف‌سنج تاسون و آشکارساز رد هسته‌ای، طیف انرژی یون‌های نیتروژن در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر ۱۹/۵ kJ را اندازه‌گیری کردند.

زیدلوسکی [۱۱] توزیع زاویه‌ای دوترون‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی ۱۰۰۰ kJ لهستان را با استفاده از فیلم‌های CR-۳۹ و صافی‌های آلومینیمی مختلف اندازه‌گیری و مشخص کرد که بیش‌ترین تعداد یون‌ها در راستای محور آند بوده و مقدار آن در حد اشباع است. به طور مشابه سادوسکی و همکاران [۱۲] توزیع زاویه‌ای دوترون‌ها و پروتون‌های سریع اولیه را با استفاده از آشکارساز رد هسته‌ای به دست آوردند. نتایج حاصل از کار آن‌ها نشان داد که هر دو توزیع زاویه‌ای در حدود زاویه‌ی ۲۰ درجه با محور Zها، دارای قله هستند.

معمولاً بیش‌تر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی دوترون‌ها، با هدف اندازه‌گیری‌ها و پژوهش‌های نوترونی انجام می‌شود. پژوهش‌های اندکی بر روی گسیل باریکه‌ی یون از دستگاه پلاسمای کانونی با استفاده از گازهای دیگر مانند نیتروژن، آرگون و هلیوم انجام شده است. در این پژوهش توزیع انرژی و زاویه‌ای یون‌های نیتروژن تولیدی در دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF۱ با استفاده از ضخامت‌های مختلف صافی آلومینیمی نشانده شده بر روی آشکارسازهای رد هسته‌ای CR-۳۹ مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. چیدمان آزمایش

مشابه آزمایش‌های انجام شده در مرجع [۱۳]، در این پژوهش نیز از دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر SBUMTPF۱ (۱۰/۴  $\mu\text{F}$ ، ۲۵ kV، ۳/۲ kJ) استفاده شد. نتایج مرجع [۱۳] نشان داد که با توجه به محدودیت‌های موجود در شمارش چگالی ردها، محدوده‌ی ضخامت مناسب صافی آلومینیمی برای تعیین انرژی یون‌های نیتروژن تولیدی در دستگاه SBUMTPF۱ در گستره‌ی ۱۲۰۰ تا ۲۶۳۰ نانومتر است. در نتیجه در این آزمایش با استفاده از روش لایه‌نشانی بخار فیزیکی<sup>(۱)</sup> (PVD)، ضخامت‌های ۱۲۴۰، ۱۳۳۰، ۱۵۰۰، ۱۶۶۰، ۱۸۱۰، ۱۹۵۰، ۲۱۰۰، ۲۲۷۰، ۲۴۵۰ و ۲۶۲۰ نانومتر از فلز آلومینیم بر روی فیلم‌های CR-۳۹ نشانده شد. برای مقایسه ردهای به دست آمده با مقدار اشباع آن‌ها و مقدار زمینه و هم‌چنین مشخص کردن ابتدا و انتهای منحنی، ضخامت‌های ۱۰۵۰ (اشباع) و ۲۷۹۰ نانومتر (زمینه) آلومینیم نیز بر روی آشکارسازهای CR-۳۹ نشانده شد. در این آزمایش‌ها محفظه‌ی دستگاه تا فشار  $8 \times 10^{-3}$  mbar خلأ شد. گاز نیتروژن با فشار ۰/۵ mbar به دستگاه تزریق و ولتاژ کاری دستگاه ۲۳±۰/۵ kV انتخاب شد. برای به دست آوردن توزیع انرژی یون‌های نیتروژن، از یک روزنه‌ی سوزنی ۲۰۰ میکرون در مقابل فیلم‌های آشکارساز استفاده شد. فاصله‌ی روزنه‌ی سوزنی تا سر آند و تا محل قرارگیری آشکارسازها، به ترتیب، برابر ۱۶ و ۵/۵ cm بود. بدین ترتیب آشکارسازها در فاصله‌ی ۲۱/۵ cm از سر آند و تحت زاویه‌ی صفر درجه نسبت به محور آند قرار گرفته بودند.

**جدول ۱.** انرژی آستانه‌ی یون نیتروژن برای عبور از ضخامت‌های مختلف

صافی آلومینیومی			
انرژی (keV)	ضخامت (nm)	انرژی (keV)	ضخامت (nm)
۱۸۰۰	۱۹۵۰	۷۰۰	۱۰۵۰
۲۰۰۰	۲۱۰۰	۹۰۰	۱۲۴۰
۲۲۵۰	۲۲۷۰	۱۰۰۰	۱۳۳۰
۲۵۰۰	۲۴۵۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰
۲۷۵۰	۲۶۲۰	۱۴۰۰	۱۶۶۰
۳۰۰۰	۲۷۹۰	۱۶۰۰	۱۸۱۰

چگالی ردهای ثبت شده روی هر فیلم، مربوط به یون‌های نیتروژن با انرژی آستانه و انرژی‌های بالاتر از آن است. با به دست آوردن اختلاف چگالی ردهای ثبت شده در گستره‌های مختلف انرژی، منحنی توزیع انرژی یون‌های نیتروژن به دست آمد. هم چنین چگالی رد یون‌ها با صافی آلومینیومی به ضخامت ۱۰۵۰ نانومتر (متناظر با آستانه‌ی ثبت انرژی ۷۰۰ keV) به حدی زیاد بود که قابل تفکیک از یک‌دیگر نبوده و در گستره‌ی شمارش نرم‌افزار نبودند (حالت اشباع). برای این فیلم‌ها به طور نمونه قسمت‌هایی از اطراف مرکز پرتودیده مورد شمارش قرار گرفت که شمارش آن‌ها بیش تر از  $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  بود. لذا برای صافی آلومینیومی با این ضخامت و ضخامت‌های کم‌تر، مقدار اشباع در نظر گرفته شد و برای رسم نمودار و امکان مقایسه‌ی چگالی ردها در بازه‌های مختلف انرژی، در انرژی‌های پایین‌تر از ۹۰۰ keV (متناظر با صافی ۱۲۴۰ nm) چگالی  $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  در نظر گرفته شد.

برای شمارش زمینه، ۳ فیلم CR-۳۹ پرتودهی نشده مورد سونش قرار گرفت؛ میانگین چگالی سطحی ردهای پرتوهای زمینه،  $(1 \pm 0.1) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  به دست آمد؛ تعداد ردهای شمارش شده بر روی فیلم CR-۳۹ به ضخامت ۲۷۹۰ نانومتر نیز در حد زمینه بود.

نتایج شکل ۲ نشان داد که با افزایش ضخامت صافی آلومینیومی، چگالی ردهای ثبت شده بر روی فیلم‌های آشکارساز کاهش می‌یابد. در جدول ۲ چگالی ردهای ثبت شده بر روی CR-۳۹ به ازای ضخامت‌های مختلف صافی آلومینیومی درج شده است. در این جدول شمارش زمینه از شمارش هر یک از فیلم‌ها کم شده است.

بعد از پرتودهی و سونش فیلم‌ها، منحنی توزیع انرژی یون‌های نیتروژن با استفاده از چگالی ردهای ثبت شده بر روی فیلم‌ها به دست آمد (شکل ۳).

برای تعیین توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن از فیلم‌های CR-۳۹ با فیلتر آلومینیومی به ضخامت ۱۲۰۰ نانومتر استفاده و به ازای هر آشکارساز یک روزنه‌ی سوزنی ۵۰۰ میکرون در مقابل فیلم‌های آشکارساز قرار داده شد. فاصله‌ی روزنه‌ی سوزنی تا سر آند ۸ cm و فاصله‌ی آن تا محل قرارگیری فیلم‌های آشکارساز، ۲ cm بود. فیلم‌های آشکارساز در زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور آند، در داخل محفظه قرار گرفته و پرتودهی شدند. شکل ۱ آرایش استفاده شده در این پژوهش برای تعیین منحنی توزیع انرژی و زاویه‌ای را نشان می‌دهد.

برای ظاهر شدن ردهای ثبت شده، فیلم‌های CR-۳۹ به مدت ۶ ساعت مورد سونش قرار گرفتند. برای سونش فیلم‌های CR-۳۹، از روش خورش شیمیایی و محلول ۶ نرمال NaOH در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. برای شمارش زمینه، نیز تعداد ۳ فیلم پرتودهی نشده مورد سونش قرار گرفت.

### ۳. نتایج آزمایش و تحلیل داده‌ها

با استفاده از نرم‌افزار SRIM، انرژی آستانه‌ی یون‌های نیتروژن برای عبور از ضخامت‌های مختلف صافی آلومینیومی و ثبت شدن بر روی فیلم‌های CR-۳۹ محاسبه شد. نتایج در جدول ۱ آورده شده است.

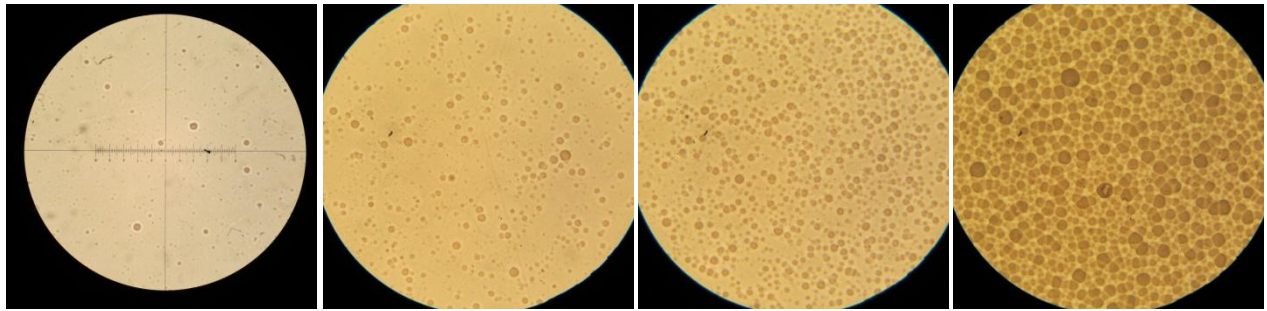


(الف)



(ب)

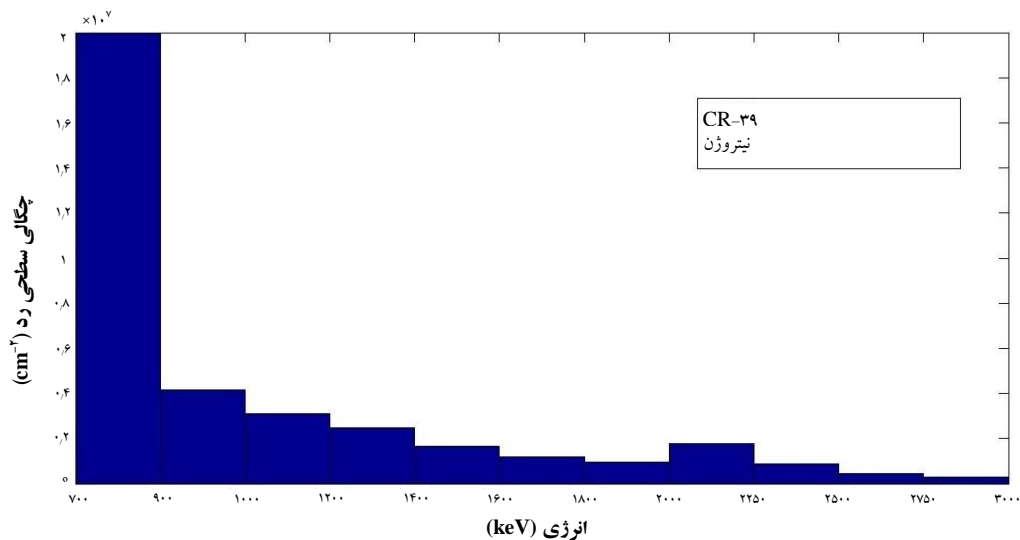
**شکل ۱.** (الف) آرایش استفاده شده برای تعیین توزیع زاویه‌ای، (ب) نگه‌دارنده‌ی طراحی شده برای تعیین توزیع انرژی.



شکل ۲. نمونه‌ای از ثبت ردها بر روی فیلم‌های آشکارساز CR-39 با ضخامت‌های مختلف صافی آلومینیومی؛ از راست به چپ، به ترتیب، ۱۰۰۰، ۱۳۳۰، ۲۱۰۰، ۲۷۹۰ نانومتر.

جدول ۲. انرژی آستانه و چگالی رد یون‌های ثبت شده با آشکارساز CR-39 برای ضخامت‌های مختلف صافی آلومینیومی

ضخامت (nm)	انرژی آستانه عبور (keV)	چگالی ردها ( $10^3 \text{ cm}^{-2}$ )	ضخامت (nm)	انرژی آستانه عبور (keV)	چگالی ردها ( $10^3 \text{ cm}^{-2}$ )
۱۰۵۰	۷۰۰	اشباع	۱۹۵۰	۱۸۰۰	$4300 \pm 100.3$
۱۲۴۰	۹۰۰	$16900 \pm 100.1$	۲۱۰۰	۲۰۰۰	$3330 \pm 100.2$
۱۳۳۰	۱۰۰۰	$12730 \pm 100.7$	۲۲۷۰	۲۲۵۰	$1570 \pm 100.1$
۱۵۰۰	۱۲۰۰	$9640 \pm 100.05$	۲۴۵۰	۲۵۰۰	$710 \pm 100.1$
۱۶۶۰	۱۴۰۰	$7150 \pm 100.04$	۲۶۲۰	۲۷۵۰	$280 \pm 100$
۱۸۱۰	۱۶۰۰	$5490 \pm 100.03$	۲۷۹۰	۳۰۰۰	در حد زمینه



شکل ۳. طیف انرژی یون‌های نیتروژن، تعیین شده با استفاده از آشکارساز CR-39.

این ناهم‌سانگردی توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن را می‌توان با توزیع نامتقارن و کاتوره‌ای ریزچشمه‌های یونی در داخل ستون پلاسمای، که ناشی از عدم تجانس میدان‌های الکترومغناطیسی محلی است، توضیح داد. این ریزچشمه‌ها نسبت به محور Z لزوماً متقارن نیستند. البته این نایکنواختی به عامل‌های مختلف دیگری چون انرژی و ولتاژ کاری دستگاه، گاز عملیاتی، شکل آند و ... بستگی دارد و در دستگاه‌های مختلف پلاسمای کانونی می‌تواند نتایج مختلفی دربر داشته باشد.

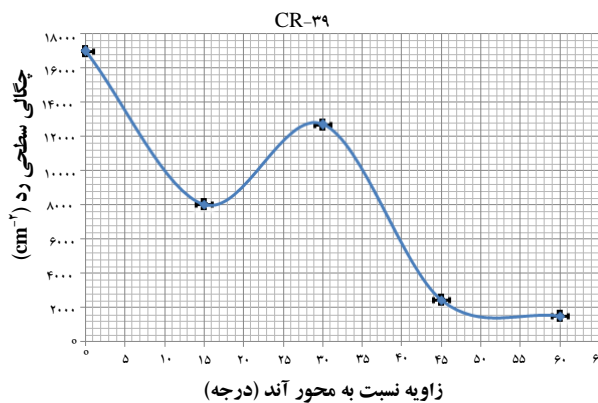
در فشار ۰/۵ mbar گاز نیتروژن، بیش‌ترین چگالی سطحی رد در زاویه‌ی صفر درجه نسبت به محور آند، برای فیلم‌های CR-39 با صافی آلومینیومی به ضخامت ۱۲۴۰ نانومتر، و برابر  $17/9 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  به دست آمد.

منحنی توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن در دستگاه SBUMTPF۱ تعیین شده با استفاده از آشکارساز CR-39 نشان داد که توزیع زاویه‌ای یون‌ها یکنواخت نبوده و در محدوده‌ی زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به محور آند، دارای یک قله است؛ این نتایج با نتایج به دست آمده در مرجع [۱۳] تطابق داشت (شکل ۴).

چگالی ردهای ثبت شده به وسیله‌ی این دو آشکارساز این نتیجه به دست آمد که تعداد رد ثبت شده روی فیلم CR-۳۹ بیش‌تر از فیلم پلی‌کربنات است؛ این، نشان‌دهنده‌ی بازده شمارش بزرگ‌تر آشکارسازهای CR-۳۹ نسبت به پلی‌کربنات است. اما به دلیل حساسیت بالای فیلم‌های CR-۳۹ و ثبت یون‌های انرژی- پایین، زمینه‌ی این فیلم‌ها نسبت به پلی‌کربنات بسیار شلوغ‌تر است.

### پی‌نوشت

#### 1. Physical Vapor Deposition



شکل ۴. توزیع زاویه‌ای یون‌های نیتروژن، تعیین شده با استفاده از آشکارساز CR-۳۹

برای دستگاه مورد استفاده در فشار ۰/۵ mbar گاز نیتروژن، نسبت گسیل یون نیتروژن در راستای محور آند (بیش‌ترین چگالی ردهای ثبت شده) به زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به آن (کم‌ترین چگالی ردهای ثبت شده) برای فیلم‌های CR-۳۹ برابر ۷/۱۵ به دست آمد؛ این مقدار برای فیلم‌های پلی‌کربنات استفاده شده در مرجع [۱۳] برابر ۵/۱۶ به دست آمده است.

### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از فیلم‌های لایه‌نشانی شده و با استفاده از آرایش‌های طراحی شده، منحنی توزیع انرژی و زاویه‌ای یون‌های نیتروژن در دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF<sub>1</sub> (۱۰/۴ μF، ۲۵ kV، ۳/۲ kJ) مطابق شکل‌های ۳ و ۴ به دست آمد. هم‌چنین مطابق شکل ۴، منحنی توزیع زاویه‌ای یون‌ها در دستگاه SBUMTPF<sub>1</sub>، در توزیع یون‌ها ناپیکنواختی نشان داد که می‌توان دلیل آن را احاطه شدن ستون پینچ به وسیله‌ی یک میدان مغناطیسی سمتی دانست. در واقع ناهم‌سانگردی زاویه‌ای، یک ویژگی ذاتی همه‌ی تخلیه‌های دستگاه پلاسمای کانونی است. به عبارت دیگر ویژگی‌های ماکروسکوپی گسیل یون برای دستگاه‌های پلاسمای کانونی ثابت باقی می‌ماند، ولی ویژگی‌های میکروسکوپی به خاطر خاصیت آماری این پدیده در دستگاه‌های پلاسمای کانونی مختلف با هم متفاوت است. اما به دلیل یکسان بودن دستگاه مورد استفاده در این پژوهش و دستگاه استفاده شده در مرجع [۱۳]، نتایج به دست آمده با آشکارسازهای CR-۳۹ و پلی‌کربنات با یک‌دیگر تطابق خوبی داشتند. هم‌چنین از مقایسه‌ی



1. GH. Murtaza, S.S.H. Mehboob Sadiq, M. Zakauallah, Plasma Focus Assisted Carburizing of Aluminum, Thin Solid Films, 517 (2009) 6777-6783.
2. S.M. Sadat Kiai, S.A.S. Sheibani, M. Elahi, A. Safarien, S. Farhangi, A.R. Zirak, S. Alhooie, B.N. Mortazavi, M.M. Khalaj, A.R. Khanchi, A.A. Dabirzadeh, A. Kashan, F. Zahedi, Design a 10 kJ of Mather Type Plasma Focus for Solid Target Activation to Product Short-Lived Radioisotopes  $^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})^{13}\text{N}$ , J. Fusion Energy (2012) 421-426.
3. F. Castillo, J.J.E. Herrera, G. Espinosa, Energy Study of Accelerated Ions from a Dense Plasma Focus by Means of CR-39 Track Detector, Nuclear Track Detector Measurement, 22 (1-4) (1993) 551-553.
4. F. Castillo, J.J.E. Herrera, Isabel Gamboa, J. Rangel, J.I. Golzarri, G. Espinosa, Angular Distribution of Fusion Products and X Rays Emitted by a Small Dense Plasma Focus Machine, Journal of Applied Physics, 107 (2007) 013303.
5. A. Malinowska, A. Szydlowski, K. Mallinowski, M.J. Sadowski, Investigation of Fusion Reaction Protons from PF-Discharges, Czechoslovak Journal of Physics, 56 (2006).
6. A. Malinowska, A. Szydlowski, M.J. Sadowski, J. Zebrowski, M. Scholz, M. Paduch, M. Jaskola, A. Korman, Measurements of Fusion-Produced Protons by Means of SSNTDs, Radiation Measurements, Doi: 10.1016/J.Radmeas (2008) 04.041.
7. A. Szydlowski, A. Banaszak, B. Bienkowska, I.M. Ivanova-Stanik, M. Scholz, M.J. Sadowska, Measurement of Fast Ions and Neutrons Emitted from PF-1000 Plasma Focus Device, Vacuum, 76 (2004) 357-360.
8. H. Kelly, H. Lepone, A. Marquez, Nitrogen Ion Spectrum from a Low Energy Plasma Focus Device, IEEE Trans, Plasma Sci. 25 (1997) 455-459.
9. H. Kelly, H. Lepone, A. Marquez, J. Sadoswki, J. Baranowski, E.S. Sadowska, Analysis of the Nitrogen Ion Beam Generated in a Low-Energy Plasma Focus Device by a Faraday Cup Operating in the Secondary Electron Emission Mode, IEEE Trans, Plasma Sci. 26 (1998) 113.
10. K. Takao, M. Shiotani, T. Honda, I. Kitamura, T. Takahashi, K. Masugate, Characteristics of the Nitrogen Ion Beam Produced in a Plasma Focus Device, Pulsed Power Plasma Sci. 1 (2001) 731-734.
11. A. Szydlowski, Application of CR-39 Track Detector for Corpuscular Diagnostics of High-Temperature Plasmas, Radiation Measurements, 36 (2003) 35-42.
12. M. Sadowski, A. Szydlowski, M. Scholz, H. Kelly, A. Marquez, A. Lepone, Application of Solid-State Nuclear Track Detector for Studies of Fast Ion Beams Within PF-1000 and other Plasma-Focus Facilities, 31 (1999) 185-190.
13. B. Ghasemi, H. Rouhi, F. Abbasi Davani, Z. Shahbazi Rad, An Investigation on the Energy and the Angular Distribution of Nitrogen Ions in SBUMTPF1 Plasma Focus Device, Using Polycarbonate Nuclear Track Detector and Different Thicknesses of Aluminum Filters, Journal of Nuclear Science and Technology (1392) 9-14.