

بررسی تغییرات ساختاری گرافیت تحت تابش پالس‌های یونی:

مطالعه موردی بر روی مواد مواجهه با پلاسما

میرمحمد رضا سیدحبشی* و علیرضا اصل زعیم

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۴)

<https://doi.org/10.47176/jame.43.3.1074>

چکیده: در این تحقیق اثرات تابش یون‌های پر انرژی هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدرن MTPF-2 بر روی خواص سطحی و ساختاری گرافیت بررسی شد. از پروتون‌های پر انرژی تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی برای تابش‌دهی نمونه‌های گرافیت در تخلیه‌های مختلف استفاده گردید. تغییرات ناشی از تابش در سطح گرافیت با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات ایجاد شده در سطح نمونه‌های تحت تابش قرار گرفته به وضوح در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دیده شد. تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های تابش‌دهی شده کندوپاش‌های نقطه همچنین خلل و فرج در سطح نمونه‌های به همراه ذوب‌شدگی نقطه که وابسته به فلوننس یونی (تعداد تخلیه الکتریکی) می‌باشد را نشان داد. از آنالیز پراش پرتو ایکس برای بررسی تغییرات ایجاد شده در ساختار گرافیت در اثر تابش پروتون‌های پر انرژی استفاده شد. در طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های تابش‌دهی شده جابجایی در مکان قله‌ها، تغییر شدت قله‌ها و افزایش اندازه کریستال در نمونه‌های تابش‌دهی شده نسبت به طیف پراش پرتو ایکس نمونه مرجع مشاهده شد. همچنین از آشکارساز فنجان فارادی برای مشخصه‌یابی طیف یونی هیدروژن ایجاد شده در دستگاه پلاسمای کانونی استفاده شد. نتایج نشان داد که انرژی میانگین یون‌های تولید شده حدود ۴۶ keV است.

واژه‌های کلیدی: مواد مواجهه با پلاسما، دستگاه پلاسمای کانونی، گرافیت، آسیب تابش، توکامک.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.seyedhabashy@gmail.com

Evaluating Structural Changes in Graphite Under Ion Pulse Irradiation: A Case Study on Plasma Facing Materials

M.M.R. Seyed Habashy* and A.R. Asle Zaeem

Plasma and Nuclear Fusion Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this study, the effects of high-energy hydrogen ion irradiation, generated by the MTPF-2 type modern plasma focus device, on the surface and structural properties of graphite were investigated. High-energy protons produced by the plasma focus device were used to irradiate graphite samples in various shots. The radiation-induced changes on the graphite surface were examined using optical microscope and scanning electron microscopy. The modifications on the irradiated samples' surface were clearly observed in the scanning electron microscopy and optical microscope images. The microscopic images of the irradiated samples revealed point sputtering as well as pores on the sample surface, along with point melting, which are dependent on the ion fluence (number of shots). X-ray diffraction analysis was employed to study the structural changes in the graphite caused by the high-energy proton irradiation. The X-ray diffraction spectra of the irradiated samples showed shifts in the peak positions, changes in the peak intensities, and an increase in the crystallite size compared to the X-ray diffraction spectra of the reference sample. Additionally, a Faraday cup detector was used to characterize the hydrogen ion spectrum produced in the plasma focus device. The results indicated that the average energy of the generated ions was ~ 46 keV.

Keywords: Plasma-Exposed Materials, Plasma Focus Device, Graphite, Radiation Damage, Tokamak.

۱- مقدمه

ذرات پلاسما با سطح مواد، منجر به فرسایش آن‌ها شده و این ذرات فرسایش یافته ممکن است در لبه پلاسما مهاجرت کرده و مجدداً رسوب کنند. تشکیل و جابجایی گرد و غبار که در هنگام بروز ناپایداری در پلاسما توکامک، ذرات گرد و غبار تشکیل می‌شوند که می‌توانند در سیستم پلاسما جابجا شده و منتقل شوند که این امر تأثیر بسزایی بر عملکرد دستگاه دارد. کاشت و جذب ذرات پلاسما که ذرات پلاسما به داخل مواد مواجه با پلاسما نفوذ می‌کنند و ممکن است در آنجا جذب شوند، منتشر شوند یا آزاد شوند که این فرآیندها بر روی رفتار و خواص مواد تأثیرگذار است. تغییرات ساختاری و شیمیایی که ساختار شیمیایی و خواص فیزیکی همچون خواص انتقال حرارتی و مکانیکی مواد مواجه با پلاسما ممکن است تحت تأثیر اندرکنش با پلاسما همجوشی دچار دگرگونی شوند و این امر سبب چالش‌های جدی در محاسبات مربوط به مدیریت سوخت، انتقال حرارت و حفظ و نگهداری پلاسما توکامک می‌گردد. آسیب‌های حرارتی و مکانیکی که افزایش دما تا حد ذوب یا تبخیر، ترک خوردگی و سایر شکل‌های آسیب، از جمله

گرافیت به‌عنوان یکی از مواد مواجه با پلاسما^۱ به‌طور گسترده‌ای در ساخت توکامک‌های بزرگی همچون TFTR و JET مورد استفاده قرار گرفته است. ویژگی‌های گرافیت، از جمله عدد اتمی پایین و هدایت حرارتی بالا، باعث شده تا این ماده نه تنها در راکتورهای همجوشی، بلکه در راکتورهای شکافت نیز به‌کار گرفته شود. به دلیل این خصوصیات منحصر به فرد، گرافیت یکی از گزینه‌های پیشنهادی برای استفاده در توکامک‌های نسل آینده نیز محسوب می‌شود. اندرکنش بین پلاسما و مواد مواجه با پلاسما از جمله چالش‌های اساسی در طراحی و ساخت دستگاه‌های همجوشی هسته‌ای به‌شمار می‌رود (۱-۱۳). این مسئله از دو جنبه حیاتی دارای اهمیت است، نخست، کنترل دقیق پلاسما در طول فرآیندهای تخلیه انرژی خازنی و دوم، افزایش عمر مفید مواد مواجه با پلاسما که در معرض بار حرارتی و تابشی ناشی از فروپاشی پلاسما همجوشی قرار دارند. انواع مختلف این برهمکنش‌ها را می‌توان به دسته‌های زیر تقسیم کرد: فرسایش مواد که برخورد مداوم

تخریب آن می‌شود. این برخورد یون‌های پرانرژی با سطح دیواره موجب کندوپاش 1° ذرات از سطح دیواره و ورود ناخالصی به داخل پلاسما می‌گردد. یون‌های پرانرژی با برخورد به سطح دیواره در داخل ماده سازنده دیواره اول کاشته می‌شوند. تغییرات ایجاد شده در خواص سطحی و ساختاری دیواره اول به دلیل برخورد این یون‌ها باعث افزایش ناخالصی در پلاسما، کاهش دمای پلاسما و مشکلات دیگر در تجهیزات خلأ توکامک می‌شود. به همین دلیل، لازم است مواد پیشنهادی برای ساخت توکامک‌ها در شرایطی مشابه با شرایطی که در آن‌ها تخریب رخ می‌دهد، آزمایش شوند تا اثرات این تخریب‌ها بر روی خواص سطحی و ساختار این مواد به‌طور کامل مشخص شود و عمر مفید این مواد قبل از ساخت دیواره توکامک تعیین گردد. تا به حال مواد کربنی مانند گرافیت در مقابل چشمه‌های پیوسته یون‌های پرانرژی که در دستگاه‌هایی مانند شتاب‌دهنده‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، بررسی شده‌اند. درحالی‌که ناپایداری‌های رخ داده در توکامک‌ها به‌صورت پالسی و یون‌های برخوردکننده با دیواره داری طیف انرژی هستند. همچنین در تحقیقات دیگری نمونه‌های گرافیت در توکامک‌هایی مانند JET و TFTR مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، اما این توکامک‌ها قادر به ایجاد بار حرارتی مشابه با توکامک‌های آینده مانند ITER نیستند. حداکثر چگالی توان بار حرارتی روی ماده دیواره اول توکامک‌های امروزی حدود 1 MW/m^2 است و در ناحیه دایورتور توکامک‌ها و استراتورهای موجود به 10 MW/m^2 می‌رسد. در راکتورهای همجوشی آینده، بار حرارتی قابل‌انتظار حدود 10^3 MW/m^2 تا 10^4 خواهد بود. یکی از مزایای دستگاه پلاسما کانونی این است که می‌تواند بار حرارتی ناشی از متلاشی شدن پلاسما داغ و چگال در حدود 10^8 MW/m^2 تولید کند که با افزایش فاصله هدف از سر آند، میزان بار حرارتی کاهش می‌یابد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با آزمایش مواد مواجه با پلاسما با استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های مختلف صورت گرفته است که به چند مورد از آن‌ها در ادامه اشاره خواهد شد.

پیامدهای دیگر تعامل بین پلاسما و مواد مواجه با پلاسما هستند. با توجه به این چالش‌ها، تحقیق و توسعه در زمینه بهینه‌سازی مواد مواجه با پلاسما به‌منظور بهبود کارایی و دوام دستگاه‌های همجوشی، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. عوارض و آسیب‌های ناشی از اندرکنش‌های مابین دیواره اول و پلاسما معمولاً در جریان بروز ناپایداری‌های پلاسمایی که منجر به ناپایداری و از هم پاشیدگی پلاسما می‌شوند، تشدید می‌گردند. پدیده‌های مانند حالت‌های لبه‌ای محلی شده^۲ جابجایی عمودی^۳، و از هم گسیختگی پلاسما^۴ از جمله این فرآیندها هستند که در زمان وقوع شان، شار ذرات و گرما به مواد مواجه با پلاسما به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد.

تاکنون از دستگاه‌های مختلفی برای بررسی اندرکنش بین پلاسما با مواد مواجه با پلاسما استفاده شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد فوق اشاره کرد: دستگاه شتاب‌دهنده یون‌های مختلف^۵ (۱۴) دستگاه همجوشی محصورسازی الکترواستاتیک لختی^۶ (۱۵) دستگاه پرتوی یونی با شار بالا^۷ (۱۶) دستگاه تشدید سیکلوترون الکترون فشرده^۸ (۱۷) دستگاه پلاسما کانونی^۹ (۳-۱، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۳). دستگاه پلاسما کانونی یکی از ابزارهای همجوشی است که به‌صورت پالسی عمل می‌کند. این دستگاه منبع تولید پرتو ایکس سخت و نرم، نوترون‌های سریع (در صورت استفاده از گاز دوتریم)، الکترون‌های نسبیتی و یون‌های پرانرژی در محدوده انرژی چندین کیلوالکترون‌ولت تا چند مگاالکترون‌ولت است. دستگاه پلاسما کانونی قادر است شرایط مشابه با ناپایداری‌های حالت لبه‌ای محلی که در راکتورهای همجوشی کنونی رخ می‌دهد را شبیه‌سازی کند. ناپایداری‌های حالت لبه‌ای محلی در راکتورهای همجوشی آینده، یکی از عوامل مهم تخریب دیواره توکامک محسوب می‌شود. مدت‌زمان برخورد یون‌های پرانرژی در هنگام این ناپایداری در حدود میکروثانیه تا میلی‌ثانیه است. زمانی که این ناپایداری رخ می‌دهد، پلاسما (یون‌ها و الکترون‌ها) از حالت محصورشدگی توسط خطوط میدان مغناطیسی خارج شده و با برخورد به دیواره اول توکامک باعث

آن‌ها نشان دادند که در اثر تابش، برآمدگی‌هایی بر روی سطح گرافیت به وجود می‌آید که اندازه این برآمدگی‌ها تابعی از انرژی تخریب است. این تخریب‌ها ناشی از استرسی است که در نزدیکی سطح در اثر برخورد آبشاری ایجاد می‌شود (۲۰). در رابطه با پژوهش حاضر و دستگاه پلاسما کانونی باید تأکید کرد که تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با تست مواد مواجهه با پلاسما با استفاده از پرتوهای یونی، نوترون‌های تند (در صورت استفاده از گاز دوتریم) و موج ضربه تولید شده در دستگاه‌های پلاسما کانونی انجام شده است. در ادامه به چندین تحقیق مهم در این زمینه اشاره می‌شود، دامیده و همکاران (۲۸)، اثرات تخریبی یون‌های دوتریم را در فواصل مختلف و در تخلیه‌های مختلف دستگاه پلاسما کانونی ۲/۲ کیلوژول بررسی کردند. در این تحقیق، نمونه‌های تنگستن با یون‌های دوتریم با انرژی متوسط ۵۶ keV و شار 10^{26} یون بر مترمربع بر ثانیه مورد تابش قرار گرفت. نتایج نشان داد که در نتیجه تابش یون‌های پرانرژی دوتریم، کرک‌هایی با اندازه ۳۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر و حفره‌هایی تا پنج میکرومتر، بسته به فاصله نمونه از سر آند، تشکیل شد (۲۱). دوتا و همکاران (۲۲)، اثرات تخریبی یون‌های هلیوم تولیدشده در دستگاه پلاسما کانونی ۲/۲ کیلوژول بر روی تنگستن را بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌های تنگستن را در زوایای مختلف نسبت به محور آند قرار داده و در ده تخلیه مورد تابش قرار دادند. مشاهده شد که ترک‌های یکنواخت با عرض یک تا چهار میکرومتر بر روی تنگستن ایجاد شد. نتایج پراش پرتو ایکس نیز نشان داد که در نمونه‌های تابش‌دهی شده با هلیوم، پیک‌ها به سمت زوایای بالاتر شیفت پیدا کردند (۲۲). نیرانجان و همکاران (۲۳)، تغییرات سطحی ایجادشده بر روی موادی که در ساخت راکتورهای همجوشی مورد استفاده قرار می‌گیرند (تنگستن، نیکل، فولاد زنگ‌نزن، مولیبدن و مس) را در اثر مواجهه با پلاسما همجوشی تولیدشده در دستگاه پلاسما کانونی بررسی کردند. نتایج تصاویر میکروسکوپی الکترونی نشان داد که تخریب‌ها و تغییرات ایجادشده بر روی سطح مواد مختلف

ماتچی و همکاران (۱۸)، برهمکنش مواد مواجهه با پلاسما را با استفاده از توکامک COMPASS مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، موادی همچون تنگستن، استیل، و پوشش‌های نازک تنگستن، استیل P92 و نیکل روی بسترهای گرافیتی در معرض پلاسما دوتریم و هیدروژن قرار گرفتند. نتایج نشان داد که فرسایش فقط در نقاط محدودی مشاهده شد که این پدیده به ایجاد قوس‌های یونیولار نسبت داده شد. همچنین، فرسایش کمی بیش‌تر در پوشش‌های استیل در مقایسه با پوشش‌های تنگستن مشاهده گردید. همچنین، جذب دوتریم در لایه نازک سطحی این مواد گزارش شد.

هابنیکت و همکاران (۱۸)، از تابش‌دهی گرافیت با یون‌های کربن پنج مگا-الکترون‌ولتبرای شبیه‌سازی اثرات تخریبی نوترون‌های سریع حاصل از گداخت بر روی گرافیت استفاده کردند. نمونه‌های تابش‌دهی شده سپس در دستگاه پلاسما خطی MAGPIE در معرض پلاسما دوتریم با فلوننس 10^{24} یون بر مترمربع قرار گرفتند. آن‌ها مشاهده کردند که تابش‌دهی گرافیت با یون‌های پرانرژی کربن باعث افزایش خلل و فرج در داخل نمونه‌های گرافیت شده و کاهش خاصیت بلور گرافیتی و ایجاد بی‌نظمی در ساختار گرافیت را به همراه داشته است. همچنین، قرار گرفتن نمونه‌های تابش‌یافته در معرض پلاسما باعث کاهش بیش‌تر خاصیت بلور گرافیتی گردید (در پژوهشی به بررسی تغییرات سطحی ایجاد شده در اثر تابش یون‌های پرانرژی بر روی گرافیت پرداخت. در این تحقیق، نمونه‌های گرافیت با یون‌هایی با انرژی بین ۲ تا ۵۰ کیلوالکترون‌ولت پرتودهی شدند. نتایج نشان داد که تغییرات سطحی ایجادشده تابعی از جرم یون، انرژی یون و دمای سطح ماده هدف می‌باشد (۱۹). کراتگر و همکاران (۲۰)، اثر انرژی و جرم یون‌ها بر تخریب سطح گرافیت را بررسی کردند. آن‌ها برای این منظور از میکروسکوپ تسونلی روبشی^{۱۱} و میکروسکوپ الکترونی عبوری^{۱۲} استفاده کردند. در این تحقیق، نمونه‌های گرافیت با یون‌های آرگون، زنون، نیتروژن و گوگرد-۳۲ با انرژی‌های ۱۵ تا ۴۰ کیوالکترون‌ولت تابش داده شدند.

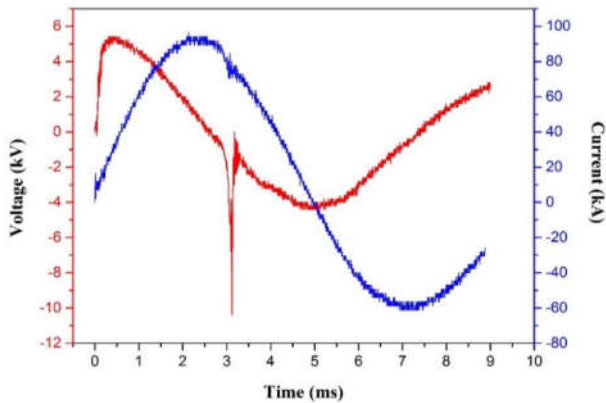
پرتو ایکس می‌گردد (۳۳). در تحقیقات اخیر، تأثیر پروتون‌های پرنرژی حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی بر روی مواد مواجه با پلاسمای مانند تنگستن و استیل به‌طور گسترده‌ای بررسی شده است. با این‌حال، تحقیقات انجام شده در مورد گرافیت بسیار محدود است. یکی از نگرانی‌های مهم در استفاده از گرافیت به‌عنوان مواد مواجه با پلاسمای فرسایش شیمیایی آن در اثر بمباران با یون‌های هیدروژن و تشکیل هیدروکربن‌ها است. این هیدروکربن‌ها با آزاد شدن در داخل پلاسمای، باعث افزایش ناخالصی‌های پلاسمای می‌شوند. ایزوتوپ‌های هیدروژن در راکتورهای همجوشی آینده به‌عنوان سوخت اصلی مورد استفاده قرار خواهند گرفت و هیدروژن به دلیل جرم مشابه با نوترون، در بسیاری از تحقیقات، اثرات تخریبی مشابهی با نوترون در انرژی‌های بالای یک مگاالکترون‌ولت نشان داده است. با توجه به گزارشات محدود در رابطه با بررسی اثرات تخریبی یون‌های حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی بر روی گرافیت، و با توجه به اینکه دستگاه پلاسمای کانونی یکی از پیشروترین ابزارها در آزمایش مواد مواجه با پلاسمای محسوب می‌شود، این ضرورت احساس می‌شود که تحقیقات بیش‌تری در زمینه پرتودهی گرافیت با یون‌های حاصل از پلاسمای کانونی انجام شود. در این پژوهش، اثرات تعداد تخلیه‌های هیدروژن بر خواص سطحی و ساختاری گرافیت مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مرجع و نمونه‌های تابش‌دهی شده با ده و بیست تخلیه هیدروژن با استفاده از آنالیزهای میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، و پراش پرتو ایکس مورد مطالعه قرار گرفتند. این پژوهش می‌تواند به درک بهتر از رفتار گرافیت تحت تابش یون‌های حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی کمک کرده و نتایج آن در انتخاب مواد مناسب برای استفاده در راکتورهای همجوشی آینده مفید باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- چیدمان آزمایشگاهی

دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۷ کیلو ژول MTPF-2 از نوع مدر با

تحت شرایط یکسان تابش‌دهی، متفاوت است (۲۳). گریبکوف و همکاران (۲۴)، برهمکنش جریان یونی پرنرژی و پلاسمای داغ تولیدشده در دستگاه‌های پلاسمای کانونی PF-6 و PF-1000 با یون‌های دوتریم را بررسی کردند. آن‌ها موادی شامل فولادهای زنگ‌نزن فریتی و آستنیتی با فعال‌سازی کم، آلیاژ تیتانیوم، دو نوع تنگستن و یک کامپوزیت بر پایه تنگستن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد تخلیه‌ها، کرک‌های ایجادشده باریک به کرک‌های عمیق و بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند (۲۴). هاوات و همکاران (۲۵)، با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۸ کیلوژول، سطح فولاد AISI 304 را با یون‌های نیتروژن مورد تابش قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که سختی سطح این فولاد تا ۱۷۵ درصد افزایش یافت. همچنین، نتایج نشان داد که با افزایش تعداد تخلیه‌ها، سختی سطح افزایش و با افزایش فاصله از آند، سختی سطح کاهش می‌یابد (۲۵). جوادی و همکاران (۲۶)، در پژوهشی نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن AISI 304 را با یون‌های دوتریم و نوترون‌های حاصل از همجوشی مورد تابش قرار داد و اثرات تخریبی ناشی از پرتودهی را بررسی کرد. نتایج نشان داد که پس از تابش با یون‌های پرنرژی دوتریم، انتقال فاز ساختاری از ترکیب $\alpha\text{-Fe}$ (BCC) و $\gamma\text{-Fe}$ (FCC) به تنها $\gamma\text{-Fe}$ (FCC) همراه با افزایش شدت صفحات کریستالی $\gamma\text{-Fe}$ (FCC) به دلیل آیل موقتی شدید در لایه سطحی رخ داد (۲۶). یکی از پژوهش‌های مرتبط که اثرات تابش یون‌های هیدروژن و آرگون تولید شده توسط دستگاه پلاسمای کانونی را بر روی گرافیت بررسی کرده است، مطالعه‌ای توسط ابطحی و همکاران (۲۰۲۱) است (۳۳). در این پژوهش، تغییرات سطحی و ساختاری گرافیت تحت تابش یون‌های پرنرژی هیدروژن و آرگون با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۳} و پراش پرتو ایکس^{۱۴} مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که تابش یون‌های هیدروژن منجر به ایجاد خلل و فرج و نقاط ذوب‌شدگی بر سطح گرافیت می‌شود، درحالی‌که تابش یون‌های آرگون باعث کندوپاش فیزیکی و تغییرات عمده در شدت و موقعیت قله‌های در آنالیز پراش با



شکل ۲- نمودار جریان تخلیه و نمودار مشتق جریان تخلیه دستگاه پلاسمای کانونی برای گاز هیدروژن.

ساخته می‌شود. روزنه ورودی فنجان فارادی یک میلی‌متر قطر دارد. مقدار ظرفیت خازنی، اندوکتانس و امپدانس فنجان فارادی ساخته شده از روابط زیر به دست می‌آید (۲۷).

$$C_{FC} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln(D/d)} \cong 3pF \quad (1)$$

$$L_{FC} = \frac{\mu_0\mu_r h}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \cong 7.4nH \quad (2)$$

$$Z_{FC} = \sqrt{L_{FC}/C_{FC}} \cong 50\Omega \quad (3)$$

که در این روابط، D ، قطر داخلی الکتروود بیرونی فنجان فارادی، d ، قطر بیرونی الکتروود داخلی فنجان فارادی و پارامتر h ، ارتفاع آن می‌باشد.

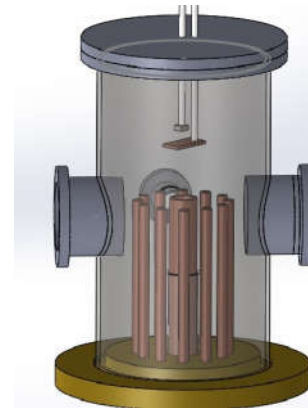
حداکثر ولتاژ اعمالی به فنجان فارادی توسط ولتاژ شکست عایق تنظیم می‌شود که طبق رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$V_p = 0.5S_{in} \ln(D/d) \cong 78kV \quad (4)$$

در رابطه (۴)، پارامتر S ولتاژ شکست عایق تغلونی مابین دو الکتروود فنجان فارادی است. فرکانس قطع این آن (f_{c-FC}) و پاسخ زمانی آن، به ترتیب، طبق رابطه (۵) و رابطه (۶) قابل محاسبه است (۲۵).

$$f_{c-FC} \approx \frac{c}{\left(\pi \left(\frac{D+d}{2}\right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right)} \cong 5GHz \quad (5)$$

$$T = \sqrt{4\pi^2 L_{FC} C_{FC}} = 0.93ns \quad (6)$$



شکل ۱- شماتیک ساختار دستگاه پلاسمای کانونی شامل آند، میله‌های کاتد و محل قرارگیری نمونه در دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2.

بانک خازنی به ظرفیت ۱۳/۵ میکرو فاراد و ولتاژ شارژ حداکثر بیست کیلو ولت، اندوکتانس ۱۵۸ nH به عنوان منبع تولید پروتون‌های پرنرژی برای پرتودهی نمونه‌های گرافیت مورد استفاده قرار گرفت. ساختار الکتروودهای این دستگاه پلاسمای کانونی و محل قرارگیری نمونه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

در قسمت بالایی آند یک حفره به شعاع ۱۰ mm و عمق ۱۰ mm به منظور کاهش مقدار بخار مس ایجاد شده است. فشار محفظه تا 10^{-3} mbar پایین آورده شد و سپس گاز هیدروژن در فشار یک میلی‌بار به محفظه تزریق شد. نمونه‌های گرافیت به ترتیب در معرض یک، ده و بیست تخلیه از تابش یون‌های هیدروژن قرار گرفتند. شکل (۲) نمونه‌ای از سیگنال‌های جریان تخلیه و مشتق جریان تخلیه برای گازهای هیدروژن نشان داده شده است.

برای تعیین مشخصات باریکه یونی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF، یک آشکارساز فنجان فارادی طراحی و ساخته شد. این فنجان فارادی برای دستگاه پلاسمای کانونی MTPF، از دو استوانه هم‌محور تشکیل شده است که استوانه بیرونی از جنس استیل و استوانه داخلی از جنس گرافیت بوده و عایق مابین این دو استوانه از جنس پلی اتیلن می‌باشد. و به دلیل حداقل بودن انتشار الکترون ثانویه، این الکتروود از گرافیت

جدول ۱- مشخصات هندسی و الکتریکی فنجان فارادی ساخته شده

ساختار	دو استوانه هم محور با عایق مابین
ابعاد استوانه بیرونی	قطر داخلی: ۲۰mm ارتفاع: ۳۱ mm
ابعاد استوانه داخلی	قطر بیرونی: ۶ mm ارتفاع: ۱۷ mm
ابعاد عایق مابین	قطر: ۶ mm ارتفاع: ۲۲ mm
روزنه ورودی	قطر ۱mm
جنس الکترودها	استیل
جنس عایق	تفلون
ولتاژ بایاس معکوس	۱۰۰ V
امپدانس	۵۰ Ω
ظرفیت خازنی	۳PF
اندوکنانس	۷/۴ nH
ولتاژ شکست عایق	۷۸ kV
فرکانس قطع	۵GHz
پاسخ زمانی	۰/۹۳ ns

شده است. برای جمع‌آوری یون‌ها، این آشکارساز به صورت منفی بایاس می‌شود. منبع تغذیه فنجان فارادی دارای یک ترانس ایزوله در قسمت ورودی خود است که خروجی این منبع از برق شهر ایزوله شده است. از طرف دیگر منبع تغذیه فنجان فارادی دارای پایانه صفر و منفی صد ولت طراحی شده است. بایاس معکوس فنجان فارادی بدین صورت انجام می‌گیرد که الکتروود بیرونی به پتانسیل زمین منبع تغذیه و الکتروود داخلی به پتانسیل ۱۰۰V- متصل می‌شوند.

فنجان فارادی مذکور، درون یک استوانه فلزی از جنس استیل به طول پنجاه سانتی‌متر قرار دارد که بر روی درپوش بالایی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF نصب شده است و فنجان فارادی می‌تواند درون این استوانه در موقعیت‌های مختلف نسبت به قسمت بالایی آند دستگاه تا فاصله شصت سانتی‌متر قرار گیرد. این استوانه به همراه محفظه اصلی پلاسمای کانونی توسط یک پمپ روتاری تا فشار 10^{-2} تور خلأ می‌گردد. شکل (۴- الف)، تصویر دستگاه پلاسمای کانونی

با توجه به اینکه ظرفیت معادل مدار فنجان فارادی برابر با مجموع ظرفیت مدار راه‌انداز $CF=100\text{ nF}$ و ظرفیت خود فنجان فارادی $CFC=3\text{ PF}$ می‌باشد که ظرفیت فنجان فارادی در مقابل با ظرفیت مدار ناچیز می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه برای انتقال سیگنال از فنجان فارادی تا اسیلوسکوپ از کابل کوآکسیال به شماره RG58 استفاده می‌شود بنابراین برای اینکه تضعیفی در محل اتصال فنجان فارادی و کابل انتقال‌دهنده سیگنال رخ ندهد باید اهم معادل این دو با هم برابر باشد. امپدانس کابل RG58 دارای مقاومت پنجاه اهم است و بنابراین باید امپدانس فنجان فارادی نیز پنجاه اهم باشد که با توجه به رابطه (۳)، همین مقدار برای فنجان فارادی نیز به دست آمده است. در نتیجه در تطابق کامل با خط انتقال بوده و تضعیف سیگنالی چندانی در این محل اتصال رخ نمی‌دهد. مشخصات هندسی و الکتریکی این فنجان فارادی در جدول (۱)، آورده شده است. مدار راه‌انداز این فنجان فارادی نیز در شکل (۳)، نشان داده

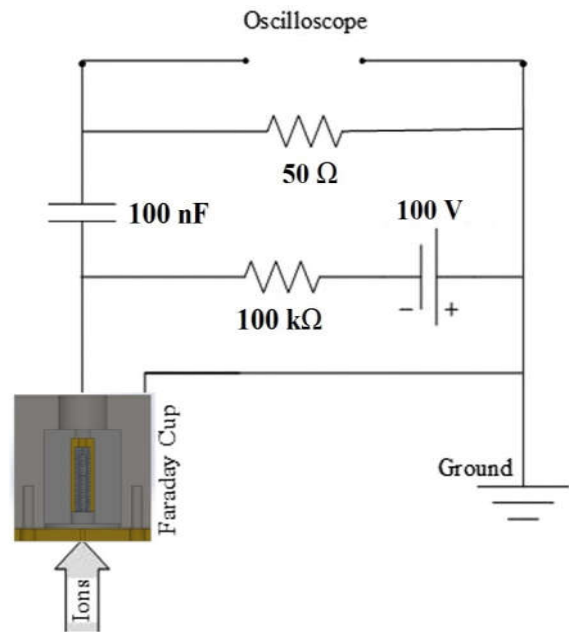
آند دستگاه MTPF قرار گرفت. شکل‌های (۴-ب) و (۴-ج) سیگنال‌های پرتو ایکس سخت، مشتق جریان و فنجان فارادی را به ترتیب برای قرار گرفتن نمونه‌ها در فاصله ده و بیست سانتی متری از بالای آند نشان می‌دهند.

۳- نتایج و بحث

تصویر یک تخلیه الکتریکی نوعی دستگاه پلاسمای کانونی با گاز کاری هیدروژن که توسط یک اسپلوسکوپ چهارکاناله ثبت شده است در شکل (۵)، نشان داده شده است. در این شکل، سیگنال‌های مشتق جریان تخلیه، پرتو ایکس سخت و باریکه یونی هیدروژن که به ترتیب توسط یک پروب مغناطیسی، سنتیلاتور و فنجان فارادی به دست آمده است را نشان می‌دهد. به طور کاملاً مشهود، در تخلیه‌های این دستگاه دو قله در سیگنال فنجان فارادی مشاهده می‌شود. با توجه به مراجع (۲۸) و (۲۹)، این دو پیک مربوط به پرتوهای ایکس بوده که در زمان فروپاشی ستون فشرده پلاسما گسیل و با الکترو گرافیتی برخورد می‌کند و پیک دوم در سیگنال فنجان فارادی مربوط به باریکه یونی است. از اختلاف زمانی این دو پیک برای شناسایی مدت زمان پرواز یون‌های گسیل یافته از ستون پینچ پلاسما استفاده می‌شود.

همچنین در شکل (۵) مشاهده می‌شود که قله ایکس ثبت شده توسط فنجان فارادی (نمودار بنفش رنگ- پیک اول) زودتر از قله ایکس ثبت شده توسط سنتیلاتور (نمودار سبزرنگ) اتفاق افتاده است که از عوامل مهم در به وجود آمدن این تأخیر زمانی در اندازه‌گیری گسیل پرتوی ایکس، می‌تواند یکسان نبودن طول کابل انتقال‌دهنده سیگنال برای این دو آشکارساز و همچنین مدارات الکترونیک متفاوت آن‌ها آشکارساز باشد.

در شکل (۶)، تصویری از یک تخلیه الکتریکی ضعیف دستگاه پلاسمای کانونی MTPF را نشان می‌دهد. شدت ضعیف پرتو ایکس در این تخلیه الکتریکی قابلیت ثبت توسط سنتیلاتور (نمودار سبز رنگ در شکل ۶) نداشته است. در این



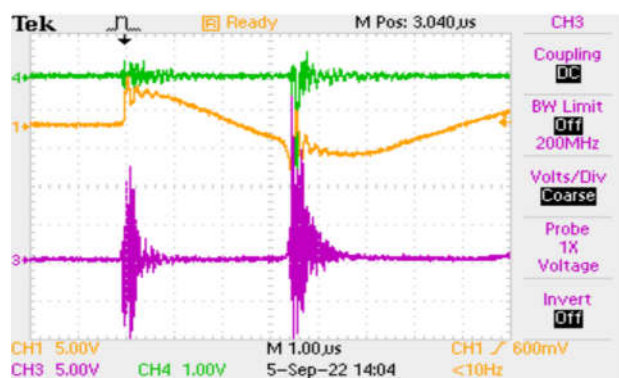
شکل ۳- مدار راه‌انداز فنجان فارادی که این آشکارساز را در ولتاژ 100V به صورت معکوس بایاس می‌کند.

MTPF و فنجان فارادی نصب شده بر روی آن و سیگنال‌های به دست آمده در طی یک تخلیه الکتریکی نوعی را نشان می‌دهد. برای تعیین موقعیت مناسب فنجان فارادی نسبت به بالای آند دستگاه (محل تشکیل ستون پلاسما)، به صورت تجربی مشاهده گردید که با نزدیک شدن فنجان فارادی به قسمت مذکور (محل تشکیل ستون پلاسمای فشرده)، نویزهایی که بر روی سیگنال فنجان فارادی اثر می‌گذارند بیش‌تر می‌شوند و برعکس با فاصله گرفتن فنجان فارادی از سطح آند، به دلیل واگرا شدن باریکه یونی، تعداد یون‌های کم‌تری به فنجان فارادی برخورد می‌کنند بنابراین دامنه سیگنال به وجود آمده نیز کاهش پیدا می‌کند.

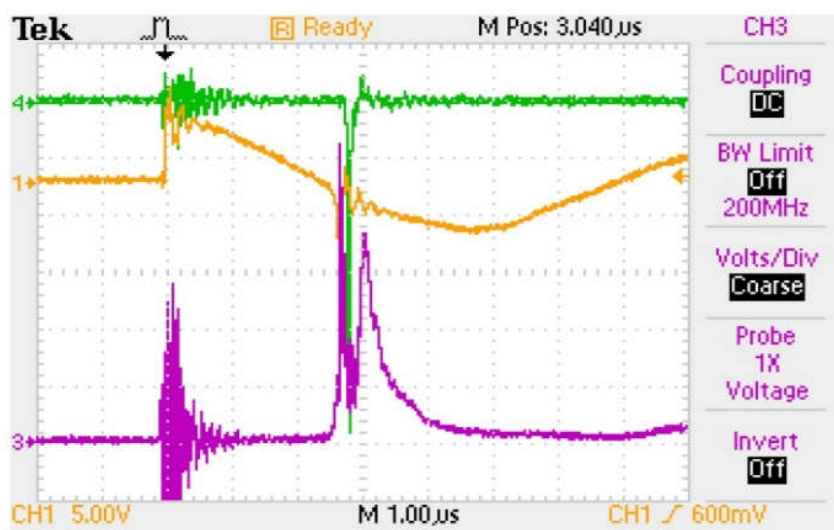
بنابراین فاصله بهینه‌ای برای موقعیت فنجان فارادی نسبت به قسمت بالای آند دستگاه وجود دارد که در دستگاه پلاسمای کانونی MTPF این فاصله به صورت تجربی در حدود شصت سانتی متر به دست آمد. در این فاصله نسبت پارامتر سیگنال به نویز (S/N) به مراتب بهبود می‌یابد (شکل ۴-ج). لذا فنجان فارادی در فاصله شصت سانتی متری از قسمت بالای الکترو



(الف)

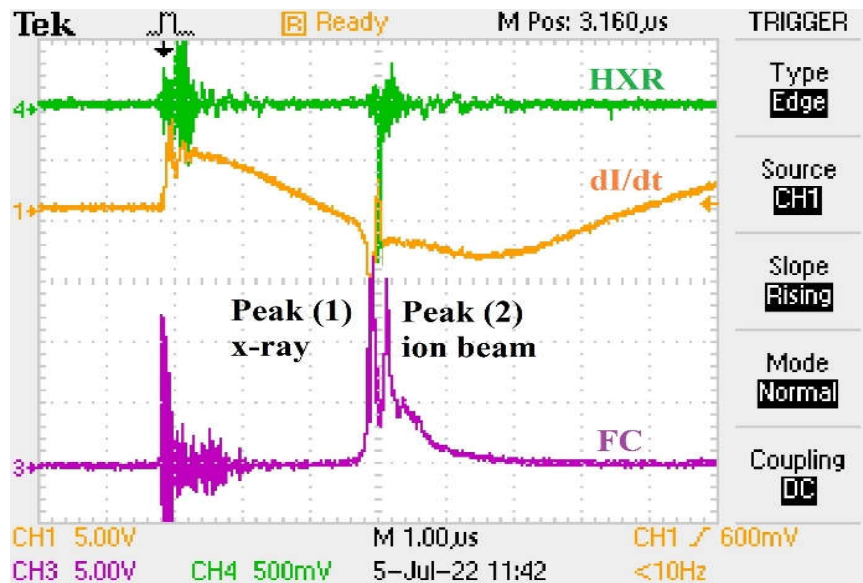


(ب)

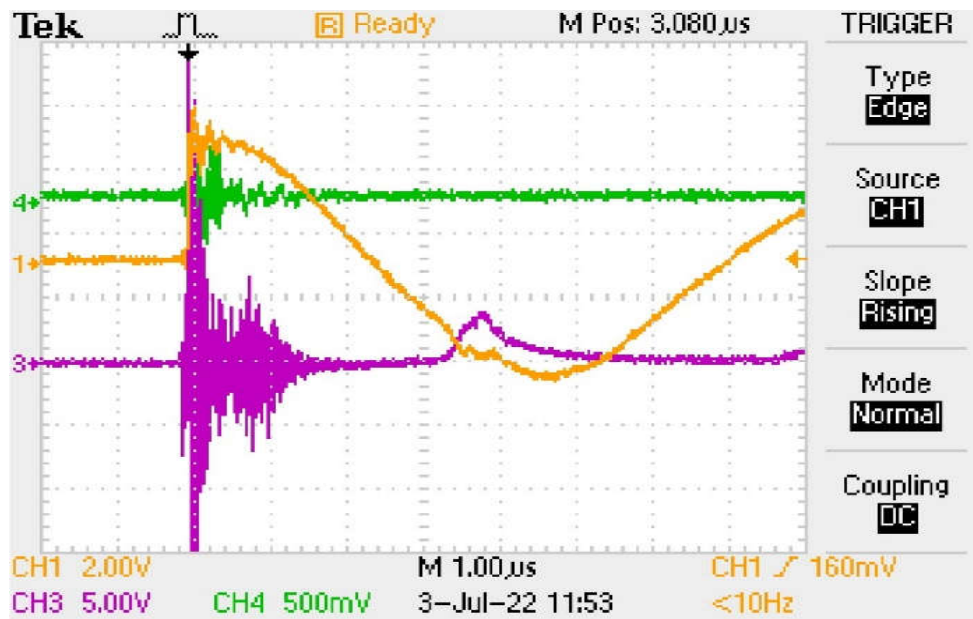


(ج)

شکل ۴- (الف) تصویری از دستگاه پلاسمای کانونی MTPF و فنجان فارادی نصب شده بر روی آن؛
 (ب) سیگنال تخلیه الکتریکی نوعی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF: سیگنال پرتو ایکس سخت (سبز)،
 نمودار مشتق جریان تخلیه (نارنجی) و سیگنال فنجان فارادی (بنفش) در فاصله ۱۰ cm از بالای آند دستگاه؛
 (ج) سیگنال تخلیه الکتریکی نوعی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF: سیگنال پرتو ایکس سخت (سبز)،
 نمودار مشتق جریان تخلیه (نارنجی) و سیگنال فنجان فارادی (بنفش) در فاصله ۶۰ cm از بالای آند دستگاه.



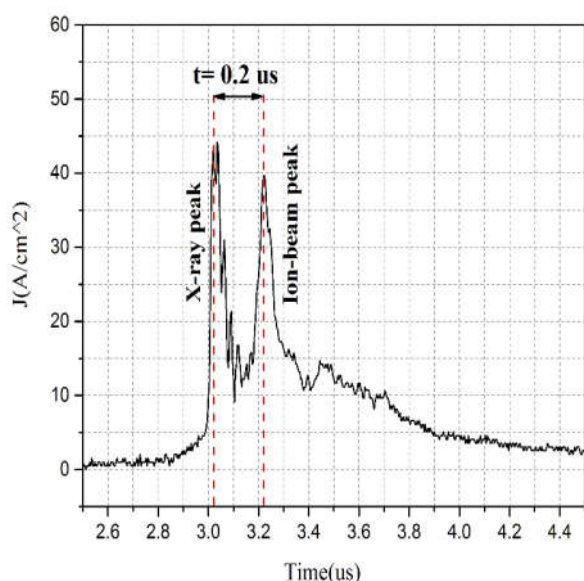
شکل ۵- سیگنال تخلیه الکتریکی نوعی دستگاه پلاسمای کانونی MTPF: سیگنال پرتو ایکس سخت (سبز)، نمودار مشتق جریان تخلیه (نارنجی) و سیگنال فنجان فارادی (بنفش). دو پیک مشاهده شده در سیگنال فنجان فارادی که مربوط به پرتو ایکس و باریکه یونی می‌باشد.



شکل ۶- نتایج حاصل از یک تنگش ضعیف در دستگاه پلاسمای کانونی MTPF که منجر به گسیل پرتو ایکس نشده است. در این حالت، سیگنال حاصل از فنجان فارادی (نمودار بنفش رنگ)، حاوی یک پیک نسبتاً پهن و ضعیف است که مؤید وجود تعدادی یون، حتی در حالت پینچ ضعیف است.

است. این موضوع مؤید وجود تعدادی یون، حتی در حالت تخلیه الکتریکی ضعیف است. در حالت تخلیه الکتریکی قوی (شکل ۵) سیگنال فنجان فارادی دارای دو قله نسبتاً بزرگ

حالت، سیگنال به‌دست آمده از فنجان فارادی نیز تنها یک قله کوچک را نشان می‌دهد. در این حالت، سیگنال فنجان فارادی (نمودار بنفش رنگ)، حاوی یک قله نسبتاً پهن و با ارتفاع کم



شکل ۷- نمودار چگالی باریکه یون (J_b) هیدروژن که اختلاف زمانی بین دو پیک آن در حدود $0.2\mu s$ به دست آمده است.

فارادی کاپ مربوط به پرتو ایکس که در زمان پینچ پلاسما از قسمت بالای آند دستگاه گسیل می‌شود) با زمان آشکارسازی یونها (پیک دوم در سیگنال فنجان فارادی) می‌توان مدت زمان پرواز یون‌های با انرژی متوسط را به دست آورد. برای اندازه‌گیری انرژی میانگین یونها، ده تخلیه الکتریکی دستگاه در شرایط فشار و ولتاژ کاری انتخاب گردید. جرم اتمی هیدروژن برابر با مقدار $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ بوده و با جایگذاری در رابطه (۹)، انرژی متوسط یون‌های هیدروژن از طریق روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید.

$$t_{\text{TOF}} = t_{\text{ion(peak2)}} - t_{\text{HXR(peak1)}} \cong 0.20\mu s \quad (8)$$

$$E_{\text{ion}} = \frac{1}{2} m_H \left(\frac{X_{\text{FC}}}{t_{\text{TOF}}} \right)^2 \cong 46 \text{ keV} \quad (9)$$

۳-۳- اندازه‌گیری شار و شارش باریکه یون‌های هیدروژن با استفاده از سیگنال فارادی کاپ

برای به دست آوردن شار و شارش باریکه یونی، با استفاده از رابطه $n = (\int I dt) / e$ می‌توان تعداد کلی یونها را در هر تخلیه

است. این دو فله به ترتیب مربوط به برخورد پرتو ایکس قوی و یون‌های پرانرژی به فنجان فارادی است.

۳-۱- اندازه‌گیری جریان و چگالی باریکه یونها با استفاده از سیگنال فنجان فارادی

یون‌های گسیل یافته از دستگاه پلاسما کانونی از طریق یک روزنه به قطر $(d_{\text{FC}}=1\text{mm})$ به الکترود داخلی گرافیتی فنجان فارادی برخورد می‌کنند و جریان الکتریکی (I) در مدار فنجان فارادی برقرار می‌گردد. این جریان از طریق یک مقاومت 50Ω اهم به ولتاژ تبدیل شده و این ولتاژ (V_{osc})، توسط اسیلوسکوپ ثبت می‌شود. بنابراین چگالی جریان باریکه یونی (J_b) در دهانه ورودی فنجان فارادی طبق رابطه (۷) قابل محاسبه است.

$$J_b = \frac{I}{A} = \frac{4V_{\text{osc}}}{50 \cdot (\pi d_{\text{FC}}^2)} \quad (7)$$

در شکل (۷)، نمودار چگالی جریان یونی مربوط به گاز هیدروژن به دست آمده از سیگنال فنجان فارادی را نشان می‌دهد. یکی از پارامترهای مهم که می‌توان از این شکل استخراج کرد اختلاف زمانی بین دو پیک ناشی از پرتو ایکس و باریکه یونی است. با توجه به این شکل این مقدار اختلاف زمانی بین این دو پیک برابر با $0.2\mu s$ به دست می‌آید. از این اختلاف زمانی برای به دست آوردن انرژی میانگین یونها که در قسمت بعدی توضیح داده شده است استفاده می‌شود. مطابق این نمودار حداکثر چگالی جریان یونی (پیک دوم) حدود 40 A/cm^2 است.

۳-۲- اندازه‌گیری انرژی میانگین یونها با استفاده از سیگنال فنجان فارادی

برای اندازه‌گیری انرژی میانگین یونها از تکنیک زمان پرواز استفاده می‌شود (۳۰). یون‌های گسیل یافته از ستون پلاسما (در محل سر الکترود آند دستگاه) پس از عبور از روزنه فنجان فارادی اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به شکل (۵)، اختلاف زمانی بین زمان تشکیل پینچ پلاسما (پیک اول در سیگنال

جدول ۲- نتایج حاصل از مشخصه‌یابی باریکه یونی با استفاده از فنجان فارادی

نتایج تجربی	پارامتر
۴۶	انرژی میانگین باریکه یونی (keV)
2.37×10^{24}	شار یونی ($\text{ions.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
1.45×10^{16}	شارش باریکه یونی (ions.m^{-2})
۱۰	جریان باریکه یونی (kA)
$4/5 \times 10^{14}$	تعداد یونها در هر تخلیه

پلاسمای کانونی با انرژی ذخیره شده در محدوده چند کیلوژول تا مگا ژول، در محدوده ده‌ها کیلو الکترون‌ولت تا چندین مگا الکترون‌ولت اندازه‌گیری شده است (جدول ۲).

در مورد فیزیک اندرکنش باریکه پروتون پراثری پلاسمای کانونی با سطح مواد سه مکانیزم را می‌توان مطرح نمود. (الف) انتقال انرژی توسط موج ضربه و باریکه یونی به سطح مواد، افزایش دمای سطح، ذوب شدن و سپس پراکندگی مذاب بر اثر برخورد باریکه پروتون (ب) افزایش دمای سطح مواد و تصعید کندوپاش فیزیکی آن توسط پروتون‌ها. اینکه کدامیک از این مکانیزم‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی غالب هستند به جنس ماده، انرژی پروتون‌ها و میزان تغییر دمای سطح ماده وابسته است. عملکردهای (الف) و (ب) به دمای ذوب و جوش مواد مورد بررسی بستگی دارد. مکانیزم سوم، ضربه فیزیکی حاصل از بمباران پروتون پراثری و کنده‌شدن ذرات ماده می‌باشد که تبخیر فیزیکی یا کندوپاش نامیده می‌شود. این مکانیزم باعث تغییر شکل ظاهری سطح گرافیت می‌شود. در فرآیند کندوپاش وقتی یک پروتون وارد سطح ماده می‌شود، نیروی کولنی بین هسته‌ها باعث انتقال انرژی و پراکندگی هسته‌ها می‌شود. اگر پراکندگی در زاویه 180° درجه رخ دهد بیش‌ترین انتقال انرژی صورت می‌گیرد. بیش‌ترین انرژی منتقل شده به هسته با جرم M مطابق رابطه (۱۲) قابل محاسبه است.

$$E_{\max} = \frac{2E_0(E_0 + 2mc^2)}{Mc^2} \quad (12)$$

به‌دست آورد که I جریان باریکه یونی است که توسط فنجان فارادی به‌دست آمده است (شکل ۷). بنابراین با انتگرال‌گیری از این نمودار، تعداد یون‌های هیدروژن که توسط فنجان فارادی اندازه‌گیری شده است برابر است با 1.45×10^{16} و با توجه به اینکه این تعداد یون از طریق یک روزنه به قطر یک میلی‌متر وارد فنجان فارادی شده است بنابراین مقدار پارامتر شارش باریکه یونی هیدروژن در دهانه ورودی فنجان فارادی با رابطه (۱۰) نمایش داده می‌شود:

$$\text{Fluence} = 1.45 \times 10^{16} \text{ (ions.m}^{-2}\text{)} \quad (10)$$

با توجه به نمودار مشتق جریان تخلیه (شکل ۵) که مدت زمان تشکیل پینچ (τ) و گسیل یون‌ها به‌طور میانگین در طی ده تخلیه الکتریکی مقدار $6/11$ نانوثانیه است بنابراین می‌توان پارامتر شار یونی باریکه هیدروژن را با رابطه (۱۱) محاسبه کرد:

$$\text{Flux} = \text{Fluence} / \tau = 2.37 \times 10^{24} \text{ (ions.m}^{-2}.\text{s}^{-1}\text{)} \quad (11)$$

مکانیزم شتاب‌گیری یون‌ها در دستگاه پلاسمای کانونی به این صورت است که در اثر تخلیه بانک خازنی بر روی آند و ایجاد اختلاف پتانسیل مابین کاتد و آند، گاز داخل محفظه دستگاه پلاسمای کانونی دچار شکست الکتریکی می‌شود و رشته‌های جریان بین آند و کاتدها برقرار می‌شوند. این لایه جریان در اثر نیروی مغناطیسی لورنتس به سمت انتهای آند حرکت می‌کند و زمانی که به بالای آند می‌رسد، توسط این نیرو رشته‌های جریان هم جهت، به سمت محور مرکزی آند جمع می‌شوند و تشکیل ستون پلاسمای فشرده را می‌دهند. این ستون پلاسمای فشرده دارای چگالی بسیار بالا، دمای خیلی زیاد و عمر بسیار کوتاه بوده و ناپایدار است. در اثر ناپایداری $m=0$ ستون پلاسمای فروپاشی می‌کند و الکترون‌های به دام افتاده در فضای پینچ با انرژی‌های زیاد به سطح آند برخورد کرده و باعث تولید اپرتو ایکس سخت و همچنین موجب بخار ذرات در قسمت بالای آند می‌شوند (۳-۱، ۶، ۸ و ۱۰). پس از فروپاشی پلاسمای یون‌ها نیز با انرژی‌های نسبتاً زیاد به سمت مخالف الکترون‌ها گسیل می‌شوند. گستره انرژی باریکه یونی تولید شده در دستگاه

که قبلاً ذکر شد، نمونه‌های گرافیت با استفاده از تغییر در تعداد تخلیه‌ها (یک، ده و بیست تخلیه) تحت تابش یون‌های هلیوم با فلورنس‌های مختلف قرار گرفتند. سطح صاف و صیقلی گرافیت پس از تابش‌دهی در تخلیه‌های مختلف، به یک سطح کدر و مخدوش تبدیل شد، به گونه‌ای که تغییرات ایجاد شده در سطح گرافیت با چشم غیرمسلح نیز قابل مشاهده بود.

از تصاویر میکروسکوپی الکترونی با بزرگ‌نمایی یکسان برای مقایسه سطح نمونه‌های تابش‌دهی شده و نمونه مرجع استفاده شد. تصویر (۸-الف) سطح نمونه خام گرافیت را نشان می‌دهد که سطحی کاملاً صاف و بدون حفره و ترک دارد. تصویر (۸-ب) سطح نمونه گرافیت تابش‌دهی شده در یک تخلیه را نشان می‌دهد که در سطح آن ترک (I) و خلل و فرج‌هایی دیده می‌شود. می‌توان گفت اندازه آن‌ها تقریباً کم‌تر از دو میکرومتر است. این خلل و فرج‌ها در اثر کندوپاش اتم‌های کربن از سطح گرافیت ایجاد شده است (II)، تصویر (۸-ج) نمونه گرافیت تابش‌دهی شده پس از ده تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهد. در این تصویر علاوه بر ترک‌های وسیع در سطح، نواحی دیده می‌شود که سطح دچار کندوپاش فیزیکی شده است و در روی سطح حفره‌هایی به عرض ده میکرومتر به وجود آمده است و داخل حفره‌ها نیز ترک‌هایی ایجاد شده است (II). شکل (۸-د) مربوط به نمونه‌ای است که با بیست تخلیه الکتریکی مورد تابش قرار گرفته است در تصویر منطقه‌ای مشاهده می‌شود که تیره‌تر از بقیه مناطق بوده، نشان‌دهنده ناحیه از سطح گرافیت است که در اثر برخورد پروتون‌های پراثری دچار کندوپاش و ذوب شدگی شده است (III)، با استناد به این تصاویر می‌توان گفت با افزایش تعداد تخلیه‌ها اندازه حفره‌ها و ترک‌ها ایجاد شده در سطح گرافیت افزایش پیدا کرده و ذوب‌شدگی نیز در سطح نمونه اتفاق افتاده است.

۳-۵- نتایج پراش پرتو ایکس

در این تحقیق از آنالیز پراش پرتو ایکس برای بررسی خواص ساختاری نمونه‌های گرافیت استفاده شد. این خواص شامل

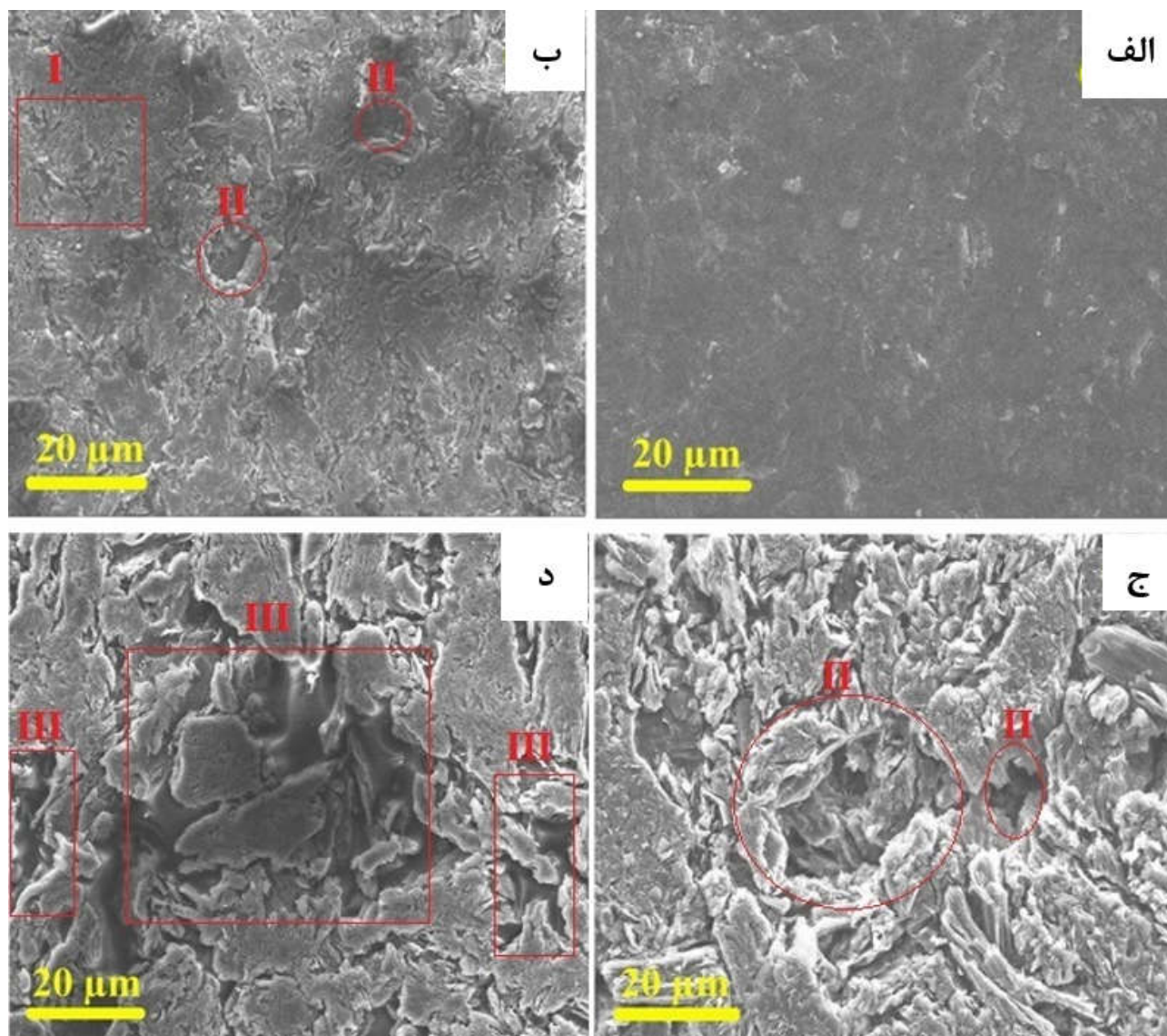
که در رابطه (۱۲) E_0 انرژی پروتون و mc^2 انرژی معادل جرم حالت سکون پروتون است. با افزایش انرژی پروتون و کاهش جرم هسته هدف، E_{max} افزایش می‌یابد. اگر E_{max} از انرژی جابجایی شبکه هدف E_d و یا E_d بزرگ‌تر باشد، پراکندگی در زاویه‌های بزرگ می‌تواند هسته را کاملاً جابجا کند و یا حتی آن را به بیرون از ماده پرتاب کند. کم‌ترین مقدار E_0 که می‌تواند منجر به E_{max} ای معادل با E_d شود، انرژی آستانه کندوپاش نامیده می‌شود. مقدار انرژی آستانه کندوپاش برای مواد با جرم اتمی بزرگ‌تر از ۱۲ با دقت بسیار بالا توسط رابطه (۱۳) که در مرجع (۳۱) ارائه شده است قابل محاسبه است.

$$E_{min}^0 = 511(\text{keV}) \left\{ \left[1 + \frac{A \cdot E_d}{561 \text{eV}} \right]^2 - 1 \right\} \quad (13)$$

با افزایش عدد جرمی و E_d انرژی آستانه کندوپاش افزایش می‌یابد. E_d از مشخصه‌های فیزیکی یک ماده است که در مرجع (۳۲) اطلاعات کاملی در این زمینه موجود است.

۳-۴- تصاویر میکروسکوپی الکترونی

در این تحقیق، نمونه‌های گرافیت با ابعاد $2 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ پس از صیقل‌دهی و تمیز کردن سطح آن‌ها با استفاده از استون و آب مقطر، بر روی سطح داخلی درب محفظه دستگاه پلاسمای کانونی نصب شدند. این نمونه‌ها در فاصله شش سانتی‌متری از آند و در زاویه صفر درجه نسبت به آند قرار گرفتند و تحت تابش ۱، ۱۰، و ۲۰ تخلیه الکتریکی با گاز هیدروژن قرار گرفتند. برای مشاهده تخریب‌های ایجاد شده در سطح نمونه‌های گرافیت پس از تابش‌دهی با یون‌های هیدروژن، تصویربرداری از سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی انجام شد. تغییرات ساختاری نیز با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Philips X'pert مورد بررسی قرار گرفت. این روش‌های تحلیلی به ما امکان داد تا تغییرات در سطح و ساختار گرافیت را به‌دقت مورد بررسی قرار دهیم و تأثیرات تابش هیدروژن بر این ماده را شناسایی کنیم. همان‌طور



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌های مرجع و تابش‌دهی شده با هیدروژن گرافیت:

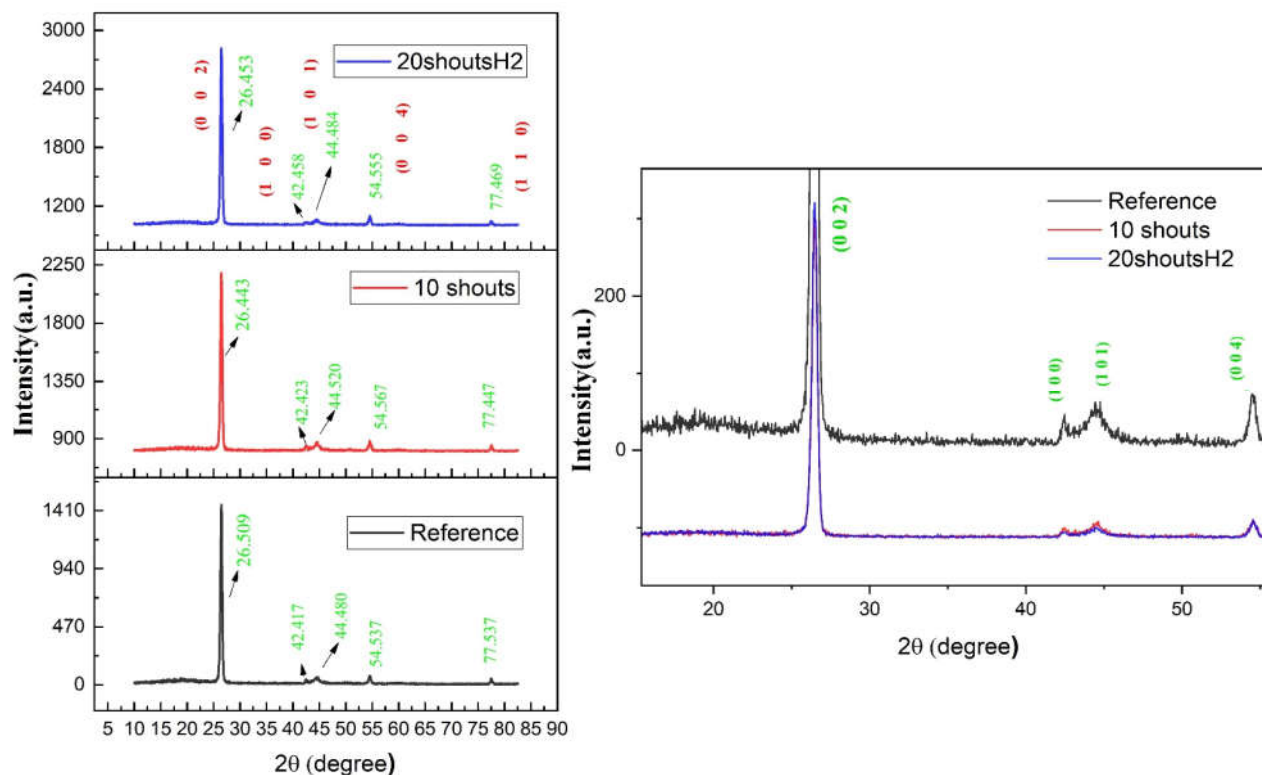
الف) مرجع، ب) یک تخلیه، ج) ده تخلیه و د) بیست تخلیه.

مربوط است. این پیک‌ها نشان‌دهنده ساختار شبکه‌ای شش وجهی گرافیت هستند. پس از تابش‌دهی نمونه‌های گرافیت پس از ده و بیست تخلیه توسط یون‌های هیدروژن، تغییراتی در مکان و شدت پیک‌ها نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد. این تغییرات نشان‌دهنده تغییراتی در ساختار گرافیت به دلیل تابش یون‌های هیدروژن است. اطلاعات مربوط به مکان در شکل (۹) نشان داده شده است.

در نمونه‌ای که با بیست تخلیه الکتریکی با گاز کاری

پارامترهای شبکه، اندازه و شکل دانه، کرنش، ترکیب فاز و تنش داخلی مناطق کریستالی کوچک است. طیف‌های پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های گرافیت تابش‌دهی شده پس از ده و بیست تخلیه الکتریکی با گاز کاری هیدروژن و همچنین برای نمونه‌های گرافیت تابش‌دهی نشده در شکل (۹) نشان داده شده است.

در طیف مربوط به نمونه مرجع گرافیت، پنج پیک مشاهده می‌شود که به صفحات (۰۰۲)، (۱۰۰)، (۱۰۱)، (۰۰۴) و (۱۱۰)



شکل ۹- طیف پرتو ایکس پراش نمونه‌های گرافیت مرجع و تابش دهی شده با پروتون‌های پر انرژی در تخلیه‌های مختلف.

صفحات می‌شود. همان‌طور که در طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های تابش دهی شده مشاهده می‌شود، ارتفاع پیک در نمونه تابش دهی شده با ده تخلیه الکتریکی به میزان کمی کاهش یافته است، درحالی‌که در نمونه تابش دهی شده با بیست تخلیه هیدروژن شدت پیک افزایش یافته است. این افزایش شدت پیک می‌تواند ناشی از افزایش بلورینگی سطح در اثر افزایش دمای سطح و ذوب و سرد شدن سریع سطح در اثر برخورد یون‌های هیدروژن باشد. دمای سطح بسیار بالا در فاصله شش سانتی متری از آند نشان‌دهنده آنیلینگ موقتی شدید لایه سطحی است که منجر به افزایش بلورینگی سطح نمونه می‌شود.

علاوه بر این، تغییرات در مکان پیک‌ها و افزایش اندازه دانه‌های کریستالی در نمونه‌های تابش یافته نشان می‌دهد که تابش یون‌های هیدروژن باعث ایجاد تغییرات ساختاری قابل توجهی در گرافیت شده است. این تغییرات ممکن است ناشی از بازآرایی اتمی و کاهش نقص‌های ساختاری در اثر آنیلینگ

هیدروژن مورد تابش قرار گرفته است، مکان پیک صفحه (۰۰۲) که بیش‌ترین شدت را دارد، به میزان ۰/۰۵۶ درجه به سمت زوایای کوچک‌تر جابجا شده است. در نمونه تابش دهی شده با ده تخلیه، مکان پیک صفحه (۰۰۲) به میزان ۰/۰۶۶ درجه نسبت به نمونه مرجع به سمت زوایای کوچک‌تر جابجا شده است. این تغییر مکان پیک‌ها به دلیل تنش/کرنش^{۱۶} ایجاد شده در نمونه‌ها به واسطه انتقال حرارت بسیار زیاد به نمونه‌ها در زمان تابش یون‌های هیدروژن است. به‌طور کلی، منابع رایج کرنش شامل جابجایی‌ها، نقص‌های انباشتی، میکروتنش‌ها، تنش‌های داخلی بلندمدت، مرزدانه‌ها، نقص‌های نقطه‌ای و غیره هستند. در اینجا، تنش داخلی ناشی از تنش حرارتی در حین سرمایش سریع و تغییر حجم در سطح نمونه، عامل اصلی جابجایی پیک‌ها در الگوی پراش پرتو ایکس است. همچنین، تابش یون‌های هیدروژن باعث ایجاد تنش کششی^{۱۷} شده است که منجر به جابجایی پیک‌ها به زوایای پایین‌تر و افزایش فاصله

حرارتی موقتی باشد. این نتایج نشان می‌دهند که تابش یون‌های هیدروژن در تخلیه‌های بالا می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های داخلی در گرافیت شود (۲۳ و ۲۵) اندازه دانه‌های کریستال‌های مربوط به پیک صفحه (۰۰۲) با استفاده از معادله (۱۴) محاسبه شد. برای نمونه مرجع و نمونه تابش‌دهی شده پس از ده تخلیه هیدروژن، اندازه دانه‌ها ۲۰/۷ نانومتر و برای نمونه تابش‌دهی شده با بیست تخلیه الکتریکی هیدروژن ۲۳/۱ نانومتر برآورد شد. این نتایج نشان می‌دهد که تابش یون‌های هیدروژن در بیست تخلیه، اندازه دانه‌های کریستالی افزایش یافته است. این افزایش اندازه دانه‌ها می‌تواند نتیجه رشد بلوری ناشی از آنیلینگ حرارتی سطح در اثر تابش یون‌های هیدروژن باشد.

یکی از نتایج مهم این پژوهش، تحلیل طیف پراش پرتو ایکس بود. پیک اصلی مربوط به صفحه (۰۰۲) در نمونه‌های گرافیت مرجع در زاویه ۲۶/۵۰۹ درجه مشاهده شد، در حالی که در نمونه‌های تابش‌یافته با ده و بیست تخلیه، این پیک به ترتیب به زوایای ۲۶/۴۴۳ و ۲۶/۴۵۳ درجه جابجا شده بود. این تغییرات به دلیل تنش‌های داخلی ایجاد شده در اثر تابش یون‌ها و تغییرات در فاصله بین صفحات بلوری گرافیت رخ داده است. شدت پیک‌ها نیز تغییراتی را نشان داد؛ به طوری که در نمونه‌های تابش‌یافته با بیست تخلیه، شدت پیک (۰۰۲) نسبت به نمونه مرجع افزایش یافت که به دلیل افزایش بلورینگی سطح گرافیت ناشی از اثرات آنیلینگ حرارتی موقتی در طول فرآیند تابش بود. اندازه بلورک‌های گرافیت با استفاده از رابطه دبای-شرر محاسبه شد. اندازه بلورک‌ها در نمونه مرجع ۲۰/۷ نانومتر و در نمونه‌های تابش‌یافته با ده و بیست تخلیه به ترتیب ۲۳/۱ و ۲۵/۴ نانومتر بود. این افزایش در اندازه بلورک‌ها می‌تواند ناشی از بازآرایی ساختاری در اثر تابش یون‌ها و افزایش دمای سطحی ناشی از برخورد‌های مکرر باشد. همچنین، فاصله صفحات بلوری نیز در اثر تابش تغییر یافت؛ به طوری که در نمونه تابش‌یافته با بیست تخلیه، فاصله صفحات به $3/369 \text{ \AA}$ افزایش یافت که نشان‌دهنده ایجاد تنش کششی در ساختار گرافیت است. از نظر مشخصه‌های باریکه یونی، نتایج به دست آمده از

در تحلیل اندازه بلورک‌ها با استفاده از معادله دبای-شرر رابطه (۱۴)، که در آن D اندازه دانه، λ طول موج پرتو ایکس، $\beta_{2\theta}$ عرض در نیمه بیشینه (FWHM) پیک پراش، و θ زاویه براگ است، افزایش اندازه بلورک‌ها در نمونه‌های تابش‌یافته می‌تواند به دلیل بمباران پی‌درپی پالس‌های یونی بر سطح ماده باشد. این بمباران به نانو ساختارها انرژی کافی می‌دهد تا تحرک بیشتری پیدا کنند و ساختارهای بزرگ‌تری تشکیل شوند. این فرآیند منجر به افزایش قابل توجه اندازه بلورک‌ها می‌شود که در طیف پراش پرتو ایکس نمونه‌های تحت تابش در بیست تخلیه مشاهده می‌گردد.

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta_{2\theta} \cdot \cos \theta} \quad (14)$$

این پژوهش به بررسی اثرات تابش یون‌های پرانرژی هیدروژن، تولید شده توسط دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2 با ظرفیت خازنی $13/5 \mu\text{F}$ و ولتاژ کاری ۱۲-۱۶ kV، بر روی خواص سطحی و ساختاری گرافیت پرداخت. نمونه‌های گرافیت تحت تابش‌های مختلف با یک، ده، و بیست تخلیه هیدروژن قرار گرفتند و تغییرات ایجاد شده در ساختار آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز پراش پرتو ایکس مورد

۴- نتیجه‌گیری

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۴۳، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳

نتایج این تحقیق نشان داد که گرافیت به‌عنوان یکی از مواد مهم در دیواره‌های توکامک، تحت تابش یون‌های پرانرژی دچار تغییرات ساختاری و سطحی قابل توجهی می‌شود که نیازمند تحقیقات بیش‌تر برای بهینه‌سازی آن برای استفاده در راکتورهای همجوشی آینده است. در نهایت، پژوهش حاضر به درک بهتری از رفتار گرافیت تحت تابش یون‌های هیدروژن کمک کرد و نشان داد که دستگاه پلاسمای کانونی می‌تواند به‌طور مؤثر برای آزمایش مواد مواجه با پلاسما و بررسی تخریب‌های ناشی از تابش‌های پلاسما در شرایط شبیه‌سازی شده استفاده شود.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای به دلیل فراهم آوردن امکانات لازم جهت انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

فنجان فارادی نشان داد که انرژی میانگین یون‌های هیدروژن حدود ۴۶ کیلو الکترون ولت بوده و چگالی جریان باریکه یونی در دهانه ورودی فنجان فارادی 40 A/cm^2 بود. شار یونی محاسبه شده در این آزمایش‌ها برابر با $2/37 \times 10^{24} \text{ ions/m}^2 \cdot \text{s}^1$ بود. تعداد یون‌های تولید شده در هر تخلیه بیش‌تر از 10^{14} محاسبه شد که نشان‌دهنده تولید باریکه یونی با چگالی بالا و انرژی قابل توجهی است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان داد که با افزایش تعداد تخلیه‌ها، حفره‌ها و ترک‌های بیش‌تری در سطح گرافیت ایجاد می‌شود و ذوب‌شدگی‌های بیش‌تری مشاهده می‌گردد. این تغییرات به وضوح نشان می‌دهند که تابش یون‌های پرانرژی به‌طور مستقیم بر ساختار سطح گرافیت تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش تخریب سطح می‌شود. در نمونه‌هایی که تحت تابش بیست تخلیه قرار گرفتند، مناطقی با ذوب‌شدگی عمیق‌تر و گسترده‌تر دیده شد که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه دما در سطح این نمونه‌ها است. این مطالعه اهمیت دستگاه پلاسمای کانونی را به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی شرایط پلاسمایی در توکامک‌های نسل آینده تأیید می‌کند. بار حرارتی و تابشی بالای این دستگاه که در محدوده 10^8 MW/m^2 است، امکان بررسی دقیق اندرکنش بین پلاسما و مواد مواجه با پلاسما را فراهم می‌کند.

واژه‌نامه

- | | |
|---|--|
| 1. plasma facing materials | 10. sputtering |
| 2. edge-localized mode (ELM) | 11. scanning tunneling microscope (STM) |
| 3. vertical displacement events | 12. transmission electron microscopy (TEM) |
| 4. disruption | 13. scanning electron microscopy (SEM) |
| 5. multicharged ion research facility (MIRF) | 14. X-ray diffraction (XRD) |
| 6. inertial electrostatic confinement fusion device | 15. displacement energy |
| 7. high flux ion beam device | 16. stress/strain |
| 8. compact electron cyclotron resonance (ECR) | 17. tensile stress |
| 9. plasma focus device (DPF) | |

مراجع

- | | |
|---|---|
| 1. Seyyedhabashy M, Tafreshi MA, Shafiei S, Nasiri A. Damage studies on irradiated tungsten by helium ions in a plasma focus device. Nucl Eng Technol. 2020; 52(4):827-834. https://doi.org/10.1016/j.net.2019.10.003 | 2. Seyyedhabashi MR, Tafreshi MA, Shafiei S, Abdisaray A. Damage study of irradiated tungsten and copper using proton and argon ions of a plasma focus device. Appl Radiat Isot. 2019;154:108875. |
|---|---|

- <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108875>
3. Seyedhabashi M, Shafiei S, Tafreshi M, Bidabadi BS. Study of surface damage and hydrogen distribution in irradiated tungsten by protons in plasma focus device. *Vacuum*. 2020;175:109249. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109249>
 4. Asgarian MA, Seyedhabashi MMR, Bidabadi BS, Rasouli C, Sedighi F. Radiation damage of tungsten surface irradiated with high-energy hydrogen and helium beams of plasma focus device. *Fusion Eng Des*. 2020; 160: 112007. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112007>
 5. Sedighi F, Kouhi A, Iraj D, Rasouli C, Bidabadi BS, Seyedhabashi MM, Rasouli H. Damage study and comparison of the effects of high-energy pulsed protons of plasma focus device with low-energy protons of glow discharge plasma of tokamak. *Plasma Res Express*. 2020;2(3):035001. <https://doi.org/10.1088/2516-1067/ab9d72>
 6. Seyedhabashi MMR, Asgarian MA, Rasouli C, Sedighi F. Radiation damage of graphite surface, used in first-wall and divertor of tokamaks, irradiated by hydrogen and argon in plasma focus device. *IEEE Trans Plasma Sci*. 2022;50(6):1814-1822. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3167836>
 7. Sedighi F, Rasouli C, Iraj D, Kouhi A, Rafi-Kheiri H, Rasouli H, Seyedhabashi M. Investigation of hydrogen glow discharge cleaning side effects on tungsten. *Plasma Phys Rep*. 2021;47:128-138. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21020057>
 8. Seyedhabashi MM, Bidabadi BS, Tafreshi MA, Sedighi F, Nasiri A. Damage studies on irradiated tungsten by helium and argon ions in a plasma focus device. *J Radiat Saf Meas*. 2020; 9(5): 1-12. <https://doi.org/10.22052/8.5.1>
 9. Chamani A, Abtahi SMM, Tafreshi MAH, Seyedhabashi MMR. The comparison of the destructive effects of high-energy protons produced in a plasma focus device on copper and molybdenum. *Iran J Radiat Saf Meas*. 2021;10(3):19-30. <https://doi.org/10.22052/9.3.19>
 10. Seyedhabashi M, Ebrahimi M, Rostamifard D, Goudarzi S, Noori E, Nasiri A. Experimental investigation and simulation of penetration depth of nitrogen ions emitted by plasma focus device inside titanium samples. *Results Phys*. 2023;52:106897. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106897>
 11. Tafreshi M, Habashi M, Bidabadi B, Abdisaray A, Shafiei S, Nasiri A. Investigating the effects of high-energy pulsed protons on the surface and structural properties of copper and tungsten by MTPF-2 plasma focus device. *J Nucl Sci Eng Technol*. 2020;41(2): 100-109. <https://doi.org/10.24200/nst.2020.1122>
 12. SeyedHabashi M. Comparison of the effect of high-energy proton pulse radiation produced in a plasma focus device on hard metals. *J Nucl Sci Eng Technol*. 2024;45(3):103-111. <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1594>
 13. Sedighi F, Rasouli C, Iraj D, Kouhi A, Kheiri H, Rasouli H, Seyedhabashi M. Исследование побочных явлений, возникающих при очищении поверхности вольфрама с помощью тлеющего разряда в водороде. *Физика плазмы*. 2021;47(4): 357-370. <https://doi.org/10.31857/S0367292121030100>
 14. Meyer FW, Krstic PS, Hijazi H, Bannister ME, Dadras J, Parish CM, Meyer H. Surface-morphology changes and damage in hot tungsten by impact of 80 eV–12 keV He-ions and keV-energy self-atoms. *J Phys: Conf Ser*. 2014;012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/488/1/012036>
 15. Cipiti B, Kulcinski G. Helium and deuterium implantation in tungsten at elevated temperatures. *J Nucl Mater*. 2005;347(3):298-306. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2005.08.009>
 16. Ueda Y, Kikuchi H, Shimada T, Sagara A, Kyoh B, Nishikawa M. Production of high-flux mixed ion beam for study of plasma material interaction. *Fusion Eng Des*. 2002;61:255-261. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(02\)00169-2](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(02)00169-2)
 17. Donovan D, Buchenauer D, Whaley J, Friddle R. Characterization of a compact ECR plasma source and its applications to studies of helium ion damage to tungsten. *Phys Scr*. 2016;014040. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014040>
 18. Matějček J, Weinzettl V, Mackova A, Malinský P, Havránek V, Naydenkova D, et al. Interaction of candidate plasma-facing materials with tokamak plasma in COMPASS. *J Nucl Mater*. 2017;493:102-119. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.06.009>
 19. Habenicht S. Morphology of graphite surfaces after ion-beam erosion. *Phys Rev B*. 2001;63(12):125419. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.125419>
 20. Coratger R, Claverie A, Chahboun A, Landry V, Ajustron F, Beauvillain J. Effects of ion mass and energy on the damage induced by an ion beam on graphite surfaces: a scanning tunneling microscopy study. *Surf Sci*. 1992;262(1-2):208-218. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(92\)90472-I](https://doi.org/10.1016/0039-6028(92)90472-I)
 21. Saw S, Damideh V, Ali J, Rawat R, Lee P, Lee S. Damage study of irradiated tungsten using fast focus mode of a 2.2 kJ plasma focus. *Vacuum*. 2017; 144: 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.002>
 22. Dutta N, Buzarbaruah N, Mohanty S. Damage studies on tungsten due to helium ion irradiation. *J Nucl Mater*. 2014;452(1-3):51-56. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.04.032>
 23. Niranjan R, Rout R, Srivastava R, Chakravarthy Y, Mishra P, Kaushik T, et al. Surface modifications of fusion reactor relevant materials on exposure to fusion grade plasma in plasma focus device. *Appl Surf Sci*. 2015;355:989-998. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.192>
 24. Gribkov V, Banaszak A, Bienkowska B, Dubrovsky A, Ivanova-Stanik I, Jakubowski L, et al. Plasma dynamics

- in the PF-1000 device under full-scale energy storage: II. Fast electron and ion characteristics versus neutron emission parameters and gun optimization perspectives. *J Phys D: Appl Phys.* 2007;40(12):3592. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/12/008>
25. Al-Hawat S, Soukieh M, Abou Kharoub M, Al-Sadat W. Using Mather-type plasma focus device for surface modification of AISI304 Steel. *Vacuum.* 2010;84(7): 907-912. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.10.017>
26. Javadi S, Ghoranneviss M, Rawat R, Elahi AS. Topographical, structural and hardness changes in surface layer of stainless steel-AISI 304 irradiated by fusion-relevant high energy deuterium ions and neutrons in a low energy plasma focus device. *Surf Coat Technol.* 2017;313:73-81. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.054>
27. Pestehe S, Mohammadnejad M, Irani Mobaraki S. Dynamic Faraday cup signal analysis and the measurement of energetic ions emitted by plasma focus. *Phys Plasmas.* 2014;21(3). <https://doi.org/10.1063/1.4867175>
28. Damideh V, Ali J, Saw SH, Rawat RS, Lee P, Chaudhary KT, et al. Fast Faraday cup for fast ion beam TOF measurements in deuterium filled plasma focus device and correlation with Lee model. *Phys Plasmas.* 2017;24(6). <https://doi.org/10.1063/1.4985309>
29. Bhuyan H, Chuaqui H, Favre M, Mitchell I, Wyndham E. Ion beam emission in a low energy plasma focus device operating with methane. *J Phys D Appl Phys.* 2005;38(8):1164. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/8/011>
30. Gerdin G, Stygar W, Venneri F. Faraday cup analysis of ion beams produced by a dense plasma focus. *J Appl Phys.* 1981;52(5):3269-3275. <https://doi.org/10.1063/1.329145>
31. Egerton R, McLeod R, Wang F, Malac M. Basic questions related to electron-induced sputtering in the TEM. *Ultramicroscopy.* 2010;110(8):991-997. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2009.11.003>
32. Kudriavtsev Y, Villegas A, Godines A, Asomoza R. Calculation of the surface binding energy for ion sputtered particles. *Appl Surf Sci.* 2005;239(3-4): 273-278. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.06.014>
33. Chamani A, Abtahi SMM. The Investigation of the Destructive Effects of Hydrogen and Argon Ions produced in The Plasma Focus Device on Graphite. *J Res Many Body Syst.* 2021;11(30):1-12. <https://doi.org/10.22055/jrmbms.2021.17019>