



## بررسی اثرات تخریبی تابش پروتون‌های پرانرژی تولیدشده در دستگاه پلاسمای کانونی بر روی گرافیت

سید حبشی، سید محمدرضا<sup>(۱)</sup> صدیقی، فریدالدین<sup>(۱)</sup> جانبازی، مهدی<sup>(۲)</sup> \* بیگ زاده، امیرمحمد<sup>(۲)</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای

<sup>۲</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

Email: mehdijanbazi@yahoo.com

### چکیده:

در این تحقیق اثرات یون‌های پرانرژی هیدروژن تولیدشده در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر  $MTPF-2$  در شات‌های مختلف بر روی خواص سطحی و ساختاری گرافیت بررسی شد. تغییرات ایجاد شده در سطح نمونه‌های تحت تابش قرار گرفته به وضوح در تصاویر  $SEM$  دیده شد. در تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های تابش‌دهی شده، کند و پاش‌های موضع‌ای، خلل و فرج و ذوب شدگی دیده می‌شود. از آنالیز  $XRD$  برای بررسی تغییرات ایجادشده در ساختار گرافیت استفاده شد. در طیف پراش اشعه ایکس نمونه‌های تابش‌دهی شده جابه‌جایی در مکان پیک‌ها و تغییر شدت پیک‌ها در نمونه‌های تابش‌دهی شده نسبت به طیف  $XRD$  نمونه مرجع مشاهده شد.

**کلمات کلیدی:** پلاسمای کانونی، تخریب تابشی، پروتون، گرافیت، آنالیز مواد

### مقدمه:

گرافیت به عنوان یکی از PFM به طور گسترده در ساخت توکامک‌های بزرگی همچون TFTR، JET استفاده شده است [۱]. از گرافیت به دلیل عدد اتمی پایین، هدایت گرمایی بالا، در ساخت راکتورهای شکافت نیز استفاده شده است و یکی از مواد پیشنهادی در ساخت توکامک‌های آینده است [۲]. اندرکنش پلاسما با مواد مواجهه با پلاسمایکی از کلیدی‌ترین مسائل در ساخت دستگاه‌های هم‌جوشی هسته‌ای است. اهمیت این مسئله هم از نظر کنترل پلاسما در زمان تخلیه و هم از نظر عمر مفید مواد مواجهه با پلاسماها می‌باشد. انواع اندرکنش پلاسما با PFM به چند گروه تقسیم می‌شود

۱- فرسایش مواد در اثر برخورد پلاسمای لبه با دیواره و لایه نشانی دوباره مواد دیواره اول

۲- ایجاد آلودگی‌ها و انتقال این آلودگی‌ها به داخل پلاسما



- ۳- کاشته شدند یون‌های پلاسما در درون PFM و ، و به دنبال آن پخش در درون مواد
- ۴- تغییرات خواص ساختار، شیمیایی، مکانیکی و گرمایی PFM.
- ۵- گرمایش و یا (احتمالاً ذوب شدگی و یا تبخیر) ایجاد ترک و سایر انواع تخریب در PFM
- این فرآیندها اغلب در فرآیندهای غیرعادی که موجب ازهم‌پاشیدگی و ناپایداری پلاسما می‌شود، اتفاق می‌افتد که فرآیندهای مانند  $ELMS^3$  و ازهم‌گسیختگی پلاسما از هم‌گسیختگی<sup>۴</sup> از جمله فرآیندهای هستند که در زمان اتفاق افتاد نشان شار ذرات و گرمای تحمیلی بر روی PFM افزایش می‌یابد.
- دستگاه پلاسما کانونی یکی از دستگاه همجوشی هسته که به صورت پالسی کار می‌کند، این دستگاه منبع تولید اشعه ایکس سخت و نرم، نوترون‌های سریع (در صورت استفاده از گاز دوتریم)، الکترون‌های نسبیتی و یون‌های پرانرژی در محدوده انرژی چندین کیلو الکترون‌ولت تا چند مگا الکترون‌ولت است، دستگاه پلاسما کانونی می‌تواند شرایط مشابه به ناپایداری ELMS که در راکتورهای همجوشی کانونی اتفاق می‌افتد را شبیه‌سازی کند. ناپایداری ELMS در راکتورهای همجوشی آینده یکی از عوامل مهم تخریب دیواره توکامک می‌باشد، مدت‌زمان برخورد یون‌های پرانرژی در هنگام ناپایداری ELMS در حدود میکروثانیه و میلی‌ثانیه هست. زمانی که ناپایداری ELMS اتفاق می‌افتد، پلاسما توکامک (یون‌ها و الکترون‌ها) از حالت محصورشدگی توسط خطوط میدان مغناطیسی در می‌آیند و با برخورد به دیواره اول توکامک باعث تخریب دیواره اول آن می‌شود. برخورد یون‌های پرانرژی با سطح دیواره باعث کندوپاش ذرات از سطح دیواره و ورود ناخالصی به داخل پلاسما می‌شود، یون‌های پرانرژی با برخورد به سطح دیواره در داخل ماده سازنده دیواره اول کاشته می‌شود. تغییرات ایجاد شده در خاص سطحی و ساختاری دیواره اول در نتیجه برخورد یون‌های پرانرژی موجب افزایش ناخالصی درون پلاسما و کاهش دمای پلاسما و سایر مشکلات مربوط به تجهیزات خلأ در توکامک‌ها می‌شود. از این رو لازم است که مواد پیشنهادی برای ساخت توکامک‌ها در شرایط مشابه شرایطی که در آن دچار تخریب می‌شوند قرار گیرند تا اینکه اثرات این تخریب‌ها به طور کامل بر روی خواص سطحی و ساختار این مواد مشخص گردد و قبل از ساخت دیواره توکامک عمر مفید این مواد تعیین گردد [۳، ۴].

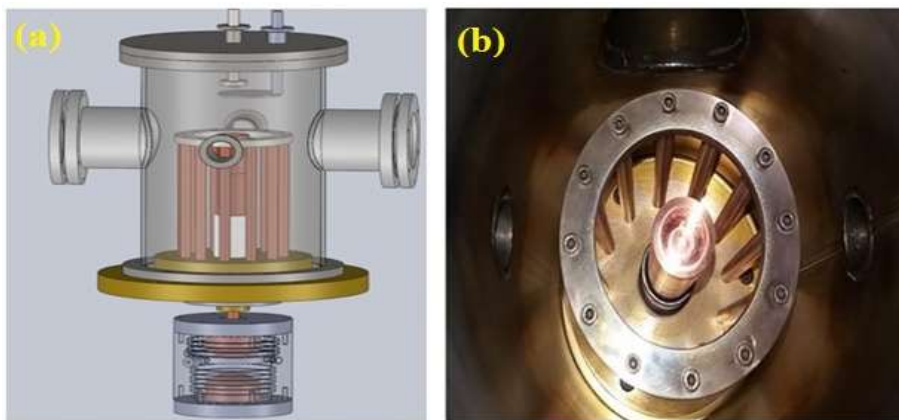
<sup>۳</sup>Edge-localized mode

<sup>۴</sup>disruption

## روش کار :

### • چیدمان آزمایش

دستگاه پلاسمای کانونی ۲,۷ کیلوژول MTPF-2 از نوع مدر با بانک خازنی به ظرفیت ۱۳,۵ میکروفاراد، حداکثر ولتاژ شارژ ۲۰ kV، اندوکتانس ۱۵۸ nH به عنوان منبع تولید پروتون‌های پرانرژی برای پرتودهی نمونه‌های گرافیت مورد استفاده قرار گرفت. ساختار الکترودهای این دستگاه پلاسمای کانونی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. (a) شماتیک ساختار دستگاه پلاسمای کانونی (b) نمایی از آرایش آند و کاتدها در دستگاه پلاسمای

### کانونی MTPF-2

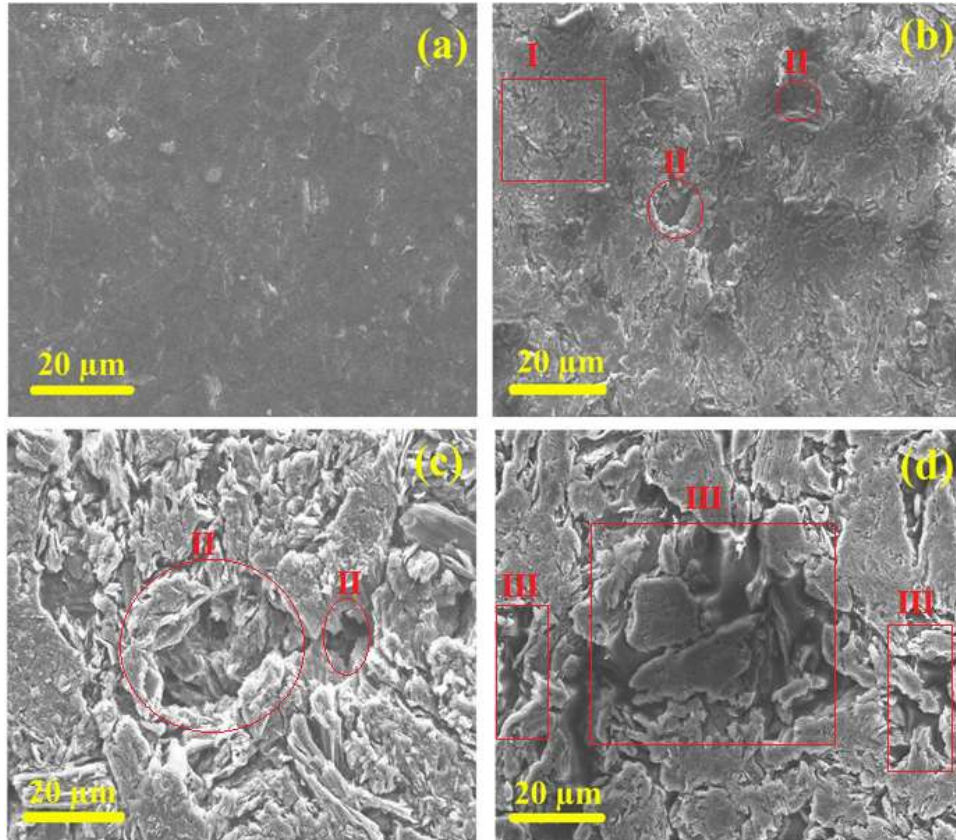
طول آند و کاتد ۱۴۵ میلی‌متر، شعاع آند ۵,۱۴ mm، شعاع کاتد ۵,۴۱ mm، طول مؤثر آند ۹۵ mm، طول عایق ۵۰ mm و تعداد ۱۲ عدد کاتد به صورت متقارن در اطراف آند قرار گرفته‌اند. در نوک آند یک حفره به شعاع ۱۰ mm و عمق ۱۰ mm به منظور کاهش مقدار بخار مس ایجاد شده است. فشار محفظه تا ۳-۱۰ mbar پایین آورده شد و سپس گاز هیدروژن در فشار ۱ mbar به محفظه تزریق شد. نمونه‌های گرافیت در شات (۲۰، ۱۰، ۱) تحت تابش پروتون‌های پرانرژی قرار گرفتند. سپس بار دیگر نمونه‌های گرافیت با یون‌های آرگون مورد تابش قرار گرفتند. از پیچ‌های روگوفسکی برای ثبت سیگنال جریان تخلیه استفاده شد. ابتدا برای دستیابی به محدوده‌ی مناسب فشار گاز هیدروژن در فشارهای مختلف گاز هیدروژن همچنین ولتاژهای کاری ۱۰ الی ۱۳ kV تخلیه‌های مختلفی انجام شد و نتایج نشان داد که ولتاژ شارژ خازن و فشار مناسب گاز هیدروژن برای دستیابی به شرایط بهینه و پینچ‌های متوالی با عمق پیچ خوب به ترتیب ۱ mbar و ۷ mbar در ولتاژ ۱۳ kV است.



مکانیزم شتاب گیری 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 لورنتس به سمت انتهای آند حرکت می‌کند و زمانی که به بالای سر آند می‌رسد، توسط نیروی بین رشته‌های جریان هم‌جهت، به سمت محور مرکزی آند جمع می‌شوند و تشکیل پینچ می‌دهند. پینچ تشکیل شده دارای چگالی بسیار بالا، دمای خیلی زیاد و عمر بسیار کوتاه بوده و ناپایدار است. در اثر ناپایداری  $m=0$  پینچ فروپاشی می‌کند و الکترون‌های به دام افتاده در فضای پینچ با انرژی‌های زیاد به سطح آند برخورد کرده و باعث تولید اشعه ایکس سخت و همچنین موجب بخار ذرات در بالای سر آند می‌شود [۵-۸]. پس از فروپاشی پلاسمای یون‌ها نیز با انرژی‌های نسبتاً زیاد به سمت مخالف الکترون‌ها گسیل می‌شوند. گستره‌ی انرژی باریکه‌ی یونی تولیدشده در دستگاه پلاسمای کانونی که با انرژی ذخیره‌شده در محدوده چند کیلوژول تا مگا ژول عمل می‌کنند، در محدوده ده‌ها کیلو الکترون‌ولت تا چندین مگا الکترون‌ولت اندازه‌گیری شده است.

### نتایج و بحث

از آنالیز میکرو سکوپ الکترونی برای بررسی و مقایسه سطح نمونه‌های خام و تابش‌دهی شده گرافیت در شات‌های مختلف گاز هیدروژن استفاده شد.



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه (a) خام و تابش‌دهی شد (b) ۱۰، (c) ۲۰ و ۱۰۰ شات گاز

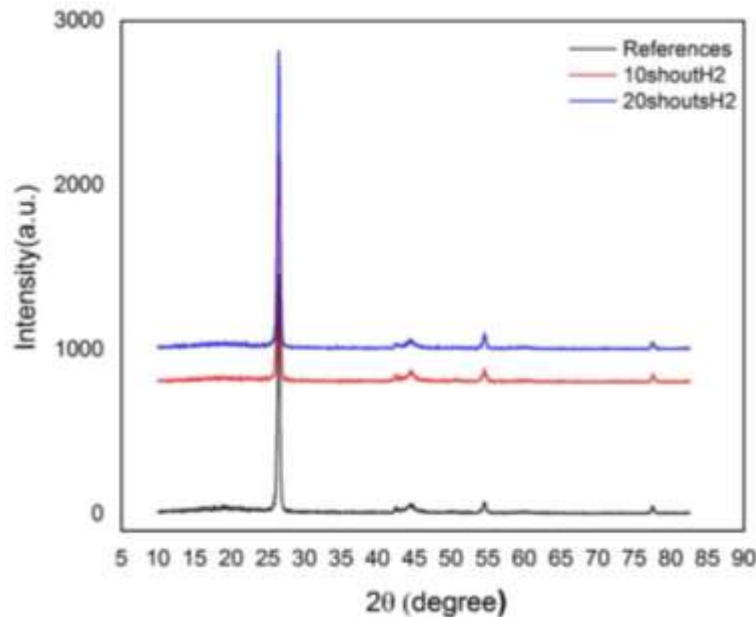
#### هیدروژن

از تصاویر با بزرگنمایی یکسان برای مقایسه سطح نمونه‌های تابش‌دهی شده و نمونه مرجع استفاده شد. تصویر a سطح نمونه خام گرافیت را نشان می‌دهد که سطحی کاملاً صاف و بدون حفره و ترک دارد تصویر b سطح نمونه گرافیت تابش‌دهی شده در ۱ شات را نشان می‌دهد که در سطح آن ترک‌ها (I) خلل و فرج‌های دیده می‌شود که می‌توان گفت اندازه تقریباً کمتر از ۲ میکرومتر دارند این خلل و فرج‌ها در اثر کندوپاش اتم‌های کربن از سطح گرافیت ایجاد شده است (II)، تصویر c نمونه گرافیت تاب شده در ۱۰ شات را نشان می‌دهد که علاوه بر ترک‌های وسیع در سطح آن، نواحی دیده می‌شود که در آن نواحی سطح دچار کندوپاش شده و در روی سطح حفره‌هایی به عرض ۱۰ میکرومتر به وجود آمده است و داخل حفره‌ها نیز ترک‌های ایجاد شده است (II). شکل d مربوط به نمونه‌ای است که در ۲۰ شات مورد تابش قرار گرفته است در تصویر منطقه‌ای دیده می‌شود که سیاه‌تر از بقیه مناطق است که نشان‌دهنده ناحیه از سطح گرافیت است که در اثر برخورد پروتون‌های پراثری دچار کندوپاش و ذوب شدگی شده است (III)، بنابر تصاویر می‌توان

گفت که با افزایش تعداد شات اندازه حفره‌ها ترک‌ها ایجاد شده در سطح گرافیت افزایش پیدا کرده است و ذوب شدگی نیز اتفاق افتاده است.

### نتایج XRD

از آنالیز پراش پرتو ایکس برای بررسی اثرات تابش یون‌های پرنرژی بر خواص ساختاری و بلوره‌ای گرافیت استفاده شد. از نمونه‌ها قبل و بعد از تابش دهی در شات‌های مختلف، آنالیز پراش پرتو ایکس گرفته شد که شکل ۳ و جدول ۱ نتایج آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نتایج XRD

جدول شماره (۱) نتایج XRD

d-spacing(A°)			FWHM (20°)			شدت(a.u)			20°درجه			شماره صفحه
۲۰ شات	۱۰ شات	مرجع	۲۰ شات	۱۰ شات	مرجع	۲۰ شات	۱۰ شات	مرجع	۲۰ شات	۱۰ شات	مرجع	
هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	هیدروژن	۰۰۲
۳,۳۶۹	۳,۳۷۰	۳,۳۶۲	۰,۳۵۴	۰,۳۹۳	۰,۳۹۳	۱۷۸۳,۶	۱۳۳۴,۶	۱۳۸۷,۴	۲۶,۵۴۳	۲۶,۴۴۳	۲۶,۵۰۹	۰۰۲
۲,۱۲۶	۲,۱۳۰	۲,۱۳۱	۰,۴۷۲	۰,۳۱۴	۰,۳۱۴	۲۲,۰۹	۳۱,۲۲	۲۹,۷۹	۴۲,۴۵۸	۴۲,۴۳۲	۴۲,۴۱۷	۱۰۰
۲,۰۳۶	۲,۰۳۵	۲,۰۳۶	۰,۶۲۹	۰,۶۲۹	۰,۹۴۴	۴۱,۰۱	۴۸,۷۱	۳۶,۴۸	۴۴,۴۸۴	۴۴,۵۲۰	۴۴,۴۸۰	۱۰۱
۱,۶۸۲	۱,۶۸۱	۱,۶۸۲	۰,۴۷۲	۰,۴۷۲	۰,۴۷۲	۸۳,۳۲	۶۵,۷۳	۳۷,۳۵	۵۴,۵۵۵	۵۴,۵۶۷	۵۴,۵۳۷	۰۰۴
۱,۲۳۱	۱,۲۳۲	۱,۲۳۰	۰,۴۸۰	۰,۴۳۳	۰,۳۸۴	۳۴,۴۳	۳۳,۱۹	۳۷,۳۵	۷۷,۴۶۹	۷۷,۴۴۷	۷۷,۵۳۷	۱۱۰

از آنالیز پراش اشعه ایکس برای بررسی خواص ساختاری مانند تعیین مشخصات ساختاری شامل پارامتر شبکه، اندازه و شکل دانه، کرنش، ترکیب فاز و تنش داخلی مناطق کریستالی کوچک استفاده می‌شود. طیف پراش اشعه ایکس



نمونه‌های گرافیت تابش‌دهی شده در ۱۰ و ۲۰ شات هیدروژن و گرافیت تابش‌دهی نشده در شکل ۵ نشان داده شده است. پنج پیک که مربوط به صفحات (۰ ۰ ۲)، (۰ ۰ ۱)، (۱ ۰ ۱)، (۰ ۰ ۰)، (۰ ۰ ۰) و (۱ ۱ ۰) در طیف مربوط به نمونه مرجع گرافیت دیده می‌شود که نشان می‌دهد ساختار شبکه گرافیت به صورت Hexagonal می‌باشد. بعد از تابش‌دهی نمونه‌های گرافیت با شات‌های مختلف ۲۰ و ۱۰ شات یون‌های هیدروژن تغییراتی در مکان پیک‌ها و شدت پیک‌ها نسبت به نمونه مرجع ایجاد شده است که نشان می‌دهد با تابش یون‌های هیدروژن در ساختار گرافیت تغییراتی ایجاد شده است که در جدول ۱ اطلاعات مربوط به مکان پیک‌ها و شدت پیک‌ها آورده شده است. اطلاعات مربوط به پیک‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌ای که با ۲۰ شات هیدروژن مورد تابش قرار گرفته است مکان پیک صفحه (۰ ۰ ۲) که بیشترین شدت را دارد تقریباً به اندازه ۰/۰۵۶ درجه به سمت زوایای کوچک‌تر شیف‌ت پیدا کرده است. و در نمونه تابش‌دهی شده با ۱۰ شات مکان پیک صفحه (۰ ۰ ۲) به میزان ۰/۰۶۶ نسبت به نمونه مرجع به سمت زوایای کوچک‌تر شیف‌ت پیدا کرده است. در این آزمایش‌ها، دلیل اصلی ایجاد تغییر حالت فلز (پس از تابش‌دهی) می‌تواند افزایش تنش‌های درونی، و ایجاد حفره‌های نقطه‌ای باشد. تنش‌های درونی، ناشی از خنک شدن سریع سطح نمونه‌ها و یا ذوب‌شدگی نقطه‌ای نواحی تابش‌دهی شده، است

#### مراجع :

- [۱] Miyahara A, Tanabe T. Graphite as plasma facing material. Journal of Nuclear Materials 1988;155-157:49-57.
- [۲] Krashenninnikov A, Nordlund K. Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials. Journal of applied physics 2010;107:۳
- [۳] mohammadreza Seyedhabashi M, Tafreshi MA, Shafiei S, Abdisaray A. Damage study of irradiated tungsten and copper using proton and argon ions of a plasma focus device. Applied Radiation and Isotopes 2019;154:108875.
- [۴] mohammadreza Seyyedhabashy M, Tafreshi MA, Shafiei S, Nasiri A. Damage studies on irradiated tungsten by helium ions in a plasma focus device. Nuclear Engineering and Technology 2019.
- [۵] Scholz M, Miklaszewski R, Gribkov V, Mezzetti F. PF-1000 device. Nukleonika 2000;45:155-8.
- [۶] 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. Journal of Physics D: Applied Physics 2007;40:3592.
- [۷] Lee S, Saw S. Plasma focus ion beam fluence and flux—For various gases. Physics of Plasmas 2013;20:062702.
- [۸] Akel M, Salo SA, Saw SH, Lee S. Characterization of oxygen ion beams emitted from plasma focus. Vacuum 2014;110:54-7.
- [۹] Bhuyan M, Mohanty SR, Rao CVS, Rayjada PA, Raole PM. Plasma focus assisted damage studies on tungsten. Applied Surface Science 2013;264:674-80.