

The Investigation of the Destructive Effects of Hydrogen and Argon Ions produced in The Plasma Focus Device on Graphite

Alieh Chamani¹, Seyed Mohammad Mahdi Abtahi*²

¹Department of Physics, Payame Noor University (PNU), P.O. Box: 19395-3697, Tehran, Iran

²Physics Department, Imam Khomeini International University, P.O. Box: 34148-96818, Qazvin, Iran

Received: 07.03.2021 Final revised: 08.06.2021 Accepted: 03.08.2021

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.17019](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.17019)

Abstract

The destructive effects of high-energy hydrogen and argon ions irradiated in the MTPF-2 Mather type plasma focus device on the surface and structural properties of graphite were investigated. Raw and irradiated samples were analyzed using a Scanning Electron Microscope. While microscopic images of samples irradiated with hydrogen ions point sputtering, pores are seen on the samples surface along with spot melts, the predominant phenomenon on the surface of samples irradiated with argon ions is sputtering of particles from the graphite surface. X-ray diffraction analysis was used to investigate the changes caused by the irradiation of high-energy protons and argon ions on the graphite structure. In the X-ray diffraction spectrum of the irradiated samples, the peaks displacement, and the change in the peaks intensity compared to the X-ray diffraction spectrum of the reference sample were observed. The peak of the graphite sample's locations irradiated with hydrogen and the sample irradiated with argon have been shifted to smaller angles. The displacement of the peaks in the proton-irradiated sample is higher than that of the argon ions. The argon ion and hydrogen ion beam specifications were calculated using the Lee code.

Keywords: Plasma Focus, Radiation Damage, Graphite, Material Analysis, Hydrogen/Argon Ions

* Corresponding Author: sm.abtahi@sci.ikiu.ac.ir; smabtahi2007@gmail.com



بررسی اثرات تخریبی یون‌های آرگون و هیدروژن تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی بر روی گرافیت

عالیه چمنی¹، سید محمد مهدی ابطحی^{2*}

¹گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، ص.پ. 19395-3697، تهران، ایران

²گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، ص.پ. 34148-96818، قزوین، ایران

دریافت: 1399/12/17 ویرایش نهائی: 1400/03/18 پذیرش: 1400/05/12

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.17019](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.17019)

چکیده

اثرات تخریبی تابش یون‌های پراثرژی هیدروژن و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر MTPF-2 بر روی خواص سطحی و ساختاری گرافیت بررسی شد. نمونه‌های خام و تابش‌دهی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تجزیه و تحلیل شد. در نمونه‌های تابش‌دهی شده با یون‌های هیدروژن، کندوپاش‌های نقطه‌ای، خلل و فرج در سطح نمونه‌ها به همراه ذوب شدگی نقطه‌ای دیده شد. پدیده غالب در سطح نمونه تابش‌دهی شده با یون آرگون کندوپاش فیزیکی ذرات از سطح گرافیت است. از تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس برای بررسی تغییرات ایجاد شده در اثر تابش پروتون‌ها و یون‌های آرگون پراثرژی بر روی ساختار گرافیت استفاده شد. در طیف پراش اشعه ایکس نمونه‌های تابش‌دهی شده، جابه‌جایی در مکان قله‌ها و تغییر شدت قله‌ها نسبت به طیف پراش اشعه ایکس نمونه مرجع مشاهده شد. به طوری که مکان قله‌ها نمونه گرافیت تابش‌دهی شده با هیدروژن و نمونه تابش‌دهی شده با آرگون به سمت زوایای کوچکتر جابه‌جا شده است. میزان جابه‌جایی مکان قله‌ها در نمونه تابش‌دهی شده با پروتون‌ها نسبت به جابه‌جایی حاصله به وسیله یون‌های آرگون بیشتر است.

کلیدواژگان: پلاسمای کانونی، تخریب تابشی، گرافیت، آنالیز مواد، یون‌های هیدروژن و آرگون

مقدمه

در ساخت توکامک‌های آینده نیز می‌باشد [3-7]. از آنجایی که استفاده از گرافیت به دلیل جذب یون‌های هیدروژن، مشکلاتی در مدیریت سوخت توکامک ایجاد کرد، راهکاری برای حل این مسأله با لایه‌نشانی فلزات مختلف بر سطح گرافیت به کار رفت که از نفوذ یون‌های هیدروژن در داخل گرافیت و به دنبال آن از رقیق شدن محیط پلاسمای جلوگیری کند.

گرافیت به عنوان یکی از مواد مجاور با پلاسما¹ به طور گسترده در ساخت توکامک‌های بزرگی مانند TFTR، JET استفاده شده است. از گرافیت به دلیل عدد اتمی پایین "به عنوان کند کننده نوترون و بازتاب‌دهنده آن به قلب رآکتور"، هدایت گرمایی بالا و اهمیت آن در مسأله اقتصاد نوترونی در ساخت رآکتورهای شکافت نیز استفاده شده است [1-2]. گرافیت یکی از مواد پیشنهادی

* نویسنده مسئول: sm.abtahi@sci.ikiu.ac.ir

¹ Plasma Facing Material (PFM)

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کپی‌رایت کامنز تخصصی 4.0 بین‌المللی می‌باشد



اندرکنش پلاسما با مواد مجاور با پلاسما یکی از کلیدی ترین مسائل در ساخت دستگاه های همجوشی است، اهمیت این مسأله هم از نظر کنترل میزان ناخالصی داخل محیط پلاسما، چگالی یون ها و همچنین کاهش تابش ترمزی و به دنبال آن جلوگیری از کاهش دمای یون ها در زمان تخلیه و هم از نظر عمر مفید مواد مجاور با پلاسما می باشد. انواع اندرکنش پلاسما با مواد مجاور با پلاسما به چند گروه تقسیم می شود که عبارتند از:

- 1- فرسایش مواد¹ در اثر برخورد پلاسما لبه با دیواره و لایه نشانی دوباره مواد دیواره اول
- 2- ایجاد آلودگی ها² و انتقال این آلودگی ها به داخل پلاسما³
- 3- کاشته شدن یون های پلاسما⁴ در درون مواد مجاور با پلاسما و پخش یون ها در درون مواد
- 4- تغییرات خواص ساختاری⁵، شیمیایی، مکانیکی و گرمایی مواد مجاور با پلاسما
- 5- گرمایش⁶ و یا (احتمالاً ذوب شدگی و یا تبخیر) ایجاد ترک⁷ و سایر انواع تخریب در مواد مجاور با پلاسما

این اندرکنش ها اغلب در فرآیندهای غیرعادی که موجب از هم پاشیدگی⁸ و ناپایداری پلاسما می شود اتفاق می افتند. فرآیندهایی مانند حالت موضعی لبه⁹، وقایع جابه جایی عمودی¹⁰ و از هم گسیختگی پلاسما از جمله فرآیندهایی هستند که در زمان وقوع آن ها، شار ذرات و گرمای تحمیلی بر روی مواد مجاور با پلاسما افزایش می یابد [8,9].

تاکنون تحقیقات گسترده در رابطه با بررسی اندرکنش پلاسما با مواد مجاور با پلاسما با استفاده از دستگاه های مختلف انجام شده است که در ادامه به چند مورد از

کارهای انجام شده و نتایج اشاره خواهد. دیلندس¹¹ و همکاران از تابش دهی گرافیت با یون های کربن 5 مگا الکترون-ولت برای شبیه سازی اثرات تخریب نوترون های تند حاصل از گداخت بر روی گرافیت استفاده کردند [5,10]. سپس نمونه های تابش دهی شده را در یک دستگاه پلاسما ی خطی در معرض پلاسما ی دوتریوم با شار¹² 10²⁴ یون بر (مترمربع. ثانیه) قرار دادند. آنها مشاهده کردند که تابش دهی گرافیت با یون های پر انرژی کربن، باعث افزایش خلل و فرج در داخل نمونه های گرافیت شده است و موجب جذب بیشتر دوتریم شده است [5]. هبنیت¹² و همکاران در پژوهشی تغییرات سطحی ایجاد شده در اثر تابش یون های پر انرژی آرگون و زنون بر روی گرافیت را مورد بررسی قرار داد آنها در این تحقیق نمونه های گرافیت را با یون های با انرژی بین 2-50 کیلو الکترون ولت مورد پرتو دهی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات سطحی ایجاد شده تابعی از جرم یون، انرژی یون و دمای سطح ماده هدف است [11].

دستگاه پلاسما کانونی یکی از دستگاه همجوشی است که به صورت پالسی کار می کند، این دستگاه منبع تولید اشعه ایکس سخت و نرم، نوترون های سریع (در صورت استفاده از گاز دوتریم)، الکترون های نسبیتی و یون های پر انرژی در محدوده انرژی چندین کیلو الکترون-ولت تا چند مگا الکترون-ولت است [8,12]. دستگاه پلاسما کانونی می تواند شرایط مشابه به ناپایداری حالت موضعی لبه که در راکتورهای همجوشی کانونی اتفاق می افتد و در راکتورهای همجوشی آینده یکی از عوامل مهم تخریب دیواره توکامک هست را ایجاد کند [13]. زمانی که ناپایداری حالت موضعی لبه اتفاق

⁷ Create cracks

⁸ Plasma Disruption

⁹ Edge-localized mode (ELMs)

¹⁰ Vertical Displacement Events (VDEs)

¹¹ Deslandes

¹² Habenicht

¹ Erosion of Materials

² Create Contamination

³ Transmission of contamination into the plasma

⁴ Implantation of plasma ions

⁵ Changes in structural properties

⁶ Heating

حرارتی روی ماده دیواره اول توکامک‌های امروزی در حدود 1 مگاوات بر متر مربع است و در ناحیه دایورتر توکامک‌ها¹ و استلاراتورهای² موجود به 10 مگاوات بر متر مربع می‌رسد. در راکتورهای همجوشی آینده بار حرارتی قابل انتظار در حدود 10^3 تا 10^4 مگاوات بر متر مربع خواهد بود [8,9,13].

تاکنون تحقیقات گسترده در رابطه با آزمون مواد مواجه با پلاسما با استفاده از پرتوهای یونی و همچنین نوترون‌های تند (در صورت استفاده از گاز دوتریم) و موج ضربه تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی انجام شده است. دامیده و همکاران اثرات تخریبی یون‌های دوتریم را در فواصل مختلف و در تخلیه‌های مختلف دستگاه پلاسما کانونی 2/2 کیلو ژول را مورد بررسی قرار دادند، نمونه‌های تنگستن با یون‌های دوتریم با انرژی متوسط 56 کیلو الکترون-ولت و با شار 10^{26} یون بر (مترمربع. ثانیه) مورد تابش قرار گرفت که در نتیجه تابش یون‌های پرانرژی دوتریم بر روی نمونه‌های تنگستن در فواصل مختلف ترک‌هایی تا 300 تا 500 نانومتر و حفره‌هایی تا 5 میکرومتر بسته به فاصله آن از سر آند تشکیل شد [19]. دو تا³ و همکاران اثرات تخریبی تخریبی یون‌های هلیوم تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی 2/2 کیلو ژول را بر روی تنگستن مورد بررسی قرار دادند [24]، آنها نمونه‌های تنگستن را در زوایای مختلف نسبت به محور آند قرار دادند و نمونه‌های تنگستن را در 10 تخلیه مورد تابش قرار دادند و مشاهده کردند که ترک‌های یکنواخت بر روی تنگستن به‌عرض 1 الی 4 میکرومتر ایجاد شد نتایج تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس⁴ نیز نشان داد که در نمونه‌های تابش‌دهی شده با هلیوم قله‌ها به سمت زوایای بالا جابه‌جایی پیدا کردند. همچنین نیرانجان⁵ و همکاران تغییرات سطحی

می‌افتد پلاسما توکامک از حالت محصور شدگی توسط خطوط میدان مغناطیسی درمی‌آید و با برخورد به دیواره اول توکامک باعث تخریب دیواره اول آن می‌شود که باعث آلودگی پلاسما، نفوذ سوخت در ماده سازنده دیواره اول، همچنین فرسایش ماده دیواره اول در نتیجه تغییر در خواص سطحی و ساختاری ماده دیواره اول و در نتیجه افزایش ناخالصی درون پلاسما و کاهش کارایی و سایر مشکلات مربوط به تجهیزات خلأ در توکامک‌ها می‌شود. از این رو لازم است که مواد پیشنهادی ساخت توکامک‌ها در شرایط مشابه با شرایط که در آن دچار تخریب می‌شوند قرار گیرند تا اینکه اثرات این تخریب‌ها به‌طور کامل بر روی خواص سطحی و ساختار این مواد مشخص گردد و قبل از ساخت دیواره توکامک عمر مفید این مواد تعیین گردد. تا به حال مواد کربنی از جمله گرافیت، در مقابل چشمه‌های پیوسته یون‌های پر انرژی مانند شتاب‌دهنده‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند در حالی که ناپایداری که در توکامک‌ها اتفاق می‌افتد به‌صورت پالسی است. همچنین گرافیت در توکامک‌های مانند JET و... مورد آزمایش قرار گرفته است در حالی که این توکامک‌ها نیز نمی‌توانند بار حرارتی توکامک‌های آینده مانند ITER را ایجاد کند [14-16]. بنابراین دستگاه پلاسما کانونی از لحاظ ایجاد شرایط مشابه که در توکامک‌های آینده در اثر ناپایداری‌های از هم‌گسیخته و حالت موضعی لبه که باعث برخورد یون‌های پرانرژی، جریان پلاسما و موج ضربه به دیواره اول توکامک‌ها می‌شود بسیار مناسب است، در نتیجه دستگاه پلاسما کانونی ابزاری مناسب برای آزمایش مواد مواجه با پلاسما در برابر تابش است [17,18]. به‌منظور تأکید بر سازگاری دستگاه پلاسما کانونی با نیازهای فناورانه دستگاه‌های همجوشی لازم به‌ذکر است که حداکثر چگالی توان بار

⁴ X-Ray Diffraction (XRD)

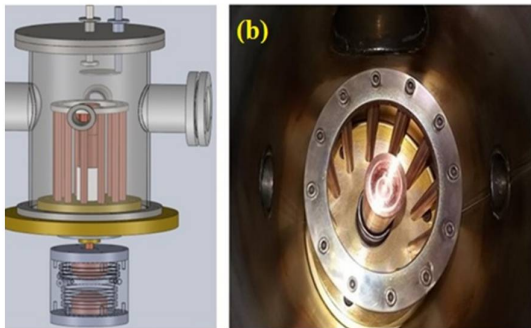
⁵ Niranjana

¹ Tokamak Divertor

² Stellators

³ Duta

نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. ساختار الکترودهای این دستگاه پلاسمای کانونی در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1. نمایی از آرایش الکترودهای دستگاه پلاسمای کانونی MTPF-2. طول آند و کاتد 145 میلی‌متر، شعاع آند 14/5 میلی‌متر، شعاع کاتد 5 میلی‌متر، طول مؤثر آند 95 میلی‌متر، طول عایق 50 میلی‌متر و تعداد 12 عدد کاتد به صورت متقارن در اطراف آند قرار گرفته‌اند. در نوک آند یک حفره به شعاع 10 میلی‌متر و عمق 10 میلی‌متر به منظور کاهش مقدار بخار مس ایجاد شده است. در ابتدا برای به دست آوردن فشار بهینه و ولتاژ بهینه، در فشارها و ولتاژهای مختلف، در غیاب نمونه‌ها تخلیه‌ها انجام شد. سپس تخلیه‌ها در تمام آزمایش‌ها برای گاز هیدروژن در فشار بهینه 1 میلی بار و برای گاز آرگون در فشار بهینه 0/6 میلی بار و ولتاژ کاری 12 کیلو الکترون ولت انجام شدند. نمونه‌های گرافیت در فاصله 6 سانتیمتری از سر آند و در 20 تخلیه خازنی جداگانه تحت تابش یون‌های هیدروژن و آرگون قرار گرفتند. در دستگاه MTPF-2 (نوع مدر)، بعد از پیدا کردن فشار و ولتاژ بهینه، بیش از 90 درصد مواقع در تخلیه اول تا تخلیه هفتم، تنگش‌های قوی تشکیل می‌شود، ولی برای اطمینان و حفظ کارایی دستگاه، فشار گاز بعد از حداکثر 5 تخلیه تا 10^{-3} میلی بار کاهش داده می‌شد تا ناخالصی‌های که از سطح الکترودها و محفظه

ایجاد شده روی موادی که در ساخت راکتورهای گداخت مورد استفاده قرار می‌گیرند (تنگستن، نیکل، استیل¹، مولیبدونیم و مس) در اثر مواجه شدن با پلاسمای پلاسمای همجوشی ایجاد شده در دستگاه پلاسمای کانونی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجزیه و تحلیل حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی² نشان داد که در شرایط یکسان تابش دهی تخریب‌ها و تغییرات ایجاد شده بر روی سطح مواد مختلف با یکدیگر متفاوت است [21].

در تحقیقات اخیر تأثیر پروتون پرنرژی حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی بر روی مواد مواجه با پلاسمای مانند تنگستن و استیل به طور گسترده‌ای بررسی شده است. تاکنون بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی ساختار گرافیت تابش دهی شده، به وسیله یون‌های تک انرژی که به طور پیوسته در شتابدهنده‌ها تولید می‌شود، انجام شده است. بسیاری از این بررسی‌ها به طور مجزا با استفاده از یون‌های سبک و تک انرژی هیدروژن و کربن صورت گرفته است [5]. ولی تحقیقات انجام شده در مورد پرتو دهی گرافیت با استفاده از طیف یون که به صورت پالسی در دستگاه پلاسمای کانونی تولید می‌شود، بسیار محدود است. بنابراین بر آن شدیم که به طور همزمان، تأثیر تابش طیف یون‌های سبک و سنگین را بر خواص سطحی و ساختاری گرافیت با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی مورد بررسی قرار دهیم و نتایج به دست آمده را با یکدیگر مقایسه نماییم.

چیدمان آزمایش

دستگاه پلاسمای کانونی 2/7 کیلوژول MTPF-2 از نوع مدر با بانک خازنی به ظرفیت 13/5 میکرو فاراد و حداکثر ولتاژ شارژ 20 کیلو ولت، اندوکتانس 158 نانو هنری و جریان تخلیه 100 کیلو آمپر به عنوان منبع تولید یون‌های آرگون و پروتون‌های پرنرژی برای پرتو دهی

² Scanning Electron Microscope (SEM)

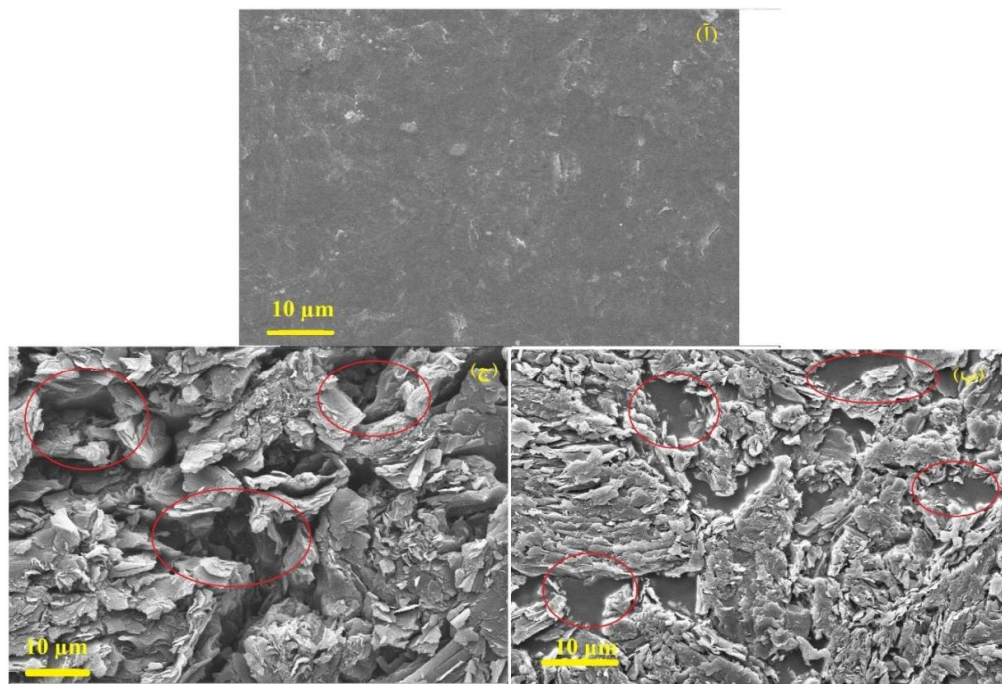
¹ Stainless steel

تابش‌دهی شده در 20 تخلیه هیدروژن را نشان می‌دهد که در سطح آن مناطقی به شکل مایع مذاب سرد شده‌ای همانند قیر تشکیل شده است و می‌توان گفت که دچار ذوب‌شدگی شده است. همچنین شکل (2ج) سطح نمونه گرافیت تابش‌دهی شده در 20 تخلیه آرگون را نشان می‌دهد که سطح آن دچار ترک‌های متراکم شده است و مناطقی دیده می‌شود که دچار کندوپاش شده است.

وارد گاز می‌شود تخلیه و سپس گاز جدید جایگزین می‌شد.

نتایج

از تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی یکسان برای مقایسه سطح نمونه‌های تابش‌دهی شده و نمونه مرجع استفاده شد. تصویر (2الف) سطح نمونه خام گرافیت را نشان می‌دهد که سطحی کاملاً صاف، بدون حفره و ترک دارد. تصویر (2ب) سطح نمونه گرافیت



شکل 2. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح الف: نمونه خام، ب: نمونه تابش‌دهی شده در 20 تخلیه هیدروژن، ج: نمونه تابش‌دهی شده در 20 تخلیه آرگون.

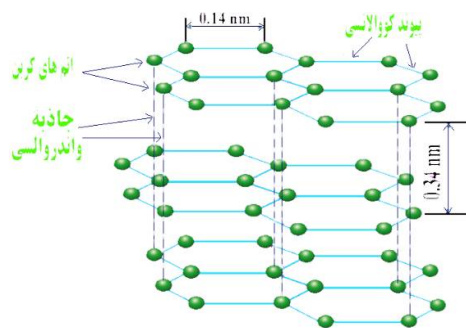
اتم‌های گرافیت، بیشتر انرژی به صورت گرمایش گرافیت از دست می‌رود، به همین دلیل در سطح گرافیت مناطق ذوب شده به چشم می‌خورد و میزان کمی از اتم‌ها از سطح گرافیت در مقایسه با سطح گرافیت تابش‌دهی شده با آرگون دچار کندوپاش شده است.

در سطح گرافیت تابش‌دهی شده با هیدروژن مناطقی کندوپاش شده نیز دیده می‌شود که مساحت کمتری نسبت به سطح کندوپاش شده در نمونه تابش‌دهی شده با یون آرگون دارند، با توجه به اینکه جرم هیدروژن در مقایسه با کربن کم است، در برخورد یون هیدروژن با

مقدار انرژی آستانه کندوپاش برای مواد با جرم اتمی بزرگتر از 12 با دقت بسیار بالا توسط اگرتون² و همکاران در سال 2010 ارائه شد [22].

آنالیز پراش اشعه ایکس

از آنالیز پراش اشعه ایکس برای بررسی خواص ساختاری مانند تعیین مشخصات ساختاری شامل پارامتر شبکه، اندازه و شکل دانه، کرنش³، ترکیب فاز و تنش⁴ داخلی مناطق کریستالی کوچک استفاده می شود. طبق شکل 3 در گرافیت اتم های کربن شش ضلعی های پیوسته ای تشکیل می دهند که در یک سطح گسترده است. لایه های شش ضلعی متشکل از اتم های کربن با قرار گرفتن روی هم، حجمی را تشکیل می دهند که به آن گرافیت گفته می شود. در ساختار گرافیت دو نوع اتصال وجود دارد، اتصالی که بین اتم های کربن هر لایه وجود دارد و از نوع پیوند کوالانسی است و نوع دوم اتصالی است که لایه ها را به یکدیگر متصل می کند و ضعیف تر از پیوند کوالانسی است. بنابراین می توان انتظار داشت که با اعمال نیرو، لایه های کربنی بر روی یکدیگر بلغزند.



شکل 3. ساختار شبکه گرافیت.

در مورد فیزیک اندرکنش باریکه یون پراثری پلاسما ی کانونی با سطح مواد سه مکانیزم را می توان 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 یونی (ب) افزایش دمای سطح مواد و تصعید آن (ج) کندوپاش فیزیکی توسط یون ها. اینکه کدامیک از این مکانیزم ها در دستگاه پلاسما ی کانونی غالب هستند به جنس ماده، انرژی یون، جرم یون و میزان تغییر دمای سطح ماده وابسته است. عملکرد مکانیزم های (الف) و (ب) به دماهای ذوب و جوش مواد مورد بررسی بستگی دارد. مکانیزم سوم، ضربه فیزیکی حاصل از بمباران یون های پراثری و کنده شدن ذرات ماده است که تبخیر فیزیکی یا کندوپاش نامیده می شود. این مکانیزم باعث تغییر شکل ظاهری سطح گرافیت می شود.

در فرایند کندوپاش وقتی که یک یون وارد سطح ماده می شود، نیروی کولنی بین هسته ها باعث انتقال انرژی و پراکندگی هسته ها می شود. اگر پراکندگی در زاویه 180 درجه رخ دهد بیشترین انتقال انرژی صورت می گیرد. بیشترین انرژی منتقل شده به هسته با جرم (M) برابر است با [22]:

$$E_{max} \approx \frac{2E_0(E_0 + 2mc^2)}{Mc^2} \quad 1$$

که در آن E_0 انرژی یون و mc^2 انرژی معادل جرم حالت سکون یون است. با افزایش انرژی یون و کاهش جرم هسته هدف، E_{max} افزایش می یابد. اگر E_{max} از انرژی جابه جایی¹ شبکه هدف (E_d) بزرگتر باشد، پراکندگی در زاویه های بزرگ می تواند هسته را کاملاً جابه جا کند و یا حتی آن را به بیرون از ماده پرتاب کند. کمترین مقدار E_0 ای که می تواند منجر به E_{max} ای معادل با E_d شود، انرژی آستانه کندوپاش نامیده می شود.

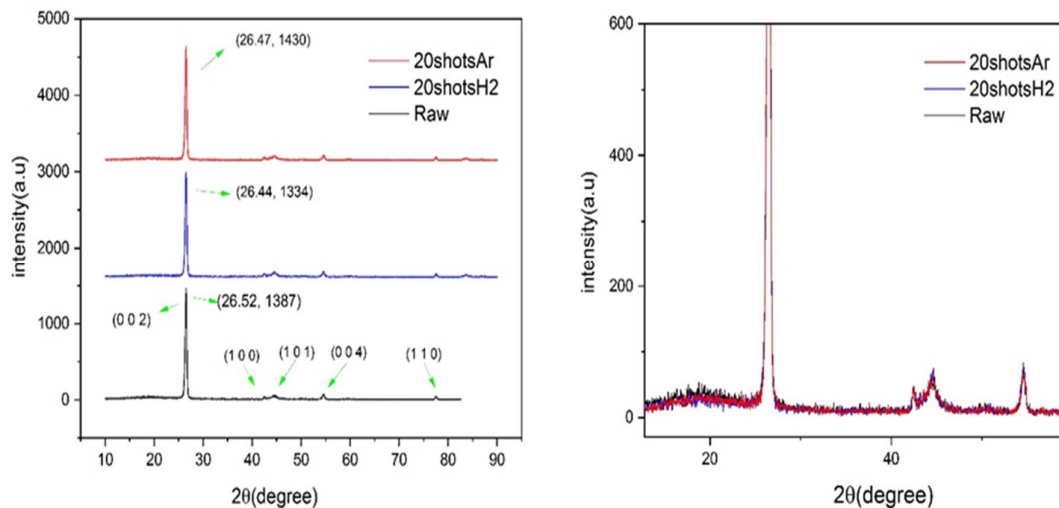
³ Strain

⁴ Stress

¹ Displacement energy

² Egerton

طیف پراش اشعه ایکس نمونه‌های گرافیت مرجع و تابش دهی شده در 20 تخلیه هیدروژن و 20 تخلیه آرگون در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 4. طیف پراش اشعه ایکس نمونه‌های گرافیت خام و تابش دهی شده در 20 تخلیه هیدروژن و 20 تخلیه آرگون.

زوایای کوچکتر جابه‌جایی پیدا کرده است و در نمونه تابش دهی شده با 20 تخلیه آرگون مکان قله صفحه (2 0 0) به میزان 0/05 نسبت به نمونه مرجع به سمت زوایای کوچکتر جابه‌جایی پیدا کرده است. بنابراین تغییر مکان قله‌ها در نمونه تابش دهی شده در 20 تخلیه هیدروژن بیشتر از نمونه تابش دهی شده در 20 تخلیه آرگون است. نمای بزرگ شده از بزرگترین قله گرافیت، به‌عنوان مثال: قله (2 0 0)، تحت یک تغییر جهت به سمت زوایای پایین‌تر قرار می‌گیرد بنابراین نشان می‌دهد که تنش گسترده‌ای در نمونه‌های تابش دهی شده ایجاد شده است. جابه‌جایی مکان قله‌ها نسبت به مکان آنها در طیف نمونه مرجع به دلیل تنش/کرنش ایجاد شده در نمونه‌ها به علت انتقال گرمایی بسیار زیاد به نمونه‌ها در زمان

در شکل 4، پنج قله که مربوط به صفحات (2 0 0)، (1 0 0)، (1 0 1)، (0 0 4)، (1 1 0) در طیف مربوط به نمونه مرجع گرافیت است، نشان می‌دهد که ساختار شبکه گرافیت به صورت شش وجهی¹ است. طبق شکل 4، بعد از تابش دهی نمونه‌های گرافیت در 20 تخلیه یون‌های هیدروژن و آرگون تغییراتی در مکان قله‌ها و شدت قله‌ها نسبت به نمونه مرجع ایجاد شد. با تابش یون‌های پرانرژی در ساختار گرافیت تغییراتی ایجاد شده است. در شکل 4 اطلاعات مربوط به مکان قله‌ها و شدت قله‌ها آورده شده است. اطلاعات مربوط به قله‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌ای که با 20 تخلیه هیدروژن مورد تابش قرار گرفته است مکان قله صفحه (2 0 0) که بیشترین شدت را دارد تقریباً به اندازه 0/08 درجه به سمت

¹ Hexagonal

در رابطه فوق L_c میانگین اندازه بلورک های فلز، λ طول موج پرتو ایکس (در این حالت برابر 1/54059 آنگسترم)، θ زاویه براگ⁹، $\beta_{2\theta}$ پهنای عرض پالس در میانه قله¹⁰ (برحسب رادیان) و k ضریب شکل بلور (عددی نزدیک به یک و برای گرافیت مقدار 0/94) می باشند [23].

جدول 1. پارامترهای باریکه یونی محاسبه شده توسط کد لی برای دستگاه پلاسمای کانونی 2/7 کیلو ژول نوع مدر MTPF-2.

پارامترهای یونی	واحد	باریکه یونی هیدرون	باریکه یونی آرگون
جریان قله ¹¹	kA	95	95
جریان تنگش ¹²	kA	45	70
شار پرتو یون پر انرژی ¹³	$\times 10^{12} \text{ W m}^{-2}$	5/6	130
ضریب تخریب شار پرتو یون پر انرژی ¹⁴	$\times 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{0.5}$	9/8	110
انرژی جریان پلاسما ¹⁵	J	44	73
شار پرتو یون تولید شده در ستون تنگش ¹⁶	$\times 10^{27} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1/7	0/59
جریان پرتو یون تولید شده در ستون تنگش ¹⁷	$\times 10^{19} \text{ m}^{-2}$	5/2	0/49
جریان انرژی ¹⁸	$\times 10^6 \text{ J m}^{-2}$	1/7	10
شار انرژی ¹⁹	$\times 10^{12} \text{ W m}^{-2}$	5/6	130
مدت زمان تنگش ²⁰	Ns	30/7	8/3
جریان یون ²¹	kA	8/2	7/6
جریان چگالی ²²	$\times 10^8 \text{ A m}^{-2}$	5/4	15
تعداد یون در هر تخلیه ²³	$\times 10^{14}$	7/9	0/25

¹⁴ FIB damage factor

¹⁵ Plasma stream (ps) energy

¹⁶ J_b flux ions (ion beam generated by pinch column)

¹⁷ Fluence ions (ion beam generated by pinch column)

¹⁸ E_n fluence

¹⁹ E_n flux

²⁰ Pinch Duration

²¹ Ion Current

²² Current Density

²³ Number of ions per shot

تابش یون های هیدروژن و آرگون است. تنش/کرنش ایجاد شده دلایل زیادی دارد که از جمله شایع ترین دلایل: ناجابه جایی¹، انباشت شکستگی ها²، میکروتنش ها³، افزایش تنش های درونی با دامنه های بلند⁴، ایجاد نقص های نقطه ای⁵ و غیره می باشند. دلیل اصلی تغییر قله در الگوی پراش اشعه ایکس، تنش های درونی است. تنش های درونی، ناشی از خنک شدن سریع سطح نمونه ها و تغییر حجم در سطح نمونه است. تنش گرمایی بیشتر، ممکن است به دلیل ذوب شدگی موضعی نواحی تابش دهی شده ایجاد شود [6.20.24]. تابش یون های هیدروژن و آرگون باعث به وجود آمدن تنش کششی⁶ (جابه جایی به زوایای پایین تر و افزایش فاصله صفحاتی) شده است.

اندازه دانه های کریستال های مربوط به قله صفحه² (0 2) با استفاده از معادله دبای-شرر محاسبه شده است که به ترتیب 20/7 نانومتر برای نمونه مرجع، 26/6 نانومتر برای نمونه تابش دهی شده با 20 تخلیه آرگون و برای نمونه تابش دهی شده با 20 تخلیه هیدروژن 23/6 نانومتر برآورد شد. رابطه زیر که به رابطه شرر⁷ معروف است، میانگین اندازه بلورک ها⁸ را به دست می دهد.

$$L_c = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cdot \cos\theta} \quad 2$$

¹ Dislocation

² Stacking fault

³ Micro-stress

⁴ Long-range internal stress

⁵ Point defect

⁶ Tensile stress

⁷ Scherrer's formula

⁸ Grain

⁹ Bragg's angle

¹⁰ Full Width at Half Maximum, FWHM

¹¹ I_{peak}

¹² I_{pinch}

¹³ FIB energy flux

مکان قله‌ها تغییر شدت قله‌ها و افزایش اندازه کریستال در نمونه‌های تابش‌دهی شده نسبت به طیف پراش اشعه ایکس نمونه مرجع مشاهده شد. میزان جابه‌جایی مکان قله‌ها به سمت زوایای کوچکتر، در نمونه‌های گرافیت تابش‌دهی شده با هیدروژن، بیشتر از نمونه‌های تابش‌دهی شده با آرگون است. با استفاده از کد لی مشخصات باریکه یونی هیدروژن و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسما یونی به دست آمد.

از کد لی برای محاسبه مشخصات باریکه یونی هیدروژن، همچنین تعداد یون‌های هیدروژن ساطع شده از ستون دستگاه پلاسما یونی استفاده شد. نتایج کد لی نشان می‌دهد که شار پروتون‌ها و یون‌های آرگون تولید شده در دستگاه پلاسما یونی به ترتیب برابر 0.44×10^{19} یون بر مترمربع و 11×10^{19} یون بر مترمربع می‌باشد.

مرجع‌ها

- [1] T.D. Burchell, *Carbon materials for advanced technologies*, Elsevier Science, New York, (1999).
- [2] R.E. Nightingale, *Nuclear Graphite*, New York and London Academic Press (1962).
- [3] A. Miyahara, T. Tanabe, Graphite as plasma facing material, *Journal of Nuclear Materials* (1988).
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(88\)90226-7](https://doi.org/10.1016/0022-3115(88)90226-7)
- [4] R. Coratger et al. Effects of ion mass and energy on the damage induced by an ion beam on graphite surfaces: a scanning tunneling microscopy study, *Surface science* **262** (1992) 208-218.
[https://doi.org/10.1016/0039-6028\(92\)90472-i](https://doi.org/10.1016/0039-6028(92)90472-i)
- [5] A. Deslandes et al. Ion irradiated graphite exposed to fusion-relevant deuterium plasma, *Nuclear Instruments and Methods in Physics*

از کد لی برای محاسبه مشخصات باریکه یونی هیدروژن، همچنین تعداد یون‌های هیدروژن ساطع شده از ستون دستگاه پلاسما یونی استفاده شد که پارامترهای استخراج شده از کد لی در جدول 1 آورده شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق نمونه‌های گرافیت با استفاده از یون‌های هیدروژن و آرگون تولید شده در دستگاه پلاسما یونی در 20 تخلیه مورد تابش قرار گرفتند. به دلیل حفظ کارایی دستگاه و جلوگیری از ورود ناخالصی به داخل گاز، بعد از چند تخلیه متوالی، گاز تخلیه و تا فشار 10^{-3} میلی بار کاهش داده شد و سپس گاز جدید تزریق شد. در بررسی‌های انجام شده تاکنون، به وسیله تابش یون‌های تک انرژی و سنگین‌تر نسبت به هیدروژن مثل کربن بر روی گرافیت، افزایش خلل و فرج‌ها در داخل نمونه‌های تابش‌دهی شده مشاهده شد [5]. در این تحقیق نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که در سطح گرافیت، حفره‌های متراکم در اثر برخورد یون‌های سبک هیدروژن ایجاد شده است و مناطقی از سطح دچار ذوب شدگی شده است. همچنین در تحقیقی که قبلاً با استفاده از یون‌های سنگین آرگون انجام شده است، تغییرات سطحی ایجاد شده تابعی از جرم و انرژی یون‌ها به دست آمد [11]. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که پدیده غالب در اثر تابش یون‌های آرگون کندوپاش فیزیکی اتم‌های کربن از سطح گرافیت است به طوری که حفره‌های با عمق چندین میکرومتر در سطح ایجاد شده است.

نمونه‌های گرافیت قبل و بعد از تابش‌دهی تحت تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس قرار گرفت. در طیف پراش اشعه ایکس نمونه‌های تابش‌دهی شده، جابه‌جایی در

- Engineering and Design* **160** (2020) 112007.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112007>
- [14] M.J. Inestrosa-Izurieta, E. Ramos-Moore, L. Soto, Morphological and structural effects on tungsten targets produced by fusion plasma pulses from a table top plasma focus, *Nuclear Fusion* **55** (2015) 093011.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/9/093011>
- [15] M. mohammadreza Seyedhabashi et al. Damage study of irradiated tungsten and copper using proton and argon ions of a plasma focus device, *Applied Radiation and Isotopes* **154** (2019) 108875.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108875>
- [16] M. mohammadreza Seyyedhabashy et al. Damage studies on irradiated tungsten by helium ions in a plasma focus device, *Nuclear Engineering and Technology* **52** (2019) 827-834.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2019.10.003>
- [17] P. Grigorev, D. Terentyev, G. Bonny, E.E. Zhurkin, G. Van Oost, J.-M. Noterdaeme, Interaction of hydrogen with dislocations in tungsten: an atomistic study, *Journal of Nuclear Materials* **465** (2015) 364-372.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.06.013>
- [18] R. Niranjana, R. Rout, R. Srivastava, Y. Chakravarthy, P. Mishra, T. Kaushik, S.C. Gupta, Surface modifications of fusion reactor relevant materials on exposure to fusion grade plasma in plasma focus device, *Applied Surface Science* **355** (2015) 989-998.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.192>
- [19] S.H. Saw, V. Damideh, J. Ali, R.S. Rawat, P. Lee, S. Lee, Damage Study of Irradiated Tungsten using fast focus mode of a 2.2 kJ plasma focus, *Vacuum*, **144** (2017) 14-20.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.002>
- [20] N. Dutta, N. Buzarbaruah, S. Mohanty, Damage studies on tungsten due to helium ion irradiation, *Journal of Nuclear Materials* **452** (2014) 51-56.
- Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **340** (2014) 21-26.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.06.027>
- [6] N. Dutta, S. Mohanty, N. Buzarbaruah, Modification on graphite due to helium ion irradiation, *Physics Letters A* **380** (2016) 2525-2530.
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.05.044>
- [7] R. Krishna et al. An understanding of lattice strain, defects and disorder in nuclear graphite, *Carbon* **124** (2017) 314-333.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.08.070>
- [8] M. Seyedhabashi et al. Study of surface damage and hydrogen distribution in irradiated tungsten by protons in plasma focus device, *Vacuum* **175** (2020) 109249.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109249>
- [9] F. Sedighi et al. Damage study and comparison the effects of high-energy pulsed-protons of plasma focus device with low-energy protons of glow discharge plasma of tokamak, *Plasma Research Express* **2** (2020) 11. <https://doi.org/10.1088/2516-1067/ab9d72>
- [10] R. Rayaprolu, S. Möller, C. Linsmeier, S. Spellerberg, Simulation of neutron irradiation damage in tungsten using higher energy protons, *Nuclear Materials and Energy* **9** (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.09.008>
- [11] S. Habenicht, Morphology of graphite surfaces after ion-beam erosion, *Physical Review B* **63** (2001).
<https://doi.org/10.1103/physrevb.63.125419>
- [12] M. mohammadreza Seyyedhabashy, M.A. Tafreshi, S. Shafiei, A. Nasiri, Damage studies on irradiated tungsten by helium ions in a plasma focus device, *Nuclear Engineering and Technology* **52** (2020) 827-834.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2019.10.003>
- [13] M.A. Asgarian, M.M.R. Seyedhabashi, B.S. Bidabadi, C. Rasouli, F. Sedighi, Radiation damage of tungsten surface irradiated with high-energy hydrogen and helium beams of plasma focus device, *Fusion*

<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.04.032>

[21] R. Niranjan et al. Surface modifications of fusion reactor relevant materials on exposure to fusion grade plasma in plasma focus device, *Applied Surface Science* **355** (2015) 989-998.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.192>

[22] R.F. Egerton et al. Basic questions related to electron-induced sputtering in the TEM, *Ultramicroscopy* **110** (2010) 991-997.
<https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2009.11.003>

[23] M.A. Amirkhani et al. The effects induced by proton irradiation on structural characteristics of nuclear graphite, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **321** (2019) 701-709.
<https://doi.org/10.1007/s10967-019-06615-5>

[24] N. Dutta et al. Surface and structural analyses of helium ion irradiated beryllium, *Vacuum*, **170** (2019) 108962.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108962>