مقایسه‌ی اثرات تابش پلاسمای دوتریوم و هیدروژن در تنگستن با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی

INC29-1222

علی عادلی احمدآبادی*، زهرا شهبازی راد، فریدون عباسی دوانی، بهجت قاسمی

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران-ایران.

چکیده:

تنگستن (W) به‌عنوان یک ماده ضروری در تحقیقات گداخت استفاده می‌شود. این ماده می‌تواند یک گزینه بالقوه برای استفاده به‌عنوان صفحات در دایورتور توکامک باشد. با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی با مشخصات (C=10.4 μF، V=23 kV، E=2.75 kJ)، تأثیر یون‌های تولیدشده در پلاسمای دوتریوم و هیدروژن بر روی صفحات W مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌ها توسط دستگاه پلاسمای کانونی در فاصله ۸ سانتی‌متری از بالای آند در معرض یون‌ها قرار گرفتند. برای تجزیه‌وتحلیل نمونه‌ها از روش ERD استفاده شد. این تجزیه‌وتحلیل نشان داد که یون‌ها تا چه مقدار به مواد نفوذ کرده‌اند. حداکثر نفوذ یون دوتریوم و هیدروژن به داخل نمونه‌ها به ترتیب nm250 و nm60 است. همچنین عمق نفوذ یون دوتریوم و هیدروژن را با استفاده از کد SRIM2008 محاسبه کردیم. عمق نفوذ دوتریوم با انرژی keV 52 بر روی نمونه W، nm 245 و برای یون‌های هیدروژن با انرژی keV 28، nm 120 به دست آمد. با مشاهده تصاویر SEM نشان داده شد که تخریب صفحات تنگستن با تابش یون‌های هیدروژن بیشتر از تابش یون‌های دوتریوم می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: پلاسمای کانونی، یون‌های پلاسمای هیدروژن و دوتریوم، تنگستن، عمق نفوذ یون.

Comparison of the effects of deuterium and hydrogen plasma radiation in tungsten using a plasma focus device

A. Adeli Ahmadabadi*, Z. Shahbazi Rad, F. Abbasi Davani, B. Ghasemi

Department of applied radiation, Faculty of nuclear engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract:

Tungsten (W) is used as an essential material in fusion researches. This material can be a potential option for use as plates in a tokamak divertor. Using a plasma focus device with specifications (C=10.4 μF, V=23 kV, E=2.75 kJ), the effect of ions produced in deuterium and hydrogen plasma on W plates has been studied. The samples were exposed to ions by a plasma focus device at a distance of 8 cm from the top of the anode. The ERD method was used to analyze the samples. This analysis showed how much the ions penetrated the material. The maximum penetration of deuterium and hydrogen ions into the samples is 250 nm and 60 nm, respectively. We also calculated the penetration depth of deuterium and hydrogen ions using the SRIM2008 code. The penetration depth of deuterium and hydrogen ions was calculated 245 nm and 120 nm on the W sample, respectively. The energy of deuterium and hydrogen ions was calculated 52 keV and 28 keV, respectively. By observing the SEM images, it was shown that the destruction of tungsten plates by hydrogen ions radiation is more than deuterium ions radiation.

Keywords: Plasma focus, Deuterium and Hydrogen plasma ions, Tungsten, Ion penetration depth.

۱. مقدمه

همجوشی هسته‌ای یکی از منابع انرژی است که با توجه به نیاز انسان به انرژی و کاهش قریب‌الوقوع سوخت‌های فسیلی باید جایگزین شود. انرژی همجوشی به دلیل فواید و منابع سوخت فراوان موردتوجه دانشمندان قرار گرفته است. یکی از گزینه‌ها به‌عنوان ماده‌ی رو به پلا سما (PFM[۱]) که در ساخت توکامک‌های عظیمی مانند ITER[۲] و JET[۳] استفاده می‌شود، استفاده از تنگستن (W) در صفحات دایورتور توکامک‌های نسل پیشرفته است [۱].

بررسی PFMها یکی از مسائل کلیدی در ساخت دستگاه‌های گداخت هستند زیرا هم بر کنترل پلاسما در حین تخلیه و هم بر ماندگاری مواد تأثیر دارند که انواع مختلف آن شامل موارد زیر است.

۱) فرسایش PFM در اثر تابش پلاسما با مواد PFM و پوشش مجدد مواد فرسایش یافته روی این مواد.

۲) ایجاد ناخالصی و سپس انتقال آن به پلاسما.

۳) کاشت یون‌های پلاسما در PFM که منجر به حفظ و انتشار این یون‌ها در PFM می‌شود.

۴) تغییرات در خواص ساختاری، شیمیایی، مکانیکی و حرارتی PFM.

۵) گرمایش منجر به تصعید یا تبخیر، ترک خوردن و سایر انواع آسیب در PFM می‌شود.

این فعل‌وانفعالات اغلب در فرآیندهای نامطلوبی رخ می‌دهد که باعث ناپایداری و تخریب پلاسما می‌شوند و همچنین باعث افزایش شار ذرات و بار حرارتی بر روی PFMها می‌شود [۲].

با استفاده از انواع مختلف پلا سمای کانونی، آزمایش‌ها و بررسی‌های گسترده‌ای بر روی PFMها انجام شده است. در ادامه، تحقیقات انجام شده توسط محققان دیگر در این زمینه بیان شده است. سیدحبشی و همکاران [۳] آسیب تابش یون‌های پروتون را بر روی W و مس (Cu) با استفاده از یک دستگاه پلا سمای کانونی مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها از آنالیز ERD[۴] برای به دست آوردن مقدار هیدروژن در ضخامت‌های مختلف سطوح W و Cu استفاده کردند. آن‌ها نفوذ یون‌های هیدروژن را پس از ۲۰ شات روی مس در ۱۶۰ nm و در سطح W در ۱۲۰ nm محاسبه کردند. سپس با استفاده از کد TRIM مقدار انرژی هیدروژن را در حدود ۳۰ keV به دست آوردند.

واس[۵] و همکاران [۴] اثرات پلاسمای دوتریوم را بر روی W به‌عنوان یک PFM راکتور همجوشی با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی بررسی کردند. مورفولوژی سطح نمونه‌های W نشان داد که سطح نمونه ناهموار با نانوذرات ۳۰ تا nm ۵۰ همراه با تراکم بزرگ‌تر nm ۱۰۰ است. پس از قرار گرفتن در معرض ۲ و ۴ شات از پلاسمای دوتریوم، مشاهده شد که لایه‌های نازک W هنوز سالم مانده‌اند. به نظر می‌رسد اندازه ویژگی نانوساختارهای روی سطح با افزایش تعداد شات‌های پلاسمای کانونی در حال رشد است اندازه متوسط ذرات با افزایش تعداد شات از nm ۳۹٫۴ برای W تابش‌دهی نشده به nm ۴۵٫۳ پس از ۲ شات و به nm ۶۴ پس از ۴ شات افزایش می‌یابد.

بویان[۶] و همکاران [۵] تأثیر تابش یون نئون بر W را برای راکتور همجوشی بررسی کردند. آن‌ها اثرات شات‌های مختلف بر روی W بررسی کردند. انرژی یون‌های نئون در مرتبه MeV ۱ بود. آن‌ها نتیجه گرفتند با افزایش تعداد شات عرض ترک روی سطح W افزایش پیدا می‌کند.

در این تحقیق، عمق نفوذ یون‌های دوتریوم و هیدروژن تولیدشده پلاسمایی به سطح W را با استفاده از روش آنالیز ERD تعیین کردیم. سپس نتایج را با داده‌های کد SRIM و کار انجام شده توسط سایر محققان مقایسه کردیم.

۲. روش کار

---

۱. plasma-facing material

۲. International Thermonuclear Experimental Reactor

۳. Joint European Torus

۴. Elastic Recoil Detection

۵. Vas

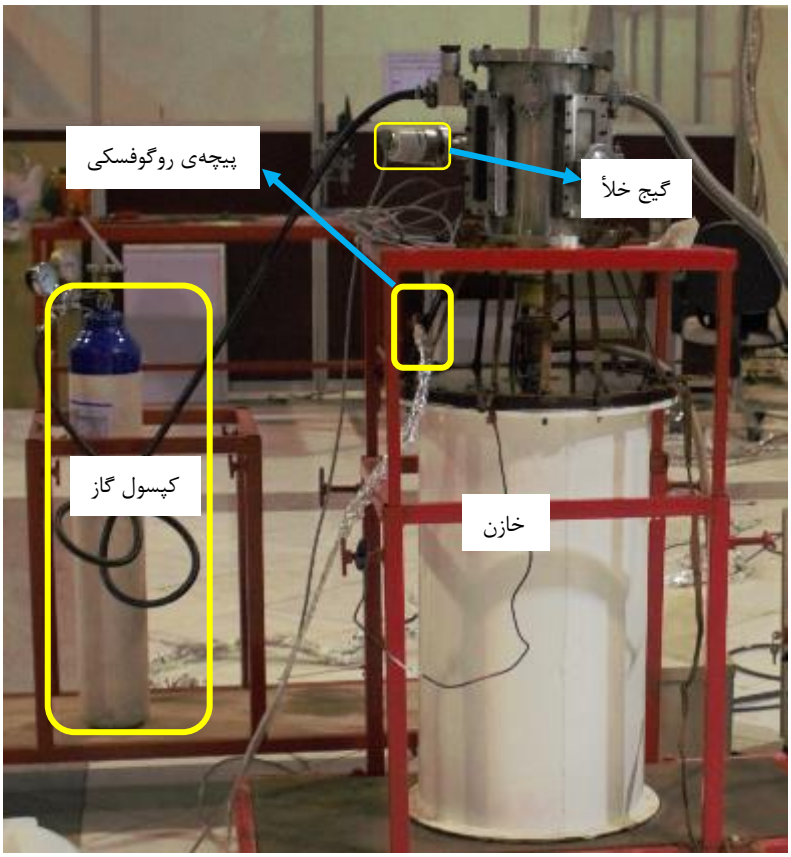
۶. Bhuyan

اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 با حداکثر انرژی ۲٫۷۵ kJ انجام شد. مشخصات و شماتیک‌های دستگاه SBUPF1 در مرجع [۶] گزارش شده است. شکل ۱ چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر یون‌های دوتریوم و هیدروژن بر سطح W، فشار و ولتاژ بهینه برای گاز دوتریوم و هیدروژن به ترتیب ۶ mbar و ۲۳ kV به دست آمد.

نمونه‌های W با طول ۳ cm، عرض ۳ cm و ضخامت ۱ mm در مرکز د ستگاه پلا سمای کانونی بالای آند با نگهدارنده نشان داده شده در شکل ۲ قرار گرفتند. نمونه‌ها در فاصله ۸ cm از بالای آند قرار گرفتند. یک نمونه W توسط یون‌های دوتریوم و یک نمونه دیگر توسط یون‌های هیدروژن تحت تابش قرار گرفتند. هر دو نمونه W توسط یون‌های دوتریوم و هیدروژن با ۳ شات تابش داده شدند.

پس از تابش یون‌های دوتریوم و هیدروژن، سطوح نمونه‌ها با روش ERD آنالیز شدند [۷]. آنالیزهای ERD توسط پرتو هلیوم (He) با انحراف ۳۰ درجه با استفاده از شتاب دهنده تهران وان دی گراف در آزمایشگاه سازمان انرژی اتمی ایران انجام شد.



شکل ۱. چیدمان آزمایش برای تابش پلاسما به تنگستن.

با استفاده از کد SRIM نفوذ یون دوتریوم و هیدروژن در تنگستن محاسبه می‌شود. این کد گروهی از برنامه‌ها است که محدوده و میزان نفوذ یون‌ها (تا ۲GeV/amu) را با استفاده از روش مکانیکی کوانتومی برخورد یون-اتم محاسبه می‌کند. (با فرض یک اتم متحرک به‌عنوان یک «یون» و همه اتم‌های هدف به‌عنوان "اتم"). این محا سبه با ا ستفاده از الگوریتم‌های آماری ب سیار کارآمد ا ست که به یون اجازه می‌دهد بین برخوردهای محا سبه شده جهش دا شته با شد و سپس نتایج برخورد را میانگین‌گیری کند [۸].

۳. محاسبات و نتایج

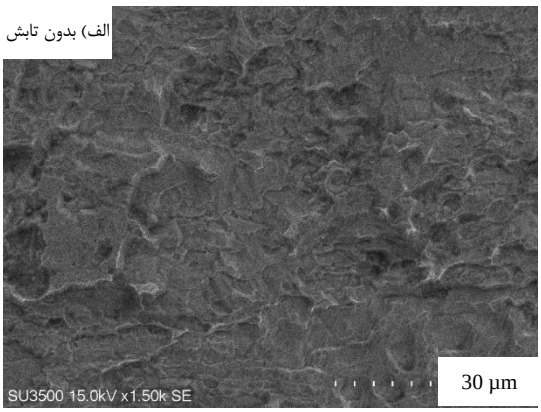
حداکثر مقدار تخلیه جریان در شرایط بهینه برای گاز دوتریوم و هیدروژن به ترتیب حدود ۱۱۰ kA و ۱۱۹ kA اندازه‌گیری شد. مقدار انرژی برای بیشتر یون‌های دوتریوم و هیدروژن به ترتیب حدود ۵۲ keV و ۲۸ keV اندازه‌گیری شد.

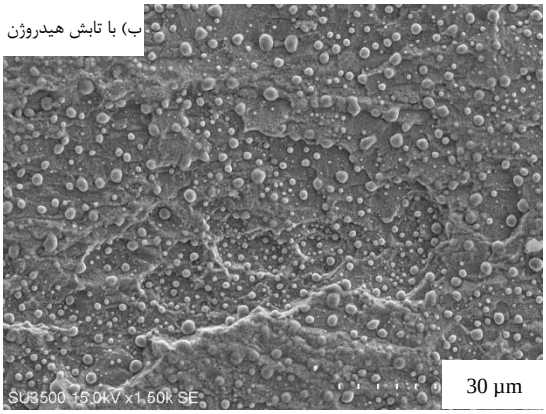
انرژی یون‌ها با استفاده از فنجان فارادی محاسبه شد. برای اندازه‌گیری انرژی یون از روش زمان پرواز (TOF[۱]) استفاده شد. فا صله زمانی بین ت شکیل پینچ تا زمان پیک جریان یون در سیگنال فنجان فارادی، ن شان‌دهنده‌ی مقدار TOF است.

با توجه به شرایط همجوشی که تولید می‌شود، هر شات پلاسما اثراتی بر سطح موادی که توسط پلاسما تابش می‌شوند، بر جای می‌گذارند. این اثرات می‌توانند شامل فرسایش، جابجایی اتم، کندوپاش، تشکیل حباب و غیره باشد.

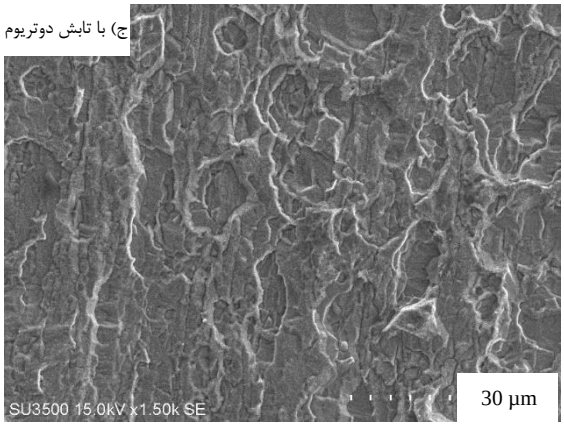
شکل ۲. نگهدارنده نمونه‌های تنگستنی.

در اثر تابش پلا سمای هیدروژن آ سیب‌های زیادی م شاهده شد و حباب‌هایی روی سطح ایجاد شد، اما تابش پلا سمای دوتریوم آ سیب زیادی به سطح W وارد نکرد. فقط کمی اعوجاج در سطح آن م شاهده شد. ت صاویر SEM از سطح نمونه W بدون تابش، پس از تابش پلا سمای هیدروژن و پس از تابش پلا سمای دوتریوم، در شکل ۳ ن شان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آسیب ناشی از تابش پلاسمای هیدروژن بیشتر از دوتریوم است. در نتیجه، پدیده فرسایش در تابش پلاسمای هیدروژن رخ داده است.



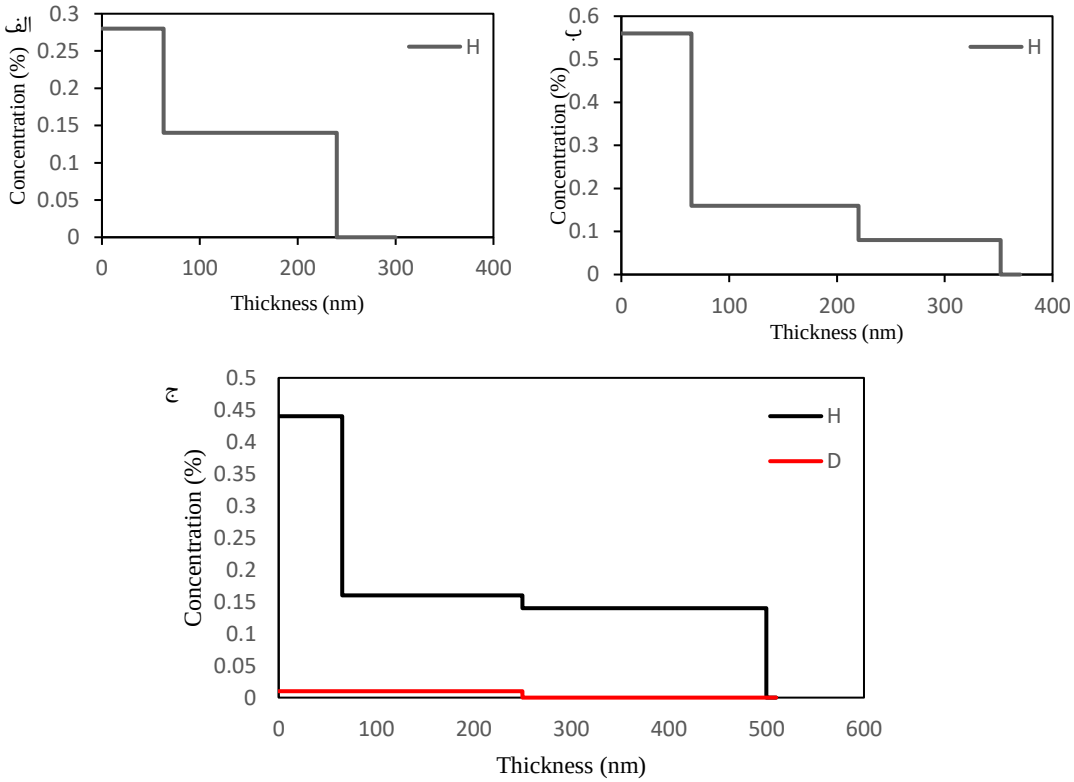


[۱] . Time of flight



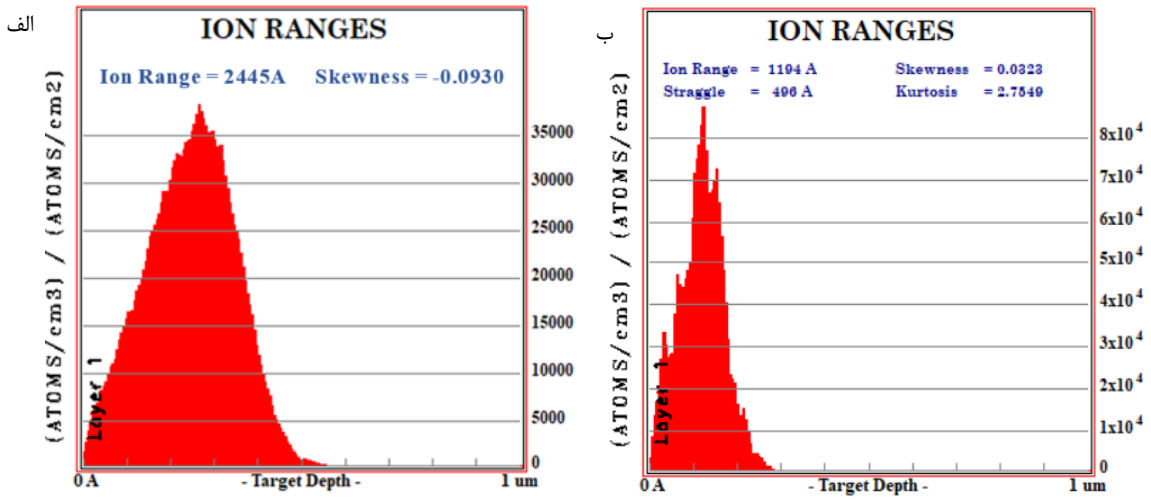
شکل ۳. تصاویر SEM از نمونه‌های تنگستنی الف) بدون تابش، ب) تابش پلاسمای هیدروژن، ج) تابش پلاسمای دوتریوم، در فشار ۶ mbar و ولتاژ ۲۳ keV.

شکل ۴ نتایج آنالیز ERD نمونه W را نشان می‌دهد. آنالیز عنصری نشان می‌دهد که درصد هیدروژن در سطح نمونه W تابش داده نشده، حدود ۲۸٪ تا عمق ۶۳ nm است. میزان عمق نفوذ بیشتر یون‌های هیدروژن در نمونه W که در معرض تابش پلاسمای هیدروژن بود تا عمق ۶۰ nm است. مقدار عمق نفوذ هیدروژن در W توسط SRIM حدود ۱۲۰ nm محاسبه شد. این اختلاف ناشی از پدیده فرسایش است. عمق نفوذ یون دوتریوم در نمونه W که در معرض تابش پلاسمای دوتریوم بود ۲۵۰ nm است.



شکل ۴. غلظت اتم الف) قبل از تابش، ب) پس از تابش توسط پلاسمای هیدروژن، ج) پس از تابش توسط پلاسمای دوتریوم.

با تعریف انرژی یون‌های دوتریوم و هیدروژن در کد محاسباتی SRIM که به ترتیب برابر ۵۲ keV و ۲۸ keV اندازه‌گیری شده بودند، عمق نفوذ یون‌های دوتریوم و هیدروژن در نمونه‌های W به ترتیب ۲۴۵ nm و ۱۲۰ nm به دست آمد. مطابق شکل ۵الف، عمق نفوذ یون دوتریوم به سطح W حدود ۲۴۵ nm و مطابق شکل ۵ب، عمق نفوذ یون هیدروژن حدود ۱۲۰ nm است.



شکل ۵. محاسبه محدوده‌ی عمق نفوذ یونی در نمونه‌های W برای (الف) یون‌های دوتریوم با انرژی ۵۲ keV (ب) یون‌های هیدروژن با انرژی ۲۸ keV با استفاده از کد SRIM2008.

در جدول ۱ نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق را با سایر پژوهش‌ها مقایسه کرده‌ایم. مقادیر به‌دست‌آمده با سایر کارهای تحقیقاتی همخوانی دارد و نشان از قابل‌قبول بودن نتایج به‌دست‌آمده دارد.

در این تحقیق از پلا سمای کانونی با انرژی ۲٫۷ kJ ا ستفاده شد که با انرژی د ستگاه در سایر کارها برابر ا ست. انرژی دوتریوم به‌دست‌آمده در این کار که با فنجان فارادی اندازه‌گیری شد، نزدیک به کارهای انجام شده توسط کوانگ لیم[۱] و ســـاو[۲] اســـت. میزان نفوذ یون هیدروژن در این کار هم از روش آنالیز ERD و هم از طریق محاســـبه SRIM با کار سیدحبشی همخوانی خوبی دارد.

جدول ۱. مقایسه نتایج کارهای مختلف.

کارهای انجام شده	انرژی دستگاه (kJ)	نفوذ دوتریوم در سطح تنگستن (nm)	نفوذ هیدروژن در سطح تنگستن (nm)	انرژی دوتریوم (keV)	انرژی هیدروژن (keV)
این کار	۲٫۷۵	ERD=250 TRIM=245	ERD=60 TRIM=120	۵۲	۲۸
سیدحبشی [۹]	۲٫۷		ERD=40-60 SRIM=60-120		۵-۵۰۰۰
ساو [۱۰]	۲٫۲			۵۶	
کوانگ لیم [۱۱]	۲٫۷			۵۲	

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت اثر یون‌های تولید شده از پلا سما بر PFMها، در این تحقیق با ا ستفاده از د ستگاه پلا سمای کانونی، اثرات یون‌های پلاسمای دوتریوم و هیدروژن بر روی نمونه‌های W مورد بررسی قرار گرفت.

انرژی یون‌های دوتریوم و هیدروژن با فنجان فارادی به دست آمد و به ترتیب ۵۲ keV و ۲۸ keV بودند.

با توجه به آنالیز ERD، عمق نفوذ یون‌های دوتریوم و هیدروژن در W به ترتیب تا ۲۵۰ nm و ۶۰ nm به دست آمد. با تعریف انرژی یون‌های دوتریوم و هیدروژن در کد محاسباتی SRIM که به ترتیب برابر ۵۲ keV و ۲۸ keV اندازه‌گیری شده بودند، عمق نفوذ یون‌های دوتریوم و هیدروژن در نمونه‌های W به ترتیب ۲۴۵ nm و ۱۲۰ nm به دست آمد.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، آ سیب نا شی از تابش پلا سمای هیدروژن بیشتر از آ سیب نا شی از دوتریوم ا ست. در نتیجه، پدیده فر سایش در مورد تابش پلا سمای هیدروژن رخ داده ا ست. بر ا ساس آنالیز ERD و کد SRIM، میزان این فرسایش ۶۰ nm است.

---

۱. Kuang Lim

۲. Saw

ازآنجایی‌که شـــدت بیشـــینه‌ی تخلیه جریان خازن در هنگام کار با گاز هیدروژن kA ۱۱۹ ولی برای گاز دوتریوم kA ۱۱۰ بود که برای هیدروژن بیشـــتر اســـت.در نتیجه انتظار قدرت تخریب برای یون‌های هیدروژن بیشـــتر اســـت. W تابش‌دهی نشده دارای ناخالصی هیدروژن بود، مقدار هیدروژن در W تابش داده شده با یون هیدروژن از عمق nm ۶۰ بیشـــتر با W بدون تابش تفاوت چندانی ندارد. به همین علت به‌جای متوســـط یون‌های هیدروژن، بیشـــینه یون‌های هیدروژن را مورد بررسی قرار دادیم.

۶. مراجع

1. Philipps, V., *Tungsten as material for plasma-facing components in fusion devices.* Journal of nuclear materials, 2011. **415**(1): p. S2-S9.
2. Seyedhabashi, M.M.R., et al., *Radiation Damage of Graphite Surface, Used in First-Wall and Divertor of Tokamaks, Irradiated by Hydrogen and Argon in Plasma Focus Device.* IEEE Transactions on Plasma Science, 2022.
3. mohammadreza Seyedhabashi, M., et al., *Damage study of irradiated tungsten and copper using proton and argon ions of a plasma focus device.* Applied Radiation and Isotopes, 2019. **154**: p. 108875.
4. Vas, J.V., et al., *Plasma processed tungsten for fusion reactor first-wall material.* Journal of Materials Science, 2021. **56**(17): p. 10494-10509.
5. Bhuyan, M. and H. Al Rashid, *The effect of neon ion irradiation on tungsten for next generation fusion reactor.* Materials Today: Proceedings, 2022.
6. Shahbazi rad, Z., M. Shahriari, and F. Abbasi Davani, *Investigation of Spatial Distribution of Hydrogen and Argon Ions and Effects of them on Aluminum Samples in a 2.5 kJ Mater Type Plasma Focus Device.* Journal of fusion energy, 2011. **30**(5): p. 358-366.
7. Michael Nastasi, J.W.M., Yongqiang Wang, *Ion Beam Analysis*. 2015, London: CRC Press is an imprint of theTaylor.
8. *SRIM Code Version 2008*, *www.SRIM.org*. 2008.
9. Seyedhabashi, M., et al., *Study of surface damage and hydrogen distribution in irradiated tungsten by protons in plasma focus device.* Vacuum, 2020. **175**: p. 109249.
10. Saw, S., et al., *Damage Study of Irradiated Tungsten using fast focus mode of a 2.2 kJ plasma focus.* Vacuum, 2017. **144**: p. 14-20.
11. Lim, L.-K., S.-L. Yap, and D. Bradley, *Time-resolved characteristics of deuteron-beam generated by plasma focus discharge.* Plos one, 2018. **13**(1): p. e0188009.