



## بررسی اثر یون‌های تولیدی پلاسمای حاصل از گداخت بر روی آلومینیوم و تنگستن با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی

علی عادل‌آبادی\*، فریدون عباسی دوانی، بهجت قاسمی، زهرا شهبازی راد  
گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران-ایران

### چکیده

در این پژوهش با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی با مشخصات ( $C=10.4 \mu F$ ,  $V=23 \text{ kV}$ ,  $E=2.75 \text{ kJ}$ )، اثر برخورد یون‌های تولیدی در پلاسمای دوترون به صفحات تنگستن و آلومینیوم بررسی شده است. نمونه‌ها در فاصله‌ی ۸ cm از آند توسط دستگاه پلاسمای کانونی تحت تابش پلاسمای قرار گرفتند. سپس آنالیز SEM، EDX، ERD و RBS از نمونه‌ها گرفته شد. نتایج آنالیز میزان خرابی سطحی، مقدار یون‌هایی که روی سطح قرار گرفته‌اند و میزان عمق نفوذ یون‌ها را در نمونه نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار خرابی ایجاد شده روی سطح آلومینیوم بسیار بیشتر از تنگستن بود. بر اثر برخورد پلاسمای دوترون به سطح تنگستن و آلومینیوم حباب‌هایی روی سطح ایجاد شد. میزان نفوذ دوترون در آلومینیوم ۲۰۰ nm و در تنگستن ۲۵۰ nm به دست آمد. همچنین با استفاده از فنجان فارادی انرژی بیشینه‌ی یون‌های دوترون در حدود ۵۰ keV اندازه‌گیری شد.

**کلیدواژه‌ها:** پلاسمای کانونی، پلاسمای دوترون، تنگستن، آلومینیوم، فنجان فارادی

## Investigation on the effect of the fusion plasma produced ions on Tungsten and Aluminum with plasma focus device

Ali Adeli Ahmadabadi, Fereydoun Abbasi Davani\*, Behjat Ghasemi, Zahra Shahbazi Rad

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

### Abstract

In this research, the effect of ions produced in deuterium plasma on tungsten and aluminum plates has been investigated using a plasma focus device with specifications ( $C=10.4 \mu F$ ,  $V=23 \text{ kV}$ ,  $E=2.75 \text{ kJ}$ ). The samples were irradiated in 8 cm distance of anode with deuterium plasma produced by a plasma focus device. The sample analyses were done by the SEM, EDX, ERD and RBS methods. These analyses show the extent of surface damage, the amount of ions deposited on the surface, and the depth of ion penetration into the sample. The amount of damages on the aluminum surface were much higher than tungsten. Bubbles formed on the surface due to the impact of deuterium ions on the surface of tungsten and aluminum. The penetration depth of deuterium was 200 nm in aluminum and 250 nm in tungsten. Also, the deuterium ions energy was measured with Faraday cup at about 50 keV.

**Keyword:** Plasma focus, Deuterium plasma ions, Tungsten, Aluminum, Faraday cup

## ۱. مقدمه

با توجه به نیاز همیشگی بشر به انرژی و همچنین تمام شدن سوخت فسیلی در آینده، جایگزین کردن منابع انرژی ضروری می‌باشد. یکی از این منابع جایگزین، انرژی حاصل از گداخت هسته‌ای می‌باشد. به علت مزیت‌ها و نامحدود بودن منبع سوخت، دانشمندان به دنبال بهره‌برداری از انرژی گداخت می‌باشند. توکامک دستگاهی است که برای بهره‌برداری از انرژی گداخت طراحی شده است. در حال حاضر زمان بهره‌برداری از انرژی گداخت در پروژه‌های شبیه ایتر (ITER-Like) ۱۰ ثانیه می‌باشد [۱]. تحقیقات همچنان برای طولانی‌تر کردن زمان گداخت ادامه دارد. یکی از علت‌های زمان کم گداخت برخورد پلاسمای داخل توکامک به دیواره است. موادی که در دیواره توکامک استفاده می‌شوند برلیم و تنگستن هستند، بنابراین با استفاده از یک دستگاه مولد پلاسمای حرارتی می‌توان اثرات پلاسمای داخل توکامک بر تنگستن و برلیم را شبیه‌سازی و بررسی کرد. جواد و همکارانش [۲] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی با انرژی ۳ kJ، اثر پلاسمای دوترون را روی تنگستن بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌های تنگستنی را در فاصله‌های مختلفی از آند و همچنین با تعداد شات‌های متفاوت بررسی کردند. با توجه به آنالیز<sup>۱</sup> XRD، به‌غیر از تنگستن عنصر مس مشاهده شد که به علت وجود عناصر مس در کاتد و آند می‌باشد. با استفاده از آنالیز<sup>۲</sup> SEM به این نکته پی بردند که هرچه تعداد شات‌ها بیشتر باشد تعداد حباب‌ها و بزرگی ترک‌ها بیشتر می‌شود و هرچه فاصله‌ی نمونه از آند بیشتر باشد، تعداد حباب‌ها کمتر و شعاع حباب‌ها بزرگ‌تر می‌شود. از آنجایی که همچنان تحقیقات در رابطه با بهبود فرآیند گداخت انجام می‌شود. در این زمینه با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی با نام SBUMTPF1، اثر پلاسمای دوترون روی تنگستن بررسی می‌شود و با اثر پلاسمای دوترون روی نمونه‌ی آلومینیوم مقایسه می‌شود.

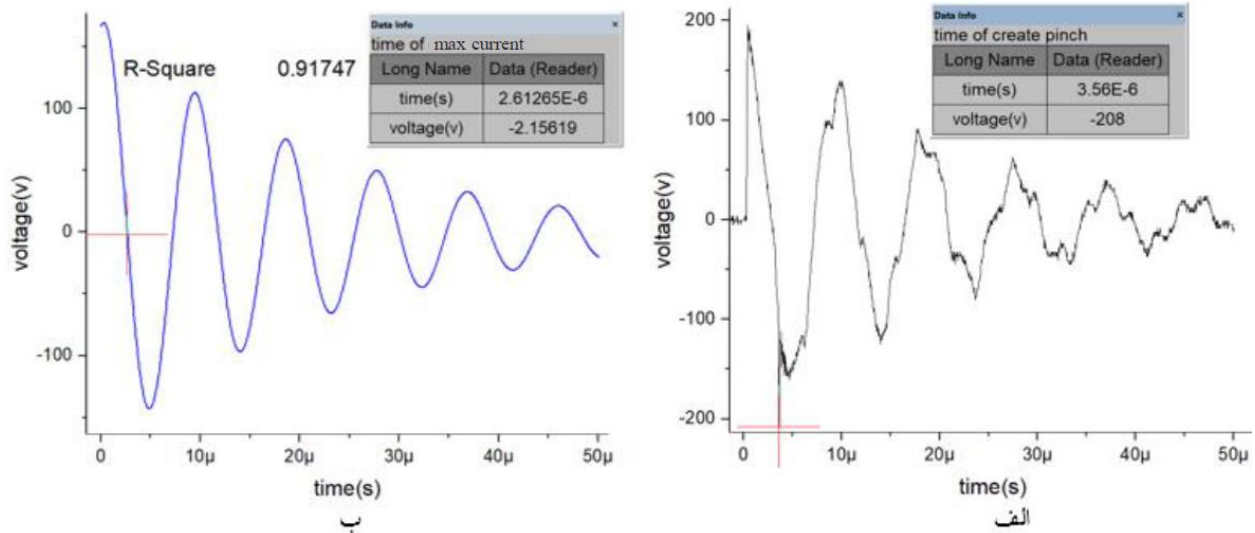
## ۲. روش انجام آزمایش

دستگاه پلاسمای کانونی مورد استفاده دارای مشخصات ( $C=10/4 \text{ F}\mu$ ،  $V=23 \text{ kV}$ ،  $E=2/75 \text{ kJ}$ ) است. این دستگاه در دانشگاه شهید بهشتی طراحی و ساخته شده است [۳]. در این آزمایش با استفاده از پیچ‌های روگوفسکی و نوسان‌نما<sup>۳</sup> مقدار بیشینه‌ی جریان تخلیه و همچنین شرایط بهینه پلاسمای اندازه‌گیری شد. طرز استفاده و عملکرد پیچ‌های روگوفسکی در مرجع [۴] آمده است. شرایط بهینه برای گاز دوترون فشار ۶ mbar و ولتاژ ۲۳ kV و مقدار بیشینه‌ی جریان تخلیه حدوداً ۱۱۰ kA به دست آمد. شکل ۱ نمونه‌ای از سیگنال تخلیه‌ی جریان که به واسطه‌ی پیچ‌های روگوفسکی روی نوسان‌نما ثبت شده و همچنین نمودار برازش شده را نشان می‌دهد. زمان‌های روی شکل برای به دست آوردن شرایط بهینه استفاده می‌شود که در مرجع [۵] توضیح داده شده است. لطفاً نام دستگاه‌های آنالیز مورد استفاده و مجموعه‌ای که در آن این آزمایش‌ها انجام شده در قاله قرار داده شود.

<sup>1</sup> X-Ray Diffraction

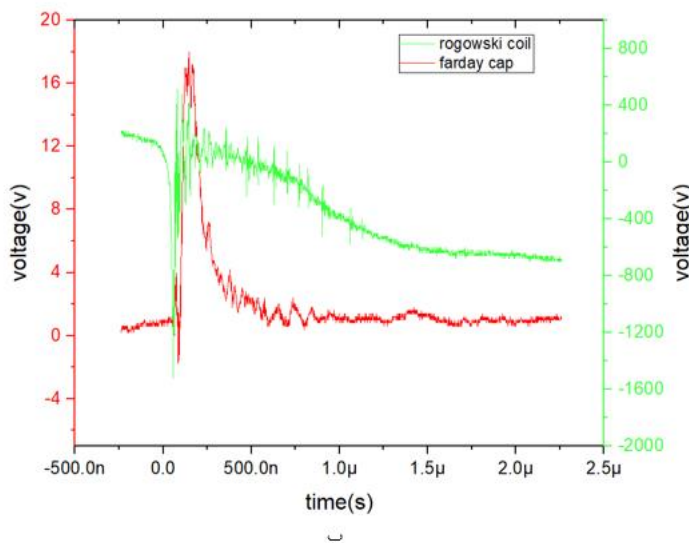
<sup>2</sup> Scanning electron microscope

<sup>3</sup> Oscilloscope



شکل ۱: الف) سیگنال تخلیه جریان که توسط پیچ‌های روگوفسکی روی نوسان‌نما ثبت شده، ب) نمودار برازش شده به سیگنال تخلیه‌ی جریان

با استفاده از فنجان فارادی مقدار انرژی یون‌های حاصل از پلاسمای دوتریون در بیشینه‌ی مقدار یون‌ها،  $52 \text{ keV}$  اندازه‌گیری شد. عملکرد فنجان فارادی در مرجع [۶] و نحوه‌ی اندازه‌گیری انرژی یون به وسیله‌ی فنجان فارادی و روش زمان پرواز ( $\text{TOF}^1$ ) در مرجع [۷] آمده است. شکل ۲ الف) فنجان فارادی که توسط نگهدارنده ثابت شده است را نشان می‌دهد. همچنین از همین نگهدارنده برای قرار دادن نمونه درون محفظه استفاده می‌شود. شکل ۲ ب) سیگنال‌های فنجان فارادی و پیچ‌های روگوفسکی که به طور هم‌زمان توسط نوسان‌نما ثبت شده‌اند را نشان می‌دهد.



الف

شکل ۲: الف) فنجان فارادی درون نگهدارنده ب) سیگنال قرمز، سیگنال حاصل از فنجان فارادی و سیگنال سبز سیگنال ناشی از پیچ‌های روگوفسکی می‌باشد.

<sup>1</sup> Time of flight

هنگامی که از دستگاه پلاسمای کانونی و گاز دوترون برای ایجاد پلاسمای استفاده می‌شود. در لحظه‌ی تنگش<sup>۱</sup> شرایط گداخت دوترون-دوترون فراهم می‌شود. ابتدا آلومینیوم را درون محفظه قرار دادیم. نمونه‌ی آلومینیومی به ابعاد  $30 \times 30 \times 1 \text{ mm}^3$  توسط نگه‌دارنده داخل محفظه و در فاصله‌ی ۸ cm از آند قرار دادیم. سپس محفظه را تا فشار  $2 \times 10^{-2} \text{ mbar}$  خلأ کردیم و گاز دوترون تا فشار ۶ mbar تزریق کردیم. در آخر با اعمال ولتاژ ۲۳ kV به خازن و تخلیه خازن شرایط گداخت در محفظه ایجاد شد. عمل شارژ و تخلیه خازن ۳ مرتبه و بلافاصله انجام شد که این عملیات به علت شرایط بهتر پلاسمای و تنگش در تخلیه‌ی سوم است. عملیات فوق روی نمونه‌ی تنگستنی به همان ابعاد انجام شد. بعد از این مراحل آنالیزهای SEM<sup>۲</sup>، EDX<sup>۳</sup>، ERD<sup>۴</sup> و RBS از سطح نمونه‌ها گرفته شد. ویژگی و چگونگی کار با آنالیزهای مذکور در مراجع [۸-۱۱] آمده است. آنالیزهای SEM و EDX توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی - SEM - SU3500 در آزمایشگاه مرکزی واقع در دانشگاه شهید بهشتی گرفته شده است. آنالیزهای ERD و RBS در خط باریکه  $30^\circ$  چپ آزمایشگاه واندوگراف تهران واقع در سازمان انرژی اتمی با استفاده از باریکه هلیوم ۱۸۰۰ keV انجام شد.

### ۳. نتایج آنالیز

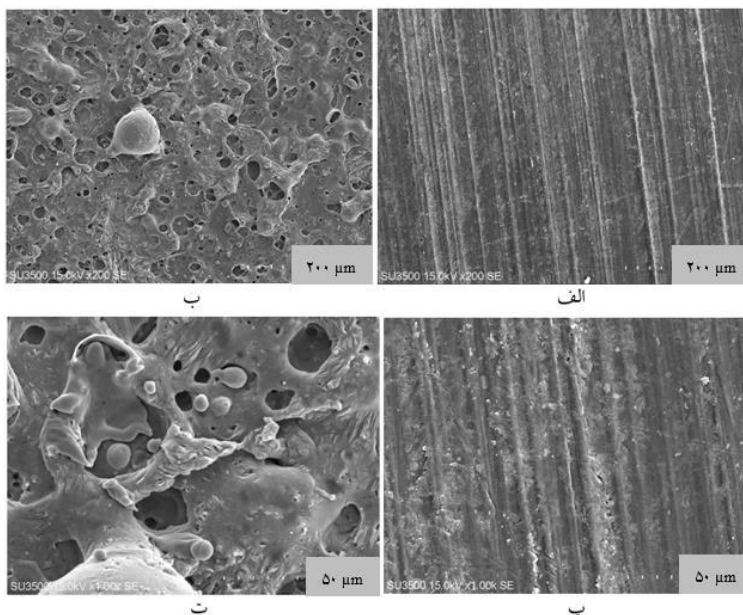
آنالیز نمونه‌های آلومینیوم و تنگستن قبل و بعد از تابش پلاسمای دوترون صورت گرفت. شکل ۳ تصاویر SEM از سطح نمونه‌ی آلومینیومی را قبل و بعد از تابش پلاسمای دوترون نشان می‌دهد. در اثر تابش پلاسمای دوترون خرابی زیادی روی سطح مشاهده می‌شود و حباب‌هایی روی سطح تشکیل شده است. هم‌چنین شکل ۴ نیز تصاویر SEM از سطح نمونه‌ی تنگستنی را قبل و بعد از تابش پلاسمای دوترون نشان می‌دهد. در اثر تابش پلاسمای دوترون خرابی زیادی روی سطح مشاهده نمی‌شود و حباب‌هایی روی سطح تشکیل شده است. با توجه به آنالیز SEM از سطح تنگستن و آلومینیوم که در معرض پلاسمای دوترون قرار گرفتند، تعداد حباب‌ها در سطح آلومینیوم کمتر و اندازه‌ی شعاع حباب‌ها بیشتر بوده است و هم‌چنین تخریب سطحی نمونه آلومینیوم بیشتر بوده است. این نتایج به علت مقاومت کمتر آلومینیوم نسبت به تنگستن اتفاق افتاده است. مقاومت سطحی آلومینیوم به علت چگالی کمتر نسبت به تنگستن، از مقاومت سطحی تنگستن کمتر است.

<sup>۱</sup> Pinch

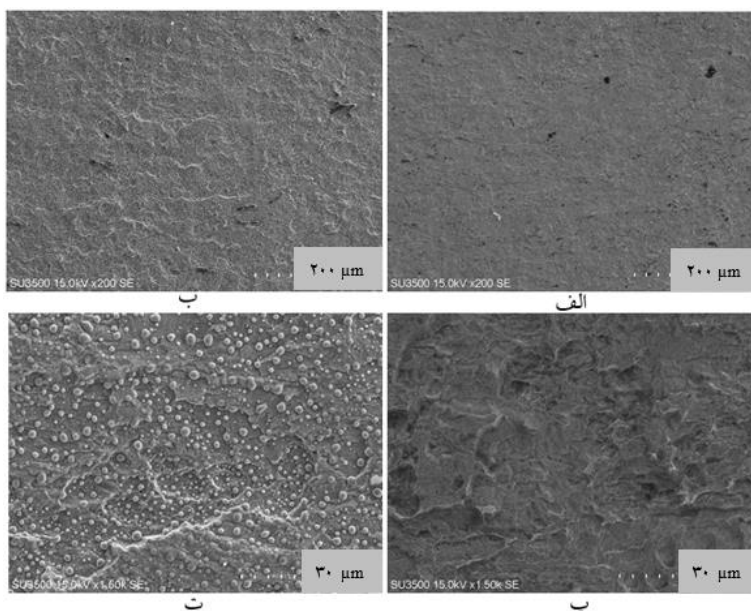
<sup>۲</sup> Energy Dispersive X-Ray

<sup>۳</sup> Elastic Recoil Detection

<sup>۴</sup> Rutherford back-scattering



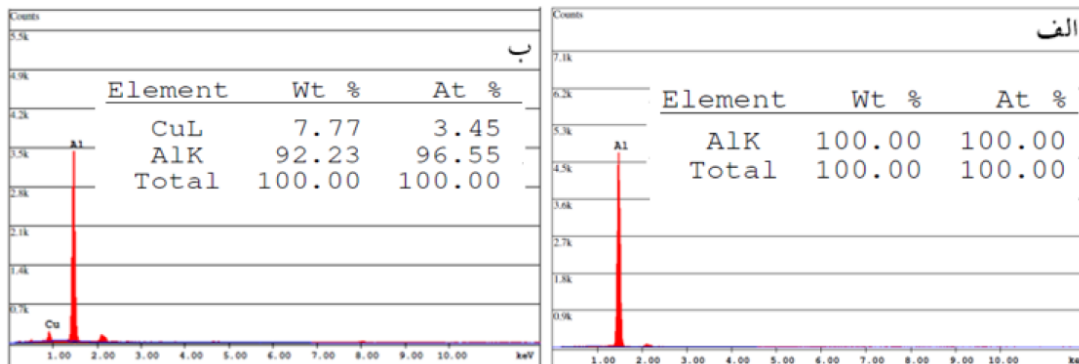
شکل ۳: تصویرهای میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های آلومینیوم الف) قبل از آزمایش، ب) اثر پلاسمای دوترون در فاصله‌ی ۸ cm از آند، پ) و ت) همان الف) و ب) با بزرگ‌نمایی بیشتر هستند



شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح تنگستن الف) و پ) قبل از تابش. ب) و ت) بعد از تابش توسط پلاسمای دوترون

با استفاده از آنالیز EDX از نمونه‌ی آلومینیومی قبل از پرتو دهی فقط عنصر آلومینیوم مشاهده شد و بعد از پرتو دهی با پلاسمای دوترون مقداری مس روی نمونه مشاهده شد (شکل ۵). با استفاده از آنالیز RBS و ERD نمونه‌ی قبل از پرتو دهی علاوه بر آلومینیوم، عنصر هیدروژن نیز به عنوان ناخالصی مشاهده شد و بعد از پرتو دهی با پلاسمای دوترون عناصر مس، اکسیژن، هیدروژن و مقداری دوترون در عمق ۲۰۰ nm در آلومینیوم مشاهده شد (جدول ۱). هم‌چنین با استفاده از آنالیزهای ذکر شده در نمونه‌ی

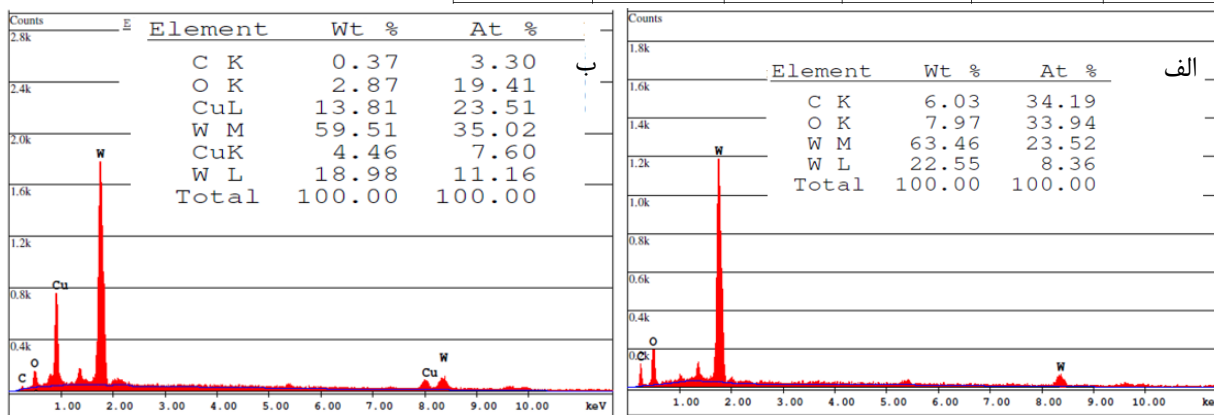
تنگستنی قبل از پرتو دهی عناصر کربن، اکسیژن و هیدروژن به عنوان ناخالصی در نمونه مشاهده شد. بعد از پرتو دهی نمونه تنگستن با پلاسمای دوتریون علاوه بر ناخالصی‌ها، عناصر دوتریون و مس نیز مشاهده شد (شکل ۶). عنصر دوتریون تا عمق ۲۵۰ nm در تنگستن مشاهده شد (جدول ۲).



شکل ۵: نتایج آنالیز EDX از نمونه‌ی آلومینیوم (الف) قبل از پرتو دهی، (ب) بعد از پرتو دهی (پیک اضافی طلای لایه نشانی شده می‌باشد)

جدول ۱: نتایج آنالیز ERD و RBS از نمونه‌ی آلومینیوم (الف) قبل از پرتو دهی، (ب) بعد از پرتو دهی

الف			ب					
عمق $10^{15}(\text{at}/\text{cm}^2)$	هیدروژن H	آلومینیوم Al	عمق $10^{15}(\text{at}/\text{cm}^2)$	هیدروژن H	دوتریم D	اکسیژن O	آلومینیوم Al	مس Cu
۰-۶۵۰	۰/۳۲	۰/۶۸	۰-۵۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۶۵۰-۱۴۵۰	۰/۱۰	۰/۹۰	۵۸-۳۲۸	۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۲۹	۰/۳۶
۱۴۵۰-۲۴۵۰	۰/۰۵	۰/۹۵	۳۲۸-۹۷۸	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۸۲	۰/۰۷
			۹۷۸-۲۰۷۸	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۰۶
			۲۰۷۸-۴۶۷۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰



شکل ۶: نتایج آنالیز EDX از نمونه‌ی تنگستن (الف) قبل از پرتو دهی، (ب) بعد از پرتو دهی

جدول ۲: نتایج آنالیز ERD از نمونه‌ی تنگستن (الف) قبل از پرتودهی، (ب) بعد از پرتودهی

عمق (nm)	عمق الف $10^{15}(\text{at}/\text{cm}^2)$	هیدروژن H	عمق (nm)	عمق ب $10^{15}(\text{at}/\text{cm}^2)$	هیدروژن H	دوتریم D
۳	۰-۵	۰/۰۰	۵	۰-۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰
۳-۶۳	۵-۴۰۵	۰/۲۸	۵-۶۵	۱۸-۴۱۸	۰/۴۴	۰/۰۱
۶۳-۲۴۰	۴۰۵-۱۶۰۵	۰/۱۴	۶۵-۲۵۰	۴۱۸-۱۷۱۸	۰/۱۶	۰/۰۱
			۲۴۵-۵۰۰	۱۷۱۸-۲۹۱۸	۰/۱۴	۰/۰۰

#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت تاثیر اجزای پلاسما بر روی مواد در راکتورهای گداخت، اثر پلاسمای دوتریون روی تنگستن و آلومینیوم با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی بررسی شد که نتایج زیر در این آزمایش حاصل شد. بعد از تابش پلاسمای دوتریون به نمونه‌های آلومینیوم و تنگستن، مشاهده شد که تعداد حباب‌ها در سطح آلومینیوم کمتر و اندازه‌ی شعاع حباب‌ها بیشتر است. هم‌چنین تخریب سطحی نمونه‌ی آلومینیوم بیشتر از تنگستن بود. حصول این نتایج را می‌توان به علت مقاومت کمتر آلومینیوم نسبت به تنگستن دانست. علت وجود مس روی نمونه‌ها به علت وجود کاتد و آند مسی و کندوپاش مس از سطح آن‌ها در فرآیند تشکیل پلاسما است. هم‌چنین اکسیژن موجود در نمونه‌ها می‌تواند به علت ناخالصی یون اکسیژن در پلاسمای تولیدی باشد و نیز ممکن است از آند مسی به‌عنوان ناخالصی ساطع شده باشد. علت احتمالی کمتر بودن عمق نفوذ دوتریون در آلومینیوم، ذوب سطحی آلومینیوم است که در تصاویر SEM میزان تخریب بیشتر در آلومینیوم مشهود است. در این آزمایش نشان داده شد که تنگستن نسبت به آلومینیوم در مقابل شرایط گداخت مقاومت خوبی دارد.

#### ۵. مراجع

- [1] E.V. Demina, A.V. Dubrovsky, V.A. Gribkov, S.A. Maslyaev, V.N. Pimenov, I.P. Sasinovskaya, R. Miklaszewski, M. Scholz, "Application of a Plasma Accelerator of the Dense Plasma Focus Type in Simulation of Radiation Damage and Testing of Materials for Nuclear Systems," 2009.
- [2] S. Javadi, B. Ouyang, Z. Zhang, M. Ghoranneviss, A. Salar Elahi, R.S. Rawat, "Effects of fusion relevant transient energetic radiation, plasma and thermal load on PLANSEE double forged tungsten samples in a lowenergy plasma focus device," *Applied Surface Science*, Vols. 311-320, 2018.
- [۳] ب. شیرانی، بهینه‌سازی نوتریون دهی دستگاه پلاسمای کانونی، SBUMTPF1، تهران: دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۷ (In Persian).
- [۴] شهبازی، ز.، بررسی تغییرات نوتریون دهی دستگاه پلاسمای کانونی با قرار دادن هدف دوتریومی داخل دستگاه، تهران: دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۰، (In Persian).
- [۵] ع. عبادی، طراحی و ساخت آرایه فنجان فارادی و آشکارساز زمان پرواز فارادی برای مطالعات یون در دستگاه پلاسمای کانونی، SBUPF1، تهران: دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، ۱۳۹۱، (In Persian).
- [۶] غ. اطاعتی، بررسی گسیل پرتوهای ایکس نرم، سخت و یون در دستگاه پلاسمای کانونی نوع مدر، تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ۱۳۸۹، (In Persian).
- [۷] ع. عادل، بررسی اثر یون‌های تولیدی پلاسما بر روی مواد مورد استفاده در دیواره ی توکامک با استفاده از دستگاه مولد پلاسمای حرارتی، تهران: دانشکده مهندسی هسته‌ای دانشگاه شهید بهشتی تهران، ۱۳۹۹، (In Persian).
- [8] Williams, J. R. Bird and J.S, Ion Beams for Materials Analysis, Australia: Academic Press, 1989.
- [9] Chu, W K; Mayer, J W; Nicolet, M A, Backscattering Spectrometry, Academic Press, 1978.
- [10] O.R.Kakuee, V.Fathollahi, M.Lamehi-Rachti, P.Oliaiy, H.Seyedi, S.Safa, M.Mojtahedzadeh Larijani, H.Moazzami, "Ion beam analysis of hydrogen-treated Ti/TiN protective nano-multilayers," *Physica Polonica*, vol. 122, 2012.
- [11] J. W. M. Y. W. Michael Nastasi, Ion Beam Analysis, London: CRC Press is an imprint of the Taylor, 2015.