

لایه‌نشانی کربن بر روی تنگستن با استفاده دستگاه پلاسمای کانونی

نرگس زیوه^{۱*}، مرتضی حبیبی^۱

۱. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده فیزیک و انرژی، گروه گداخت

چکیده:

تنگستن، فولاد ضد زنگ و مس از مهم‌ترین مواد ساختاری در دیواره سیستم‌های گداخت می‌باشند. تنگستن به دلیل مزایایی همچون استحکام بالا به عنوان یکی از مواد ساختاری دیواره راکتورهای گداخت و پلاسمای بکار می‌رود. از سوی دیگر، این ماده در دمای کاری پلاسمای، مقاومت به خوردگی و تحمل حرارتی پایینی دارد. یکی از روش‌های موثر جهت بهبود کارایی و خواص مواد پوشش و لایه‌نشانی آن با مواد دیگر است. از این رو، یکی از راه‌های بهبود خواص این ماده، پوشش‌دهی با کربن به دلیل مقاومت حرارتی و نقطه ذوب بالا این ماده می‌باشد. هدف این مقاله، لایه‌نشانی کربن بر روی نمونه‌های تنگستن که در زاویه صفر درجه نسبت به آند قرار دارند، می‌باشد. نمونه‌ها در معرض ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شات پلاسمای کانونی در زاویه صفر درجه نسبت به آند قرار گرفته و تست‌های SEM و XRD انجام شدند. نتایج تجربی نشان داد، با افزایش تعداد شات‌های پلاسمای کانونی از ۱۰ به ۲۰ و سپس ۳۰، میانگین اندازه کریستال‌ها نیز افزایش می‌یابد. نتایج XRD نیز پیک‌های کربن در شات‌های مختلف کاری را نشان می‌دهد همچنین، با مقایسه نتایج XRD و استفاده رابطه شرر، اندازه کریستال‌های کربن ۲۲۴.۶ نانومتر بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: تنگستن، گداخت، دستگاه پلاسمای کانونی، لایه‌نشانی.

Deposition of Carbon on tungsten substrates using plasma focus device

Narges Ziveh¹, Morteza Habibi¹

1. Nuclear Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract:

Tungsten is one of the most important structural materials in the wall of a fusion systems. Hence, one of the effective methods to improve the properties of this material is to cover it with carbon due to its thermal resistance and high melting point. In this paper, deposition of Carbon on tungsten substrates using plasma focus device and methane gas is done for the first time. The samples were exposed to 10, 20 and 30 shots at a zero-degree angle to the anode and SEM, AFM and EDX tests were performed. Results showed, the average size of crystallites (from XRD), sub-micro-structures (from SEM) and particles (EDX) increase when the number of shots increase from 10 to 20 then 30 shots. Also, by comparing the XRD results and using the Scherer equation, the size of carbon crystals was 224.6 nm.

Keywords: Tungsten, Fusion, Plasma Focus Device, Deposition.

Email: nargesziveh73@gmail.com

۱. مقدمه

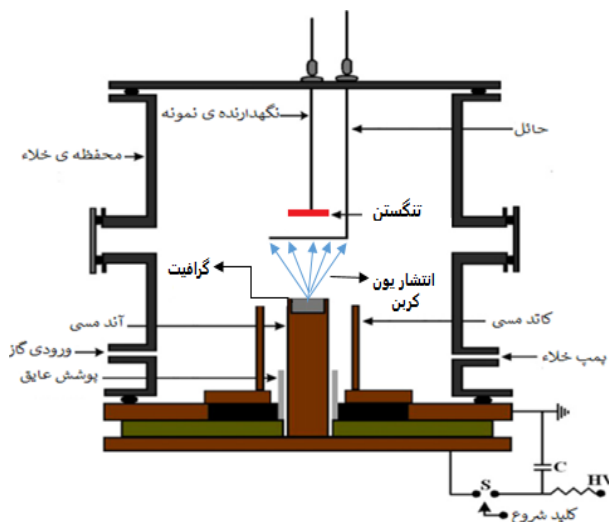
تنگستن، فولاددزنگ و مس از مهم‌ترین مواد ساختاری در دیواره سیستم‌های گداخت می‌باشند. تنگستن بدلیل مزایایی همچون استحکام بالا به عنوان یکی از مواد ساختاری دیواره راکتورهای گداخت و پلاسما بکار می‌رود [۱-۲]. از سوی دیگر، این ماده در دمای کاری پلاسما، مقاومت به خوردگی و تحمل حرارتی پایینی دارد. یکی از روش‌های موثر جهت بهبود کارایی و خواص مواد پوشش و لایه نشانی آن با مواد دیگر است. کربن با داشتن مقاومت حرارتی و همچنین نقطه ذوب بسیار بالا، گزینه‌ی مناسبی می‌باشد. از این رو، در این مطالعه، لایه‌نشانی کربن بر روی تنگستن جهت بهبود خواص تنگستن برای استفاده در ساختار دیواره گداخت انجام شد. روش‌های گوناگونی برای لایه‌نشانی وجود دارند که از میان آنها می‌توان به روش لایه‌نشانی شیمیایی بخار در دستگاه پلاسما کانونی اشاره کرد. این دستگاه نسبت به سایر روشهای متعارف لایه‌نشانی از مزیت‌هایی همچون فرآیند خشک، قیمت پایین، پرنرژی بودن و زمان کوتاه واکنش برخوردار است. هرچند معیایی نظیر اختلاف در پارامترهای یون در شات‌های مختلف را نیز داراست [۳]. تاکنون بررسی‌های زیادی بر روی مواد مختلف و فلزات گوناگون صورت گرفته شده است. اطاعتی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ میلادی، فیلم نازکی از نیتريد تنگستن بر روی فولاددزنگ را لایه‌نشانی کردند که موجب افزایش سختی سطح شد [۴]. گوپتا و سریواستاوا در سال ۲۰۰۴، با استفاده از روش‌های لایه‌نشانی لایه‌ای از کربن بر روی تیتانیوم ایجاد کردند [۵]. راوات و همکارانش در سال ۲۰۰۱ میلادی، با استفاده از دستگاه پلاسما کانونی، فیلم‌های نازکی از کاربید تیتانیوم را لایه‌نشانی کردند [۶]. در مطالعه‌ای دیگر، شایستا زب و همکارانش در سال ۲۰۰۷ میلادی، با استفاده از دستگاه پلاسما کانونی، فیلم‌های نازکی از الماس شبیه کربن را لایه‌نشانی کردند [۷].

۲. روش کار

در دستگاه پلاسما کانونی ۴/۵ kJ پلاسما چگال ($10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) در دمای بالا (۲keV-۰/۱) با طول پالس کوتاه (۱۰-۱۰۰ ns) تولید می‌شود. این دستگاه از نوع مدر بوده و توسط یک خازن (۲۰kV، ۱۰ μF، ۹۰ nH) تغذیه می‌شود. همچنین جریان تخلیه با استفاده از پیچ‌ه روگوفسکی در حدود ۱۷۰ kA به دست آمد. آند شامل لوله‌ای از جنس مس به ارتفاع (cm) ۱۴/۸ و قطر (cm) ۲ است. کاتد شامل میله مسی توپر بطور متقارن بر روی صفحه با لبه تیز نصب شده است. عایق‌های از جنس پیرکس با (mm) ۳ و (cm) ۵/۲ استفاده شده است. محفظه تخلیه که نقش بخشی از کاتد سیستم را نیز ایفا می‌کند، از جنس فولاد ضد زنگ حاوی شش پنجره در اطرافش بطور متقارن جهت نصب ابزار تشخیصی بوده و به قطر درونی (cm) ۲۶/۵ و (cm) ۳۸ می‌باشد. پوشش بالایی محفظه واکنش با قطر (cm) ۳۴/۵ می‌باشد. این سیستم قابلیت تولید پلاسما چگال ($10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) با دمای بالا (۲keV-۰/۱) و طول پالس (۱۰-۱۰۰ ns) را دارد. شکل (۱)، نمایی از کارکرد دستگاه پلاسما کانونی استفاده شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل نیز پیداست، محفظه خلاء ابتدا توسط یک پمپ روتاری تخلیه شده است و سپس گاز متان با فشار (toit) ۲ تزریق می‌شود. پس از تشکیل و تخریب ستون پلاسما چگال در اثر ناپایداری سوسیسی و رشد شدید اندوکتانس، میدان الکتریکی القایی یون‌ها را به سمت بالای محفظه شتاب می‌دهد. همچنین، الکترون‌ها که در جهت مخالف شتاب می‌گیرند، با سطح نوک آند به شدت برخورد کرده و سبب کندن سطح و انباشت آن به نمونه از قسمت بالایی الکترودها می‌شوند. در نتیجه، با توجه به اینکه در این مقاله از گاز متان استفاده شده و در نوک آند نیز گرافیت قرار داده شده است، کربن در اثر پلاسما گاز محفظه و همچنین در اثر پراکنش گرافیت در اثر برخورد الکترون‌ها و کندن آنها بر روی نمونه از جنس تنگستن لایه‌نشانی خواهد شد. با ایجاد هر پالس پلاسما، یون‌های کربن، هم از قرص گرافیتی و هم از پلاسما گاز متان به سطح تنگستن برخورد کرده و تشکیل لایه‌ای از گرافیت بر روی تنگستن می‌دهند. در این مطالعه، با بکارگیری دستگاه پلاسما کانونی دانشگاه صنعتی امیرکبیر به روش لایه‌نشانی با دستگاه پلاسما کانونی برای اولین بار، با استفاده از قرص گرافیت بر روی نوک آند دستگاه پلاسما کانونی و گاز متان، لایه‌نشانی کربن بر روی نمونه‌های تنگستن انجام شد. در نهایت، نمونه‌ها در معرض ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شات در زاویه صفر درجه نسبت به آند

قرار گرفته و تست‌های SEM و XRD انجام شدند نتایج آورده و تحلیل کردند تا صحت‌سنجی لایه نشانی کربن با دقت بالا صورت گیرد.

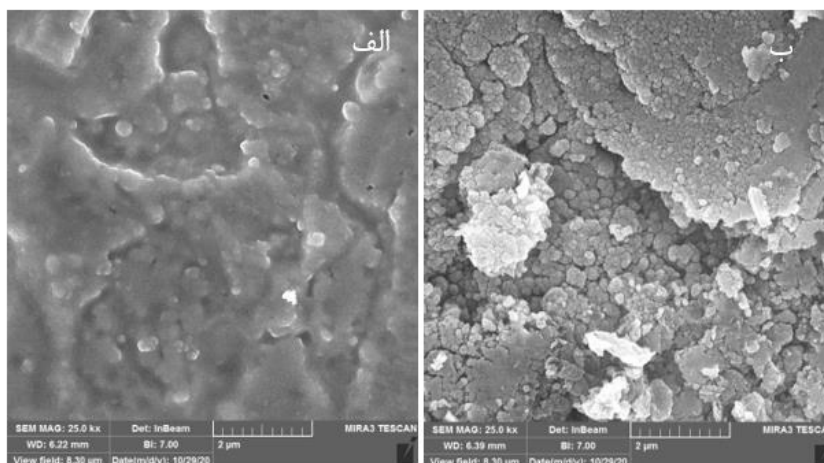


شکل ۱. نمایی از کارکرد دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱.۲. نتایج

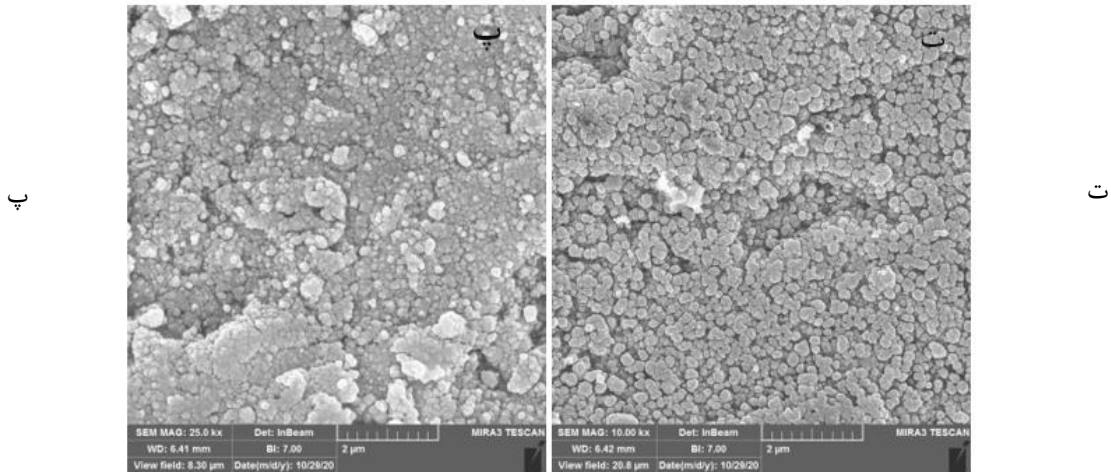
نتایج تست SEM

جهت بررسی مورفولوژی سطح، اندازه ذرات و توزیع اندازه دانه‌های کربنی لایه‌نشانی شده بر روی سطح زیرلایه از آزمون FE-SEM استفاده شده و میکروگراف‌های بدست آمده در شکل (۲) نشان داده شده است.



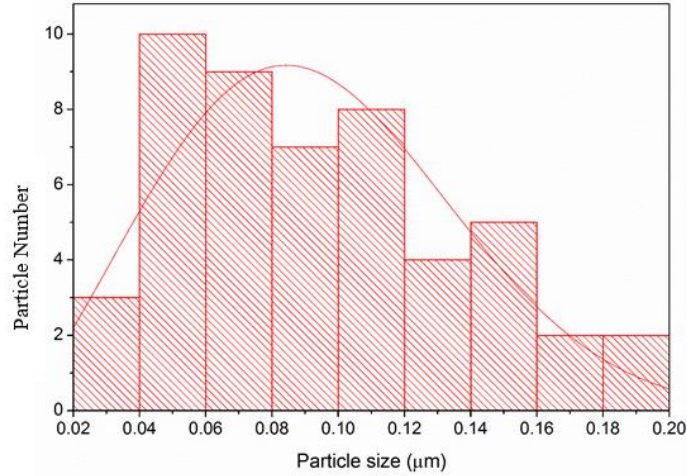
الف

ب

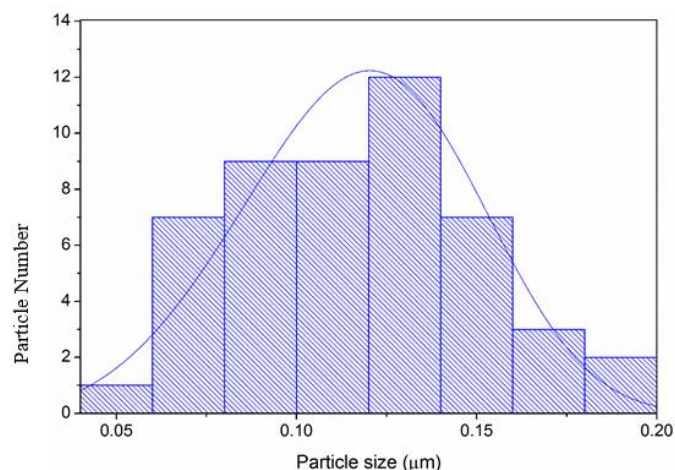


شکل ۲. تصاویر FE-SEM مربوط به (الف) نمونه بدون شات و همچنین نمونه‌های قرار گرفته تحت (ب) ۱۰ شات، (پ) ۲۰ شات و (ت) ۳۰ شات

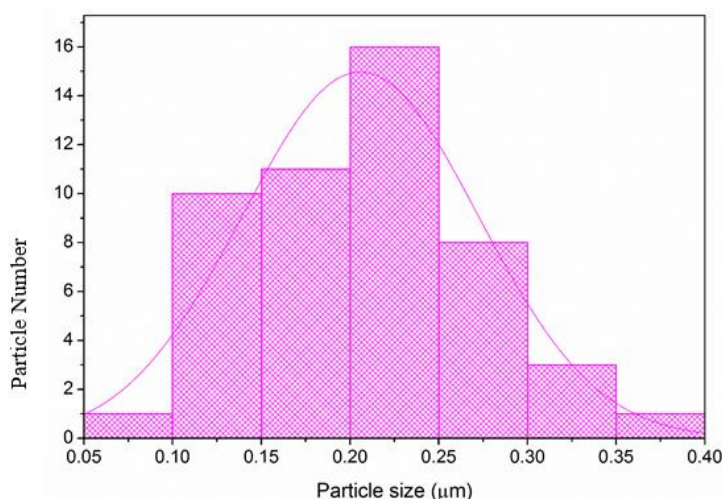
از این تصاویر مشهود است که با افزایش تعداد شات اندازه دانه‌ها بزرگتر شده است. جهت بررسی دقیق‌تر اندازه میانگین دانه‌ها و همچنین توزیع اندازه ذرات در تعداد شات‌های مختلف از نرم‌افزار پردازش تصویر image J استفاده شده و هیستوگرام‌های حاصل در شکل (۳) نشان داده شده اند.



الف



ب.



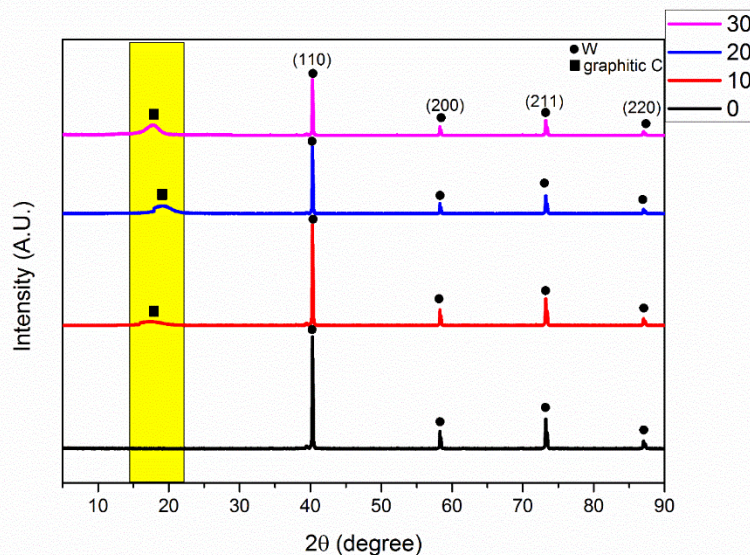
ب.

شکل ۳. هیستوگرام‌های توزیع اندازه ذرات مربوط به نمونه‌های قرار گرفته تحت (الف) ۱۰ شات، (ب) ۲۰ شات و (پ) ۳۰ شات

توزیع اندازه ذرات با افزایش تعداد شات نرمال‌تر و باریک‌تر شده است که این به معنی ایجاد یک لایه همگن‌تر بر روی سطح زیرلایه با افزایش تعداد شات می‌باشد.

نتایج تست XRD

مطابق شکل (۴) برای تحلیل الگوهای پراش بدست آمده از نرم افزار Expert High Score Plus استفاده شده است. مطابق شکل، نمونه‌ای که تحت شات قرار نگرفته است، دارای چهار پیک در زوایای 40.3° ، 58.2° ، 73.2° و 87.1° به ترتیب مربوط به پراش پرتو ایکس از صفحات (۱۱۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱) و (۲۲۰) بوده است. با انطباق این پیک‌ها بر روی پیک‌های مرجع مربوط به ساختارهای کریستالی مختلف مشخص شد که این الگوی پراش بیشترین انطباق را با الگوی پراش فلز تنگستن با کد مرجع JCPDS card #04-0806 داشته است.



شکل ۴. الگوهای پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه تنگستن پس از اعمال ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شات

مطابق با رابطه دبی - شرر مقدار اندازه بلورک برای تنگستن برابر با ۲۲۴.۶ نانومتر بدست آمده است. مشاهده می‌شود که پس از اعمال شات، علاوه بر پیک‌های مربوط به زیرلایه تنگستنی، یک پیک پهن مربوط به کربن آمورف در زوایای حدود ۱۵° تا ۲۰° بوجود آمده است. با افزایش تعداد شات بر شدت این پیک افزوده شده و پهنای آن کاهش یافته است که این به معنی کریستاله‌تر شدن کربن با افزایش تعداد پیک می‌باشد. اندازه بلورک تنگستن بر اساس هر پیک پس از اعمال شات با استفاده از رابطه دبی - شرر بدست آمده و در جدول (۱) آورده شده است.

تعداد شات	اندازه بلورک بر اساس هر صفحه (nm)				اندازه بلورک میانگین (nm)
	(۱۱۰)	(۲۰۰)	(۲۱۱)	(۲۲۰)	
۰	۲۴۳.۸	۲۳۶.۵	۲۳۸.۹	۲۳۹.۶	۲۳۹.۷
۱۰	۲۴۳.۹	۲۴۴.۰	۲۴۸.۱	۲۵۳.۶	۲۴۷.۴
۲۰	۲۴۴.۴	۲۵۲.۹	۲۵۱.۳	۲۴۷.۸	۲۴۹.۱
۳۰	۲۵۵.۲	۲۵۳.۱	۲۴۸.۷	۲۵۴.۲	۲۵۲.۸

مطابق جدول (۱)، مقدار میانگین اندازه بلورک برای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شات به ترتیب برابر با ۲۳۹.۷، ۲۴۷.۴، ۲۴۹.۱ و ۲۵۲.۸ نانومتر بدست آمده است که نسبت به نمونه بدون شات تغییر چشمگیری نشان نمی‌دهد. این افزایش اندک اندازه بلورک تنگستن می‌تواند به دلیل بالا رفتن نسبی دما با اعمال شات بر روی سطح زیرلایه و در نتیجه رشد بلورک‌های تنگستن باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد شات شدت پیک‌های مربوط به زیرلایه تنگستنی کاهش یافته است. این مورد به معنای افزایش ضخامت پوشش کربنی بر روی زیرلایه می‌باشد که منجر به کاهش ورود اشعه ایکس به زیرلایه و در نتیجه کاهش شدت پیک‌های تنگستن در الگوهای پراش شده است. بنابراین از روی نتایج آزمون XRD نیز تشکیل یک لایه کربنی بر روی زیرلایه تنگستنی اثبات شده و مشخص شد که با افزایش تعداد شات ضخامت این لایه افزایش و بلورینگی آن نیز بیشتر شده است.

۳. نتیجه‌گیری

تنگستن پوشش داده شده با لایه‌ای از کربن، به علت داشتن خواص مفید نظیر مقاومت حرارتی و نقطه ذوب بالا، می‌تواند به عنوان یک ماده مناسب برای ساخت محفظه‌های مولد پلاسما و دیواره راکتورهای گداخت که در واکنش و برخورد مستقیم با پلاسما قرار دارند، استفاده شوند. از این رو، هدف از انجام این مطالعه، لایه‌نشانی کربن جهت بهبود خواص

نمونه‌های تنگستن، با استفاده از قرص گرافیت بر روی نوک آند دستگاه پلاسمای کانونی دانشگاه صنعتی امیرکبیر و گاز متان برای اولین بار می‌باشد. جهت انجام، نمونه‌ها در معرض ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شات در زاویه صفر درجه نسبت به آند در آزمایشگاه قرار گرفته و تست‌های SEM و XRD انجام شدند. در پایان، نتایج حاصل از تست‌ها در قابل جداول و اشکال نمایش داده شد تا صحت‌سنجی اطلاعات بدست آمده حاصل از آزمایشات با دقت بالا انجام گیرد. نتایج تست‌ها نشان داد، با افزایش تعداد شات‌ها از ۱۰ به ۲۰ و سپس ۳۰، میانگین اندازه کریستال‌ها نیز افزایش می‌یابد. همچنین، با مقایسه نتایج XRD و استفاده رابطه دبای - شرر، اندازه کریستال‌های کربن ۲۲۴.۶ نانومتر بدست آمد و توزیع اندازه ذرات با افزایش تعداد شات نرمال‌تر و باریک‌تر شده است که این به معنی ایجاد یک لایه همگن‌تر بر روی سطح زیرلایه با افزایش تعداد شات می‌باشد لازم به ذکر است که، جهت تحلیل کامل‌تر مطالعه تست‌های AFM، EDX و RAMAN نیز انجام شده است.

۴. مراجع

- [1] Hino, T., et al. "Silicon Carbide as Plasma Facing or Blanket Material." *Advanced SiC/SiC Ceramic Composites: Developments and Applications in Energy Systems* 144 (2006): 353- 361.
- [2] Miyahara, A., and T. Tanabe. "Graphite as plasma facing material." *Journal of Nuclear Materials* 155 (1988): 49-57.
- [3] Abegunde, Olayinka Oluwatosin, et al. "Overview of thin film deposition techniques." (2019).
- [4] Etaati, G. R., et al. "Deposition of tungsten nitride on stainless steel substrates using plasma focus device." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 269.10 (2011): 1058-1062
- [5] Gupta, Ruby, and M. P. Srivastava. "Carbon ion implantation on titanium for TiC formation using a dense plasma focus device." *Plasma Sources Science and Technology* 13.3 (2004): 371.
- [5]- Rawat, R., et al., Room temperature deposition of titanium carbide thin films using dense plasma focus device. *Surface and Coatings Technology*, 2001. 138(2-3): p. 159-165.
- [6]- Zeb, S., et al., Deposition of diamond-like carbon film using dense plasma focus. *Materials chemistry and physics*, 2007. 103(2-3): p. 235-240.