



# A Study on the Role of Hydrocarbon Precursor on Structure of Diamond-Like Carbon Coating Applied by Ion Beam Deposition Technology

Saeid Mersagh Dezfuli <sup>1</sup>, Seyed Hojatollah Hosseini <sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> PhD. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author's Email: [nshosseini@mut.ac.ir](mailto:nshosseini@mut.ac.ir) (S. H. Hosseini)

## Paper History:

Received: 2024-08-15

Revised: 2024-09-25

Accepted: 2024-12-17

## Keywords:

Diamond-like Carbon,  
PVD-IBD Process,  
Raman,  
Hydrocarbon Precursor

**Abstract:** In the present study, Diamond-Like Carbon (DLC) coating was applied using two hydrocarbon precursors, methane (CH<sub>4</sub>) and acetylene (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) through the PVD-IBD process. Raman spectroscopy and nano-indentation analyses were conducted to study the effect of hydrocarbon precursor on the structural and mechanical properties of the DLC coatings. Additionally, Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and Atomic Force Microscopy (AFM) were employed to investigate the surface morphology and topography of the created coatings. The results from Raman analysis revealed a smaller I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ratio and a larger FWHM for the DLC coating synthesized with acetylene hydrocarbon precursor. Cross-sectional FESEM images of the resulting coatings demonstrated a higher deposition rate of carbonaceous species when using the acetylene precursor. Further, AFM analysis showed that the surface roughness of the DLC coating produced with acetylene hydrocarbon precursor was lower than that obtained with methane. Finally, nano-indentation testing indicated that the DLC coating created using acetylene gas source (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) exhibited higher hardness (H) and elastic modulus (E).



<https://doi.org/10.30501/jamt.2024.473494.1304>

URL: [https://www.jamt.ir/article\\_211650.htm](https://www.jamt.ir/article_211650.htm)

## 1. INTRODUCTION

Diamond-Like Carbon (DLC) is another name for amorphous carbon that contains a significant percentage of sp<sup>3</sup> diamond bonds (Robertson, 2002). DLC exhibits outstanding properties, including high hardness, low friction coefficient and wear rate, chemical neutrality, high corrosion resistance, high electrical resistance, and biocompatibility. These coatings consist of a combination of graphite (sp<sup>2</sup>) and diamond (sp<sup>3</sup>) bonds. The sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> ratio varies depending on the deposition process, conditions, and carbon source (Chowdhury et al., 2004). Consequently, the structure, mechanical properties, and tribological performance of these coatings differ across the reports. Ion beam-based processes offer unique advantages. In these methods, ion bombardment is used to improve surface properties and create coatings. One key benefit of the ion beam deposition process is the low coating temperature along with enhanced adhesion to the substrate due to the stitching process (Lichun et al., 2011). This technique allows for the creation of thin diamond-like carbon layers by ionizing hydrocarbon gases and accelerating carbon ions toward the substrate using electric fields. Hydrocarbon gases such as methane, acetylene, ethane, and benzene are commonly utilized as carbon sources in

this process. When molecular ions strike the surface of the substrate and coating, they break apart, and their kinetic energy is distributed among the carbon atoms. The resulting effective energy is calculated per carbon (Robertson, 1994; Haiping et al., 2024). This means that the properties of DLC coatings depend on the gaseous precursor molecule. Therefore, changes in the gas source impact the structure and properties of the DLC coatings mainly due to the difference in H/C ratio in the composition of hydrocarbon gases (Robertson, 2002; Robertson, 1994). Therefore, this research investigates the effect of hydrocarbon precursor on the structural changes in carbon coatings created through the ion beam process.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In this research, AISI 4140 steel was used as the substrate. The samples were polished using different grades of grinding papers (from #80 to #3000) followed by washing in an ultrasonic bath for 20 min at 40 °C and 40 kHz in acetone. To deposit DLC thin layers, ion beam deposition process was employed, using a radio frequency source and two hydrocarbon gas sources\_ acetylene (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>)\_ with 99.99% purity.

Please cite this article as: Mersagh Dezfuli, S. & Hosseini, S. H. (2024). A Study on the Role of Hydrocarbon Precursor on Structure of Diamond-Like Carbon Coating Applied by Ion Beam Deposition Technology. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 13, No. 3, 63-74. [in Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2024.473494.1304>.

2783-0829/© 2024 The Author(s). Published by MERC.

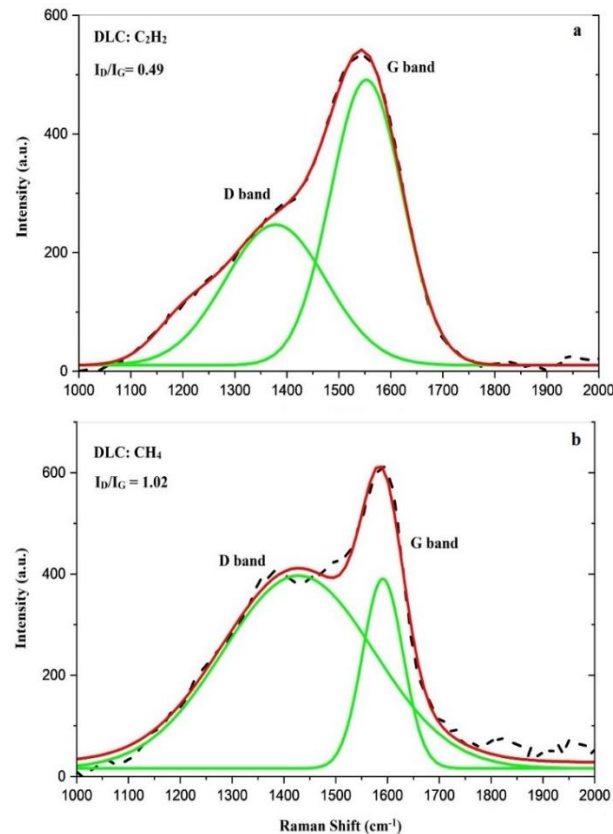
This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)



### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 presents the graph obtained from Raman analysis for the DLC coatings created using acetylene ( $C_2H_2$ ) and methane ( $CH_4$ ) gas sources. The Raman analysis results for carbon coatings created by acetylene and methane hydrocarbon precursors indicate the presence of G and D peaks, confirming the formation of the DLC phase in the structure of the coatings. The  $I_D/I_G$  ratio for the DLC coatings with different gas sources was extracted from Raman spectroscopy chart. To calculate this, the height of peak D was divided by the height of

peak G, yielding numerical value that represents the intensity ratio of peaks D to G. The  $I_D/I_G$  ratios for the DLC coatings with acetylene gas source ( $C_2H_2$ ) and methane gas source ( $CH_4$ ) were obtained as 0.49 and 1.02, respectively. These values indicate that the DLC coating deposited with acetylene gas source has more diamond-like characteristics. In contrast, the higher  $I_D/I_G$  ratio for the DLC coating created with methane gas source suggests a more regular structure with a lower amount of irregular  $sp^3$  phase, compared to the coating created with acetylene gas source.



**Figure 1.** Raman spectrum of DLC films a) DLC ( $C_2H_2$ ), b) DLC ( $CH_4$ )

### 4. CONCLUSION

According to the results of Raman analysis, the lowest  $I_D/I_G$  value was observed in the Diamond-Like Carbon (DLC) coating created using an acetylene ( $C_2H_2$ ) source. The graphite clusters size for this coating was the smallest, measuring 9 angstroms. Additionally, the FWHM (G) value for DLC ( $C_2H_2$ ) coating was  $162\text{ cm}^{-1}$  which was higher than that of DLC ( $CH_4$ ) coating.

### 5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their gratitude and appreciation to the officials to the Vacuum lab in Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

### REFERENCES

- Chowdhury, S., Laugier, M. T., & Rahman, I. Z. (2004). Effects of substrate temperature on bonding structure and mechanical properties of amorphous carbon films. *Thin Solid Films*, 447-448, 174-180. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)01076-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)01076-9)
- Lichun, B., Guangan, Z., Zhiguo, W., Jun, W., & Pengxun, Y. (2011). Effect of different ion beam energy on properties of amorphous carbon film fabricated by ion beam sputtering deposition (IBSD). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 269(17), 1871-1877. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.05.017>
- Robertson, J. (1994). The deposition mechanism of diamond-like a-C and a-C: H. *Diamond and Related Materials*, 3(4-6), 361-368. [https://doi.org/10.1016/0925-9635\(94\)90186-4](https://doi.org/10.1016/0925-9635(94)90186-4)
- Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering, R: Reports*, 37(4-6), 129-281. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)



مقاله‌ی کامل پژوهشی

## مطالعه‌ای درباره‌ی اثر پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی بر ساختار پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط فناوری رسوب‌دهی پرتو یونی

سعید مرساق دزفولی<sup>۱</sup>، سیدحجت‌اله حسینی<sup>۲\*</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

کلیدواژه‌ها:

کربن شبه‌الماس،

فرایند PVD-IBD،

رامان،

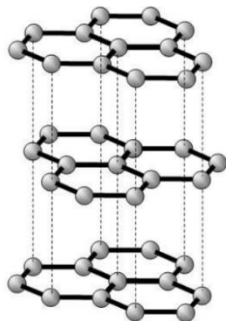
پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی

**چکیده** در پژوهش حاضر، پوشش کربن شبه‌الماس با دو پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی متان (CH<sub>4</sub>) و استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) توسط فرایند PVD-IBD اعمال شد. سپس، برای مطالعه‌ی اثر پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی بر تحولات ساختاری و مکانیکی پوشش کربن شبه‌الماس از آنالیزهای طیف‌سنجی رامان و نانودندانه‌گذاری استفاده شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و نیروی اتمی (AFM) برای بررسی ریخت‌شناسی و توپوگرافی سطح پوشش‌های ایجادشده استفاده شد. نتایج حاصل از آنالیز رامان نسبت I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> کوچک‌تر و FWHM (پهنای در نصف بیشینه‌ی قله‌ی G) بزرگ‌تری را برای پوشش کربن شبه‌الماس با پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی استیلن نشان داد. تصاویر FESEM از مقطع پوشش‌های ایجادشده حاکی از بالاتر بودن نرخ رسوب گونه‌های کربنی توسط پیش‌ماده‌ی استیلن بود. نتایج حاصل از آنالیز AFM گویای کمتر بودن زبری سطح پوشش کربن شبه‌الماس حاصل از پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی استیلن در مقایسه با متان بود. نتایج حاصل از آزمون نانودندانه‌گذاری نشان داد که پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) دارای سختی (H) و مدول الاستیک (E) بالاتری هستند.

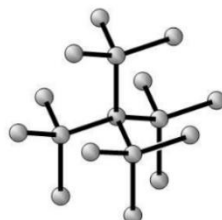
<https://doi.org/10.30501/jamt.2024.473494.1304>[https://www.jamt.ir/article\\_211650.htm](https://www.jamt.ir/article_211650.htm)

### ۱- مقدمه

پوشش‌ها حاوی پیوندهای گرافیت (sp<sup>2</sup>) و الماس (sp<sup>3</sup>) هستند که، با توجه به فرایند و شرایط رسوب‌دهی و منبع کربنی، نسبت sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> می‌تواند متفاوت باشد (Bewilogua & Hofmann, 2014; Yu et al., 2020). شکل ۱ ساختار کربن در دو شکل الماس و گرافیت را نشان می‌دهد.



ب) گرافیت



الف) الماس

شکل ۱. ساختار کربن: الف) الماس و ب) گرافیت

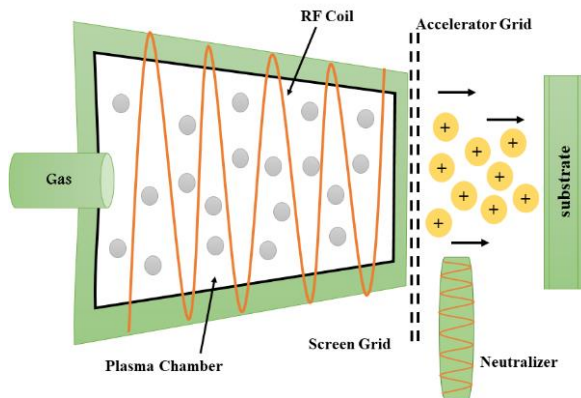
کربن شبه‌الماس (DLC) نام دیگر کربن آمورف است که حاوی درصد قابل‌توجهی پیوندهای الماس sp<sup>3</sup> است (Bewilogua & Hofmann, 2014). پوشش‌های کربن شبه‌الماس، به دلیل داشتن خواص برجسته، در تحقیقات علمی و صنعتی مورد توجه محققان و مهندسان هستند. این خواص شامل سختی بالا، ضریب اصطکاک و نرخ سایش پایین، خنثایی شیمیایی و مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت الکتریکی بالا، زیست‌سازگاری و غیره است (Marks, 2005). پوشش‌های DLC کاربردهای گسترده‌ای به‌عنوان پوشش‌های محافظ از قبیل پنجره‌های نوری، دیسک‌های ضبط مغناطیسی، بخش‌های خودرو، پوشش‌های زیست‌پزشکی و موتورهای مکانیکی الکتریکی میکرونی دارند (Wänstrand et al., 1999). این

عهده‌دار مکاتبات: سیدحجت‌اله حسینی

نشانی: ایران، تهران، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

پیام نگار: [nns hosseini@mut.ac.ir](mailto:nns hosseini@mut.ac.ir)

کربن به سمت زیرلایه توسط میدان‌های الکتریکی است. در شکل ۳، طرحواره‌ای از فناوری رسوب‌دهی پرتو یونی آورده شده است. در این فرایند، از گازهای هیدروکربنی همانند متان، استیلن، اتان و بنزن به عنوان منبع کربن برای ایجاد پوشش کربن شبه‌الماس استفاده می‌شود. اغلب گونه‌های رسوبی یون مولکولی  $C_mH_n^+$  هستند. هنگامی که یون مولکولی به سطح زیرلایه و پوشش برخورد می‌کند، شکسته می‌شود و انرژی جنبشی آن بین اتم‌های کربن تقسیم می‌شود و انرژی مؤثر به‌ازای اتم کربن خواهد بود (Robertson, 2002; Ferrari & Robertson, 2000)، به این معنا که خصوصیات کربن شبه‌الماس وابسته به مولکول پیش‌ماده‌ی گازی است.

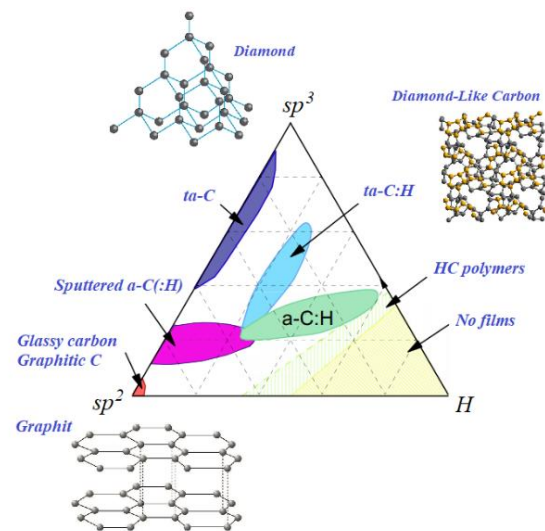


شکل ۳. طرح‌واره‌ای از فناوری رسوب‌دهی پرتو یونی (IBD)

بنابراین، ساختار و خواص پوشش‌های کربن شبه‌الماس با تغییر در منبع گازی (پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی) تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد که این امر به دلیل تفاوت در نسبت H/C در ترکیب گازهای هیدروکربنی است (Ting et al., 2017; Donnet & Erdemir, 2007). در گزارشی، رابرسون و همکاران (2002) پوشش کربن شبه‌الماس را توسط فرایند PECVD با منابع گازی مختلف ایجاد و بیان کردند که نرخ رسوب لایه با تغییر در منبع گازی دچار تغییر می‌شود (Robertson, 2002). در گزارشی دیگر، پوشش کربن شبه‌الماس توسط منابع گازی CO و  $C_2H_2$  در فرایند CVD ایجاد و بیان شد که نرخ رشد پوشش کربنی با منبع گازی استیلن بیشتر بود (Mamun et al., 2018). ما نیز کنجکاو بودیم، با تغییر در منبع گازی در فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی، تحولات ساختاری پوشش کربن شبه‌الماس را بررسی کنیم. بنابراین، با توجه به اندک بودن گزارش‌های منتشرشده از

بنابراین، ساختار، عملکرد مکانیکی و تریبولژیکی این پوشش‌ها در گزارش‌ها نیز می‌تواند متفاوت باشد. کربن شبه‌الماس انواع گوناگونی دارد. در شکل ۲، ساختارهای گوناگون کربن آمورف به‌صورت دیاگرامی سه‌تایی نمایش داده شده‌اند که براساس سه پارامتر پیوند  $sp^3$ ، پیوند  $sp^2$  و هیدروژن تعریف می‌شوند (Robertson, 2002).

روش‌های پوشش‌دهی کربن شبه‌الماس به دو دسته‌ی رسوب‌دهی شیمیایی بخار<sup>۱</sup> (CVD) و رسوب‌دهی فیزیکی بخار<sup>۲</sup> (PVD) تقسیم می‌شوند. این روش‌ها شامل رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار با پلاسمای بهبودیافته (PECVD)، کندوپاش، قوس الکتریکی فیلترشده (FCVA)، لایه‌نشانی لیزر پالسی (PLD) و رسوب‌دهی پرتو یونی (IBD) هستند. هریک از این فرایندها مزایا و معایبی به‌لحاظ نرخ رسوب‌دهی، کیفیت لایه و یکنواختی دارند (Kazuya et al., 2021).



شکل ۲. طرحواره‌ای از نمودار سه‌تایی ساختارهای گوناگون کربن آمورف (Robertson, 2002)

در این میان، فرایندهای مبتنی بر پرتو یونی مزایای منحصربه‌فردی دارند. در این فرایندها، از بمباران یونی برای بهبود خواص سطحی و ایجاد پوشش بهره می‌گیرند. از مهم‌ترین مزایای فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی می‌توان به دمای پوشش‌دهی پایین و افزایش چسبندگی به زیرلایه به دلیل ایجاد فرایند بخیه‌زنی اشاره کرد (Lichun et al., 2011). یکی از قابلیت‌های این روش ایجاد لایه‌های نازک کربن شبه‌الماس توسط یونیزاسیون گازهای هیدروکربنی و شتاب‌گیری یون‌های

جدول ۱. درصد وزنی عناصر مهم موجود در فولاد AISI 4140

| عناصر آلیاژی | Mo   | Si   | C   | Mn   | Cr  |
|--------------|------|------|-----|------|-----|
| درصد وزنی    | ۰/۱۶ | ۰/۲۴ | ۰/۴ | ۰/۸۴ | ۰/۱ |

به منظور رسوب‌دهی لایه‌های نازک کربن شبه‌الماس، از فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی با منبع رادیوفرکانس و از دو منبع گازی هیدروکربنی استیلن ( $C_2H_2$ ) و متان ( $CH_4$ ) با خلوص ۹۹/۹۹ درصد استفاده شد. در جدول ۲، مقادیر پارامترهای فرایندی آورده شده است. پس از اعمال پوشش‌های کربن شبه‌الماس، برای بررسی‌های ساختاری و مکانیکی پوشش‌ها از آنالیزهای رامان و نانودندانه‌گذاری و برای ارزیابی ضخامت و زبری سطح پوشش‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۱</sup> (FESEM) و نیروی اتمی<sup>۲</sup> (AFM) استفاده شد.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای لایه‌نشانی در فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی

| انرژی یون (الکترون ولت) | دمای زیرلایه (درجه‌ی سلسیوس) | زمان رسوب‌دهی (دقیقه) | نرخ شار گاز منبع (sccm) | نمونه         |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
| ۱۲۵                     | ۲۵                           | ۹۰                    | ۱۲                      | DLC- $C_2H_2$ |
| ۱۲۵                     | ۲۵                           | ۹۰                    | ۱۲                      | DLC- $CH_4$   |

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج حاصل از آنالیز رامان

پهنا در نصف بیشینه‌ی قله‌ی G (FWHM) است که مربوط به بی‌نظمی ساختاری ناشی از زوایا و اعوجاج در طول پیوندها است. کاهش FWHM قله‌ی G نشانه‌ی کاهش درجه‌ی آمورف شدن و افزایش نظم لایه‌ها است. حضور خوشه‌های  $sp^2$  بدون نقص و عاری از تنش موجب کاهش در FWHM قله‌ی G در طیف رامان لایه‌های DLC می‌شود ([Bewilogua & Hofmann, 2014](#); [Ferrari & Robertson, 2000](#); [Donnet & Erdemir, 2007](#)). می‌توان این‌طور بیان کرد که، اگر خوشه‌ها عاری از بی‌نظمی باشند، پهنا در نصف بیشینه کوچک خواهد بود.

در شکل ۴، نمودار حاصل از آنالیز رامان برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده با منابع گازی استیلن ( $C_2H_2$ ) و متان ( $CH_4$ ) نشان داده شده است. همچنین، منحنی طیف‌های رامان با استفاده از تابع گوسین توسط نرم‌افزار اوريجین فیت شده است و دو قله‌ی G و D از یکدیگر تفکیک شده‌اند و در شکل ۵ نیز آورده شده‌اند. داده‌های حاصل از آنالیز رامان در جدول ۳ ذکر شده است.

تأثیر ترکیب و شیمی پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی (منبع گازی) بر ساختار و ریخت‌شناسی پوشش‌های کربن شبه‌الماس، در تحقیق حاضر به بررسی اثر پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی بر تحولات ساختاری پوشش کربنی ایجادشده در فرایند پرتو یونی پرداخته شده است.

#### ۲- روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد AISI 4140 به‌عنوان زیرلایه استفاده شد. نمونه‌ها توسط سنباده‌های شماره‌ی ۸۰ تا ۳۰۰۰ صیقل یافتند و سپس در حمام التراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه با دمای ۴۰ درجه‌ی سلسیوس و بسامد ۴۰ کیلوهرتز در محلول استون شست‌وشو داده شدند. ترکیب شیمیایی فولاد AISI 4140 مورد استفاده در این پژوهش توسط آنالیز کوانتومتری بررسی و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

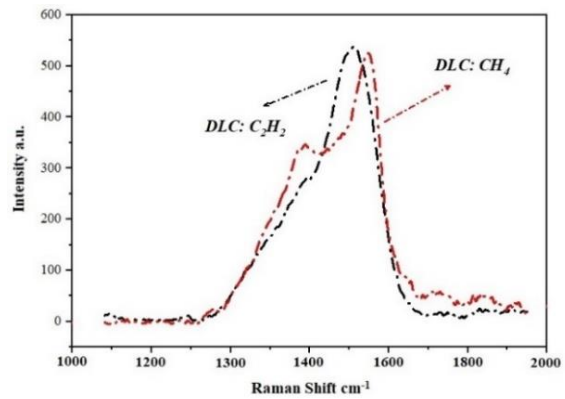
در این بخش به بررسی تأثیر منابع گازی استیلن ( $C_2H_2$ ) و متان ( $CH_4$ ) بر تحولات ساختاری پوشش کربن شبه‌الماس پرداخته شده است. طیف‌سنجی رامان به‌طور گسترده برای توصیف ساختار مواد کربنی آمورف به‌دلیل غیرمخرب بودن استفاده می‌شود. پارامترهای طیف‌سنجی رامان مانند موقعیت، عرض و شدت قله‌ی G و قله‌ی D ارتباط نزدیکی با چگالی، اندازه و ساختار خوشه‌های  $sp^2$  دارند که همچنین با محتوای پیوندهای  $sp^3$  در پوشش DLC نیز مرتبط هستند. نسبت  $I_D/I_G$  و موقعیت قله‌ی G مشخصات جالبی از پوشش‌های کربن آمورف را در طیف‌های رامان ارائه می‌دهد. در کربن آمورف، نسبت شدت باند D به باند G ( $I_D/I_G$ ) با کاهش نسبت  $sp^2/sp^3$  مطابقت دارد ([Bewilogua & Hofmann, 2014](#); [Marks, 2005](#); [Robertson, 2002](#)). پارامتر دیگر در طیف‌سنجی رامان

به دست آمده نسبت شدت قله‌های D به G را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نسبت  $I_D/I_G$  برای پوشش کربن شبه‌الماس با منبع گازی استیلن ( $C_2H_2$ ) و منبع گازی متان ( $CH_4$ ) به ترتیب برابر با ۰/۴۹ و ۱/۰۲ است. این امر نشان می‌دهد که پوشش کربن شبه‌الماس اعمال شده با منبع گازی استیلن دارای مشخصه‌های شبه‌الماس بیشتری است. نسبت  $I_D/I_G$  میزان نشان‌دهنده‌ی حلقه‌های  $sp^2$  است و افزایش آن نشان می‌دهد که پوشش به سمت گرافیت شدن پیش می‌رود و دارای خوشه‌های  $sp^2$  بیشتری است (Ferrari & Robertson, 2000; Donnet & Erdemir, 2007). بالا بودن نسبت  $I_D/I_G$  برای پوشش کربن شبه‌الماس با منبع گازی متان به این معنی است که این پوشش ساختار منظم‌تری دارد و، در مقایسه با پوشش ایجاد شده با منبع گازی استیلن، مقدار کمتری فاز نامنظم  $sp^3$  دارد. با دستیابی به مقدار  $I_D/I_G$  از آنالیز رامان می‌توان برای محاسبه‌ی اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی‌ی  $sp^2$  در لایه‌های DLC از رابطه‌ی (۱) استفاده کرد (Ferrari & Robertson, 2000; Donnet & Erdemir, 2007; Robertson, 2002):

$$I_D/I_G = C(\lambda)L^2 \quad (1)$$

در این رابطه، L اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی و  $C(\lambda)$  یک عدد ثابت است که به طول موج لیزر وابسته است و مقدار آن برابر ۰/۰۰۵۵ در نظر گرفته می‌شود (۱۱ و ۷). اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی در پوشش‌های DLC ( $C_2H_2$ ) و DLC ( $CH_4$ ) محاسبه شده است که اندازه‌ی آن به ترتیب برابر ۹ و ۱۳ آنگستروم است. بنابراین، اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی در پوشش DLC ( $C_2H_2$ ) دارای اندازه‌ی کمتری است و این پوشش مشخصه‌های شبه‌الماس بالاتری دارد.

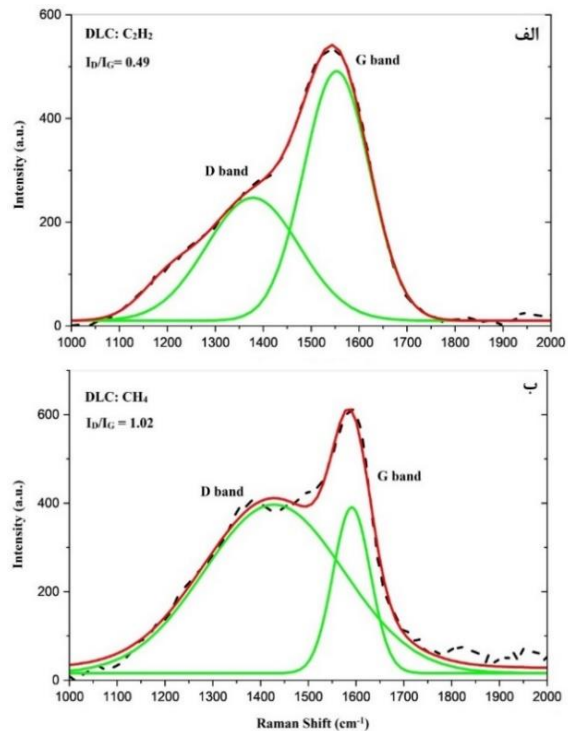
پارامتر مهم دیگر در طیف‌سنجی رامان پهنا در نصف بیشینه‌ی قله‌ی G (FWHM) است که به نظم ساختاری ناشی از زاویه و طول پیوند وابسته است. کاهش FWHM قله‌ی G نشانه‌ی کاهش درجه‌ی آمورف شدن و افزایش نظم لایه‌ها است (Robertson, 2002). حضور خوشه‌های  $sp^2$  بدون نقص و عاری از تنش موجب کاهش در FWHM(G) طیف رامان لایه‌های DLC می‌شود (Ferrari & Robertson, 2000; Robertson, 2002). در جدول ۳، داده‌های FWHM مربوط به پوشش‌های DLC ( $CH_4$ ) و DLC ( $C_2H_2$ ) آورده شده است که مقدار آن به ترتیب برابر با  $162 \text{ cm}^{-1}$  و  $92 \text{ cm}^{-1}$  است. مشاهده



شکل ۴. نمودارهای حاصل از آنالیز رامان برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس

جدول ۳. داده‌های حاصل از آنالیز رامان

| نمونه        | $I_D/I_G$ | L (Å) | FWHM G | G position $\text{cm}^{-1}$ |
|--------------|-----------|-------|--------|-----------------------------|
| DLC $C_2H_2$ | ۰/۴۹      | ۹     | ۱۶۲    | ۱۵۵۲                        |
| DLC $CH_4$   | ۱/۰۲      | ۱۳    | ۹۲     | ۱۵۹۰                        |



شکل ۵. نمودار فیت‌شده‌ی حاصل از آنالیز رامان برای پوشش کربن شبه‌الماس با منابع گازی الف) استیلن ( $C_2H_2$ ) و ب) متان ( $CH_4$ ) نتایج به دست آمده از آنالیز رامان برای پوشش‌های کربنی ایجاد شده توسط پیش‌ماده‌های هیدروکربنی استیلن و متان حاکی از این است که وجود قله‌های G و D در هر دو پوشش کربنی نشان از تشکیل فاز DLC در ساختار پوشش‌ها دارد. نسبت  $I_D/I_G$  برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس با منابع گازی متفاوت با نمودار طیف‌سنجی رامان استخراج شده است. برای این کار، ارتفاع قله‌ی D به ارتفاع قله‌ی G تقسیم می‌شود و عدد

این امر به ایجاد و افزایش شدت قله‌ی D منجر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی میزان بی‌نظمی در ساختار است. بنابراین، در این مرحله، نسبت  $I_D/I_G$  افزایش می‌یابد. در این مرحله، براساس رابطه‌ی زیر که توسط رابرتسون و دوننت گزارش شده است، بین اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی ( $La$ ) و نسبت  $I_D/I_G$  رابطه‌ی (۲) عکس وجود دارد (Donnet & Erdemir, 2007; Robertson, 2002):

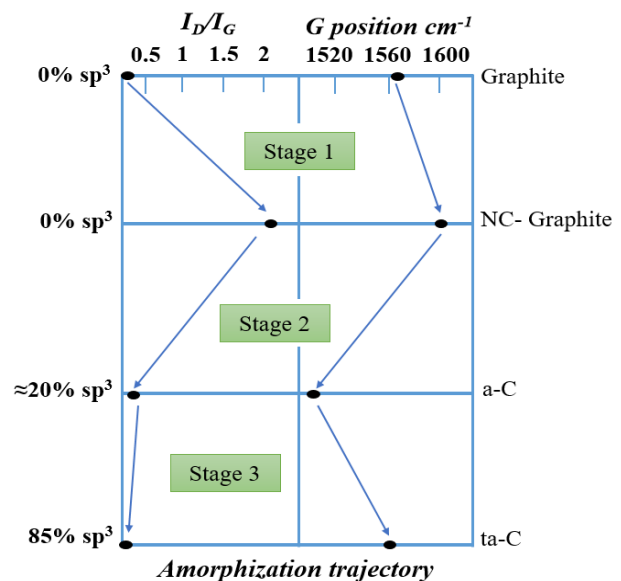
$$\frac{I_D}{I_G} = \frac{c(\lambda)}{La} \quad (2)$$

در مرحله‌ی دوم، نقص‌ها به‌صورت فزاینده‌ای در لایه‌ی گرافیتی به وجود می‌آیند و در نهایت ساختاری کاملاً بی‌نظم ایجاد می‌شود که حاوی درصد بالایی از پیوندهای  $sp^2$  و اندکی پیوندهای  $sp^3$  است و ساختار کربن آمورف نام دارد. در این مرحله، با توجه به کاهش اندازه‌ی خوشه‌های گرافیت به کمتر از ۲ نانومتر و در نتیجه کاهش تعداد حلقه‌های شش ضلعی در خوشه‌ها که متناسب با شدت قله‌ی D در این محدوده است، کاهش نسبت  $I_D/I_G$  مشاهده می‌شود و براساس معادله‌ی گزارش‌شده توسط فراری و رابرسون (2000) رابطه‌ی نسبت  $I_D/I_G$  و اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی در این مرحله براساس رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید (Donnet & Erdemir, 2007; Robertson, 2002):

$$\frac{I_D}{I_G} = cLa^2 \quad (3)$$

در مرحله‌ی سوم، به تدریج تمام حلقه‌های موجود در ساختار آمورف از بین می‌رود و به رشته تبدیل می‌شود. بنابراین، شدت  $I_D/I_G$  از مرحله‌ی قبل کمتر می‌شود و به صفر میل می‌کند. در واقع، کوچک بودن مقدار  $I_D/I_G$  به‌عنوان معیاری برای قرار داشتن ساختار در مرحله‌ی سوم محسوب می‌شود. در شکل ۷، عوامل موثر بر محل و ارتفاع قله‌های D و G کربن‌های آمورف به‌طور طرح‌واره‌ای نمایش داده شده است. بنابراین، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی مکان و شدت قله‌های D و G در طیف رامان به خوشه‌ای شدن فاز  $sp^2$ ، بی‌نظمی پیوندها، حضور پیوندها به‌صورت حلقه و رشته در فاز  $sp^2$  و نسبت  $sp^3/sp^2$  بستگی دارد (Donnet & Erdemir, 2007; Ferrari & Robertson, 2000):

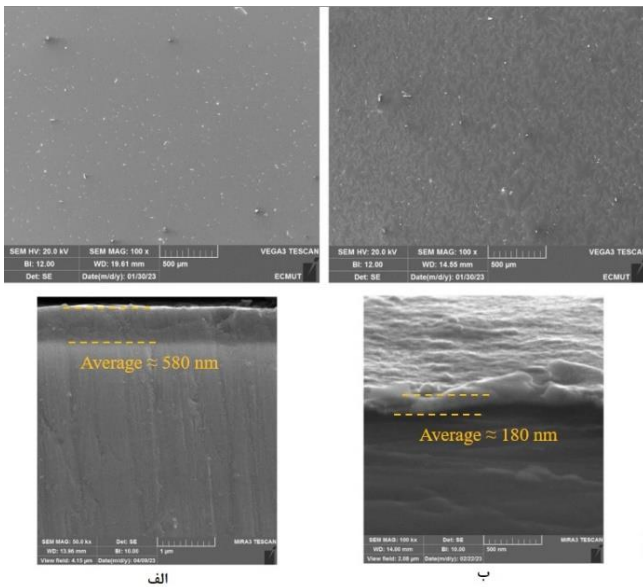
می‌شود که مقدار پارامتر FWHM برای پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با پیش‌ماده‌ی استیلن کمتر است. این مقدار از پهنا در نصف بیشینه‌ی قله‌ی G نشان‌دهنده‌ی بالا بودن پیوندهای  $sp^3$  و بی‌نظمی ساختاری در پوشش  $DLC (C_2H_2)$  است. تغییرات ساختاری در پوشش‌های کربنی را می‌توان براساس مدل سه‌مرحله‌ای که در شکل ۶ آورده شده است تشریح کرد. مدل سه‌مرحله‌ای از روند تغییرات ساختاری گرافیت به کربن شبه‌الماس به‌صورت طرح‌واره نشان داده شده است. براساس نظر محققانی مانند فراری، رابرسون (2000) و رابرسون (2002) و با توجه به تعریف قله‌های D و G در طیف رامان، با کاهش نسبت  $I_D/I_G$ ، تعداد حلقه‌ها در هر خوشه کاهش می‌یابد (Ferrari & Robertson, 2000; Robertson, 2002). افزایش بی‌نظمی در ساختار کربن از ساختار گرافیت خالص به کربن آمورف تتراهدراال قابل تقسیم به سه مرحله است (علامت فلش جهت تغییرات ساختاری با تغییر درصد پیوندهای  $sp^2$  را نشان می‌دهد):



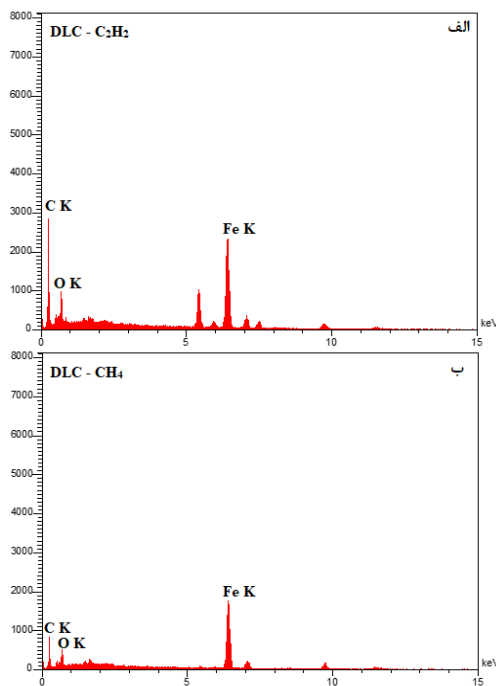
شکل ۶. طرح‌واره‌ی روند تغییرات ساختاری گرافیت به کربن

شبه‌الماس (Donnet & Erdemir, 2007; Robertson, 2002)

مرحله‌ی اول: ساختار کاملاً گرافیتی به سمت گرافیت نانو ساختار. مرحله‌ی دوم: گرافیت نانو ساختار به سمت کربن آمورف (a-C) با درصد بالای  $sp^2$ . مرحله‌ی سوم: کربن آمورف با درصد بالای  $sp^2$  به کربن آمورف حاوی درصد بالای  $sp^3$ . در مرحله‌ی اول ساختار منظم و بلوری گرافیت به تدریج منظم خود را با کاهش اندازه‌ی صفحات گرافیتی منظم از دست می‌دهد که

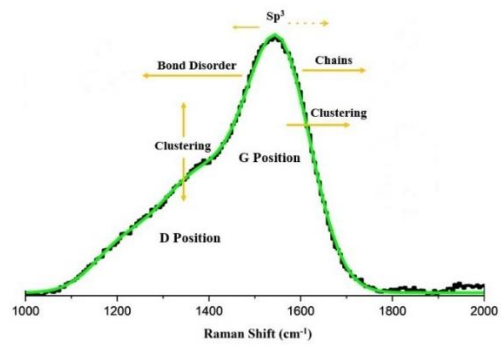


شکل ۸. تصاویر FESEM از ریخت‌شناسی و سطح مقطع پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منابع گازی الف) استیلن ( $C_2H_2$ ) و ب) متان ( $CH_4$ )



شکل ۹. نتایج EDS از پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منابع گازی الف) استیلن ( $C_2H_2$ ) و ب) متان ( $CH_4$ )

گفتنی است که، درباره‌ی رشد و تشکیل پوشش کربن شبه‌الماس، گونه‌های پلاسمای برخوردکننده با سطح فیلم در حال رشد از یونها و گونه‌های خنثی تشکیل شده‌اند. گونه‌های خنثی و یونها به ترتیب مولکول‌هایی با مدارهای پر مانند گازهای تجزیه‌نشده، رادیکال‌هایی مانند  $CH_3$  و دیگر گونه‌های غیراشباع مانند  $C_2H_4$  یا  $C_2H_2$  هستند. همچنین، پلاسمای مقادیر قابل توجهی از هیدروژن و کربن اتمی را نیز شامل می‌شود

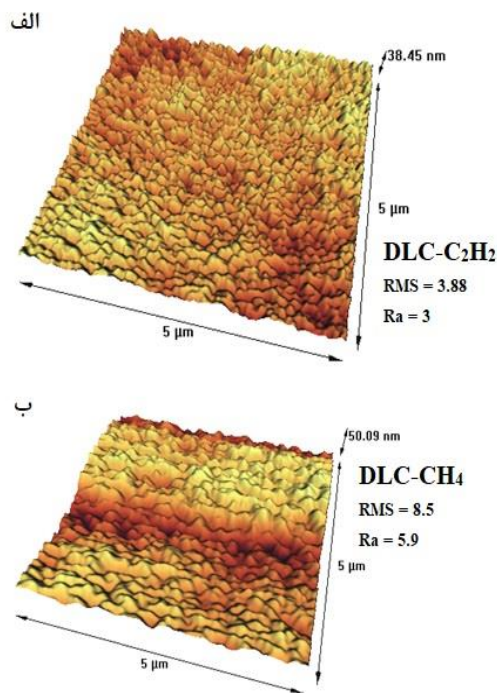


شکل ۷. نمایش عوامل مؤثر بر محل و ارتفاع قله‌های G و D کربن‌های غیربلوری (Robertson, 2002)

### ۲-۳- نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

در این پژوهش، پوشش کربن شبه‌الماس توسط فرایند لایه‌نشانی پرتو یونی با استفاده از دو منبع گازی استیلن ( $C_2H_2$ ) و متان ( $CH_4$ ) ایجاد شد. به منظور بررسی ریخت‌شناسی، ضخامت و نرخ رسوب پوشش‌های ایجادشده از آنالیز FESEM استفاده شد که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین، نتایج حاصل از آنالیز EDS در شکل ۹ آورده شده است. مطابق با تصاویر ریخت‌شناختی، سطح پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط منبع گازی استیلن ( $C_2H_2$ ) یکنواختی و تراکم بالایی دارد، در صورتی که سطح پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی متان ( $CH_4$ ) پستی و بلندی و سطحی غیریکنواخت دارد. همچنین، مطابق با تصاویر مقطع عرضی، ضخامت پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط منابع گازی استیلن ( $C_2H_2$ ) و متان ( $CH_4$ ) تفاوت چشمگیری با هم دارد. ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی استیلن ( $C_2H_2$ ) در حدود ۵۸۰ نانومتر و ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی متان ( $CH_4$ ) در حدود ۱۸۰ نانومتر تعیین شده است. این رخداد نشان از تفاوت در نرخ رسوب پوشش کربنی حاصل از منابع گازی مختلف دارد. تصاویر حاصل از آنالیز FESEM حکایت از این دارند که نرخ رسوب پوشش کربنی توسط منبع گازی استیلن بسیار بالاتر از نرخ رسوب پوشش کربنی توسط منبع گازی متان است. این امر نشان می‌دهد که ترکیب (شیمی) پیش‌ماده‌ی گازی هیدروکربنی بر نرخ و میزان رسوب‌گذاری تأثیر زیادی دارد. در واقع، دلیل این رفتار تفاوت در پتانسیل یونیزاسیون استیلن ( $C_2H_2$ ) و متان ( $CH_4$ ) است که این امر ناشی از وجود مولکول‌های غیراشباع در استیلن است (Donnet & Erdemir, 2007; Ting et al., 2017).

لایه، ریخت‌شناسی سطح پوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۱۰. تصاویر AFM لایه‌های کربن شبه‌الماس با منابع گازی (الف) استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) و (ب) متان (CH<sub>4</sub>)

درواقع، درخصوص ساختار، دو پارامتر پیوندهای sp<sup>3</sup> و خوشه‌های sp<sup>2</sup> از عوامل مهم در تعیین ویژگی‌های سطح پوشش‌های کربن شبه‌الماس هستند. بر این اساس، هرچه مقدار پیوندهای sp<sup>3</sup> در ساختار پوشش افزایش یابد، زبری سطح نیز کاهش می‌یابد. لیفشیتز و همکاران (1994) گزارش کردند (Lifshitz et al., 1994) که هم‌بستگی واضحی بین زبری سطح و میزان ویژگی شبه‌الماس (پیوند sp<sup>3</sup>) وجود دارد و بیان کردند که زبری سطح با کاهش مقدار فاز گرافیت (sp<sup>2</sup>) کاهش می‌یابد. در پوشش کربنی ایجادشده توسط منبع گازی متان (CH<sub>4</sub>)، به دلیل میزان یونیزاسیون پایین‌تر پلاسما در مقایسه با منبع گازی استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)، گونه‌های رسیده به سطح فرصت کافی برای تشکیل لایه‌ای فشرده نخواهند داشت و نمی‌توانند از قله‌ها به سمت نقاط زیرسطحی پوشش نفوذ کنند. بنابراین، به صورت غیرفشرده روی سطح باقی می‌مانند و خوشه‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند که این امر بر افزایش زبری سطح پوشش مؤثر است (Donnet & Erdemir, 2007; Marks, 2005).

مدل کاشت زیرسطحی رشد پوشش کربنی به صورت طرح‌واره در شکل ۱۱ ارائه شده است.

(Donnet & Erdemir, 2007). گونه‌های هیدروکربنی خنثی فقط در سطح واکنش می‌دهند و قادر نیستند در داخل فیلم نفوذ کنند (Donnet & Erdemir, 2007). بنابراین، به دلیل بالا بودن میزان یونیزاسیون پلاسما حاصل از پیش‌ماده‌ی گازی استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) و بالاتر بودن میزان گونه‌های کربنی و هیدروکربنی غیراشباع در پلاسما حاصل از گاز استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)، تغذیه‌ی گونه‌های مؤثر در رشد پوشش کربنی افزایش می‌یابد و این امر در نرخ رسوب و ضخامت پوشش حاصله مؤثر است.

### ۳-۳- نتایج آنالیز AFM

به منظور بررسی توپوگرافی سطح پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط فرایند پرتو یونی با دو منبع گازی استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) و متان (CH<sub>4</sub>) از آنالیز AFM استفاده شد. شایان ذکر است که میزان زبری سطح لایه‌ها واکنش سطح با محیط اطراف خود را پیش‌بینی می‌کند، به طوری که هرچه میزان زبری سطح بیشتر باشد، میزان اصطکاک، آسیب‌دیدگی و تخریب‌پذیری بیشتر می‌شود (Mersagh Dezfuli & Sabzi, 2019). در شکل ۱۰، تصاویر حاصل از آنالیز AFM برای پوشش‌های DLC (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) و DLC (CH<sub>4</sub>) نشان داده شده و مقادیر زبری سطح نیز (RMS, Ra) محاسبه و ذکر شده است. مقادیر زبری سطح کلی نمونه‌ها (تخمین‌زده‌شده با میانگین بر روی منطقه ۵ میکرومتر \* ۵ میکرومتر) کمتر از ۹ نانومتر است. مطابق با تصاویر AFM، زبری سطح پوشش DLC (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) نسبت به پوشش DLC (CH<sub>4</sub>) عدد کمتری را نشان می‌دهد.

میانگین زبری سطح پوشش DLC (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) برابر با ۳/۸ نانومتر و زبری سطح پوشش DLC (CH<sub>4</sub>) برابر با ۸/۵ نانومتر تخمین زده شده است. بهبود ریخت‌شناسی و کاهش زبری سطح پوشش کربنی را می‌توان به کاهش اندازه و مقدار خوشه‌های sp<sup>2</sup> و افزایش درجه‌ی فاز شبه‌الماس، که توسط نتایج رامان تأیید شده است، نسبت داد.

میانگین زبری سطح پوشش DLC (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) برابر با ۳/۸ نانومتر و زبری سطح پوشش DLC (CH<sub>4</sub>) برابر با ۸/۵ نانومتر تخمین زده شده است. بهبود ریخت‌شناسی و کاهش زبری سطح پوشش کربنی را می‌توان به کاهش اندازه و مقدار خوشه‌های sp<sup>2</sup> و افزایش درجه‌ی فاز شبه‌الماس، که توسط نتایج رامان تأیید شده است، نسبت داد. در پوشش‌های کربن شبه‌الماس، علاوه بر ریخت‌شناسی سطح زیرلایه، عواملی همچون ضخامت و ساختار

می‌شود. زمانی که انرژی یون برخوردی ( $E_i$ ) از مقدار بحرانی ( $E_c$ ) بیشتر شود، آسیب ناشی از تصادم شبکه‌ی کربنی در تمام توده‌ی پوشش رخ می‌دهد و روند افزایش چگالی را مختل می‌کند. در نتیجه، باعث گرافیت شدن و افزایش زبری پوشش می‌شود.

### ۳-۴- آنالیز نانو سختی (نانودندانه‌گذاری)

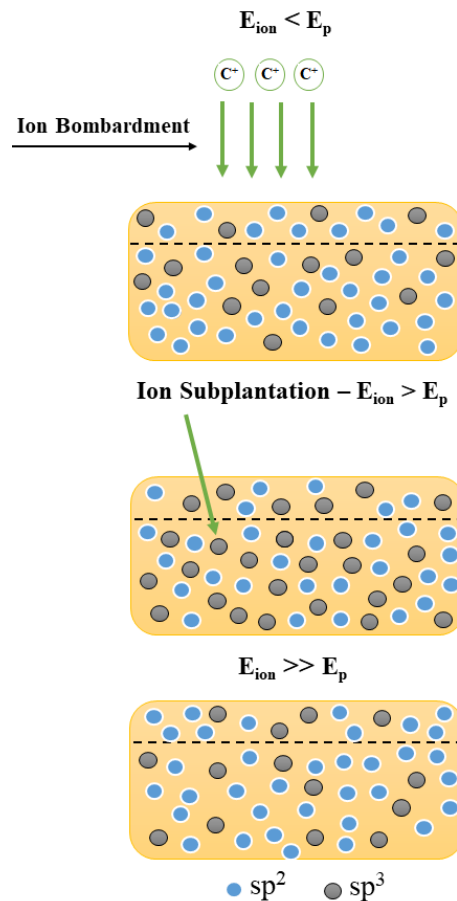
در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر منابع گازی متان ( $CH_4$ ) و استیلن ( $C_2H_2$ ) بر خواص مکانیکی (سختی و مدول الاستیک)، پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجاد شده توسط فرایند پرتو یونی از آنالیز نانو سختی سنجی استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون نانو سختی سنجی در شکل ۱۲ و جدول ۴ آورده شده است. از منحنی‌های بار-جابجایی حاصل از آنالیز نانو سختی سنجی نیز برای تعیین خواص مکانیکی از جمله سختی ( $H$ )، مدول الاستیک ( $E$ ) و پارامتر ضریب پلاستیک ( $H/E$ ) استفاده می‌شود (Wänstrand et al., 1999). با توجه به نمودارها و نتایج حاصل از آنالیز نانو سختی سنجی، پوشش کربن شبه‌الماس ایجاد شده با منبع گازی استیلن ( $C_2H_2$ ) دارای سختی و مدول الاستیک بالاتری است.

جدول ۴. مقادیر  $H$ ،  $E$  و  $H/E$  حاصل از آنالیز نانو سختی سنجی

| sample        | H / GPa | E / GPa | H/E   |
|---------------|---------|---------|-------|
| DLC- $C_2H_2$ | ۲۰/۱۸   | ۱۸۷/۷   | ۰/۱۰۷ |
| DLC- $CH_4$   | ۱۲/۴۸   | ۱۲۷/۸   | ۰/۰۹۷ |

مقادیر سختی به دست آمده برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس حاصل از منابع گازی استیلن و متان به ترتیب برابر با ۲۰/۱۸ و ۱۲/۴۸ گیگاپاسکال است. مقادیر کمتر  $H$  و  $E$  برای پوشش کربن شبه‌الماس ایجاد شده با منبع گازی متان ( $CH_4$ ) مربوط به بالاتر بودن مقدار  $I_D/I_G$  است که به افزایش غلظت پیوند کربن هیبرید شده  $sp^2$  و کاهش نسبت  $sp^3/sp^2$  داده می‌شود.

کمیت سختی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های مکانیکی یک سطح است که مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک را نشان می‌دهد (Donnet & Erdemir, 2007). سختی ( $H$ ) و مدول الاستیک ( $E$ ) در پوشش‌های کربن شبه‌الماس به شدت به ریزساختار و پیوندهای  $sp^3$  وابسته است. در واقع، افزایش پیوندهای  $sp^3$  در پوشش کربنی سختی و مدول الاستیک پوشش را افزایش می‌دهد (Donnet & Erdemir, 2007; Wänstrand et al., 1999).



شکل ۱۱. طرح‌واره‌ای از اثر انرژی یون بر رشد پوشش کربن شبه‌الماس: الف)  $E_{ion} < E_p$ ، نفوذ سطحی غالب است (افزایش زبری)، ب)  $E_{ion} > E_p$ ، نفوذ به عمق و افزایش مقدار  $sp^3$  (کاهش زبری) و ج)  $E_{ion} \gg E_p$ ، آسیب ناشی از تصادم شبکه‌ی کربنی و افزایش  $sp^2$  (افزایش زبری) (Lifshitz et al., 1994)

با توجه به انرژی یون‌های برخوردی به سطح ( $E_i$ )، سه حالت رشد برای پوشش قابل تصور است. زمانی که انرژی یون برخوردی ( $E_{ion}$ ) از مقدار بحرانی انرژی ( $E_c$ ) کمتر باشد، به دلیل غلبه‌ی پدیده‌های سطحی، افزایش زبری سطح رخ می‌دهد. علت این پدیده انرژی پایین یون برخوردی است که باعث می‌شود نفوذ در سطح بیش از نفوذ به بالک پوشش رخ بدهد. این مسئله باعث می‌شود روی سطح خوشه‌هایی از جنس  $sp^2$  ایجاد شود و زبری سطح افزایش یابد. زمانی که انرژی یون برخوردی با انرژی بحرانی ( $E_c$ ) برابر است، گونه‌های کربنی شروع به نفوذ به زیرسطح می‌کنند (Donnet & Erdemir, 2007; Robertson, 2002).

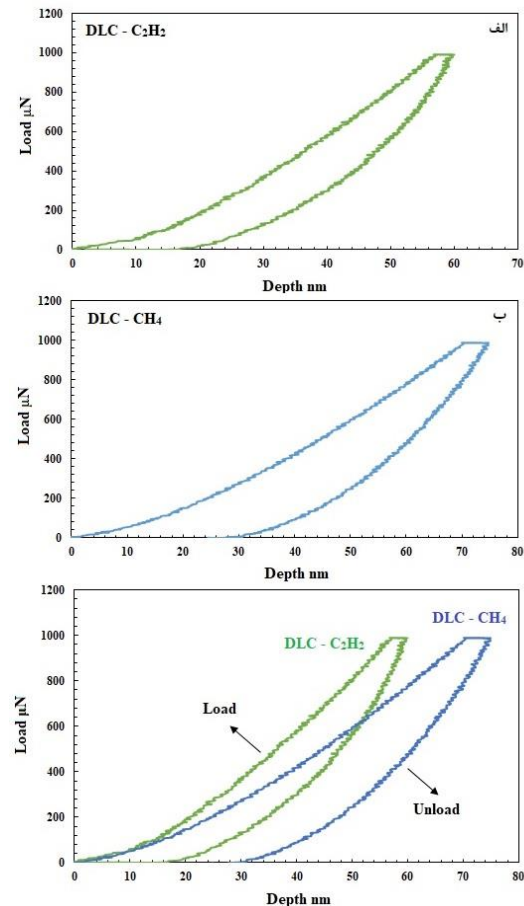
در این حالت، یون‌های برخوردی به مکان‌های بین‌نشینی می‌روند و حالت کاشت زیرسطحی به پدیده‌ی نفوذ سطحی غلبه می‌کند. در این حالت، مقدار پیوندهای  $sp^3$  از مقدار  $sp^2$  بیشتر

سایش نیز پارامتر بسیار مهمی برای تعیین کیفیت فیلم‌ها است. یکی دیگر از داده‌های قابل استخراج از آنالیز نانوسختی سنجی کمیت ضریب پلاستیک است. پارامتر مقاومت پلاستیک (H/E) نه تنها خواص الاستیک - پلاستیک را توضیح می‌دهد، بلکه اطلاعاتی درباره‌ی مقاومت به سایش ماده نیز ارائه می‌کند. نسبت H/E پاسخ فیزیکی شبکه‌ی اتمی را به نیروی خارجی نشان می‌دهد و به استحکام شکست بالک مربوط می‌شود. دامنه‌ی اعتبار H/E برای پوشش‌های DLC در محدوده‌ی صفر تا ۰/۱ متغیر است. حد بالایی و پایینی به ترتیب رفتار الاستیک و الاستیک - پلاستیک فیلم‌ها را نشان می‌دهند. همچنین، برای پوشش‌های با مقاومت به سایش بالا، H/E باید عدد بالایی باشد (Donnet & Erdemir, 2007; Wänstrand et al., 1999). بنابراین، فیلم‌های DLC، که H/E بالا را نشان می‌دهند، مقاومت در برابر سایش بالایی نیز دارند.

با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده در جدول ۴، مقادیر H/E برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس DLC-CH<sub>4</sub> و DLC-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> به ترتیب برابر با ۰/۱۰۷ و ۰/۰۹۷ است. H/E کمتر در پوشش DLC-CH<sub>4</sub> نشان می‌دهد که کسر بیشتری از کار در تغییر شکل پلاستیک (کرنش پلاستیک) هنگام تماس با یک ماده اعمال می‌شود. حداکثر مقدار H/E ~ 0.1 در پوشش DLC-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> مربوط به تغییر شکل پلاستیک کمتر، مقاومت به سایش بیشتر و در نتیجه بالا بودن خواص شبه‌الماس آن است. شایان ذکر است که الماس با H ~ 100 GPa و E ~ 1000 GPa مقدار H/E ~ 0.1 را نشان می‌دهد (Donnet & Erdemir, 2007). بنابراین، در بین پوشش‌های DLC-CH<sub>4</sub> و DLC-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>، پوشش کربنی DLC-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> نه تنها برای کاربردهای مستلزم سختی زیاد، بلکه برای کاربردهای پوشش با مقاومت سایشی بالا مناسب است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تغییرات ساختاری پوشش کربن شبه‌الماس بر اساس تغییرات در پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی در فرایند لایه‌نشانی پرتو یونی بررسی و مطالعه شد. پوشش کربن شبه‌الماس با دو پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی متان (CH<sub>4</sub>) و استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) در فرایند PVD-IBD اعمال شد. نتایج کلی حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:



شکل ۱۲. نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده با منابع گازی الف) استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) و ب) متان (CH<sub>4</sub>)

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز رامان، پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) دارای مشخصه‌های شبه‌الماس بالاتر و پیوندهای sp<sup>3</sup> بیشتری از پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی متان (CH<sub>4</sub>) در ساختار خود است. این امر توسط آنالیز نانوسختی سنجی نیز تأیید شده است. لذا، مطابق با نمودارهای به‌دست‌آمده از آنالیز نانوسختی سنجی، عمق نفوذ فرورونده به پوشش DLC-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> از پوشش DLC-CH<sub>4</sub> کمتر است که این امر بالاتر بودن سختی پوشش DLC-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> را نشان می‌دهد. مقادیر مدول الاستیک (E) حاصل نیز از روند مشابهی همانند سختی پیروی می‌کنند. شایان ذکر است که ترکیب منبع گازی (پیش‌ماده‌ی هیدروکربنی) نه تنها بر ترکیب و کیفیت پلاسم، بلکه بر ساختار و خواص پوشش نیز تأثیر می‌گذارد. مشخصه‌هایی مانند سختی، تنش پسماند، چگالی و کسر اتم‌های کربن با پیوند sp<sup>3</sup> با تغییر منبع گازی دچار تغییر می‌شوند (Bewilogua & Hofmann, 2014). علاوه بر H و E، در آنالیز نانوسختی سنجی، مقاومت پوشش در برابر

4. Kazuya, K., Yasuharu, O., Masanori, H., Hideki, N., Akihiko, H., & Kenji, H. (2021). Classification of DLC films for cell proliferation based on optical constants. *Diamond and Related Materials*, 113, 108266. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108266>
  5. Lichun, B., Guangan, Z., Zhiguo, W., Jun, W., & Pengxun, Y. (2011). Effect of different ion beam energy on properties of amorphous carbon film fabricated by ion beam sputtering deposition (IBSD). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 269(17), 1871-1877. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.05.017>
  6. Lifshitz, Y., Lempert, G. D., & Grossman, E. (1994). Substantiation of subplantation model for diamondlike film growth by atomic force microscopy. *Physical Review Letters*, 72(17), 2753-2756. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.2753>
  7. Mamun, A., Furuta, H., & Hatta, A. (2018). Pulsed DC plasma CVD system for the deposition of DLC films. *Materials Today Communications*, 14, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.008>
  8. Marks, N. A. (2005). Thin film deposition of tetrahedral amorphous carbon: a molecular dynamics study. *Diamond and Related Materials*, 8, 1223-1231. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2004.10.047>
  9. Mersagh Dezfouli, S., & Sabzi, M. (2019). Review of the Effect of Presence of Yttria and Benzotriazole Inhibitor Factor on Electrochemical Properties and Activation of Self-Healing Mechanism in Alumina-Based Coatings. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 7(4), 75-92. [in Persian]. <https://doi.org/10.30501/JAMT.2019.84402>
  10. Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering, R: Reports*, 37(4-6), 129-281. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)
  11. Ting, G., Cuicui, K., Xiaowei, L., Peng, G., Zhenyu, W., & Aiyang, W. (2017). Microstructure and mechanical properties of Ti/Al co-doped DLC films: dependence on sputtering current, source gas, and substrate bias. *Applied Surface Science*, 410, 1-59. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.254>
  12. Wänstrand, O., Larsson, M., & Hedenqvist, P. (1999). Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings. *Surface and Coatings Technology*, 111(2-3), 247-254. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00821-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00821-4)
  13. Yu, W., Wang, J., Huang, W., Cui, L., & Wang, L. (2020). Improving high temperature tribological performances of Si doped diamond-like carbon by using W interlayer. *Tribology International*, 146, 106241. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106241>
- ۱- مطابق با نتایج آنالیز رامان، کمترین مقدار  $I_D/I_G$  در پوشش کربن شبه‌الماس در پوشش  $DLC (C_2H_2)$  مشاهده شد. اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی برای پوشش کربنی ایجادشده با منبع گازی استیلن دارای کمترین اندازه و برابر با ۹ آنگستروم بود. همچنین، مقدار  $FWHM (G)$  برای پوشش  $DLC (C_2H_2)$  برابر با  $cm^{-1}$  ۱۶۲ بود که مقدار آن نسبت به پوشش  $DLC (CH_4)$  بیشتر بود.
- ۲- با توجه به تصاویر FESEM، سطح پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط منبع گازی استیلن  $(C_2H_2)$  یکنواختی و تراکم بالایی داشت، در صورتی که سطح پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی متان  $(CH_4)$  پستی و بلندی و سطحی غیریکنواخت داشت. ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی استیلن  $(C_2H_2)$  در حدود ۵۸۰ نانومتر و ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی متان  $(CH_4)$  در حدود ۱۸۰ نانومتر بود.
- ۳- مطابق با نتایج AFM، زبری سطح پوشش  $DLC (C_2H_2)$  از پوشش  $DLC (CH_4)$  عدد کمتری را نشان داد. میانگین زبری سطح پوشش  $DLC (C_2H_2)$  برابر با  $3/88$  نانومتر و زبری سطح پوشش  $DLC (CH_4)$  برابر با  $8/5$  نانومتر تخمین زده شد.
- ۴- با توجه به نتایج حاصل از آنالیز نانوسختی سنجی، پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی استیلن  $(C_2H_2)$  سختی و مدول الاستیک بالاتری داشت. مقادیر سختی به‌دست‌آمده برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس حاصل از منابع گازی استیلن و متان به ترتیب برابر با  $20/18$  و  $12/48$  گیگاپاسکال بود.

## ۵- سپاسگزاری

از مسئول محترم آزمایشگاه لایه‌نشانی در خلاء دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران برای همکاری در این پژوهش بسیار سپاسگزاریم.

## مراجع

1. Bewilogua, K., & Hofmann, D. (2014). History of diamond-like carbon films-From first experiments to worldwide applications. *Surface and Coatings Technology*, 242, 214-225. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.01.031>
2. Donnet, C., & Erdemir, A. (2007). Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications. *Advanced Materials Research*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-49891-1>
3. Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review, B*, 61(20), 14095-14107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>