

## بررسی اثرات نانومقیاس ناشی از پلاسمای سرد بر روی سطوح

محمد تقی احمدی، استاد<sup>۱</sup>

زهرا رضائی، کارشناسی ارشد<sup>۲</sup>

میثم رحمانی، استادیار، [meisam.rahmani@bzte.ac.ir](mailto:meisam.rahmani@bzte.ac.ir)<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مقاله اثرات نانومقیاس ناشی از پلاسمای سرد بر روی سطوح بررسی شده است. حفاظت از قطعات سیستم های الکترونیکی و مکانیکی برای افزایش عمر آنها ضروری است. هنگامی که برخی از قطعات در معرض محیط قرار می گیرند، سطح آنها با مولکول های محیط واکنش نشان می دهد و این واکنش ها باعث آلودگی هایی مانند فرسایش و خوردگی می شود که این عوامل آسیب جدی به آنها وارد می کند. در گذشته برای اصلاح سطح مواد از روش های شیمیایی استفاده شده است که علاوه بر معایب زیاد اثر ماندگاری نیز نداشت. امروزه روش سودمندی با عنوان اصلاح سطح مواد توسط پلاسما همراه با مزایا و فواید فراوان گسترش یافته است. در این مطالعه از دستگاه پلاسما جت که از منبع تغذیه AC با فرکانس بالا تشکیل شده است استفاده می شود. الکترودها به یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا متصل می شوند و پلاسما بین آنها در دمای اتاق و فشار اتمسفر تشکیل می شود. در این تحقیق سطحی از ۶ قطعه شامل شیشه، گرافیت، پلاستیک، سرب، آلومینیوم و الیاف برای تمیز کردن سطح پلاسما مورد بررسی قرار گرفته است و از نانوفوکوس و میکروسکوپ دیجیتال برای تشخیص تغییرات در سطوح قبل و بعد از اعمال پلاسما استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آنست که آلودگی سطحی از طریق پردازش پلاسما حذف شده است.

واژه‌های کلیدی: پلاسما، پلاسما جت، اثرات نانومقیاس، تمیز کردن سطح.

### ۱- مقدمه

اکنون روش های مختلفی برای ایجاد تغییرات سطحی وجود دارد. پردازش سطح از طریق پلاسما بسیار مورد توجه قرار گرفته است. پلاسما به عنوان بعد چهارم ماده تعریف می شود. گونه های مختلفی در پلاسما وجود دارد، مانند الکترون ها، یون های مثبت، اتم ها یا مولکول ها، فلزات، رادیکال های آزاد، فوتون ها و گونه های فعال اکسیژن و نیتروژن. هنگامی که پلاسما به نمونه اعمال می شود، هر یک از این گونه ها به روش های مختلفی واکنش نشان می دهند که فرآیندهای سطحی مختلفی را دنبال می کنند. نفوذ این ذرات به داخل نمونه (به جز فوتون ها) در حد ۱۰ نانومتر یا کمتر است، به این معنی که پلاسما یک عمل سطحی است [۱]. پلاسما به روش های مختلفی از جمله تخلیه گاز، فوتونیوئیزاسیون، تابش گرما، فرکانس های رادیویی و پرتوهای الکترونی تولید می شود که در بین این موارد، تخلیه گاز معمول ترین روش تولید پلاسما است [۲]. با اعمال میدان الکتریکی با ولتاژ بالا به

<sup>۱</sup>گروه نانوفیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup>گروه نانوفیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

<sup>۳</sup>گروه مهندسی برق، نرم افزار، فناوری اطلاعات و مهندسی پزشکی، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، قزوین، ایران

گاز، با پدیده پلاسمای فشار اتمسفر مواجه می‌شود [۳]. الکترون‌ها به دلیل وزن کم و فعالیت زیاد، بیشترین انرژی میدان الکتریکی را به دست می‌آورند. در طی برهمکنش‌ها، الکترون‌ها این انرژی را به ذرات دیگر پلاسما منتقل می‌کنند و انرژی واکنش‌های پلاسما مانند یونیزاسیون، تحریک، انحلال و غیره را تامین می‌کنند. فشار گاز مورد استفاده برای تولید پلاسما تأثیر مستقیمی بر خواص پلاسما و روش‌های ساخت پلاسما خواهد داشت [۱]. پلاسماها از نظر فشار در سه حالت فشار کم، فشار اتمسفر و فشار بالا قرار دارند. برای تولید پلاسمای کم فشار، نیاز به تجهیزات خلاء است که هزینه نسبتاً بالایی داشته باشد و پیچیدگی فرآیندهای تصفیه مواد را افزایش دهد [4-5]. پلاسماهای فشار اتمسفر در دمای اتاق تولید می‌شوند و به فضای بزرگ و سیستم‌های خلاء وابسته نیستند [۶]. بنابراین تولید ارزان و کارکرد آسان و موادی که نیاز به خلاء زیاد ندارند [۷] و پردازش اجسام سه بعدی قابل استفاده برای استفاده مداوم در خط تولید، تحت قوانین خاصی نگهداری نمی‌شوند. آنها توانایی تولید ذرات با شیمی بسیار واکنش پذیر را در دمای اتاق دارند [۸]. پردازش پلاسما ویژگی‌های سطح را بدون تغییر خواص فیزیکی مواد اصلاح می‌کند. پس از چندین بار استفاده از پلاسما در سطح ماده، وزن آن تغییر نمی‌کند. در پردازش سطحی مرسوم، معمولاً از مواد شیمیایی استفاده می‌شود، آب و انرژی بسیار هدر می‌رود، اما پلاسما یک فرآیند خشک است و استفاده از آن برای پردازش سطحی، استفاده از سه مورد فوق را کاهش می‌دهد [۱]. پلاسماهای فشار اتمسفر محدوده فرکانس از DC تا میکروویو را پوشش می‌دهند [۶]. انواع دستگاه‌های تولید پلاسما عبارتند از: تخلیه جرقه، تخلیه سد دی الکتریک (DBD)، تخلیه پالسی کرونا، تخلیه کرونا [۹]. پلاسما تخلیه یکنواخت درخشش یک جو، تخلیه سطح فشار اتمسفر، مشعل پلاسمای سرد، اتمسفر جت پلاسما تحت فشار [۵]. پلاسمای میکروویو، پلاسمای فرکانس رادیویی، پلاسمای جفت شده القایی، پلاسمای جفت شده خازنی، پلاسمای تشدید سیکلوترون الکترونی [۱۰] و تخلیه سد مقاومتی (RBD) [۲]. جت‌های پلاسما را به بیرون دستگاه هدایت می‌کنند و هیچ گونه خطر الکتریکی و الکترونی ندارند، بنابراین بسیار قابل توجه هستند [۶]. دمای جت‌های پلاسما تحت فشار اتمسفر در محدوده ۵۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد است، بنابراین عملاً هیچ آسیب جدی حرارتی به مواد فرآوری شده وارد نمی‌شود، اما دمای جت پلاسما سرد در دمای اتاق و در حدود ۲۵-۳۰ درجه سانتیگراد است [۵]. پلاسمای اتمسفر در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع غذایی و زیست پزشکی [۱۰]، اثر مستقیم به سلول‌ها و بافت‌های زنده، کشت باکتری‌ها و انعقاد خون [۱۱]، ترمیم پوست [۱۲]، درمان سرطان [۳]، استریل کردن دستگاه‌های پزشکی کاربردهای فراوانی دارد. همچنین در دندانپزشکی، کاربردهای زیبایی، استفاده در سلامت بیمارستان [۱۳]، حفاظت از محیط زیست، حذف (VOCs) [۱۴]، تولید ازن برای تصفیه آب [۹]، کنترل آب و هوا در هواشناسی، تولید نانولوله‌های کربنی، لایه‌های نازک رسوبی [۱۵]، پردازش انواع مختلف مواد مانند فلزات، مانند اصلاح سطح آلومینیوم، ایجاد تغییرات در سطح پلیمرها [۱۶]، عملیات دیزل آگزوز [۱۷]، تمیز کردن سطوح قبل از ساخت پوشش [۱۸]، ایجاد آب گریزی در سطح شیشه و بهبود آن، خواص سطح [19-20]، مهندسی سطح میکرو در زمینه‌های مختلف [۸] و غیره کاربرد دارد. در این تحقیق از دستگاه «پلاسما جت» برای تولید پلاسما (شکل ۱)، منبع برق با ولتاژ بالا در محدوده فرکانس ۱۶-۲۲ کیلوهرتز در دمای اتاق و فشار اتمسفر استفاده شده است. دمای پلاسمای آزاد شده از نازل حدود ۲۰-۳۵ است که هیچ آسیبی به بافت مواد وارد نمی‌کند. تغییرات در ساختار سطح ۶ ماده پس از قرار گرفتن در معرض پلاسما بررسی شده است.



شکل ۱- دستگاه پلازما جت.

وقتی صحبت از میدان الکتریکی یکنواخت داخل پلازما می شود، رفتار یون ها و الکترون ها به دلیل وجود این میدان در نظر گرفته می شود. این ذرات در جهت مخالف میدان حرکت می کنند و در نتیجه حرکت نسبی بین این ذرات ایجاد می شود. اما حرکت این ذرات در جهت مخالف منجر به برخوردهایی بین آنها می شود که باعث از بین رفتن ریزش تکانه نسبی بین آنها می شود. بنابراین، تعادل تکانه نسبی وابسته به فروپاشی تکانه نسبی توسط برخورد بین ذره است که امکان یک حالت پایدار را فراهم می کند. معادله ای که موازنه نیروها روی الکترون ها را نشان می دهد:

$$0 = -\frac{e}{m_e} E - v_{ei} u_{rel} \quad (1)$$

که در آن  $u_{rel}$  سرعت نسبی بین الکترون ها و یون ها است،  $v_{ei}$  سرعت نسبی برخورد بین الکترون ها و یون ها،  $e$  مقدار بار الکترون،  $m_e$  جرم الکترون و  $E$  شدت میدان الکتریکی است. ما از فرمول جریان الکتریکی برای ساده کردن معادله استفاده می کنیم.

$$J = -n_e e u_{rel} \quad (2)$$

که در آن  $n_e$  چگالی الکترون ها را نشان می دهد. معادله ۱ به این شکل ساده شده است:

$$E = \eta J \quad (3)$$

که  $\eta$  مقاومت الکتریکی پلازما نامیده می شود و با معادله زیر بیان می شود.

$$\eta = \frac{m_e v_{ei}}{n_e e^2} \quad (4)$$

رابطه  $n_e \approx n_i$  به عنوان تعریف "پلاسمای شبه خنثی" وجود دارد که تقریباً همان چگالی یون ها و الکترون های مثبت است. اگر یون های باردار زیاد باشند، این معادله به شکل زیر تغییر می کند:

$$n_e \approx \sum_z Z n_z \quad (5)$$

که در آن  $Z$  تعداد یون های مثبت و  $n_z$  چگالی یون های باردار است.  $n_i$  همان  $n_z$  است. بنابراین حالت شبه خنثی پلازما با معادله زیر بیان می شود:

$$Z n_i = n_e \quad (6)$$

معادلات  $v_{ie} = \sigma^* n_i v_{Te}$  (برابر با دمای برخورد است و فرض شده است  $\sigma_{ii}^* = \sigma_{ee}^* \sigma_{ii}^* = \sigma_{ee}^*$  و  $Zn_i = n_e$  مورد استفاده قرار می‌گیرند و معادله مقاومت الکتریکی پلاسما را به صورت زیر تکمیل می‌کنیم.

$$\eta = \frac{Ze^2}{2\pi m_e \epsilon_0^2 v_{Te}^3} \ln\left(\frac{\lambda_D}{b_{\pi/2}}\right) \quad (7)$$

که در آن  $\lambda_D$  طول Debye-Huckel نامیده می‌شود و معادله آن به صورت زیر است:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e}\right)^{1/2} \quad (8)$$

## ۲- بخش عملی و آزمایشگاهی

دستگاه مورد استفاده در این مطالعه دستگاه پلاسما جت می‌باشد که هندسه بسیار ساده ای دارد. دستگاه مورد استفاده در این مطالعه اساساً از دو الکتروود فلزی تشکیل شده است که یک طرف آنها به منبع تغذیه AC متصل و طرف دیگر در داخل پلاسما ژنراتور در فاصله ۴ میلی متری قرار می‌گیرد. هنگامی که منبع تغذیه روشن می‌شود، پلاسما در فاصله بین دو الکتروود تشکیل شده و از طریق نازل به سطح قطعه اعمال می‌شود. منبع تغذیه ولتاژ بالا در محدوده فرکانس ۱۶-۲۲ کیلو هرتز کار می‌کند. منبع تغذیه ۱۰ کیلو ولت در هر سانتی متر جرقه است و دستگاه ما ۳ سانتی متر جرقه زده است، بنابراین ولتاژ آن حدود ۳۰ کیلو ولت است. در داخل منبع تغذیه علاوه بر مدار خود دستگاه، مدار ترانسفورماتور ۱۲ ولتی تعبیه شده است تا با گرفتن برق شهر و تبدیل آن به جریان و ولتاژ متناسب با دستگاه، از آسیب به دستگاه جلوگیری شود. گاز مورد استفاده در این آزمایش هوا است. در گاز هوا، پس از اعمال پلاسما بر روی سطح و شکستن پیوندهای هیدروکربنی، مولکول‌های اکسیژن با مولکول‌های کربن و هیدروژن موجود در سطح واکنش داده و به مولکول  $H_2O$  و  $CO_2$  تبدیل شده و وارد هوا شده و سطح آلوده تمیز می‌شود. یک لوله از سیلندر گاز به ابتدای نازل دستگاه متصل شده و گاز از طریق نازل جریان می‌یابد. در این تحقیق از قطعاتی استفاده می‌شود که دسترسی آسان و ارزان دارند. برای این منظور ۶ قطعه شیشه، آلومینیوم، سرب، گرافیت، پلاستیک و الیاف را انتخاب کردیم. هر قطعه به طور جداگانه قبل از شروع پردازش پلاسما بر روی سطح، عمود بر محور نازل و در فاصله ۵ میلی متری از نازل قرار می‌گیرد.

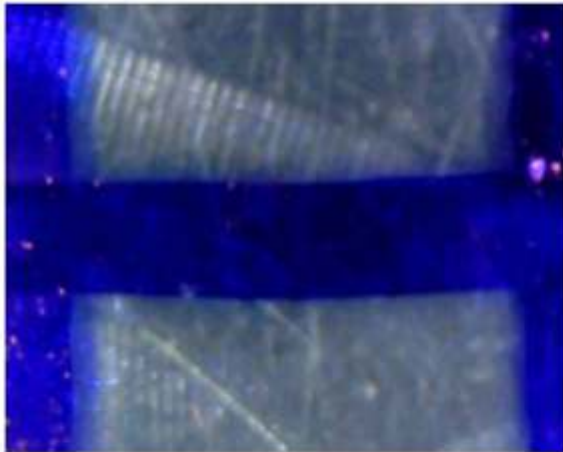
هر ذره در پلاسما نقش خاص خود را در فرآیند پردازش سطح ایفا می‌کند. به عنوان مثال، همانطور که اشاره کردیم، الکترون‌ها بیشترین انرژی میدان الکتریکی را به دست می‌آورند و سپس آن را به سایر اجزای پلاسما منتقل می‌کنند. تغییرات دما و چگالی الکترون و نحوه توزیع انرژی توسط آن، باعث کنترل و بهبود فرآیندهای پلاسما می‌شود. یون‌های موجود در پلاسما نیز تأثیر زیادی بر سینتیک آن دارند، به طور کاتالیزوری ایجاد می‌کنند، همچنین به طور خاص باعث پایداری ستون پلاسما می‌شود و برای اکسید شدن سوخت مهم است [۴]. رادیکال‌های موجود در سطح ماده به دلیل شکسته شدن پیوندها از طریق شتاب یونی تولید می‌شوند. رادیکال‌های آزاد مهم‌ترین پارامتر برای تمام واکنش‌هایی هستند که در پردازش سطحی پلاسما تأثیر دارند. بمباران الکترونی توسط تخلیه الکتریکی باعث جدا شدن مولکول‌ها و افزایش چگالی رادیکال‌های آزاد می‌شود. اکسیژن رادیکال در پایین‌ترین حالت برانگیخته خود دارای انرژی ۲۲۰ کیلوکالری بر مول در بالای سطح زمین است که مقدار انرژی مورد نیاز برای شکستن پیوندهای مولکولی است. بنابراین اگر رادیکال‌های آزاد روی سطوح آلوده قرار گیرند، انرژی آنها باعث شکسته شدن پیوندهای مولکولی روی سطح می‌شود که منجر به فروپاشی کلی مولکول می‌شود. در این حالت، سطوح آلوده با فروپاشی مولکول‌های آلی تمیز می‌شوند [21-22].

در ابتدا چاپ جت پلاسما برای پردازش سطوح آماده شد. یک منبع تغذیه ولتاژ بالا AC برای ایجاد پلاسما بین دو الکتروود استفاده شد. ما پلاسما یکنواخت و همگن در فرکانس ۱۶-۲۲ کیلوهرتز و ولتاژ ۳۰ کیلو ولت داشتیم. وقتی پلاسما همگن به دست می‌

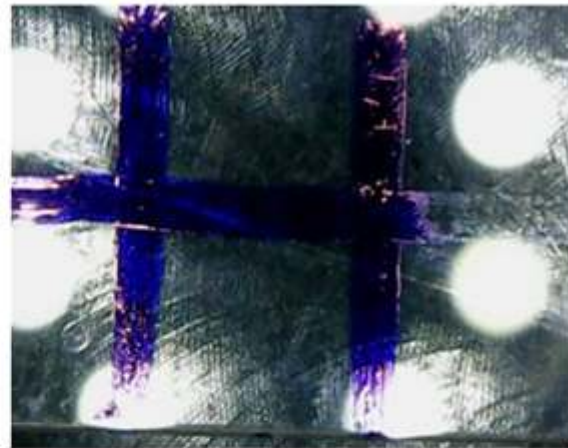
آوریم با استفاده از دماسنج لیزری که در محدوده ۲۰-۳۵ درجه سانتی گراد به دست می آید دمای آن را اندازه گیری می کنیم. دو الکتروود را به خروجی های منبع تغذیه متصل می کنیم. طرف دیگر الکتروودها در داخل نازل با فاصله ۴ میلی متر از هم قرار دارد. از نازل، لوله به سیلندر گاز متصل می شود. ابتدا منبع تغذیه را روشن می کنیم سپس ورودی گاز را باز می کنیم و گاز از الکتروودها عبور می کند و پلاسمای یکنواخت با فرکانس و ولتاژ مناسب تشکیل می شود. با تغییر مقدار گاز ورودی، اندازه شعله پلاسما نیز تغییر می کند. هر چه مقدار گاز ورودی بیشتر باشد طول ستون پلاسما بیشتر می شود. نمونه ها را آماده می کنیم. در نمونه ها به عمد ناخالصی (آلودگی) ایجاد شده است. برای پاکسازی این ناخالصی ها از فرآیند پلاسما استفاده می شود. نمونه ها روی یک سطح قرار گرفتند. نازل در فاصله ۵ میلی متری از نمونه ها نگهداری شد و با گذشت زمان، پلاسما روی سطح نمونه ها اعمال شد. نتایج نشان می دهد که دستگاه پلاسما جت می تواند یک تغییر سطح همگن در محل انتخاب شده ایجاد کند. برای ارزیابی تغییرات ایجاد شده در سطوح مورد نظر، تصاویر با استفاده از دستگاه های نانوفوکوس و دوربین دیجیتال [۱] ضبط شد.

## ۲-۱- شیشه

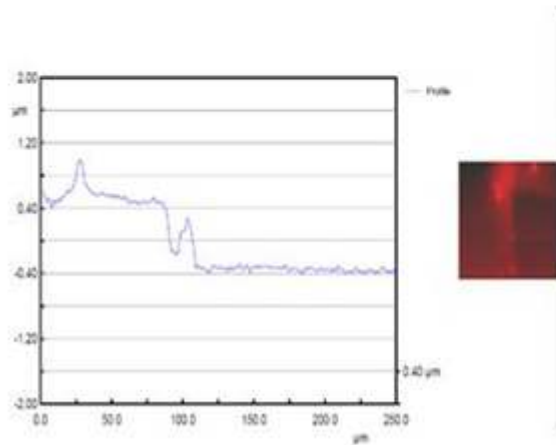
ابتدا نمونه ای از شیشه در نظر گرفته شد. قبل از انجام پلاسما، تصویر شیشه ای با میکروسکوپ دیجیتال ثبت شد (شکل ۲-۱a). نمونه در محل قرار داده شد و ثابت شد و سپس قسمت آلوده سطح به مدت ۱ دقیقه در معرض پلاسما قرار گرفت. پس از اعمال پلاسما، مجدداً با میکروسکوپ دیجیتال تصویری از شیشه گرفته شد (شکل ۲-۱b). همچنین تغییرات ضخامت لایه آلوده روی سطح پس از اعمال پلاسما توسط دستگاه نانوفوکوس کننده ثبت شد. نمودار تغییر ضخامت آلودگی در شکل ۲-۱c و تصویر سه بعدی تغییر ضخامت آلودگی در شکل ۲-۱d نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲-۱c نشان داده شده است، ناخالصی ها در محدوده میکرومتر اندازه گیری می شوند. حداکثر مقدار ناخالصی ایجاد شده روی سطح شیشه ۰,۹۹۱ میکرومتر است. با اعمال پلاسما بر روی لیوان با شدت فرکانس ۱۶ کیلوهرتز در فاصله زمانی یک دقیقه و در فاصله ۵ میلی متری از نازل ژنراتور پلاسما، مقدار ناخالصی به ۰,۴۰۹ میکرومتر رسیده است. با مجموع حداکثر و حداقل ناخالصی ها، مشاهده می شود که ناخالصی ها به مقدار ۱,۳۹۱ میکرومتر از سطح حذف شده اند.



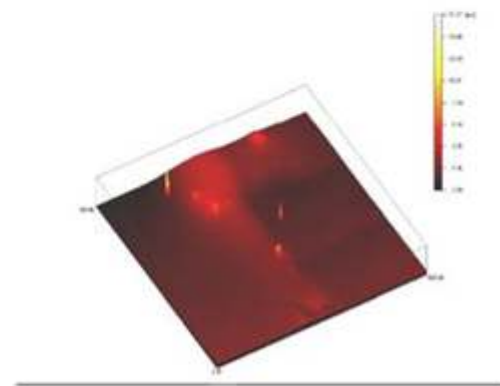
(a)



(b)



(c)

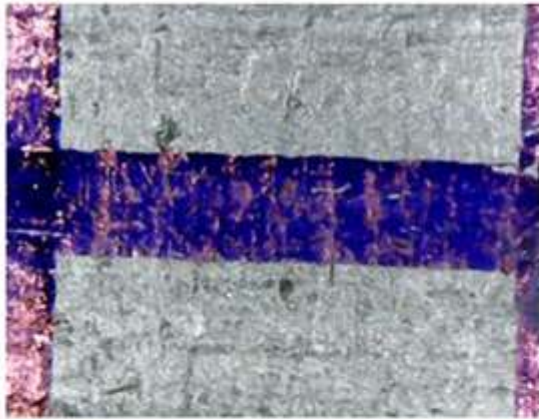


(d)

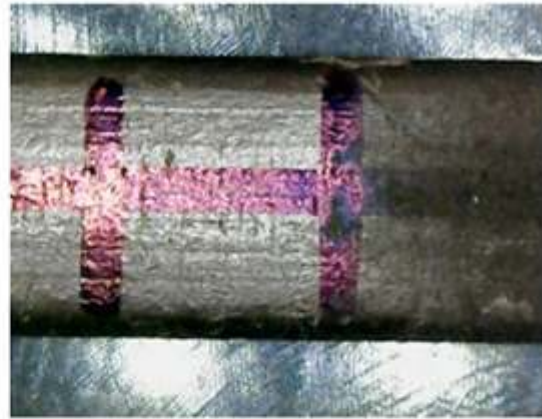
شکل ۲- تاثیر پلاسما بر روی شیشه (a) تصویر سطح شیشه قبل از اعمال پلاسما، (b) تصویر سطح شیشه بعد از اعمال پلاسما، (c) نمودار تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح شیشه بعد از اعمال پلاسما، (d) تصویر سه بعدی از تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح شیشه بعد از اعمال پلاسما.

## ۲-۲- گرافیت

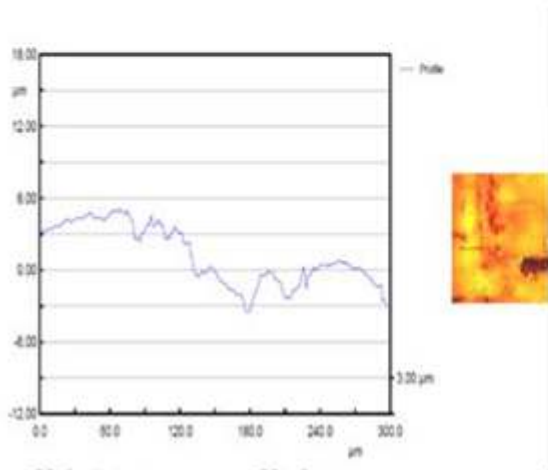
نمونه دوم آزمایش شده یک قطعه گرافیت است. قبل از استفاده از پلاسما، تصویری از سطح گرافیت توسط میکروسکوپ دیجیتال گرفته شد (شکل ۳-۱). سپس پلاسما به ناخالصی ایجاد شده روی گرافیت اعمال شد. پس از استفاده از پلاسما، تصویر نمونه ثبت شد (شکل ۳-۲). نمودار توسط یک دستگاه نانوفوکوس برای نشان دادن تغییرات ضخامت ناخالصی روی سطح گرافیت انجام شد (شکل ۳-۳). همچنین تصویر سه بعدی تغییر ضخامت با دستگاه فوکوس نانو ثبت شد (شکل ۳-۴). همانطور که در شکل ۳-۳ مشخص است، ناخالصی در سطح گرافیت در ابتدا ۵,۰۹۸ میکرومتر است. با شروع عملیات پلاسما، در محیط اتاق به مدت یک دقیقه و به فاصله ۵ میلی متر، سطح از ناخالصی های نازل بر روی سطح کاهش می یابد تا به حداقل مقدار ۳,۴۶۰ میکرومتر برسد. با مجموع مقادیر حداکثر و حداقل ناخالصی سطح، نتیجه می گیریم که ناخالصی به اندازه ۸,۵۵۸ میکرومتر کاهش می یابد.



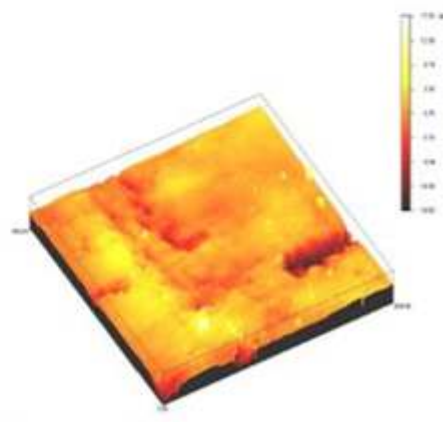
(a)



(b)



(c)



(d)

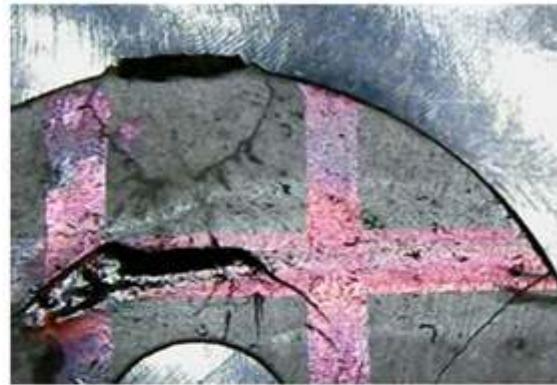
شکل ۳- تاثیر پلاسما بر روی گرافیت (a) تصویر سطح گرافیت قبل از اعمال پلاسما، (b) تصویر سطح گرافیت بعد از اعمال پلاسما ، (c) نمودار تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح گرافیت بعد از اعمال پلاسما، (d) تصویر سه بعدی از تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح گرافیت بعد از اعمال پلاسما.

### ۳-۲- پلاستیک

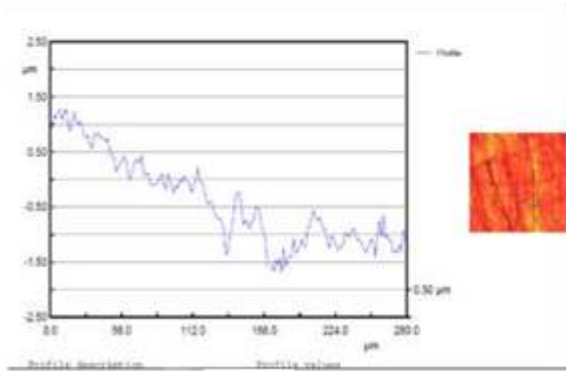
نمونه سوم یک قطعه پلاستیکی بود. ناخالصی روی سطح با جوهر ایجاد شد. سپس از سطح نمونه، تصویر توسط میکروسکوپ دیجیتال ثبت شد (شکل ۴-۱a). سپس دستگاه روشن شد و پلاسما در ناحیه خاصی از سطح آلوده اعمال شد. پس از این کار مجدداً تصویر از قسمت مورد نظر سطح آلوده تهیه شد (شکل ۴-۱b). تغییرات ایجاد شده در ضخامت ناخالصی با استفاده از پلاسما با یک دستگاه نانوفوکوس ثبت شد (شکل ۴-۱c). نمودار نشان داده شده در شکل ۴-۱c، حداکثر ناخالصی را در سطح نمونه ۱,۲۵۵ میکرومتر نشان می دهد. پس از استفاده از پلاسما به مدت یک دقیقه در فرکانس ۱۶ کیلوهرتز، مقداری از ناخالصی ها توسط پلاسما حذف می شود. پس از سپری شدن زمان، ناخالصی به ۱,۷۱۵ میکرومتر می رسد، این حداقل مقدار آن است. مشاهده می شود که تغییرات ناخالصی ۲,۹۷ میکرومتر است.



(a)



(b)



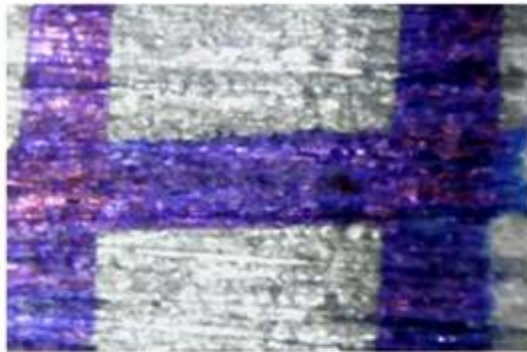
(c)

شکل ۴- تاثیر پلاسما بر روی پلاستیک (a) تصویر سطح پلاستیک قبل از اعمال پلاسما، (b) تصویر سطح شیشه بعد از اعمال پلاسما، (c) نمودار تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح پلاستیک بعد از اعمال پلاسما.

## ۴-۲- سرب

مطالعه موردی چهارم یک قطعه سرب بود. ابتدا ناخالصی روی سطح نمونه ایجاد شد. سپس تصویری از سطح سرب با میکروسکوپ دیجیتال گرفته شد (شکل ۵-۱a). پس از آن، پلاسما به ناخالصی‌هایی که روی سطح سرب تشکیل شده بود اعمال شد. پس از استفاده از پلاسما، تصویر نمونه مجدداً با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال ثبت شد (شکل ۵-۱b). سپس نموداری با دستگاه نانوفوکوس برای نشان دادن تغییرات ضخامت ناخالصی روی سطح سرب به دست آمد (شکل ۵-۱c). همچنین تصویری سه بعدی از تغییرات ضخامت سطح نمونه با یک دستگاه نانوفوکوس ثبت شد (شکل ۵-۱d). همانطور که در شکل ۵-۱c نشان داده شده است، ناخالصی در سطح سرب در ابتدا ۱۰,۵۷۴ میکرومتر است. با شروع عملیات پلاسما، در محیط اتاق به مدت یک دقیقه و به فاصله ۵ میلی‌متر، سطح از ناخالصی‌های نازل بر روی سطح کاهش می‌یابد تا به حداقل مقدار ۶,۵۴۸ میکرومتر برسد. با مجموع مقادیر حداکثر و حداقل ناخالصی سطح، نتیجه می‌گیریم که ناخالصی به اندازه ۱۷,۱۲۲ میکرومتر کاهش می‌یابد.

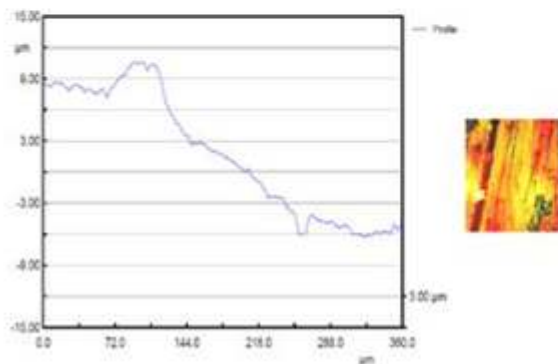




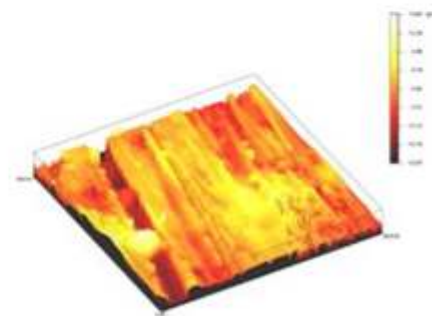
(a)



(b)



(c)

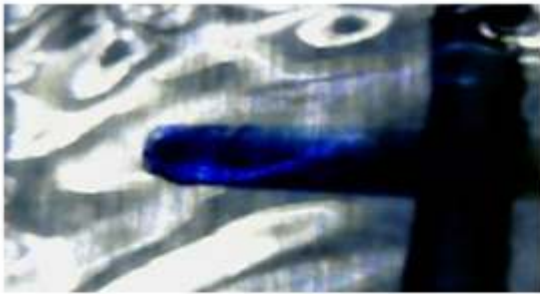


(d)

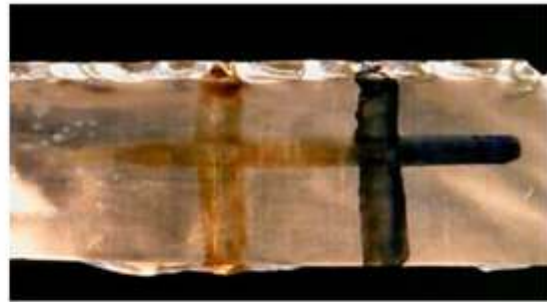
شکل ۵- تاثیر پلاسما بر روی سرب (a) تصویر سطح سرب قبل از اعمال پلاسما، (b) تصویر سطح سرب بعد از اعمال پلاسما، (c) نمودار تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح سرب بعد از اعمال پلاسما، (d) تصویر سه بعدی از تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح سرب بعد از اعمال پلاسما.

## ۵-۲- آلومینیوم

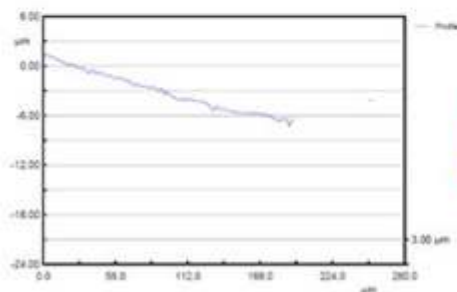
نمونه پنجم یک قطعه آلومینیومی بود. ناخالصی روی سطح با جوهر ایجاد شد. سپس از سطح نمونه، تصویر توسط میکروسکوپ دیجیتال ثبت شد (شکل ۶-۱a). سپس دستگاه روشن شد و پلاسما در ناحیه خاصی از سطح آلوده اعمال شد. پس از این کار مجدداً تصویر از قسمت مورد نظر سطح آلوده تهیه شد (شکل ۶-۱b). تغییرات ایجاد شده در ضخامت ناخالصی با استفاده از پلاسما با دستگاه نانوفوکوس ثبت شد (شکل ۶-۱c). همچنین تصویر سه بعدی تغییر ضخامت سطح آلومینیوم با دستگاه نانوفوکوس ثبت شد (شکل ۶-۱d). نمودار نشان داده شده در شکل ۶-۱c حداکثر ناخالصی را در سطح آلومینیوم ۱,۴۱۸ میکرومتر نشان می دهد. پس از استفاده از پلاسما به مدت یک دقیقه در فرکانس ۱۶ کیلوهرتز، مقداری از ناخالصی ها توسط پلاسما حذف می شود. پس از گذشت زمان، ناخالصی به ۱۴,۶۸۹- میکرومتر می رسد، این حداقل مقدار آن است. مشاهده می شود که تغییرات ناخالصی ۱۶.۱۰۷ میکرومتر است.



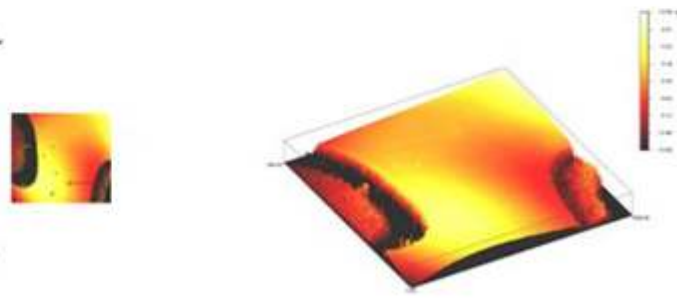
(a)



(b)



(c)

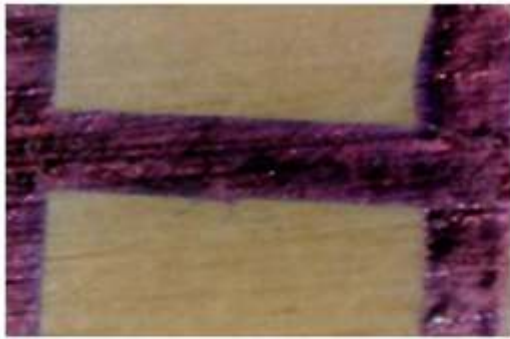


(d)

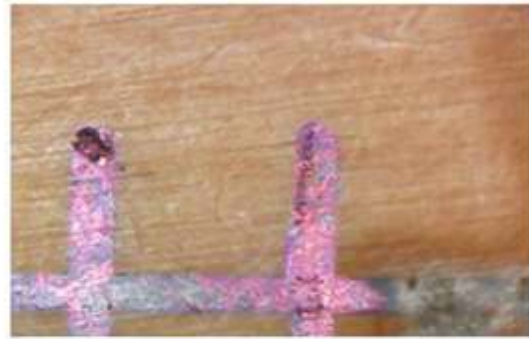
شکل ۶- تاثیر پلاسما بر روی آلومینیوم (a) تصویر سطح آلومینیوم قبل از اعمال پلاسما، (b) تصویر سطح آلومینیوم بعد از اعمال پلاسما، (c) نمودار تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح آلومینیوم بعد از اعمال پلاسما، (d) تصویر سه بعدی از تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح آلومینیوم بعد از اعمال پلاسما.

## ۶-۲- الیاف

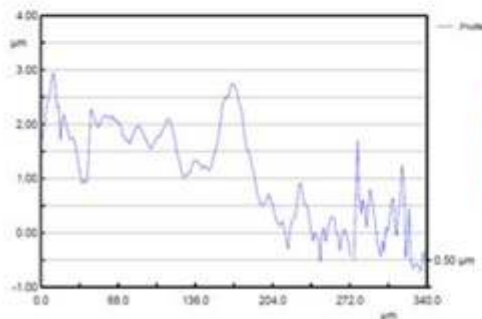
نمونه ششم یک تکه الیاف بود. قبل از انجام پلاسما، تصویر فیبر با میکروسکوپ دیجیتال ثبت شد (شکل ۷-۸). نمونه در محل قرار داده شد و ثابت شد و سپس قسمت آلوده سطح به مدت ۱ دقیقه در معرض پلاسما قرار گرفت. پس از اعمال پلاسما، مجدداً تصویری از فیبر توسط میکروسکوپ دیجیتال گرفته شد (شکل ۷-۹). همچنین تغییرات ضخامت لایه آلوده روی سطح پس از اعمال پلاسما توسط دستگاه نانوفوکوس ثبت شد. نمودار تغییر ضخامت آلودگی در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است، حداکثر مقدار ناخالصی ایجاد شده روی سطح فیبر ۲,۹۴۳ میکرومتر است. با اعمال پلاسما بر روی الیاف با شدت فرکانس ۱۶ کیلوهرتز در فاصله زمانی یک دقیقه و در فاصله ۵ میلی متری از نازل ژنراتور پلاسما، مقدار ناخالصی به ۰,۷۸۴ میکرومتر رسیده است. با مجموع حداکثر و حداقل ناخالصی ها، مشاهده می شود که ناخالصی ها به مقدار ۳,۷۲۷ میکرومتر از سطح حذف شده اند.



(a)



(b)



(c)

شکل ۷- تاثیر پلاسما بر روی الیاف (a) تصویر سطح الیاف قبل از اعمال پلاسما، (b) تصویر سطح الیاف بعد از اعمال پلاسما، (c) نمودار تغییرات ضخامت ناخالصی در سطح الیاف بعد از اعمال پلاسما.

### ۳- نتیجه گیری

روش پلاسمای فشار اتمسفر در ایجاد زمینه برای تمیز کردن سطوح آلوده تکنیکی موفق بوده است. این سیستم با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود مانند خواص غیر حرارتی و غیرتعادلی، عملکرد فوق‌العاده‌ای نسبت به عملکرد سیستم‌های سنتی از خود نشان داده است. سیستم پلاسمای فشار اتمسفر کارآمدتر، مقرون به صرفه تر و راحت تر از سیستم‌های پلاسمای فشار بالا و فشار پایین است. در این تحقیق، کاربرد پلاسمای سرد فشار اتمسفر در زمینه تمیز کردن سطوح آلوده بررسی شده است. در این مطالعه شش قطعه مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه ابداعی ما می‌تواند یک پلاسمای سرد پایدار، در دمای اتاق و فشار اتمسفر با استفاده از هوا (بدون نیاز به پمپ خلاء) تولید کند. اندازه ستون پلاسما با تغییر فشار هوا متفاوت است و دما بین ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتیگراد متغیر است. پلاسمای هوا روی این ۶ قطعه اعمال شد و تمیز کردن سطح در ناحیه مورد نظر از سطح انجام شد. با توجه به نتایج مشاهده‌شده در آزمایش‌ها، نتیجه می‌گیریم که پلاسمای هوا بر روی تمام سطوح آزمایش شده مؤثر بوده است، اما در سطح قطعه آلومینیومی بهترین عملکرد را دارد. زیرا طبق نمودار شکل ۶c، آلودگی در قسمت مورد نظر کاملاً از بین می‌رود. همچنین بر اساس نمودار شکل ۶c، پلاسما بیشترین پاکسازی را روی قطعه سربی انجام داده است و مشاهده می‌شود که به طور مؤثر بر روی این قطعه حذف می‌شود. همچنین، آلودگی گرافیت به طور مؤثر توسط پلاسما حذف می‌شود. اما روی قطعات پلاستیکی و الیافی تاثیر کمتری دارد. کمترین اثر در بین این شش قطعه روی یک تکه شیشه ایجاد شد.

## مراجع

- [1] Buyle, G. (2009). Nanoscale finishing of textiles via plasma treatment. *Materials Technology*, 24(1), 46-51.
- [2] Liao, X., Liu, D., Xiang, Q., Ahn, J., Chen, S., Ye, X., & Ding, T. (2017). Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: a review. *Food Control*, 75, 83-91.
- [3] Walk, R. M., Snyder, J. A., Srinivasan, P., Kirsch, J., Diaz, S. O., Blanco, F. C., ... & Sandler, A. D. (2013). Cold atmospheric plasma for the ablative treatment of neuroblastoma. *Journal of pediatric surgery*, 48(1), 67-73.
- [4] Fridman, A. (2008). *Plasma chemistry*. Cambridge university press.
- [5] Cheng, C., Liye, Z., & Zhan, R. J. (2006). Surface modification of polymer fibre by the new atmospheric pressure cold plasma jet. *Surface and Coatings Technology*, 200(24), 6659-6665.
- [6] Park, G. Y., Park, S. J., Choi, M. Y., Koo, I. G., Byun, J. H., Hong, J. W., ... & Lee, J. K. (2012). Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications. *Plasma Sources Science and Technology*, 21(4), 043001.
- [7] Stoffels, E., Flikweert, A. J., Stoffels, W. W., & Kroesen, G. M. W. (2002). Plasma needle: a non-destructive atmospheric plasma source for fine surface treatment of (bio) materials. *Plasma Sources Science and Technology*, 11(4), 383.
- [8] Kostov, K. G., Nishime, T. M. C., Castro, A. H. R., Toth, A., & Hein, L. R. D. O. (2014). Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. *Applied Surface Science*, 314, 367-375.
- [9] Fridman, A., Chirokov, A., & Gutsol, A. (2005). Non-thermal atmospheric pressure discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(2), R1.
- [10] Pankaj, S. K., & Keener, K. M. (2017). Cold plasma: Background, applications and current trends. *Current Opinion in Food Science*, 16, 49-52.
- [11] Kalghatgi, S., Kelly, C. M., Cerchar, E., Torabi, B., Alekseev, O., Fridman, A., ... & Azizkhan-Clifford, J. (2011). Effects of non-thermal plasma on mammalian cells. *PLoS one*, 6(1), e16270.
- [12] Kilmer, S., Semchyshyn, N., Shah, G., & Fitzpatrick, R. (2007). A pilot study on the use of a plasma skin regeneration device (Portrait® PSR 3) in full facial rejuvenation procedures. *Lasers in medical science*, 22(2), 101-109.
- [13] Heinlin, J., Morfill, G., Landthaler, M., Stolz, W., Isbary, G., Zimmermann, J. L., ... & Karrer, S. (2010). Plasma medicine: possible applications in dermatology. *JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft*, 8(12), 968-976.
- [14] Van Durme, J., Dewulf, J., Leys, C., & Van Langenhove, H. (2008). Combining non-thermal plasma with heterogeneous catalysis in waste gas treatment: A review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 78(3-4), 324-333.
- [15] Zhu, G. Q., Boeuf, J. P., & Chaudhury, B. (2011). Ionization-diffusion plasma front propagation in a microwave field. *Plasma Sources Science and Technology*, 20(3), 035007.
- [16] Lommatzsch, U., Pasedag, D., Baalman, A., Ellinghorst, G., & Wagner, H. E. (2007). Atmospheric pressure plasma jet treatment of polyethylene surfaces for adhesion improvement. *Plasma Processes and Polymers*, 4(S1), S1041-S1045.
- [17] Chae, J. O. (2003). Non-thermal plasma for diesel exhaust treatment. *Journal of electrostatics*, 57(3-4), 251-262.
- [18] Hsieh, J. H., Fong, L. H., Yi, S., & Metha, G. (1999). Plasma cleaning of copper leadframe with Ar and Ar/H<sub>2</sub> gases. *Surface and Coatings Technology*, 112(1-3), 245-249.
- [19] Fang, Z., Qiu, Y., & Kuffel, E. (2004). Formation of hydrophobic coating on glass surface using atmospheric pressure non-thermal plasma in ambient air. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(16), 2261.
- [20] Bellan, P. M. (2008). *Fundamentals of plasma physics*. Cambridge University Press.
- [21] Wiesemann, K. (2014). A short introduction to plasma physics. *arXiv preprint arXiv:1404.0509*.
- [22] Liston, E. M. (1989). Plasma treatment for improved bonding: a review. *The Journal of Adhesion*, 30(1-4), 199-218.