

Research Paper

Implantation of Helium in Polyethylene and Polystyrene to Improve Wettability of Surfaces¹

Parisa Ahmadi^{* 2}, Masoud Mahjour-shafiei³ and Mohammad Reza Mohammadizadeh⁴

Received: 2021.12.27

Revised: 2022.02.25

Accepted: 2022.04.29

Abstract

Hydrophilicity is one of the essential properties of biocompatible materials to be placed in the body environment. In this research, improvement in hydrophilicity of the surfaces of polyethylene and polystyrene samples with implantation of helium ion was studied. A 10 μA helium ion beam with an energy of 10 keV delivered by the department of physics university of Tehran's electrostatic accelerator was used. The samples were bombarded with a beam at two angles of 45° and 90° relative to the surface of the sample. No remarkable difference was observed in the hydrophilicity of the samples bombarded with the two mentioned above angles. Implantation was performed with various fluences in the range of $(10^{16} - 10^{18}) \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$. A variation of the fluence revealed that the contact angle may be reduced 14 and 16 degrees for polyethylene and polystyrene samples, respectively. The surface roughness of the samples was measured before and after ion implantation with an atomic force microscope (AFM). The reported roughness for each sample is the average of 30 measurements. It was observed that ion implantation has the opposite impact on the surface roughness of polyethylene and polystyrene. On average, the surface roughness of polyethylene samples decreased 32 nm, in contrast to the polystyrene roughness, which increased 33 nm.

Keywords: *Biocompatible Materials, Ion Implantation in Polymer, Contact Angle, Beam Energy, Ion Accumulation Per Unit Area.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2022.38948.1254

² M. Sc. Graduated, Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: pr.ahmadi72@gmail.com

³ Associate Professor, Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mmshafiei@ut.ac.ir

⁴ Professor, Supermaterials Research Lab. (SRL), Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: zadeh@ut.ac.ir



کاشت یون هلیوم در پلی اتیلن و پلی استایرن به منظور بهبود آبدوستی سطوح^۱

پریسا احمدی نیگجه^{۲*}، مسعود مهجور شفیعی^۳ و محمدرضا محمدی زاده^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا

سال دوازدهم، پیاپی ۲۹، تابستان ۱۴۰۱

صص ۷-۲۱

چکیده:

آبدوستی یکی از ویژگی‌های لازم برای مواد زیست‌سازگار است که آن‌ها را برای قرار گرفتن در محیط بدن مناسب می‌سازد. در این پژوهش تاثیر کاشت یون هلیوم (He^+) در میزان بهبود آبدوستی سطح پلیمرهای پلی اتیلن و پلی استایرن مطالعه شد. باریکه‌ی هلیوم یک بار مثبت با جریانی حدود $10\mu A$ و انرژی $10 keV$ که توسط شتابدهنده‌ی دانشکده فیزیک دانشگاه تهران تولید شد، مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها تحت دوز اولیه 45° و 90° نسبت به سطح نمونه توسط باریکه بمباران شدند. نتایج تجربی نشان داد که تغییر زاویه تاثیر چشمگیری بر روی ویژگی‌های آبدوستی ندارد. کاشت یون با انباشت متغیر بین (10^{16})

یون
سانتی متر مربع (10^{18}) روشن ساخت که می‌توان در این بازه‌ی انباشت زاویه‌ی آبدوستی پلی اتیلن را تا 14° درجه و پلی استایرن را تا 16° درجه کاهش داد. تاثیر کاشت یون بر زبری سطح نیز مطالعه شد. زبری گزارش شده برای هر نمونه متوسط تقریباً 30 اندازه‌گیری است. مشخص گردید که نمونه‌های پلی اتیلن و پلی استایرن از این جهت رفتاری متضاد دارند. به طور متوسط در نمونه‌های پلی اتیلن، $32 nm$ کاهش زبری، و در نمونه‌های پلی استایرن با $33 nm$ افزایش زبری مشاهده شد.

واژگان کلیدی: مواد زیست‌سازگار، کاشت یون در پلیمر، زاویه‌ی آبدوستی، انرژی باریکه، انباشت یون در واحد سطح.

¹ DOI: 10.22051/ijap.2022.38948.1254

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: pr.ahmadi72@gmail.com

^۳ دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Email: mmshafiei@ut.ac.ir

^۴ استاد، آزمایشگاه پژوهشی ابرمواد، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Email: zadeh@ut.ac.ir



۱. مقدمه

مواد زیستی به موادی گفته می‌شود که به طور کامل یا جزئی در تماس با اندام‌ها و بافت‌های بدن باشند. این مواد به دلیل تماس با بافت بدن لازم است ویژگی‌های معینی داشته باشند تا با بدن سازگار بوده و بتوان آن‌ها را در بدن کاشت. از مهم‌ترین ویژگی‌ها می‌توان به آبدوستی، عدم بروز واکنش‌های آسیب‌زننده با اندام‌ها، چسبندگی سلولی، مقاوم در برابر سایش، انعطاف‌پذیری بالا، عدم واکنش با مواد شیمیایی و خون‌سازگاری اشاره کرد [۱].

مواد مورد استفاده در کاربردهای پزشکی کمابیش به چهار گروه تقسیم می‌شوند: مواد بیولوژیکی (یاخته‌های انسانی یا جانوری)، سرامیک‌ها، فلزات و پلیمرها و الیاف. هر کدام از این گروه‌ها مزایا و معایب ویژه خود را دارند و متناسب با نیاز و کاربرد در جراحی‌ها و کاشت در بدن انسان مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

از میان مواد مختلفی که در مصارف زیستی و بهداشتی کاربرد دارند، مواد پلیمری دارای جایگاه ویژه‌ای هستند. حدود ۹۰٪ مواد زیستی پایه‌ی پلیمری دارند. سرعت ساخت بالا، قابلیت بازتولید، مقاومت خوب در برابر مواد شیمیایی، هزینه‌ی کم در مقایسه با آلیاژها، فلزات و سرامیک‌ها از جمله ویژگی‌هایی هستند که سبب محبوبیت پلیمرها در میان پزشکان شده و آن‌ها را به یکی از پرکاربردترین مواد در صنعت تجهیزات پزشکی تبدیل کرده است [۳، ۴].

از پلیمرها به طور گسترده در صنعت زیست پزشکی استفاده می‌شود. اگرچه به ندرت پیش می‌آید که سطح آن‌ها اصلاح نشده و به صورت اولیه در محیط بدن به کار رود. در اصلاح سطح پلیمرها، سعی بر ایجاد بستری مناسب جهت کاشت در بدن و مصرف پزشکی است. برای دستیابی به ویژگی‌های مناسب، انتخاب روش مناسب از میان روش‌های اصلاح سطح ضروری است. چهار روش برای اصلاح سطح پلیمرها وجود دارد. این چهار روش عبارتند از: اصلاح با پرتولیزر، کاشت یون، اصلاح با پلاسما و پیوند نانو ذرات [۵]. روش مورد استفاده در این پژوهش روش کاشت یون است.

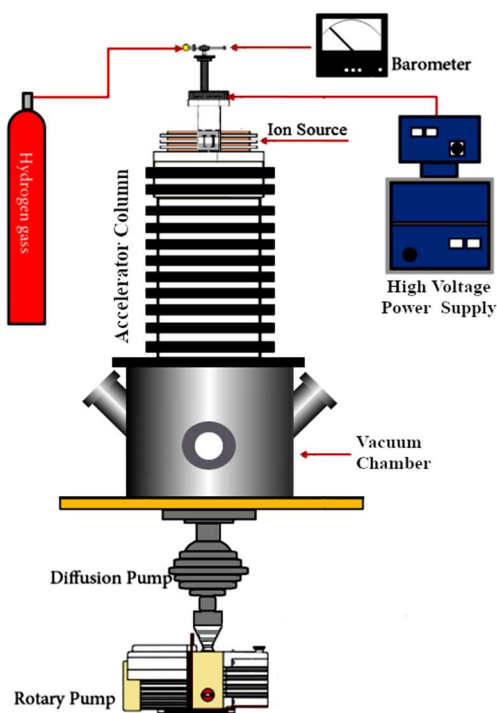
فناوری کاشت یون بر روی مواد پلیمری، از نظر هزینه مقرون به صرفه و در کیفیت اصلاح سطح برای مصارف پزشکی کارآمدتر از دیگر روش‌ها است. همین امر سبب ایجاد انگیزه برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به سطوح پلیمری و اصلاح سطح آن با استفاده از پرتوهای یونی شده است [۶]. اصلاح سطح مواد از طریق کاشت یون سبب تغییرات چشم‌گیری در ساختار سطح ماده‌ی هدف می‌شود. تغییرات به متغیرهای بسیاری همچون دما، جنس ماده‌ی هدف، نوع یون‌های کاشته شده، انرژی جنبشی آن‌ها و چگالی شار یون‌ها بستگی دارد [۷، ۸].



کاشت پرتوهای یونی نیازمند چشمه و شتاب دهنده پرتو یونی است. چشمه های یونی شاری از یون ها در فشار کم ایجاد می کنند. سپس این یون ها به کمک شتاب دهنده به انرژی های جنبشی بالا دست پیدا می کنند. در آزمایش های انجام شده در این پژوهش از ستون شتاب دهنده ی الکترواستاتیکی برای شتاب دادن به یون ها استفاده و کاشت یون در پلیمرها در انرژی های پایین و در مقیاس keV انجام شده است. در اصلاح سطح پلیمرها باید به این نکته توجه داشت که تابش مواد با باریکه های یونی با انرژی بالا می تواند منجر به تخریب سطح پلیمر شود و همچنین از نظر هزینه کاشت یون در انرژی های پایین نسبت به انرژی های بالا بسیار مقرون به صرفه تر است و نیز در حال حاضر دستگاه هایی که در مراکز تحقیقاتی و دانشگاه ها مورد استفاده قرار می گیرند، پژوهشگران روی کاشت پرتوهای یون با انرژی پایین تمرکز می کنند [6]. در نهایت، انرژی های بالا انتخاب مناسبی برای اصلاح سطح پلیمرها نمی تواند باشد.

۲. روش انجام آزمایش - چیدمان

کاشت یون های گازی مثبت بر روی پلیمرها با استفاده از دستگاه شتاب دهنده ی الکترواستاتیکی آزمایشگاه باریکه های یونی دانشکده فیزیک دانشگاه تهران انجام شد. این آزمایشگاه بر روی دو هدف تولید و کاربرد باریکه های یونی کم انرژی (کمتر از ۱۰۰ کیلو الکترون ولت) متمرکز است. در شکل ۱ ترسیم ساده ای از دستگاه شتاب دهنده ی الکترواستاتیکی را مشاهده می کنید. در این تصویر، قسمتی که با نام "ion source" مشخص شده است، اولین بخش از سیستم تولید باریکه ی یونی است. این چشمه بر اساس تخلیه ی الکتریکی در گازها و در فشار پایین کار می کند. در حین انجام آزمایش ها فشار چشمه در حدود 10^{-2} mbar و فشار محفظه 10^{-5} mbar است.



شکل ۱ طرحواره‌ای از شتاب‌دهنده الکترواستاتیکی ۱۰۰keV دانشکده‌ی فیزیک دانشگاه تهران [۹].

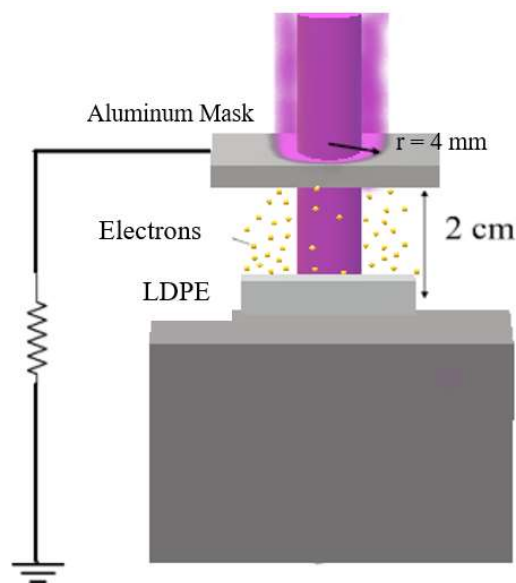
چشمه یونی مورد استفاده از نوع پنینگ با کاتد سرد است که با به دام انداختن الکترون‌ها در یک میدان مغناطیسی محوری و چاه پتانسیل الکترواستاتیکی شرایط تخلیه الکتریکی خودماندگار در فشار پایین را فراهم می‌کند [۱۰]. به دلیل تخلیه الکتریکی ستونی از پلاسما درون چشمه شکل می‌گیرد. سپس باریکه‌ای از یون‌ها توسط مجموعه‌ای از لنزها که در ابتدای ستون شتاب‌دهنده طراحی و نصب شده‌اند، از درون پلاسما بیرون کشیده می‌شوند [۱۱، ۱۲]. بعد از ورود یون‌ها به درون ستون شتاب‌دهنده، توسط این لنزها هم‌راستا می‌شوند و تحت تاثیر میدان‌های الکترواستاتیکی سرعت آن‌ها افزایش می‌یابد. حال باریکه‌ای از یون‌های هم‌انرژی و هم‌راستا بدست آمده و به ماده هدف برخورد می‌کند.

باریکه قبل از برخورد به نمونه که از جنس پلی‌اتیلن با دانسیته^۱ پایین^۱ از درون روزنه‌ای به شعاع ۴ میلی‌متر که در یک ماسک آلومینیومی قرار داده شده است عبور می‌کند، شکل ۲. این ماسک در

^۱ Low density polyethylene



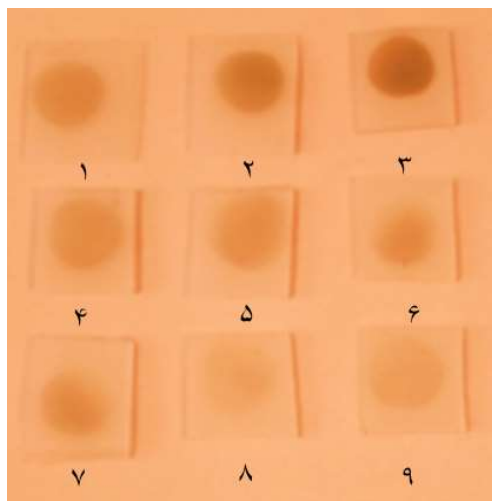
فاصله ۲ سانتی متری از نمونه قرار دارد و از راه یک مقاومت کوچک به پتانسیل زمین متصل می شود. به دو دلیل (۱) تعیین دقیق لبه های باریکه با حذف هاله ی باریکه و (۲) خنثی سازی سطح نمونه از این ماسک استفاده شده است. با فرود باریکه ی یون های کم انرژی بر روی سطح مواد نارسانا با تجمع بارها بر روی سطح نمونه روبه رو می شویم. تجمع بارها به دلیل انتشار الکترون های ثانویه و همچنین کاشت یون های مثبت در سطح نمونه اتفاق می افتد. تجمع بیش از اندازه ی بار مثبت در نمونه سبب ایجاد یک میدان الکتریکی قوی می شود. این میدان پرتو ورودی را منحرف نموده و فرآیند کاشت یون را مختل می کند [۱۳]. افزون بر این میدان الکتریکی قوی می تواند ساختار ماده را تحت تاثیر قرار دهد و حتی منجر به تخریب ساختار بلوری آن شود. در حقیقت، با عبور باریکه یونی از درون حفره، قسمتی از باریکه با لبه های حفره برخورد می کند. این برخورد منجر به گسیل الکترون های ثانویه از لبه ی حفره و حرکت آن ها به سمت نمونه می شود، شکل ۲. استفاده از این گونه ماسک برای خنثی سازی سطح عایق ها به همراه توضیحات مفصل در رابطه با سازو کار خنثی سازی در مرجع [۱۳] در دسترس قرار دارد.



شکل ۲ طرحواره ای از ماسک آلومینیومی در پتانسیل زمین و حفره درون آن.

باریکه یونی به رنگ بنفش و الکترون های ثانویه به شکل دایره های کوچک زرد رنگ نشان داده شده اند.

در شکل ۳، اثر کاشت یون هلیوم در نمونه‌های پلی اتیلن قابل مشاهده است. مساحت لکه‌ی روی نمونه‌ها هم اندازه مساحت حفره‌ی روی ماسک است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، رنگ لکه‌ها بر روی هر نمونه با نمونه‌ی دیگر متفاوت است. دلیل تفاوت در رنگ نمونه‌ها به تفاوت در انباشت^۱ یون و انرژی باریکه بر می‌گردد. با تغییر انباشت یون، تعداد یون بر سانتی‌متر مربع و با تغییر انرژی میزان عمق نفوذ یون در نمونه تغییر می‌کند. میزان انرژی توسط شتاب‌دهنده هدایت‌شدنی است. با تغییر زمان بمباران نیز انباشت یون تغییر می‌کند. در شکل ۳، نمونه‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ با انرژی ۱۰ keV و نمونه‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ با انرژی ۶.۲ keV بمباران شده‌اند. انباشت یون در نمونه‌های ۲ و ۳ برابر $\frac{۱۰^{۱۶}}{۳}$ یون بر سانتی‌متر مربع، در نمونه‌های ۱ و ۴ برابر $\frac{۱۰^{۱۵}}{۵}$ یون بر سانتی‌متر مربع، در نمونه‌های ۵ و ۶ برابر $\frac{۱۰^{۱۵}}{۵}$ یون بر سانتی‌متر مربع، در نمونه‌های ۷ و ۸ برابر $\frac{۱۰^{۱۴}}{۵}$ یون بر سانتی‌متر مربع و در نمونه‌ی ۹ برابر $\frac{۱۰^{۱۴}}{۹}$ یون بر سانتی‌متر مربع است.



شکل ۳ اثر کاشت یون هلیوم با انرژی ۱۰ keV و ۶.۲ keV با انباشت‌های متفاوت در نمونه‌های پلی اتیلن با چگالی‌های پایین.

^۱ Fluence



پلیمرهای پلی اتیلن و پلی استایرن، در کارگاه الاستومر دانشکده پلیمر دانشگاه امیرکبیر و به صورت پودر تهیه شدند. در کارگاه الاستومر این پودر تحت حرارت کافی قرار گرفت و با اعمال فشار در قالب‌های ویژه به صورت ورقه‌هایی با ضخامت ۳ میلی‌متر و میزان زبری کم و بیش یکسان در تمام سطح ورقه تولید شدند. نمونه‌ها به وسیله‌ی کاتر در ابعاد $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ برش داده شدند. طول و عرض نمونه‌ها به منظور صاف و یک‌دست شدن با ورقه‌های کاغذی سمباده صیقل داده می‌شوند. به منظور پاک شدن سطح نمونه‌ها از چربی و ذرات گرد و غبار نمونه‌ها را با پنس برداشته و در محلول‌های آب اکسیژنه، آب مقطر و الکل صنعتی شست و شو داده می‌شوند. برای انجام این کار لازم است از هر محلول به مقدار کافی در بشرهای جداگانه ریخته و نمونه‌ها داخل هر محلول به مدت ۱۵ دقیقه شست و شو داده شود و سپس با استفاده از پنس روی سطح تمیزی قرار داده شده تا خشک شوند. این مراحل در حین شست و شو با محلول‌های بعدی نیز تکرار می‌شوند. توجه شود که پلیمر پلی استایرن با محلول آب اکسیژنه واکنش نشان می‌دهد و سطح نمونه آسیب می‌بیند. برای پاک شدن سطح این نمونه، الکل و آب مقطر کافی است. بعد از شست و شوی نمونه‌ها با هر محلول، با پنس آن را در ظرف پلاستیکی تمیز و زیپ‌دار که مانع از ورود هوا و گردوغبار و هرگونه آلودگی به داخل شود، قرار می‌دهیم. بعد از نصب ماسک در سیستم خلاء و آماده‌سازی چشمه، هر کدام از نمونه‌ها بر روی نگهدارنده‌ای که قابلیت در بر گرفتن ۹ نمونه را همزمان دارد و از بیرون چمبره قابل چرخاندن است قرار داده می‌شود. در شکل ۴، سه نمونه را بر روی یک وجه این نگهدارنده مشاهده می‌کنید که بعد از کاشت یون از آن‌ها عکس گرفته شده است. آزمون آبدوستی بلافاصله بعد از کاشت یون انجام می‌گیرد.



شکل ۴ نمونه‌های پلی اتیلن بر روی یک وجه نگهدارنده‌ی متحرک بعد از کاشت یون.

۳. تحلیل نتایج

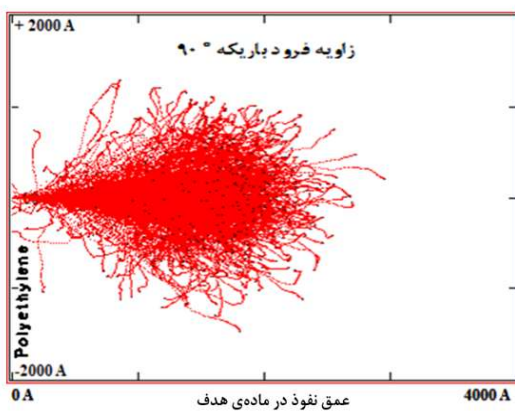
برای شبیه‌سازی و دسترسی به اطلاعاتی از جمله میزان عمق نفوذ و مسیر حرکت یون در نمونه، چگونگی توزیع آن در عمق‌های متفاوت و میزان یونیزاسیون اتم‌ها از برنامه‌ی شبیه‌سازی SRIM_TRIM^{۲۰۰۸} استفاده شد. برای شبیه‌سازی کاشت یون، لازم است اطلاعات مربوط به نوع یون کاشته شده، میزان انرژی و تعداد یون، زاویه‌ی فرود باریکه، و همچنین نوع ماده‌ی هدف را در برنامه مشخص کرد. برای همه‌ی نمونه‌های پلی‌اتیلن و پلی‌استایرن که در آزمایشگاه ساخته شده بودند، شبیه‌سازی انجام شد. این شبیه‌سازی‌ها تحت انرژی‌ها و زوایای فرود متفاوت صورت گرفت تا تصویری قابل درک از فرآیند کاشت داشته باشیم. همچنین به کمک شبیه‌سازی‌ها عمق نفوذ و تاثیر زاویه فرود قبل از آزمایش تخمین زده شد. در شکل ۵، نمونه‌ای از این شبیه‌سازی‌های انجام شده آمده است. در این شکل نفوذ ۱۰۰۰ یون هلیوم با انرژی فرودی ۱۰ keV و زاویه‌های فرود ۹۰ نسبت به سطح نمونه‌ی پلی‌اتیلن نشان داده شده است. شکل ۵ (آ)، مسیر حرکت ذرات را درون نمونه نشان می‌دهد. روشن است که یون‌های هلیوم تا عمق ۲۲۰nm نفوذ کرده‌اند و در عمق حدود ۱۷۰nm بیشترین پهن‌شدگی را مشاهده می‌کنیم. لازم به یادآوری است که هر چه یون سنگین‌تر باشد، عمق نفوذ کاهش می‌یابد. شکل ۵ (ب)، نشان‌دهنده‌ی فراوانی یون‌های متوقف شده در ماده برحسب عمق نفوذ است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، بیشترین میزان توقف یون‌ها در عمق حدود ۱۷۰nm بوده است. شکل ۵ (آ) نیز بیش‌ترین گسترده‌گی عرضی را در همین عمق نشان می‌دهد.

در آزمایش اول، یون هلیوم (He^+) در پلی‌اتیلن و پلی‌استایرن با انرژی ۱۰ keV و با زاویه فرود متغیر کاشته شد. در این آزمایش با کاشت He^+ در دو ماده‌ی هدف متفاوت و تغییر در زاویه فرود باریکه، به بررسی تأثیر این دو متغیر پرداخته شد. به دلیل بالا بودن دمای ذوب پلیمر پلی‌استایرن نسبت به پلی‌اتیلن سطح این پلیمر از لحاظ ظاهری بیشتر کمتر متأثر می‌شود. برای این که بتوانیم مدت زمان کاشت یون را به منظور افزایش انباشت یون بالا ببریم، این پلیمر برای کاشت یون انتخاب شد تا نگرانی از آسیب دیدن سطح نمونه و پایین بودن دمای ذوب آن نداشته باشیم. متغیرهایی هم چون جریان باریکه و مدت زمان کاشت یون در این آزمایش ثابت در نظر گرفته شد. با ثابت ماندن این دو متغیر، انباشت یون در واحد سطح نمونه که تابع این دو متغیر است، ثابت ماند. بعد از اتمام فرآیند کاشت یون بلافاصله از نمونه‌ها آزمون آبدوستی گرفته شد. بر اساس این داده‌ها مشخص شد که کاشت یون در پلی‌استایرن نسبت به پلی‌اتیلن، نتایج بهتری ارائه می‌دهد. برای مطالعه تاثیر زاویه فرود باریکه نمونه‌ها تحت دو زاویه ۹۰° و ۴۵° بمباران شدند. نتایج تجربی نشان داد

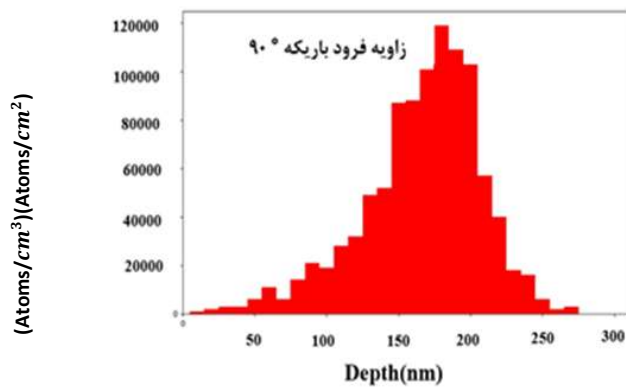


زاویه فرود باریکه برای نمونه‌ی پلی اتیلن تأثیری قابل مشاهده‌ای در آبدوستی نمونه‌ها ندارد. برای نمونه‌های پلی استایرن بمباران تحت زاویه 45° در مقایسه با زاویه 90° تنها دو درجه زاویه تماس را بیشتر کاهش داد.

(ت)

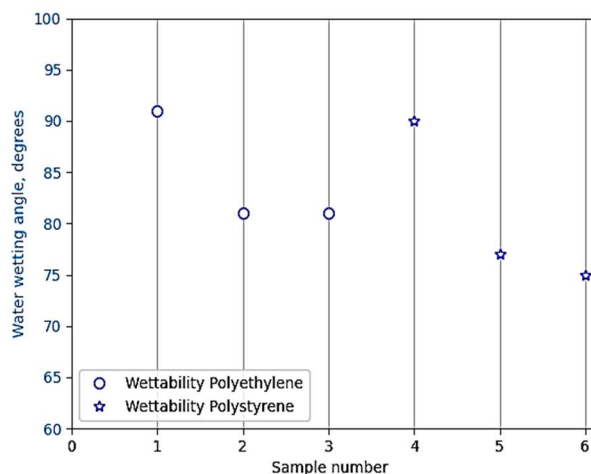


(ب)



شکل ۵ نفوذ هلیوم یک بار مثبت با انرژی ۱۰ keV درون نمونه‌ی پلی اتیلن؛ (آ) مسیر حرکت یون در نمونه، (ب) توزیع یون هلیوم برحسب عمق.

در شکل ۶، نمودار زاویه آبدوستی نمونه‌های پلی اتیلن و پلی استایرن قبل و بعد از کاشت یون و با جداسازی زاویه‌ی فرود باریکه رسم شده است. در این نمودار در محور افقی، شماره‌ی نمونه بیان شده است که به ترتیب؛ شماره ۱) نمونه‌ی شاهد پلی اتیلن (شماره‌ی ۲) پلی اتیلن با زاویه فرود 90° ، شماره‌ی ۳) پلی اتیلن با زاویه فرود 45° ، شماره‌ی ۴) نمونه‌ی شاهد پلی استایرن، شماره‌ی ۵) پلی استایرن با زاویه فرود 90° ، شماره‌ی ۶) پلی اتیلن با زاویه فرود 45° است. برای هر دو نمونه‌ی پلیمر، شاهد روند کاهشی در اندازه‌ی زاویه تماس هستیم. به طور متوسط در نمونه‌های پلی استایرن به ۱۴ درجه و در نمونه‌های پلی اتیلن ۱۰ درجه کاهش زاویه‌ی آبدوستی مشاهده می‌شود. در نمونه‌ی پلی استایرن کاهش بیشتری نسبت به پلی اتیلن مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده‌ی تاثیرپذیری بیشتر آن در اثر کاشت یون نسبت به پلی اتیلن است و می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌ی مناسب‌تری نسبت به پلی اتیلن است.



شکل ۶ نمودار زاویه‌ی آب دوستی نمونه‌های پلی اتیلن و پلی استایرن قبل و بعد از کاشت یون با زاویه‌های فرود متفاوت. دایره‌های (ستاره‌های) توخالی نماینده نمونه‌های پلی اتیلن (پلی استایرن) هستند. شماره‌های ۱ و ۴ نمونه‌های شاهد، شماره‌های ۲ و ۵ بمباران شده تحت زاویه 45° و شماره‌های ۳ و ۶ بمباران شده تحت زاویه فرود 90° هستند.

در آزمایش دوم، پرتو یون هلیوم با انرژی 10 keV و جریان باریکه $15 \mu\text{A}$ در نمونه‌های پلی اتیلن و پلی استایرن کاشته شد. زاویه‌ی فرود باریکه نیز همانند انرژی و جریان باریکه ثابت بود. در تمام مراحل آزمایش، زاویه‌ی فرود باریکه 45° اعمال شد. به منظور تغییر انباشت یون در واحد سطح، مدت زمان کاشت یون در هر نمونه متفاوت در نظر گرفته شد. همچنین جهت تعیین ساختار و

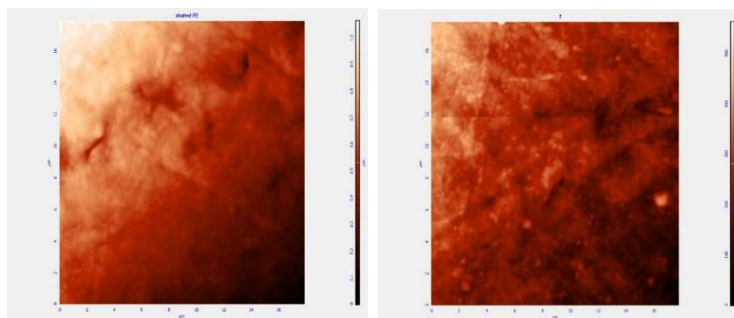


ناهمواری سطح پلیمرها و پیدا کردن رابطه‌ی میان ناهمواری سطوح و میزان آبدوستی و همچنین اثر کاشت یون بر روی ناهمواری سطوح، شش نمونه‌ای که طی آزمایش بمباران شده بودند به همراه دو نمونه‌ی شاهد توسط دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۷ و ۸ تصاویر دو بعدی نمونه‌ی پلی اتیلن و پلی استایرن قبل و بعد از کاشت یون هلیوم در آن‌ها آورده شده است. از میان بررسی‌های این دستگاه، از بررسی Roughness_Analysis که یکی از زیر مجموعه‌های بخش Statics است، جهت به دست آوردن اطلاعات مربوط به زبری سطوح استفاده شد.

در شکل ۹، نمودارهای زاویه تماس و زبری سطح بر حسب انباشت یون در واحد سطح نمونه، هر دو در یک نمودار رسم شده‌اند. در این نمودار داده‌های مربوط به نمونه‌های پلی اتیلن و پلی استایرن با نمادها و رنگ‌های متفاوت از یکدیگر جداسازی شده‌اند. طبق نمودار زاویه‌ی آبدوستی نمونه‌ها بعد از کاشت یون نسبت به نمونه‌های شاهد که با انباشت $0 \frac{ions}{cm^2}$ مشخص شده‌اند، کاهش می‌یابد. همانطور که ملاحظه می‌شود، برای هر دو پلیمر، نمونه‌های بمباران شده آبدوست‌تر از نمونه‌های شاهد هستند که این سازگار با نتیجه گزارش شده در [۱۴] است. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش تدریجی انباشت به صورت مشخص و موثری منجر به افزایش آبدوستی نمی‌شود. در حالی که نتایج گزارش شده در [۱۴] نشان می‌دهد که افزایش تدریجی انباشت به آرامی آبدوستی را کاهش می‌دهد. لازم به یادآوری است که پژوهش گزارش شده در [۱۴] با استفاده از پلاسمای معلق انجام شده است. همچنین در این نمودار میانگین داده‌های مربوط به تغییرات زبری سطح آورده شده است. برای نمونه‌های پلی اتیلن زبری با افزایش انباشت به طور میانگین ۳۲ نانومتر کاهش و آبدوستی به طور متوسط افزایش داشته است.

این نوع رفتار را می‌توان با نظریه‌ی ونزل توجیه نمود. طبق معادله‌ی ونزل در زمینه‌ی آب‌دوستی، اگر مایع بتواند به درون تمام شیارها و حفره‌ها نفوذ کند، اگر زاویه تماس سطح صاف بیش از ۹۰ درجه باشد، با زبر کردن سطح زاویه‌ی تماس افزایش می‌یابد هر چه زبری کاهش پیدا کند، سطح آبدوست‌تر می‌شود [۱۵]. برخلاف پلی اتیلن، زبری سطح پلی استایرن بعد از کاشت یون به طور متوسط ۳۳ نانومتر افزایش یافته است. این نوع رفتار پلی استایرن را می‌توان با بخش دوم نظریه‌ی ونزل توجیه نمود. بر اساس نظریه‌ی ونزل، موادی که زاویه‌ی آبدوستی کمتر از ۹۰ درجه دارند اگر با افزایش زبری روبه رو شوند، آبدوست‌تر خواهند شد [۱۵]. در نمودار زاویه‌ی آبدوستی نمونه‌ی

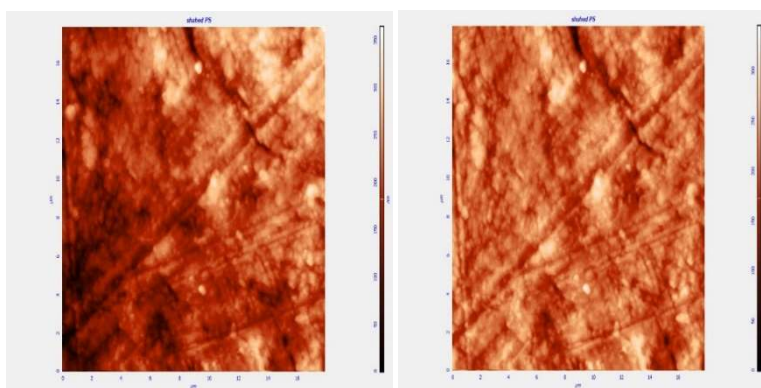
شاهد پلی استایرن، ۹۶ درجه است. با توجه به خطای دستگاه اندازه گیری زاویه‌ی تماس، این زاویه را می‌توان نزدیک به ۹۰ درجه در نظر گرفت و رفتار این ماده را با بخش دوم نظریه توجیه نمود.



(ب)

(آ)

شکل ۷ تصویر دوبعدی AFM از سطح نمونه های پلی اتیلن. (آ) قبل از کاشت یون هلیوم در پلی اتیلن. (ب) بعد از کاشت یون.

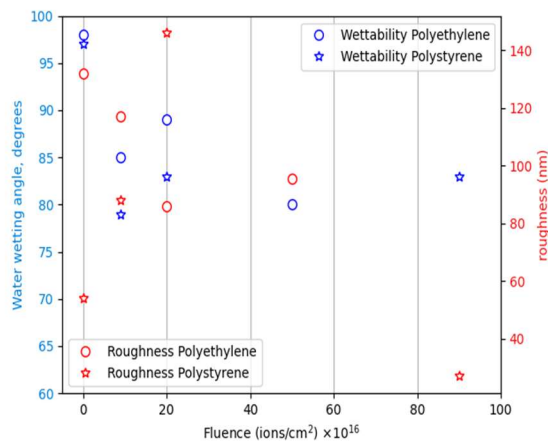


(ب)

(آ)

شکل ۸ تصویر دوبعدی AFM از سطح نمونه های پلی استایرن. (آ) قبل از کاشت یون هلیوم در پلی استایرن. (ب) بعد از کاشت یون.





شکل ۹ نمودار زاویه ی آبدوستی و میانگین زبری سطح بر حسب انباشت یون در واحد سطح. زاویه آب دوستی پلی اتیلن (دایره ی آبی)، زاویه آبدوستی پلی استایرن (ستاره ی آبی)، زبری سطح پلی اتین (دایره ی قرمز)، زبری سطح پلی استایرن (ستاره ی قرمز).

۴. نتیجه گیری

هدف از پژوهش صورت گرفته، تصحیح میزان آبدوستی پلیمرهای پلی اتیلن و پلی استایرن به منظور بهبود ویژگی های زیست سازگاری این پلیمرها با محیط بدن بود. نمونه های پلیمری که در این کار تحت کاشت یون هلیوم قرار گرفتند، بعد از کاشت یون نسبت به نمونه های شاهد با کاهش زاویه ی آبدوستی رو به رو شدند.

در آخرین آزمایش انجام شده در این تحقیق، در نمونه ی پلی اتیلن ۱۴ درجه و در نمونه ی پلی استایرن ۱۶ درجه کاهش زاویه ی آبدوستی شاهد بودیم که در مقایسه با تحقیقات مشابه انجام شده در این زمینه نتیجه ی مطلوبی محسوب می شود [۱۶]. در آنالیز میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) نیز زبری سطوح بعد از کاشت یون کاهش یافت. دلیل این کاهش می تواند افزایش دمای نمونه هنگام کاشت و بازپخت همزمان با کاشت باشد که منجر به کاهش زبری سطح شده است.

در این مطالعه مشخص شد که می توان با اعمال طیف گسترده ای از انباشت یون در واحد سطح، انباشت یونی بهینه ای که منجر به بالاترین میزان آبدوستی سطح نمونه می شود را یافت و شرایط آزمایش را تثبیت کرد. همچنین داشتن اطلاعات از دمای سطح نمونه در هنگام کاشت یون سبب مدیریت بیشتر بر تغییرات ریخت شناسی سطح نمونه می شود و از آسیب رسیدن به سطح نمونه

جلوگیری می‌کند. دمای نمونه در حین کاشت به روش پرتو یونی کمابیش افزایش می‌یابد که مدیریت آن با تجهیزات ویژه امکان‌پذیر است. اگرچه در روش پلاسما یون غوطه‌وری دمای سطح نمونه نسبت به دمای اتاق چندان تغییری نمی‌کند. در مجموع بنظر می‌رسد پلی‌استایرن در شرایط مشابه تحت کاشت یون آبدوست‌تر از پلی‌اتیلن می‌شود. تصور ما بر این است که دلیل این مشاهده، نقطه ذوب بالاتر این پلیمر است. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود کاشت یون با نرخ پایین‌تر انجام شود و همزمان دمای نمونه مدیریت گردد. شاید به همین دلیل کاشت یون به روش غوطه‌وری پلاسما که در آن دمای نمونه‌ها به اندازه کاشت یون با استفاده از باریکه بالا نمی‌رود نتیجه بهتری نسبت به این روش دارد [۱۷].

منابع

- [1] Jagielski, J., A. Piatkowska, P. Aubert, L. Thomé, A. Tuross, and A. Abdul Kader. "Ion implantation for surface modification of biomaterials." *Surface and Coatings technology*, 200, 6355- 6361, 2006.
- [2] Mändl, S., and B. Rauschenbach. "Improving the biocompatibility of medical implants with plasma immersion ion implantation." *Surface and Coatings Technology*, 156, 276-283, 2002.
- [3] Ong, J. L., Mark R. Appleford, and Gopinath Mani. *Introduction to biomaterials: basic theory with engineering applications*. Cambridge University Press, 2014.
- [4] Wise, Donald L., Debra J. Trantolo, David E. Altobelli, Michael J. Yaszemski, and Joseph D. Gresser, eds. *Human biomaterials applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] Neděla, Oldřich, Petr Slepíčka, and Václav Švorčík. "Surface modification of polymer substrates for biomedical applications." *Materials*, 10, 1115, 2017.
- [6] Kondyurin, Alexey, and Marcela Bilek. *Ion beam treatment of polymers: application aspects from medicine to space*. Newnes, 2014.
- [7] Grant, William A., ed. *Surface Modification of Metals by Ion Beams: Proceedings of the International Conference on Surface Modification of Metals by Ion Beams*, Elsevier Applied Science, 1987.
- [8] Fink, Dietmar, ed. *Fundamentals of ion-irradiated polymers*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [9] S.Sh. Salimi, M. Mahjour-Shafiei, and M. Yarmohammadi Satri. "Investigation on the degree of dissociation of Hydrogen plasma in PIG ion source via optical emission spectroscopy." *The 25th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy*, 240, 2018.
- [10] Mahjour-Shafiei, M., H. Noori, and A. H. Ranjbar. "Influence of magnetic field on the electric breakdown in penning ion source." *Review of Scientific Instruments* 82, 11, 113502, 2011.
- [11] Rafieian Najaf Abadi, Mahdi, and Masoud Mahjour-Shafiei. "Dependence of emittance of the He+ beam extracted from a Penning ion source on the design of the source, a Particle-In-Cell simulation." *Review of Scientific Instruments* 92, 12, 123501, 2021.
- [12] Iordanova, S., I. Koleva, and Ts Paunská. "Hydrogen degree of dissociation in a low-pressure tandem plasma source." *Spectroscopy Letters* 44, 1, 8-16, 2011.



- [13] Yedji, Mourad, and G. G. Ross. "Effect of electric charge accumulation on low energy ion implantation in insulators." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 230, 1-4, 386-390, 2005.
- [14] Kondyurin, A., B. K. Gan, M. M. M. Bilek, D. R. McKenzie, K. Mizuno, and R. Wuhrer. "Argon plasma immersion ion implantation of polystyrene films." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 266, no. 7, 1074-1084, 2008.
- [15] Shi, Xiaofeng, Shixiang Lu, and Wenguo Xu. "Fabrication of CuZn5–ZnO–CuO micro-nano binary superhydrophobic surfaces of Cassie–Baxter and Gecko model on zinc substrates." *Materials Chemistry and Physics* 134, no. 2-3, 657-663, 2012.
- [16] Kurzina, I. A., et al. "Surface property modification of biocompatible material based on polylactic acid by ion implantation." *Surface and Coatings Technology* 388, 125529, 2020.
- [17] Kondyurin, A., V. Karmanov, and R. Guenzel. "Plasma immersion ion implantation of polyethylene." *Vacuum* 64(2), 105-111, 2001.

© 2020 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).