

مروری بر امکان استفاده از فناوری پلاسمای سرد در صنعت بسته‌بندی

سوگل مظلوم^{۱*}، مونا فلاح شجاعی^۲، محمد حسن کمانی^۳، حبیب الله میرزایی^۴

تاریخ دریافت مقاله: خرداد ماه ۱۳۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: مرداد ماه ۱۳۹۲

چکیده

پلاسمای سرد به گاز یونیزه شده‌ای اطلاق می‌شود که بخش کوچکی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و به یون‌های مثبت تبدیل شده باشد. به دلیل ویژگی‌هایی از قبیل دمای پایین و انرژی بالا در دامنه‌ی وسیعی از فناوری‌ها مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از پلاسمای سرد به واسطه‌ی کاربردهایی از قبیل استریل و پاکسازی، فعال‌سازی (واکنش پذیرتر شدن) و ایجاد پوشش‌های مطلوب بر روی سطوح به منظور افزایش ماندگاری محصول و ایجاد سطوح مناسب برای حفظ کیفیت آن در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی، دارویی، بهداشتی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. عموماً در تولید پلاسمای سرد از گازهایی نظیر اکسیژن، نیتروژن و آرگون استفاده می‌شود. برخی از مزایای آن از جمله: کاهش اثرات منفی اعمال حرارت بر روی سطوح برای پاکسازی، بهبود ویژگی‌های رطوبت‌پذیری الیاف، افزودن لایه‌ی نازک بر روی سطوح در جهت اصلاح ویژگی آن و افزایش پتانسیل چاپ و رنگ‌پذیری موجب توجه صنعت بسته‌بندی به این فناوری شده است، لذا مروری بر کاربرد پلاسمای سرد در این صنعت بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

پلاسمای سرد، بسته‌بندی، پاکسازی، فعال‌سازی، پوشش پلاسمایی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، روش‌های بهبود خواص سطوح، پیشرفت‌های چشمگیری داشته است، برای مثال با توجه به رشد بی‌سابقه‌ی استفاده از فیلم‌های پلی‌مری^۵ در صنایع مختلف (خودرو و هواپیماسازی، الکترونیک^۶ و الکترونیک^۷، بسته‌بندی و پزشکی) ترکیبی از ویژگی‌های مناسب از قبیل فرآیندپذیری آسان، تغییرپذیری آسان سطح، قابلیت تحمل فشار، وزن و غیره می‌تواند کاربرد این دسته را حتی بیشتر هم افزایش دهد [۴]. می‌توان به این نکته اشاره نمود در کلیه‌ی زمینه‌های کاربردی ذکر شده داشتن قابلیت اتصال و پیوستگی بالا یک مزیت مهم به شمار می‌رود. بعضی از فیلم‌ها قابلیت اتصال و پیوستگی خوبی دارند، اما در بیشتر مواقع فیلم‌های پلی‌مری خواص اتصالی ضعیفی را از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل این فیلم‌ها نیازمند یکسری اصلاحات اضافه برای افزایش فعالیت سطوح، رطوبت‌پذیری و در نتیجه افزایش خصوصیات اتصال‌پذیری و پیوستگی آن‌ها می‌شود. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای اصلاح خواص سطوح فیلم‌های پلی‌مریک (شیمیایی، حرارتی، مکانیکی و الکترونیک) به کار گرفته شده است. از این رو، تحقیق بر روی استفاده از

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی سبزوار.

(* نویسنده مسئول: mona_falahshojae@yaho.com)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع غذایی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی سبزوار.

۴- دانشیار دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

5- Polymeric film

6- Electric

7- Electronic

می‌شوند و به همین دلیل فرکانس برخورد‌های الاستیک^۳ بین الکترون‌ها و اتم‌ها، پایین است و الکترون‌ها فرصت زیادی برای انتقال انرژی خود به گاز را ندارند و نمی‌توانند گونه‌های سنگین را به طور مؤثر گرم کنند. بنابراین گاز زمینه در دمای محیط و یا نزدیک آن باقی می‌ماند، در نتیجه دمای الکترون خیلی بزرگ‌تر از دمای گاز می‌گردد و منجر به یک عدم تعادل حرارتی موضعی می‌شود. به همین دلیل آن را پلاسما غیر تعادلی، پلاسما با یونش و دمای کم نیز می‌نامند [۱، ۲ و ۴]. پلاسما به‌طور کلی از تخلیه الکتریکی در فشار کم یا زیاد ایجاد می‌شود. بر این اساس دو نوع پلاسما کاربرد دارد: پلاسما در فشار کم یا خلأ و پلاسما در فشار جو یا اتمسفری. پلاسما کم فشار در محفظه‌ای تحت خلأ و فشار بسیار پایین (میلی‌تور) تولید می‌شود و در محدوده‌های متنوعی کاربرد دارد، در مواردی که چسبندگی^۴ بهتر بین سطوح و یا تغییرپذیری آسان‌تر سطح مورد نیاز باشد پلاسما کم فشار نقش پر رنگ‌تری دارد. فرایند وکیوم به جریان گاز کمتری احتیاج دارد و لذا انرژی کمتری را مصرف می‌کند، اما از آنجایی که هزینه‌ی ساخت و نگهداری سامانه‌های تحت خلأ بالا می‌باشد و نیز به دلیل محدود شدن ابعاد هندسی مواد پردازشی به وسیله‌ی حجم محفظه‌ی تخلیه، در سال‌های اخیر انواع مختلف پلاسما غیرحرارتی فشار اتمسفری توسعه یافته است [۳ و ۴]. البته لازم به ذکر است که کنترل عملیات در فشار اتمسفری مشکل‌تر می‌باشد زیرا امکان مخلوط شدن گاز مورد استفاده با هوا وجود دارد [۹]. هر کدام از روش‌ها مزایا و معایبی دارند که به صورت خلاصه در (جدول ۱) به آن پرداخته شده است.

پلاسما سرد اتمسفری بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است، زیرا تکنیکی مقرون به صرفه و مفید، بدون نیاز به استفاده از مواد و روش‌های شیمیایی است، که احتیاج به رطوبت ندارد و اصلاح سطوح به صورت یکنواخت‌تر انجام می‌گیرد. از طرفی دمای سطح همان دمای اتاق باقی می‌ماند. به همین دلیل می‌تواند در صنایع به صورت گسترده مورد استفاده قرار بگیرد [۵]. بسته به نوع گاز مورد استفاده قادر است با ایجاد گونه‌های فعال (اساساً گروه‌های قطبی) میزان فعالیت سطوح را افزایش دهد [۶]. پلاسما، حالت چهارم مواد می‌باشد. زمانی که به گاز انرژی وارد شود مثلاً در یک میدان الکتریکی قرار گیرد، اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و بار مثبت می‌یابند و به عبارتی یونیزه می‌شوند. پس می‌توان گفت که پلاسما به گاز یونیزه شده‌ای اطلاق می‌شود که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و به یون‌های مثبت تبدیل شده باشند، پلاسما شامل یون‌های مثبت، الکترون، اتم و یا مولکول‌های گاز خنثی، امواج^۱ UV، رادیکال‌های آزاد و اتم‌ها و مولکول‌های برانگیخته می‌باشد. [۷، ۸، ۱]

۱-۱- انواع پلاسما

پلاسما به دو صورت سرد یا گرم می‌باشد. نمونه‌ی واقعی از پلاسما داغ یا گرم خورشید می‌باشد. در این نوع از پلاسما درجه‌ی یونیزاسیون^۲ نزدیک به ۱۰۰٪ است. در این نوع الکترون‌ها، اجزای اتمی و سایر ذرات در دمای خیلی زیاد و یکسان می‌باشند و با عنوان‌های دیگری چون پلاسما با یونش زیاد، پلاسما با دمای زیاد و تعادلی نامیده می‌شود. این نوع از پلاسما به وسیله‌ی قوس‌های الکتریکی، واکنش‌های هسته‌ای و تحریک لیزری ایجاد می‌شود، اما پلاسما سرد در واقع واقع سرد نیست بلکه دمای الکترون‌ها در این پلاسما به ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد هم می‌رسد، اما در این نوع فقط بخش کوچکی از ذرات نزدیک به ۱٪ یونیزه

3- Elastic
4- Adhesion

1- Ultraviolet
2- Ionization

جدول ۱- مقایسه‌ی مزایا و معایب پلاسمای کم فشار و فشار جو

مزایا	معایب	مزایا	معایب
تولید پلاسمای داخل محفظه امکان‌پذیر است.	ایجاد شرایط خلأ برای کاربرد صنعتی محدودیت دارد.	به راحتی در محیط قابل اندازه‌گیری قابل تیمار از این روش محدود است.	اندازه سطوح قابل تیمار از این روش محدود است.
مناسب برای مواد حساس به اکسیداتیو	برای بعضی مواد مثل سیلیکون‌ها احتیاج به پمپ‌های بزرگی برای تأمین خلأ می‌باشد.	لوله یا کابل به خوبی و در زمان کوتاهی از این روش تیمار می‌شوند.	موجب اکسید شدن سطوح می‌شود.
پوشش یک شکل و یکسان در تمام سطح می‌باشد، تمام سطوح PVD و PECVD از این روش تیمار می‌شوند	احتمال آلودگی محفظه‌ی تولید پلاسمای با پوشش‌دهی می‌باشد.	در هیچ گونه کاربرد صنعتی تاکنون استفاده نشده است.	در هیچ گونه کاربرد صنعتی تاکنون استفاده نشده است.

۲-۱- منابع تولید پلاسمای سرد

تعداد وسیعی از منابع مختلف تولید پلاسمای سرد تا به امروز برای کاربردهای گوناگون، طراحی و پیشرفت کرده‌اند. همان طور که در توضیحات نیز ذکر شد، پلاسمای حاصل شکست الکتریکی در یک گاز خنثی، در حضور یک میدان الکتریکی است. حامل‌های بار در میدان الکتریکی شتاب گرفته و انرژی خود را در اثر برخورد با سایر ذرات به پلاسمای انتقال می‌دهند که این انتقال در برخوردهای الاستیک بسیار بیشتر از غیر الاستیک‌ها می‌باشد. جریان مستقیم (DC یا جریان پیوسته)، عبور پیوسته جریان الکتریسیته از یک هادی نظیر یک سیم از پتانسیل بالا به پتانسیل کم است. در جریان مستقیم، بار الکتریکی همواره در یک جهت عبور می‌کند که این امر جریان مستقیم را از جریان متناوب (AC) متمایز می‌کند. اغلب در محفظه‌ی بسته‌ای که دارای الکتروود می‌باشد صورت می‌گیرد.

مدل‌های متفاوتی را با تغییر در ولتاژ و جریان از این طریق می‌توان به دست آورد. یکی از منابع تولیدی پلاسمای تخلیه‌های DC می‌باشد. جت پلاسمای فشار اتمسفری و پلاسمای مایکروویوی^۳ نیز از انواع دیگر می‌باشند. جت پلاسمای سرد اتمسفری^۴ یا APPJ نسبت به روش تخلیه‌ی سد دی‌الکتریکی دیگر محدود به اندازه‌ی سطح الکتروودها نمی‌شود و می‌تواند از چند سانتی‌متر به کمتر از میلی‌متر تنظیم شود. به این صورت پلاسمای تولیدی قابلیت نفوذ به شکاف‌های بسیار ریز و ساختارهای خلل و فرج‌دار را دارد این خصوصیات APPJ را مخصوصاً جهت اصلاح الیاف و مصارف پزشکی و اشیاء با ساختار هندسی پیچیده مناسب می‌سازد. میدان‌ها با فرکانس بالا اثرات پایداری بر پلاسمای دارد و می‌تواند پلاسمای بدون استریم^۵ ایجاد کند [۴].

3- Microwave

4- Atmospheric pressure plasma jets

5- Streamer

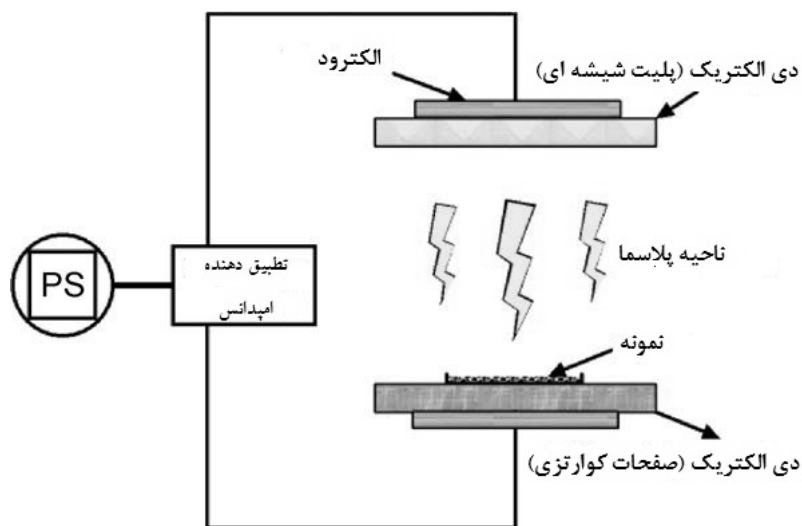
فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون

1- Direct Current

2- Alternating current

می‌تواند به حلی متمرکز شود که هوای مجاور خود را یونیزه نماید. این مسئله می‌تواند منجر به تخلیه جزئی انرژی الکتریکی شود که به آن کرونا می‌گویند. یکی دیگر از مواقعی که کرونا به وجود می‌آید، در تیوب تخلیه الکتریکی کم فشار با اختلاف پتانسیل شدید، برای تولید پلاسما است. در این حالت گاز قبل از شکست الکتریکی کامل، کرونا را تجربه خواهد کرد؛ این پدیده تنها در مکان‌هایی که میدان الکتریکی متمرکز شده است (مانند خراش‌ها، نقاط تیز و غیره) رخ خواهد داد و گاز در اطراف این مکان‌ها هادی گشته و هاله را تشکیل می‌دهد. این پدیده را به نام تخلیه تک قطبی نیز می‌شناسند [۴ و ۱۰]. در ادامه به برخی از کاربردهای پلاسما اشاره می‌شود که منجر به توجه صنعت بسته‌بندی به این روش شده است.

بیشترین منابع تولید پلاسما بر پایه‌ی روش تخلیه‌ی سد دی الکتریک^۱ DBD می‌باشند، این منبع از افزودن یک لایه‌ی نازک در الکتریک به فضای تخلیه بار ایجاد می‌شود، اولین بار در سال ۱۸۵۷ فردی به نام سیمون از این روش برای تولید ازن از اکسیژن استفاده نمود. برای این روش دستگاه‌های مختلفی طراحی شده است که با توجه به نوع کاربرد شکل الکترودها و نوع دی الکتریک تفاوت می‌یابد. دی الکتریک به کار رفته اغلب از شیشه و یا کوارتز^۲ می‌باشد. علت استفاده از آن جلوگیری از جریان بالا و یا ایجاد جرقه در فضای تخلیه بار می‌باشد به همین دلیل به آن^۳ نیز می‌گویند. پلاسما بر پایه‌ی روش تخلیه سد دی الکتریک DBD پرتوان‌ترین سامانه برای گندزدایی سطوح است. شکل (۱) نمایی کلی از نحوه‌ی چیدمان این دستگاه را نشان می‌دهد. کرونا^۴ نیز یکی دیگر از منابع پلاسما می‌باشد. کرونا هنگامی که گرادیان^۵ ولتاژ در سطح یک هادی بیش از شدت دی الکتریک هوای اطراف هادی گردد، هوای اطراف هادی یونیزه می‌شود حال اگر گرادیان ولتاژ بیش از ۳۰ کیلو ولت بر سانتی متر گردد با پدیده کرونا مواجه خواهیم شد میدان الکتریکی در نزدیکی ماده رسانا.



شکل ۱- شماتیکی ساده از نحوه‌ی تولید پلاسما

- 1- Dielectric barrier discharge
- 2- Quartz
- 3- Silent discharge
- 4- Corona
- 5- Gradient

۲- مروری بر برخی از کاربردهای پلاسمای سرد

۱-۲- استریل و پاک‌سازی

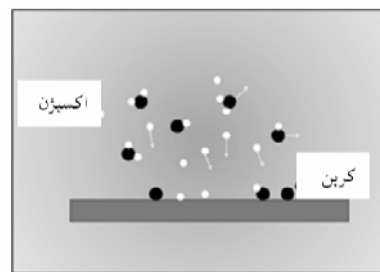
می‌توان سطوح را از طریق بمباران یونی توسط پلازما از آلودگی‌هایی نظیر روغن‌ها پاک نمود. در واقع از این عمل به‌عنوان یک پیش‌تیمار می‌توان استفاده کرد. به این صورت که سطوح را آماده و عاری از هر گونه آلودگی و مواد زائد سایر فرآیندها از قبیل برچسب‌زنی و اتصال به سایر عوامل می‌نماید.

از طرفی چون در این روش استریل کردن با دمای پایین صورت می‌گیرد به صنایع بسته‌بندی این امکان را می‌دهد که مواد حساس به دمای بالا را به راحتی استریل و ضدعفونی نماید، مثلاً فویل‌های آلومینیومی در تغییرات دمایی، دچار تغییر در ساختار خود می‌شوند در صورتی که با تیمار توسط پلازما این قبیل مشکلات ایجاد نمی‌شود [۱۱ و ۱۲].

و اما مکانیسم کلی آن بدین شرح است:

۱- امواج ماوراء بنفش تولید شده در پلازما و همچنین یون‌ها و اتم‌های پرانرژی می‌توانند به خوبی پیوندهای مولکولی آلودگی‌های روی سطوح را بشکنند که این عمل به حذف بعضی آلودگی‌ها مانند روغن و گریس^۱ کمک بسیاری می‌نماید.

گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده با آلاینده‌های آلی وارد واکنش شده و آن‌ها را اکسید می‌کند و با پیوند آلاینده با اکسیژن منجر به جدایی از سطح می‌شود (شکل ۲) [۶ و ۱۲].



تیمار پلاسمای سرد

شکل ۲- مکانیسم عمل پاک‌سازی در حین عمل‌آوری با پلازما

1- Grease

میاو^۲ و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی میزان استریلیزاسیون^۳ ای‌کلای^۴ بر فیلم‌های مورد استفاده در پزشکی PET^۵، PTFE^۶ و PVC^۷ به وسیله پلازما را مورد بررسی قرار دادند در این جا پلازما از طریق تخلیه‌ی سد دی الکتریک تولید شده و زمان تیمار ۱ تا ۵ دقیقه بوده است. نمونه‌ی میکروبی نیز از طریق کشت E. coli (ATCC8099) در محیط آگاهی^۸ حاوی پروتئین سویا و سپس تولید محلول رقیقی با غلظت ۱۰^۶ CFU از کشت حاصل، تهیه گشته است. برای انجام آزمون مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از آن را بر روی هر کدام از فیلم‌هایی که قبلاً استریل شده، اسپری کردند. بعد از گذشت ۲ ساعت در دمای اتاق برای خشک شدن، نمونه‌ها را مورد تیمار قرار داده سپس سطح فیلم‌ها را با بافر فسفات سالین^۹ شسته و با رقت ۱/۱۰ در محیط کشت آگار کشت داده شده و پس از انکوبه‌گذاری در دمای ۳۷ درجه به مدت ۴۸ ساعت تعداد کلنی‌ها شمرده و ضریب مرگ باکتری را محاسبه نمودند. در این آزمون، میزان فاصله نمونه‌ها از محل تابش به عنوان عامل مؤثر بر عملکرد پلازما مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در (نمودار ۱) نشان داده شده است.

در نمونه A (زمانی که سوپسترا^{۱۰} PET باشد) کاهش میکروارگانیسم‌ها رفته رفته با افزایش زمان، زیاد می‌شود و پس از گذشت ۳ دقیقه به ۹۹٪ از ضریب مرگ می‌رسد. حتی در فاصله‌های مختلف بعد از مدت ۵ دقیقه مشاهده شد که در نهایت تمام باکتری‌ها کشته شدند. در PVC, C, PTFE B روند مرگ باکتری‌ها مشابه PET بوده است، اما به طور کل فاصله ۳ سانتی‌متر عملکرد بهتری

2- Miao

3- Sterlization

4- E. coli

5- Polyethylene terephthalate

6- Poly (tetrafluoroethylene)

7- Ppolyvinyl chloride

8- Agar medium

9- Buffer phosphate saline

10- Substrate

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون

بسته‌بندی

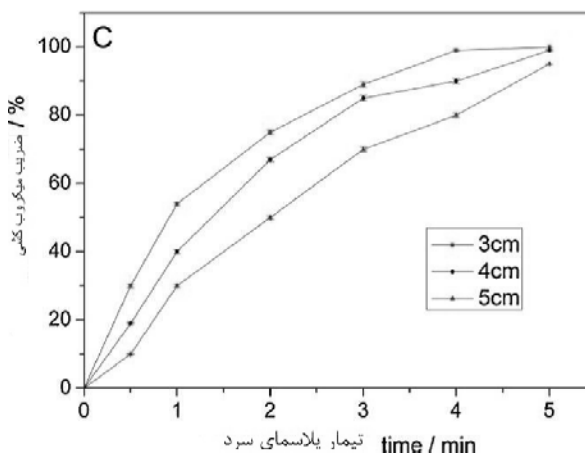
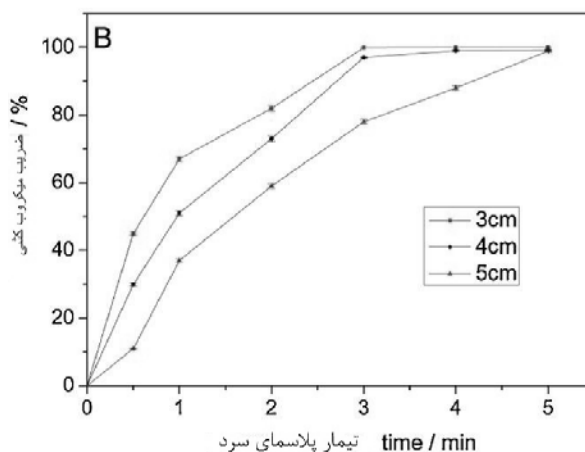
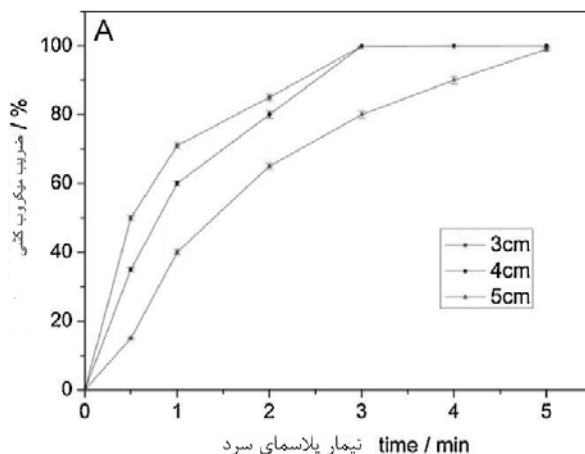
بیشترین ضریب مرگ را فیلم PET و سپس PVC و در آخر^۱ PTFE دارد.

اما دلیلی که برای توجیه آن ذکر نموده‌اند این است که در تهیه نمونه‌ها قطراتی از سوسپانسیون^۲ باکتری بر روی سطح فیلم قرار می‌گیرد. پس اینکه هر کدام از فیلم‌ها تا چه حد توانایی جذب قطرات را داشته باشد به قابلیت رطوبت‌پذیری آن‌ها مربوط می‌باشد. از این رو، زاویه تماس^۳ هر کدام از فیلم‌ها اندازه‌گیری شد که برای PET و PVC به ترتیب ۷۳، ۸۹ و ۱۱۰ درجه می‌باشد. هر چه زاویه تماس کمتر رطوبت‌پذیری کمتر می‌شود، لذا میزان چگالی انباشته‌ی باکتری در آن نقاطی که سوسپانسیون اسپری شده است، بیشتر می‌شود و هر چه میزان غلظت بیشتر باشد بهره‌وری پلاسما کاهش می‌یابد [۱۳].

به طور کلی، برخی از موارد استفاده‌ی این کاربرد در صنایع بسته‌بندی عبارتند از: تمیز کردن سطوح فلزی، آماده‌سازی سطح پلاستیک و الاستومرها، آماده‌سازی سطح و تمیز کردن محصولات شیشه‌ای و سرامیکی و از بین بردن اکسیداسیون^۴ ایجاد شده روی سطوح می‌باشد [۱۲].

۲-۲- فعال‌سازی سطوح

پلاستیک‌ها برای مثال پروپیلن یا^۵ PTFE (پلی‌تترا فلورو اتیلن) به راحتی با ذرات دیگر متصل یا به اصطلاح باند نمی‌شوند، در این موارد، پلاسما بهترین راه‌حل برای آماده‌سازی این سطوح از فرآیندهایی است که الزام به اتصال و باند شدن دارند، می‌باشد. شیشه و سرامیک را هم از همین طریق می‌توان فعال نمود. در این روش به طور معمول از O₂ استفاده می‌شود، (اما می‌توان با هوای محیط



نمودار ۱- تأثیر اثر فاصله‌ی نمونه‌ها از نقطه‌ی تابش بر میزان استریلیزاسیون

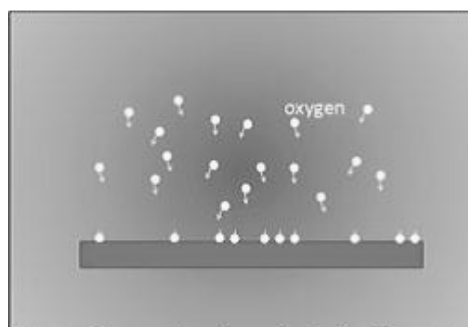
داشته است. پس نتیجه گرفته شد که فاصله‌ی نمونه از پلاسما بر میزان اثر و فعالیت پلاسما مؤثر می‌باشد. همچنین طبق داده‌ها گزارش شده است که تحت شرایط کاملاً مساوی

- 1- Polytetrafluoroethylene
- 2- Suspension
- 3- Contact angle
- 4- Vulcanized
- 5- Oxidation
- 6- Poly tetra fluoro ethylene

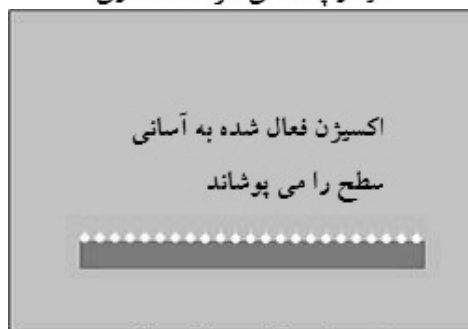
نیز این فعالیت را انجام داد) قطعاتی که از این طریق فعال می‌شوند برای چند دقیقه تا چند ماه فعال باقی می‌مانند(البته با توجه به نوع ماده مثلاً پروپیلن تا چند هفته فقط فعال است)[۵].

مکانیسم عمل در این روش بدین صورت است که: گونه‌های فعال اکسیژن(رادیکال‌ها) به تمام سطوح ماده موردنظر متصل می‌شوند و بعد یک سطح با فعالیت بالا ایجاد می‌کنند که قادر است به راحتی به مواد دیگر متصل شوند و در واقع انرژی سطحی آن را افزایش داده و پیوند آن را با ذرات دیگر قوی‌تر سازد(شکل ۳).

در یک مطالعه^۱ LDPE تحت تیمار پلاسمای سرد اتمسفری در مقایسه با کرونا و یک تیمار شاهد قرار گرفت و بعد از ۱۷ روز به بررسی نتایج در دو زمینه‌ی کشش سطحی و چسبندگی با فیلم آکرلیک استات^۲ پرداخت که در آن‌ها تأثیر تیمار با پلاسمای سرد از همه بیشتر مشهود بوده و



تیمار پلاسمای سرد- فعالسازی



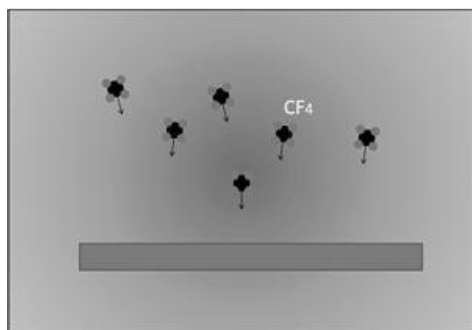
بعد از تیمار با پلاسمای سرد

شکل ۳- مکانیسم عمل فعالسازی در حین عمل آوری با پلاسمای

قابلیت چسبندگی و کشش سطحی را افزایش داده است[۱۴].

۲-۳- پوشش پلاسمایی

در این فرایند یک لایه‌ی پلی‌مری بسیار نازک در سرتاسر سطحی که در تماس با پلاسمای می‌باشد تشکیل می‌شود. این لایه به اندازه‌ی ۰/۰۱ قطر موی انسان، بی‌رنگ، بی‌بو بوده و هیچ گونه تغییر ظاهری روی ماده ایجاد نمی‌کند. این پوشش پایدار است و در مقیاس اتمی با ماده روی سطوح بانند می‌شود. مکانیسم تشکیل آن بدین صورت است که مونومرهایی که وارد محفظه تولید پلاسمای شده‌اند، تحت شرایطی که توسط پلاسمای ایجاد می‌شود، جذب هم شده و تشکیل پلی‌مر را می‌دهند. مونومرهایی مختلف می‌توانند سطوح آبریز و آبدوست را ایجاد کنند، مثلاً پوشش‌های کاملاً دافع مایعات(آب و روغن) یا نفوذپذیر به آب را می‌توان نام برد(شکل ۴)[۱۲، ۱۴ و ۱۵].



پوشش دهی پلاسمای پلی‌مریزاسیون

شکل ۴- مکانیسم عمل پوشش‌دهی در حین عمل آوری با پلاسمای

تحقیقات نشان داده است که اثر پلاسمای روی الیاف پلی‌استر، موجب افزایش خواص آبدوستی این الیاف با گازهای هوا، اکسیژن، هلیوم^۳ و آرگون^۴ و نیز کاهش

3- Helium

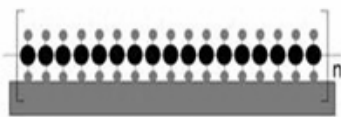
4- Argon

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون

1- low density polyethylene

2- Acrylic acetate

گذاشتن لایه‌ها



بعد از پوشش دهی با پلاسما

شکل ۵- مکانیسم عمل پوشش دهی بعد از عمل آوری

خواص آبدوستی با گازهای^۱CF₄,^۲CHF₃,^۳CClF₃ می‌شود [۲ و ۶].

مسائلی و همکاران (۱۳۸۵) با تأثیر عمل آوری به وسیله‌ی پلاسما بر روی خواص آبدوستی پارچه‌ی پلی‌استر^۴ به مطالعه پرداخته‌اند. در ابتدا نمونه‌ها در قطعات به اندازه‌ی ۲۸×۲۸ سانتی‌متر از پارچه‌ی پلی‌استر با خصوصیات مشخص تهیه و سپس تحت عمل آوری پلاسما با شرایطی که در (جدول ۲) بیان شده قرار دادند.

جدول ۲- برخی از اصلاحات ایجاد شده توسط روش پوشش پلاسمایی

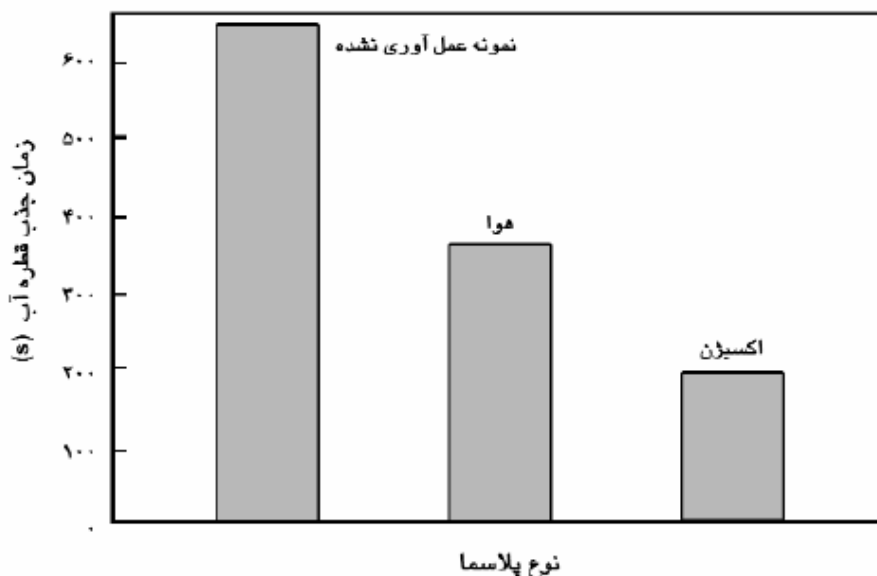
کاربرد(توانایی)	مواد(ثانویه)	زیر لایه(اولیه)
پوشش‌های مهارکننده اکسیژن	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	PET، قرص سیلیکون، استیل و شیشه
پوشش‌های نوری	SiO ₂ , TiO ₂	شیشه، پلاستیک
پوشش‌های سخت	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , Cr _x O _y	قرص سیلیکون، استیل، آلومینیوم، پلاستیک
Ashing(خاکسترگیری)	فتورزست	سیلیکون
پلی‌مرهای آب‌زدایی شده	گروه‌های قطبی، defluorination	PET، تفلون، پلاستیک
پارچه‌های مقاوم به آب و روغن(سطوح با آبگریز بالا)	گروه‌های -CF ₃ و -CF ₂ - سطحی	PET، نخ، کلوارد

دوم اندازه‌گیری خاصیت انتقال آب: برای اندازه‌گیری این اثر، نمونه‌هایی به اندازه‌ی یکسان بریده (۱سانتی‌متر) از آن‌ها را داخل آب قرار داده و مدت زمانی را که طول کشیده تا آب ۳ سانتی‌متر طول پارچه را طی کند، اندازه گرفتند(نمودار ۲). گزارش شده است که : عمل آوری با پلاسما باعث کاهش مدت زمان نفوذ و مدت زمان انتقال آب می‌شود که دلیل افزایش خواص آبدوستی را می‌توان خوردگی‌های سطحی الیاف بیان کرد که تخریب سطح الیاف اکسایش آن‌ها ذکر شده که به وسیله‌ی ذرات باردار پلاسما صورت گرفته است و سازوکارهای متفاوتی برای تخریب پلی‌مر با پلاسما ارائه شده است، اما جزء اساسی آن‌ها اکسیژن اتمی

سپس به منظور بررسی اثر پلاسما چند عامل را ارزیابی نمودند:

اول اندازه‌گیری خاصیت پخش آب: برای این منظور از نمونه‌های اصلاح شده قطعاتی به یک اندازه بریده روی بشر قرار داده با لوله‌ی مدرج، قطره‌ای آب روی آن ریخته و سپس با محاسبه‌ی زاویه ۴۵ درجه‌ی ناپدید شدن قطره از سطح نمونه، تغییرات این خاصیت را اندازه‌گیری نمودند که نتایج در(شکل ۵) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است نتایج نشان داد که اثر پلاسمای اکسیژن از هوا بیشتر بوده است.

- 1- Tetra fluoro methane
- 2- Tri fluoro methane
- 3- Chloro tri fluoro methane
- 4- Polysters

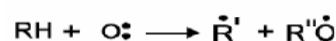
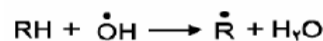
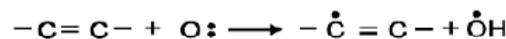
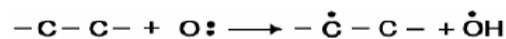


نمودار ۲- اثر نوع گاز پلاسما بر مدت زمان پخش قطره آب روی نمونه‌های پلی‌استر عمل‌آوری شده با پلاسما در توان ۲۰۰ وات به مدت ۶ دقیقه

جدول ۳- شرایط عمل‌آوری با پلاسما

نوع گاز	توان (W)	زمان (min)
هوا	۲۰۰	۱،۳،۶،۱۰،۱۵
هوا	۱۰۰	۶
هوا	۵۰۰	۶
اکسیژن	۲۰۰	۳،۶،۱۰

یا رادیکال اکسیژن می‌باشد. اتم اکسیژن به سطح پلی‌مر حمله کرده و واکنش زیر رخ می‌دهد:



۲-۴- پلاسما اتچینگ^۱

پلاسما اتچینگ برای زبر کردن سطوح در مقیاس میکروسکوپی به کار برده می‌شود که سطوح مورد نظر ما با گاز فرایند، اتچ می‌شود یا به عبارتی قلم زده می‌شود. از این طریق سطح گسترده‌تر شده و به بهبود فرایندهایی از قبیل چاپ، برجسب‌زنی و نقاشی روی سطوح کمک می‌شود. این روش برای بعضی سطوح مثل POM^۲ و POM^۳ PTFE بسیار مفید می‌باشد زیرا که این سطوح به تنهایی قابل چاپ و برجسب‌پذیر یا به طور کل باند شدن با سایر

در این واکنش‌ها، رادیکال‌های پلی‌مری و شکست زنجیری دیده می‌شود که به معنی تخریب سطح پلی‌مر توسط پلاسما است. همچنین مشاهده شد که پلاسمای اکسیژن اثر بیشتری نسبت به پلاسمای هوا دارد که به همین دلیل است [۲]. در (جدول ۳) به چند نمونه از موادی که می‌توان با این روش بر روی سطوح رسوب داده و ویژگی مورد نظر را به دست آورد، اشاره شده است.

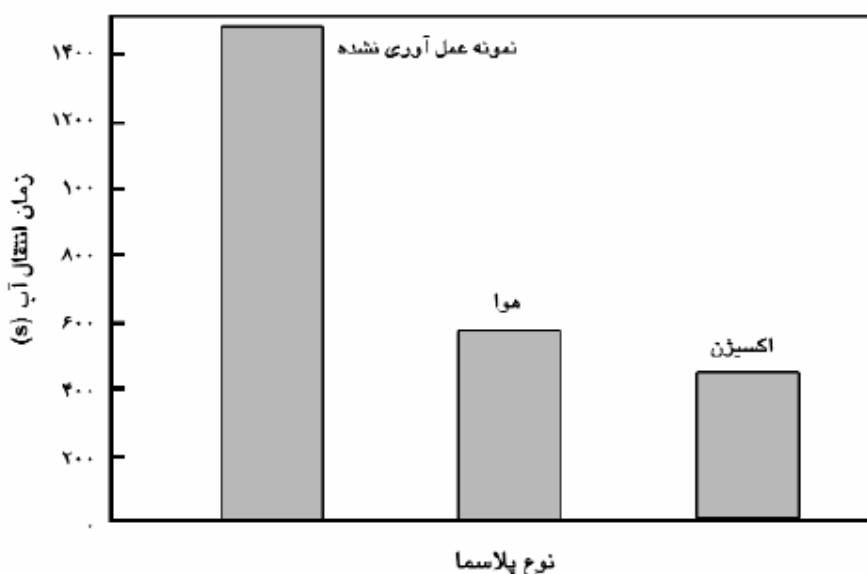
1- Etching

2- Polyoxymethylene plastic

3- Polytetrafluoroethylene

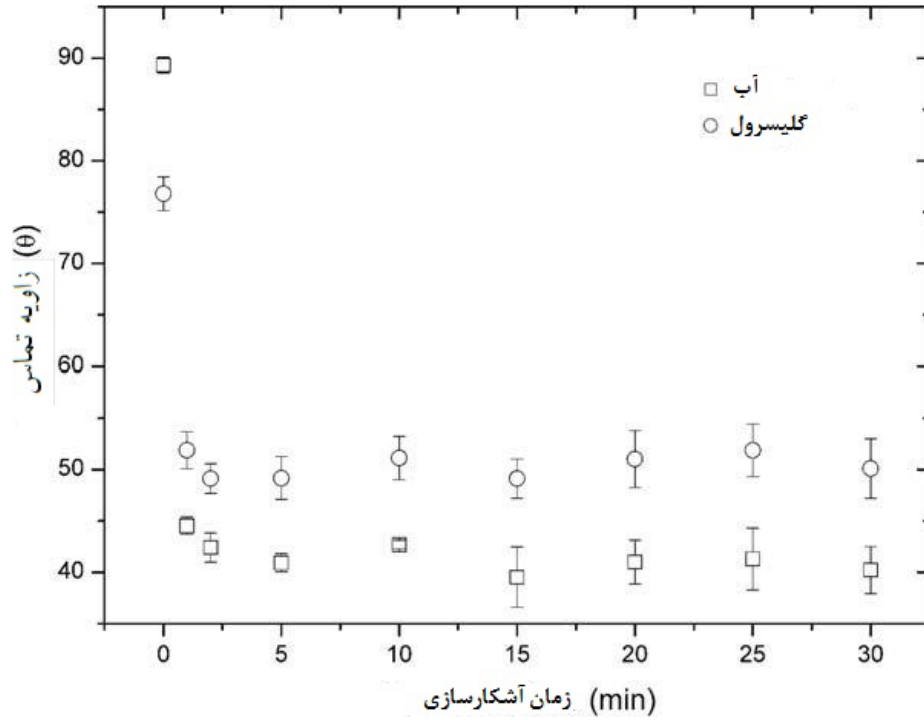
با افزایش زمان تغییر مشهودی در میزان تغییر زاویه‌ی تماس مشاهده نشد، اما به طور حتم در اثر اتچینگ زیری بیشتری در سطح ایجاد می‌شود. نتایج نشان داد که عمل‌آوری با پلاسمای حاصل از گاز اکسیژن میزان شکل‌گیری گونه‌های فعال قطبی را بر روی سطح فیلم بهبود می‌بخشد. پلاسمای نه تنها بر تشکیل گروه‌های قطبی منجر می‌شود بلکه با افزایش زیری و ساییدگی در سطح فیلم، رطوبت‌پذیری را بیشتر و بهتر بهبود می‌بخشد. همچنین نتایج حاصل از کاهش وزن فیلم در طی عمل‌آوری تاثیر پلاسمای بر ساییدگی حاصل از بمباران اتمی را نشان داد، سرعت کاهش وزن محاسبه شده از طریق محاسبه شیب $22 \text{ }^{\mu\text{m}}/\text{cm}^2\text{min}$ به دست آمد که سرعت معمول در اکثر فیلم‌های پلی‌مری تحت عمل‌آوری با پلاسمای حاصل از گاز اکسیژن می‌باشد. (نمودار ۴ و ۵) [۱۸].

مواد نمی‌باشد. این روش همچنین می‌تواند برای سایر ساختارهایی نظیر PFA^2 , FEP^1 مناسب باشد. سانچیس^۳ و همکاران (۲۰۰۶) در پژوهشی نمونه‌هایی به اندازه‌ی 20×20 سانتی‌متر از فیلم شفاف کم چگال پلی‌اتیلن با خصوصیات مشخص (ضخامت $50 \mu\text{m}$, $P=0/92\text{gr,cm}^3$) را تحت عمل‌آوری پلاسمای حاصل از گاز اکسیژن با فشار پایین (سرعت جریان اکسیژن $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ ، فشار ۳۱ پاسکال) برای بررسی تغییرات ایجاد شده در سطح فیلم به منظور اصلاح آن در زمان‌های مختلف (۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه) قرار دادند. بعد از عمل‌آوری با اندازه‌گیری زاویه تماس حاصل از دو مایع مختلف (آب و گلیسرول) بر سطح فیلم عمل‌آوری شده و مقایسه با زوایای اولیه تغییرات آبدوستی ایجاد شده در سطح فیلم را بدین صورت گزارش داده‌اند که: زوایای تماس فیلم برای آب و گلیسرول در ابتدا و قبل از عمل‌آوری به ترتیب 9° ، 77° ، 3° و 89° بوده که بعد از عمل‌آوری در مدت ۱ تا ۵ دقیقه تحت پلاسمای زاویه‌ی تماس تا $40-42$ و $49-51$ درجه کاهش یافته است (نمودار ۳).

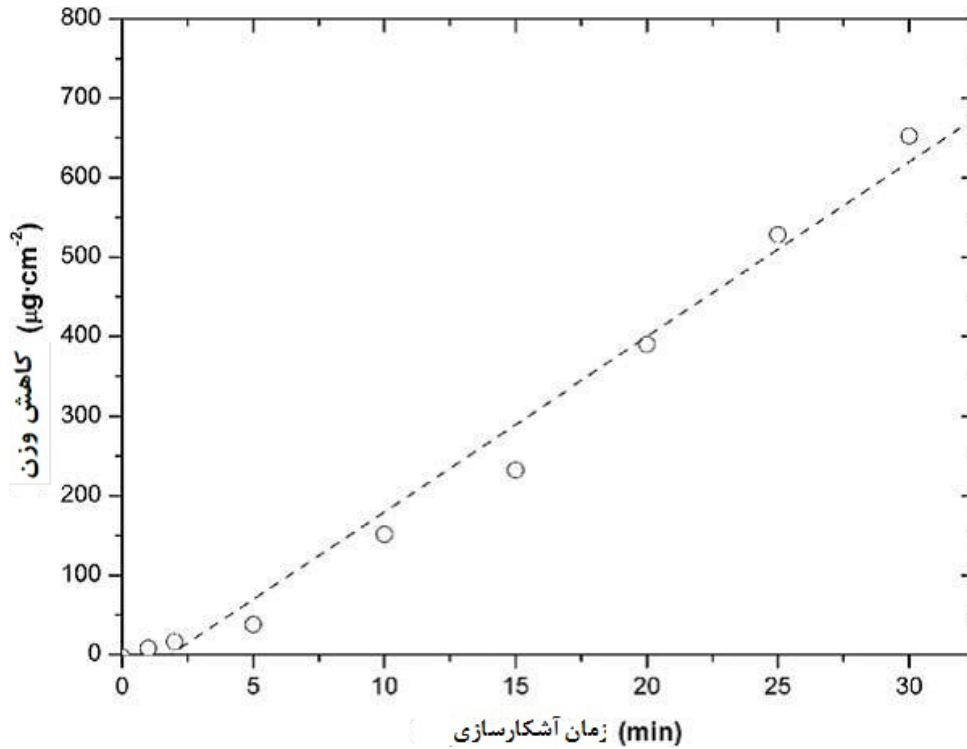


نمودار ۳- اثر نوع گاز پلاسمای بر زمان انتقال آب نمونه‌های پلی‌استر عمل‌آوری شده با پلاسمای به مدت ۶ دقیقه و توان ۲۰۰ وات

- 1- Fluorinated ethylene propylene
- 2- Perfluoroalkoxy
- 3- Sanchis
- 4- Glycerol



نمودار ۴- تغییرات زاویه تماس سطحی برای زمان آشکارسازی متفاوت تحت فشار پایین اکسیژن پلازما برای مایعات



نمودار ۵- سیر کاهش وزن در نتیجه کاربرد زمان آشکارسازی با کاهش فشار اکسیژن پلازما

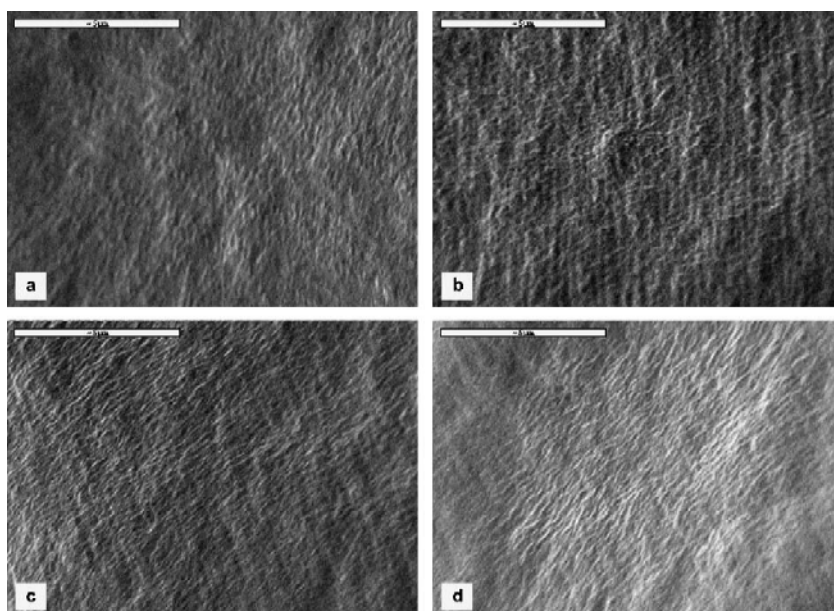
نیترژن و همچنین کربن تترافلوراید^۱ موجب کاهش رطوبت پذیری کاغذ می‌شود [۱۹].

۳- نتیجه گیری

بسته‌بندی در استفاده از فناوری پلاسمای سرد، پیشینه‌ای کوتاه دارد و یقیناً هنوز موارد متعددی از مصرف آن وجود دارد که به آن پرداخته نشده است. فراوری پلاسمایی می‌تواند مزایای متعددی برای بسته‌بندی در پی داشته باشد. با توجه به خصوصیات پلاسمای سرد از قبیل: دمای پایین، سرعت و انرژی بالای آن نسبت به سایر فرآیندها و همچنین کاربردهای شرح داده شده مانند: پاکسازی سطوح، افزایش انرژی سطح، بهبود خاصیت

شکل (۶) میکروگراف حاصل از زمان‌های مختلف عمل‌آوری می‌باشد. می‌توان به خوبی ایجاد ساییدگی در سطح را مشاهده نمود (۱۷).

پلاسمای همچنان برای اصلاح سطوح ارگانیک از جمله کاغذ و مقوا نیز می‌تواند به کار رود. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه صورت گرفته است. عمل‌آوری با پلاسمای اتمسفری می‌تواند در کمتر از ۱ دقیقه زاویه‌ی تماس را در کاغذ از ۱۲۰ به ۵۵ درجه کاهش دهد. همچنین گزارش شده است که عمل‌آوری توسط کرونا و پلاسمای اتمسفری میزان اکسیژن/کربن و در نتیجه انرژی و قطبیت سطح مقوا را افزایش می‌دهد.



شکل ۶- میکروگراف‌های سطوح LDPE تیمار شده با پلاسمای اکسیژن برای زمان‌های آشکارسازی متفاوت (a) تیمار نشده (b)، ۱۰ دقیقه، (c) ۲۰ دقیقه. $\times 10000$.

رطوبت‌پذیری و افزایش توانایی چاپ و رنگ‌پذیری، ایجاد پوشش، یا رسوب لایه‌ی نازک بر روی سطوح و ایجاد خاصیت آبگریزی و یا آبدوستی که می‌تواند موجب ماندگاری هرچه بیشتر نقش، برچسب‌ها و افزایش کیفیت سطح مورد استفاده شود، همگی می‌تواند توانایی ایجاد

همچنین تحقیقات دیگر حاکی از آن است که پلاسمای می‌تواند موجب اکسید شدن و استخراج لیگنین از خمیر چوب، خارج نمودن اسیدهای چرب غیر اشباع و اسیدهای رزین و در نتیجه افزایش رطوبت‌پذیری آن شود، این خاصیت در کاغذ می‌تواند باعث کاهش زمان تجزیه کاغذ و هزینه‌ی انرژی در چرخه‌ی بازیافت آن بسیار مفید واقع شود. از طرفی، سایر مطالعات نشانگر این بوده که استفاده از گاز

1- Tetrafluoride

Instrum meth phys Res Sect B-Beam interact mater Atoms, 208:281. 2003.

7. Fernández, A., Thompson, A., The inactivation of salmonella by cold atmospheric plasma treatment. Food research international, 45, 678–684. 2011.

8. Fernández-Gutierrez S. A., Pedrow, P. D., Pitts, M. J. and Powers J., Cold atmospheric-pressure plasmas applied to active packaging of apples. IEEE transactions on plasma science, VOL. 38, NO. 4. 2010.

9. L. Cernakova, P. Stahel, C. Kovacik, K. Johansson, M. Cernak in: proceedings of the 9th TAPPI advanced coating fundamentals symposium, turku, finland, february 8th–10th pp. 7–172006..

10. Z. Mi, L. Yan. Study on the characteristics of dielectric barrier discharge and dielectric barrier corona, proceedings of the third international symposium on computer science and computational technology. 14-15, 492-494. 2010.

11. K., Rød, S., Hansen, F., Leipold F., Knöchel, S., Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: Inactivation of listeria innocua and changes in product quality. Food microbiology, 30, 233-238. 2011.

12. Gordon J., The application of plasma technology in packaging.

مواد مطلوب‌تر را در اختیار صنعت بسته‌بندی قرار دهد. تمام این ویژگی‌های تحقیقی موجب می‌شود تا این فناوری بتواند ابزاری مفید برای این صنعت تلقی شود و در آینده جنبه‌های کاربردی بیشتری در این رابطه داشته باشد.

۴- منابع

۱. صحبت زاده، ف.، میرزانژاد، س.، مهدوی، ه.، ۱۳۹۰. بررسی پلاسمای سرد اتمسفری در فرکانس رادیویی ۱۳/۵۶ مگاهرتز. مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران، فیزیک اتمی و مولوکولی، ۱۶۳۷-۱۶۴۰.

۲. مسائلی، ا.، برهانی، ص.، ۱۳۸۵. «بررسی اثر پلاسمای سرد و کم فشار بر خواص رطوبتی پارچه پلی‌استر». مجله علوم و تکنولوژی پلی‌مر، سال بیستم، شماره ۲، ۱۵۵-۱۶۳.

۳. صحبت زاده، ف.، حسین زاده، ا.، میرزانژاد، س.، حاجی احمدی، س.، طالب زاده، م.، قاسمی، م.، ۱۳۹۰. مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران، فیزیک پلاسما، ۴۸۹-۴۹۲.

4. Bárdos, L., Baránková, H., Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications. Thin solid films, 518, 6705–6713. 2010.

5. Guillard, V. Mauricio-Iglesias, M. & Gontard N., Effect of novel food processing methods on packaging: structure, composition, and migration properties critical. reviews in food science and nutrition, 50:969–988. 2010.

6. Hegemann D, Brunner H, Oehr C., Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement. nucl

آدرس نویسنده

گرگان- میدان بسیج- دانشگاه کشاورزی و
منابع طبیعی گرگان.

michigan state university – packaging,
PKG 432. 2008.

13. H. Miao, G.Yun., The sterilization of Escherichia coli by dielectric-barrier discharge plasma at atmospheric pressure., Applied surface science ,257, 7065–7070. 2011.

14. Vesel, A., Modification of polystyrene with a highly reactive cold oxygen plasma. Surface & cCoatings technology, 205, 490–497. 2010.

15. Beilis, I.I., Koulik, Y., Boxman, R.L.a, Arbilly, D., Al and Zn film deposition using a vacuum arc plasma source with a refractory anode. Surface & coatings technology, 205, 2369–2374. 2010.

16. Vesel, A., Elersic, K., Adsorption of protein streptavidin to the plasma treated surface of polystyrene. Applied surface science, 258, 5558– 5560. 2012.

17. M.R. Sanchis, V. Blanes , M. Blanes, D. Garcia, R. Balart., “Surface modification of low density polyethylene(LDPE) film”. by low pressure O2 plasma treatment. European polymer Journal 42,1558–1568. 2006.

18. Aouinti M., Bertrand P., Poncin-epaillard, F., Characterization of polypropylene surface treated in a CO2 plasma. plasmas polym ; 8 (4):225–36. 2003.

19. C. Gaiolas, A.Costa., Cold plasma-assisted paper recycling., Industrial crops and products 43. 114– 118. 2013.