

## کاربرد پلاسمای سرد در بسته‌بندی مواد غذایی

امیرحسین بیانلو<sup>۱</sup>، سالار شکری یزنی<sup>۲</sup>، ایمان شهابی قهفرخی<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت مقاله: آذرماه ۱۳۹۹

تاریخ پذیرش مقاله: فروردین ماه ۱۴۰۰

## چکیده

پلاسمای سرد یک فناوری سبز و نوظهور است و به گاز یونیزه شده‌ای اطلاق می‌شود که بخش کوچکی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و حاوی بسیاری از گونه‌های فعال مانند الکترون‌ها، یون‌ها، رادیکال‌های آزاد، حالت برانگیخته و تعداد زیادی مولکول خنثی غیر یونیزه می‌باشد. این فناوری در فشارها و توان‌های پایین تولید می‌شود و نوع گاز به کار رفته و روشی که برای تولید پلازما به کار می‌رود، تعیین‌کننده ماهیت و کمیت گونه‌های فعال تولید شده است. در سال‌های اخیر استفاده از پلاسمای سرد به دلایلی از قبیل عدم تاثیر منفی بر مواد حساس به حرارت، بهبود ویژگی‌های رطوبت‌پذیری، افزایش فعالیت سطوح، پتانسیل چاپ و رنگ‌پذیری مورد توجه پژوهشگران صنعت بسته‌بندی قرار گرفته است. امروزه تجمع پلاستیک‌هایی بر پایه نفت که به طور عمده در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند، عامل یک مشکل جدی زیست محیطی هستند؛ به همین دلیل، تلاش‌های محققان به توسعه فیلم‌ها و پوشش‌های زیست تخریب‌پذیر افزایش یافته است، اما این مواد نیز همانند پلیمرها خصوصیات سطحی مورد نیاز در برخی از کاربردها را ندارند. پلاسمای سرد به روش‌هایی از قبیل اتصالات عرضی، دپلمریزاسیون و اچینگ پلازما، می‌تواند پلیمرهای زیستی و سنتزی را اصلاح نماید. این مقاله به بررسی کاربردهای پلاسمای سرد در اصلاح سطح پلیمرهای زیستی و سنتزی می‌پردازد.

## واژه‌های کلیدی

## ۱- مقدمه

بسته‌بندی؛ پلاسمای سرد؛ اصلاح سطحی؛ پلیمر؛ پلیمر زیستی

مواد مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی عمدتاً شامل شیشه، کاغذ، فلزاتی مانند آلومینیوم، فولاد بدون قلع<sup>۴</sup> و پلاستیک‌هایی مانند پلی‌الفین‌ها، پلی‌استرها، پلی‌استایرن‌ها و پلی‌آمیدها می‌باشند. با این وجود، استفاده از پلیمرها در بسته‌بندی مواد غذایی به دلیل هزینه کمتر، وزن سبک‌تر، انعطاف‌پذیری بالا، نفوذ ناپذیری، مقاومت در برابر شکستگی، پارگی و سوراخ شدن سهم عمده بازار را به خود اختصاص داده است [۱]، اما در بیشتر موارد سطوح پلیمری ماهیتی آبگریز و انرژی سطحی پایینی دارند. به منظور به دست آوردن پلیمرهایی با خواص مورد نظر، در بیشتر موارد از تیمارهای سطحی مختلف استفاده

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی (amirhosseinbayanlo@gmail.com).

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه زنجان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی (salarshokriyazani@gmail.com).

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

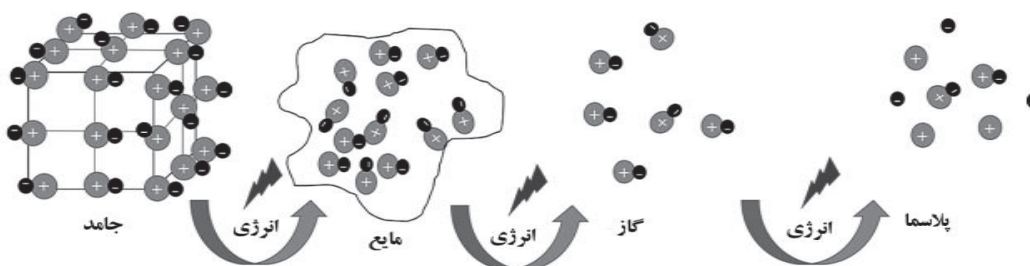
(\* نویسنده مسئول: i.shahabi@znu.ac.ir).

## 4- Tin-Free Steels

می‌شود [۲]، اما تجمع پلاستیک‌هایی بر پایه نفت، که به طور عمده در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند، عامل یک مشکل جدی زیست محیطی هستند. به این دلیل تلاش‌های محققان به توسعه فیلم‌ها و پوشش‌های زیست تخریب پذیر افزایش یافته است، اما این مواد خصوصیات سطحی مورد نیاز در برخی از کاربردها را ندارند. اصلاح سطح پلیمرها و پوشش‌های خوراکی می‌تواند با روش‌های شیمیایی یا فیزیکی انجام شود. روش‌های فیزیکی به دلایلی مانند، سهولت کنترل فرآیند، هزینه کمتر و عدم آلودگی محیط

## ۲- تعریف پلاسما

امروزه پلاسما به عنوان حالت چهارم ماده (شکل ۱) شناخته شده است و حاوی بسیاری از گونه‌های فعال مانند الکترون‌ها، یون‌ها، رادیکال‌های آزاد، حالت برانگیخته و تعداد زیادی مولکول خنثی غیر یونیزه می‌باشد. اصطلاح پلاسما اولین بار در سال ۱۹۲۸ توسط ابروینگ لانگمیر استفاده شد و پلاسما را به عنوان حالت چهارم ماده معرفی کرد [۳].



شکل ۱- حالت‌های چهارگانه فیزیکی مواد [۵]

## ۳- شیمی پلاسما

فریدمن گزارش کرده است که در شیمی پلاسما، یونیزاسیون<sup>۱</sup> گاز، مهم‌ترین عنصر در کنار سایر عوامل مانند انواع برخورد، توزیع انرژی الکترون و غیره می‌باشد [۳].

میسرا<sup>۲</sup> و همکاران گزارش داده‌اند که خصوصیات شیمیایی پلاسما به عوامل مختلفی از جمله ترکیب گاز ورودی، رطوبت، توان، ولتاژ اعمال شده و فاز اطراف آن بستگی دارد [۳]. در ترکیب شیمیایی پلاسمای سرد، اکسیژن، دی اکسید کربن، مخلوط گاز نیتروژن و یون‌های اکسیژن<sup>+</sup>،  $O_2^-$ ،  $O^+$ ،  $N^+$ ،  $N_2^-$ ،  $NO^+$ ،  $CO_2^+$  به صورت غالب مشاهده می‌شوند. اکسیژن اتمی و رادیکال‌های هیدروکسیل به دلیل تطبیق‌پذیری در پیوند کووالانسی<sup>۳</sup> با بسیاری از ترکیبات مختلف، بیشترین واکنش‌پذیری را

زیست بر روش‌های شیمیایی ارجحیت بیشتری یافته‌اند [۲]. تاکنون روش‌های فیزیکی متعددی از جمله پرتو ماوراء بنفش، پرتوهای گاما، پرتوهای یونی و تیمار با لیزر برای اصلاح سطوح پلیمرها و بیوپلیمرها مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از این روش‌ها مانند پرتوی گاما و برخی از منابع پرتوی یونی دارای معایبی مانند: پسماندهای رادیو اکتیو، تجهیزات بسیار اختصاصی و عدم دسترسی مناسب به تجهیزات آن هستند. ولی برخی دیگر مانند: پرتوی فرابنفش اگرچه سهل‌الوصول و فاقد پسماندهای رادیواکتیو هستند ولی به دلیل عمق نفوذ و انرژی پایین، تأثیرگذاری کُندی در فرآیند اصلاح سطوح پلیمر و فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر دارند [۱].

از این رو روش‌های جایگزین آن‌ها که دارای نقاط قوت روش‌های مذکور باشد برای سال‌ها مورد توجه محققین این حوزه قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها استفاده از پلاسمای سرد است.

1- Ionization

2- Misra

3- Covalent

دارند [۳]. در پلاسمایی که با استفاده از گاز نیتروژن و اکسیژن ایجاد می‌شود، برخورد الکترونی پراثری صورت می‌گیرد و واکنش‌های زنجیره‌ای منجر به تولید اکسیدهای نیتروژن می‌شود. در کنار رادیکال‌های آزاد تولید شده در پلاسما، اثر متقابل گونه‌های واکنشی و سطوح بیوپلیمر، منجر به ایجاد دیگر الکترون‌های ثانویه و رادیکال‌های آزاد می‌شود. این رادیکال‌های آزاد می‌توانند منجر به ایجاد اتصالات عرضی یا پیوند گروه‌های حاوی اکسیژن و دیپلمریزه شدن زنجیره‌های نشاسته شوند [۳].

### ۳-۱- انواع پلاسما

به‌طور کلی پلاسما را می‌توان به پلاسما تعادلی (حرارتی) و غیرتعادلی (دمای پایین) تقسیم‌بندی کرد. اگر گازی برای دستیابی به یونیزاسیون، به اندازه کافی در دمای بالا (معمولاً به میزان ۲۰۰۰۰ کلوین) گرم شود از آن به عنوان پلاسما حرارتی یاد می‌شود. در پلاسما حرارتی، همه گونه‌های شیمیایی تشکیل‌دهنده، الکترون‌ها، یون‌ها در تعادل دمایی ترمودینامیکی هستند. پلاسما دمای پایین را می‌توان به دو شاخه پلاسما شبه تعادلی (به‌طور معمول ۱۵۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و پلاسما غیر تعادلی (<۶۰ درجه سانتی‌گراد) طبقه‌بندی نمود. در نوع اول تعادل ترمودینامیکی موضعی در بین گونه‌ها وجود دارد، در حالی که در نوع دوم، خنک‌سازی یون‌ها و مولکول‌های بدون بار موثرتر از انتقال انرژی از الکترون‌ها است و گاز در دمای پایین باقی می‌ماند. به همین دلیل به پلاسما غیرتعادلی، پلاسما سرد نیز گفته می‌شود. به‌طور معمول پلاسماهای غیر تعادلی از تخلیه الکتریکی در گازها حاصل می‌شوند [۵].

### ۳-۲- دستگاه‌های تولیدکننده پلاسما سرد

دستگاه‌های مختلف پلاسما که برای تولید پلاسما سرد استفاده می‌شوند شامل: تخلیه سد دی‌الکتریک<sup>۲</sup>، تخلیه تابش کرونا<sup>۳</sup>، فرکانس رادیویی<sup>۴</sup>، تخلیه تابش اتمسفری<sup>۵</sup>، پلاسما

به هم پیوسته القایی<sup>۶</sup>، پلاسما ناشی از میکروویو<sup>۷</sup> و تخلیه قوس گلایدینگ<sup>۸</sup> است. در میان منابع مختلف پلاسما، جت پلاسما و تخلیه سد دی‌الکتریک به دلیل ساختار ساده و کاربرد آسان، در تحقیقات صنایع غذایی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند و از نظر تجاری در دسترس هستند [۳].

### ۳-۳- روش‌های تولید پلاسما سرد

پلاسما را می‌توان با استفاده از هر نوع انرژی که بتواند گازها را یونیزه کند، از جمله الکتریکی، حرارتی، نوری (اشعه ماوراء بنفش)، رادیواکتیو (تابش گاما) و تابش الکترومغناطیسی پرتو ایکس تولید کرد. برای تولید پلاسما سرد غالباً از میدان‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. دستگاه‌های تخلیه سد دی‌الکتریک و جت پلاسما برای تولید پلاسما سرد در فراوری مواد غذایی، کاربرد فراوان دارند. دستگاه تخلیه سد دی‌الکتریک از دو الکتروود فلزی تشکیل شده است که حداقل یکی از این دو الکتروود با یک دی‌الکتریک پوشانده شده است (شکل ۲). سد دی‌الکتریک به عنوان یک ماده تثبیت‌کننده عمل می‌کند و از هر گونه انتقال قوس جلوگیری می‌کند [۶].

پلاسما سرد در فشارهای پایین نیز تولید می‌شود؛ در این سیستم از امواج الکترومغناطیسی میکروویو در فرکانس‌های بیش از صدها مگا هرتز استفاده می‌شود. در این روش امواج ماکروویو در مگنترون دستگاه تولید و به طرف محفظه فرایند هدایت می‌گردد. این امواج متعاقباً توسط گاز فرایند جذب شده و گرما تولید می‌شود که باعث واکنش‌های یونیزاسیون در اثر برخوردهای غیرالاستیک<sup>۹</sup> می‌شود (شکل ۳) [۷].

5- Atmospheric Glow Discharges

6- Inductively Coupled Plasma

7- Microwave Induced Plasma

8- Gliding Arc Discharge

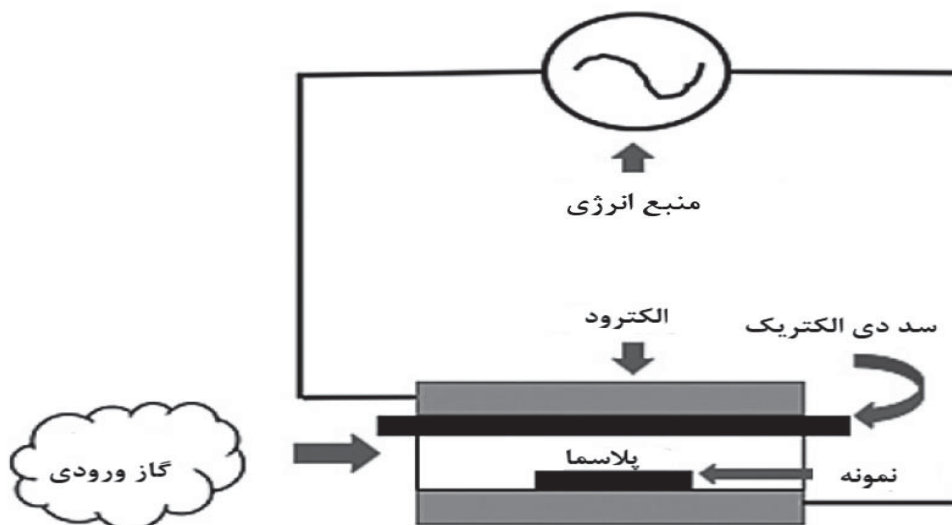
9- Inelastic Collision

1- Depolymerization

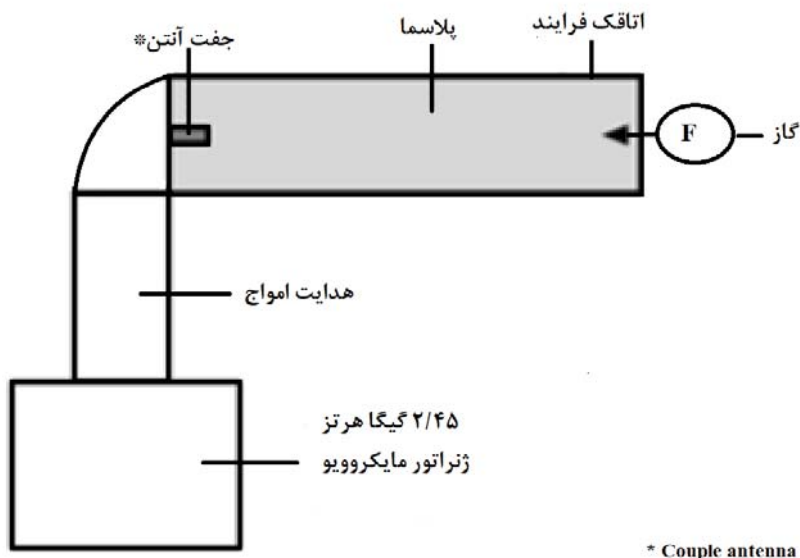
2- Dielectric Barrier Discharges (DBD)

3- Corona Glow Discharges

4- Radio Frequency



شکل ۲- روش تخلیه سد دی الکتریک [۵]



شکل ۳- تولید پلاسمای سرد توسط امواج مایکروویو [۸]

تماس با آن هستند تأثیری نمی‌گذارد، به منظور اصلاح سطوح پلیمری مورد توجه محققین این حوزه قرار گرفته است. برخی از پژوهش‌هایی که در این زمینه انجام شده است، در (جدول ۱) به آن‌ها اشاره شده است.

#### ۴- اصلاح سطح پلیمرها توسط پلاسمای سرد

پلیمرهایی نظیر پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن ترفتالات به طور کلی بیش از ۸۰ درصد پلیمرهای بسته‌بندی مواد غذایی را تشکیل می‌دهند. این پلیمرها همچنان که پیش از این اشاره شد، دارای معایبی نیز هستند [۲]. استفاده از پلاسمای سرد با توجه به این که روی مواد حساسی که در

جدول ۱- پژوهش‌های انجام شده در مورد تیمار پلاسما سرد روی پلیمرها [۲]

| مواد بسته‌بندی پلیمری           | منبع پلاسما                             | گاز مورد استفاده و شرایط تیمار  | یافته‌های کلیدی   |
|---------------------------------|---|---|---|
| فیلم پلی اتیلن با دانسیته پایین | فرکانس رادیویی (۱۳/۵۶ مگاهرتز، ۱۰۰ وات) | پلاسما آرگون (۹۰-۱۵ ثانیه، ۱۰۰-۲۵ وات، ۱۵ میلی‌لیتر بر دقیقه)             | کاهش زاویه تماس<br>کاهش تبلور<br>افزایش زبری                          |
| فیلم پلی اتیلن با دانسیته پایین | فرکانس رادیویی (۱۳/۵۶ مگاهرتز، ۱۰۰ وات) | پلاسما اکسیژن (۹۰-۱۵ ثانیه، ۱۰۰-۲۵ وات، ۱۵ میلی‌لیتر بر دقیقه)            | کاهش زاویه تماس<br>کاهش تبلور<br>افزایش زبری                          |
| فیلم پلی اتیلن با دانسیته بالا  | فرکانس رادیویی (۱۳/۵۶ مگاهرتز)          | آرگون : اکسیژن = ۹:۱ (۱۵۰ وات، ۳۰ سانتی متر مکعب بر دقیقه، فشار ۰/۰۱ تور) | کاهش زاویه تماس   |
| فیلم پلی اتیلن با دانسیته پایین | فرکانس رادیویی (۱۳/۵۶ مگاهرتز)          | پلاسما اکسیژن (۱۵۰ وات، ۰/۰۲ تور)   | کاهش زاویه تماس   |
| فیلم پلی اتیلن                  | پلاسما مایکروویو (۲۸۶۰ مگاهرتز)         | پلاسما هوا (۶۰-۱۵ ثانیه، ۱۴۰ میلی آمپر، ۰/۰۴ میلی بار)                    | کاهش زاویه تماس   |
| فیلم پلی پروپیلن                | پلاسما کرونا                            | پلاسما هوا (۳۰ کیلو هرتز، ۱/۷ ژول بر سانتی متر مربع)                      | کاهش زاویه تماس، افزایش چسبندگی جوهر                                  |
| فیلم پلی پروپیلن                | فرکانس رادیویی (۱۳/۵۶ مگاهرتز، ۱۵۰ وات) | پلاسما متان: اکسیژن (۸۰:۲۰) (۱۰۰ سانتی متر مکعب بر دقیقه، ۳۲-۳۱ پاسکال)   | کاهش زاویه تماس<br>افزایش زبری<br>افزایش وزن<br>افزایش ظرفیت اکسیژن   |
| فیلم پلی اتیلن ترفتالات         | تخلیه تابشی (۴۰۰ ولت)                   | پلاسما هوا (۰/۲ میلی بار، ۲۵-۲ دقیقه)                                     | کاهش زاویه تماس<br>افزایش زبری<br>افزایش ظرفیت اکسیژن<br>افزایش تبلور |
| فیلم پلی اتیلن ترفتالات         | پلاسما مایکروویو (۲۰۰ وات)              | پلاسما اکسیژن (۴ و ۱۵ دقیقه، ۱/۳۳ میلی بار)                               | افزایش انرژی سطح<br>افزایش زبری                                       |

#### ۱-۴- اثرات پلاسما سرد بر اصلاح سطح پلیمرها

##### ۱-۱-۴- تغییرات فیزیکی

بمباران سطح با استفاده از ذرات پرنرژتی پلاسما، مانند: الکترون‌ها، یون‌ها، رادیکال‌ها، ذرات خنثی، اتم‌ها و مولکول‌های برانگیخته با سطح است. اچینگ توسط پلاسما با دو مکانیسم فیزیکی و شیمیایی بیشتر مورد قبول است. اچینگ فیزیکی منجر به حذف یا تجمع مجدد تگه‌هایی با وزن مولکولی کم، و اچینگ شیمیایی، منجر به شکستن پیوندهای شیمیایی، برش زنجیره، اکسیداسیون یا تخریب شیمیایی مواد تیمار شده می‌شود [۱].

اصلی‌ترین تغییر فیزیکی که پس از تیمار پلاسما مشاهده می‌شود، افزایش زبری سطح و توپوگرافی<sup>۱</sup> مواد تیمار شده است. افزایش زبری سطح به دلیل اثر اچینگ<sup>۲</sup> (حکاکی) پلاسما است. این فرآیند معمولاً برای پولیش، تمیز کردن و زدودن مواد از سطوح به‌کار می‌رود. اچینگ بیشتر مربوط به

1- Topography  
2- Plasma Etching

## ۴-۱-۲- تغییرات شیمیایی

جدا از تغییرات فیزیکی مشاهده شده در سطح تیمار شده با استفاده از پلازما، به دلیل بمباران سطح با استفاده از گونه‌های واکنش‌پذیر، زنجیره پلیمری به صورت شیمیایی به همدیگر چسبانده می‌شود و اتصال ثانویه یا ترکیب شیمیایی کلی، سطح را تغییر دهند. بسیاری از اوقات گروه‌های شیمیایی جدیدی روی سطح تیمار شده ایجاد می‌شوند و تغییرات مورد نظر را ایجاد می‌کنند. تغییرات ایجاد شده در ترکیب شیمیایی سطح پس از تیمار پلازما، عمدتاً وابسته به گاز پلازما و نوع گونه‌های واکنش‌پذیر تولید شده می‌باشد. ترکیب گونه‌های واکنشی نیتروژن و اکسیژن، میزان شکل‌گیری گروه‌های عملکردی قطبی جدید مانند: هیدروکسیل<sup>۱</sup>، کربوکسیل<sup>۲</sup> و کربوکسیلات<sup>۳</sup> در سطح تیمار شده را افزایش می‌دهند [۱].

## ۴-۱-۳- زاویه تماس

تغییرات در زاویه تماس و انرژی آزاد سطح به تغییرات ایجاد شده در ترکیب شیمیایی سطح پلیمر پس از تیمار با پلازما بستگی دارد. در بیشتر موارد، افزایش قابل توجهی در انرژی آزاد سطح پلیمر تیمار شده مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش گروه‌های قطبی روی سطح پلیمر پس از تیمار پلازما باشد. پانکاج<sup>۴</sup> و همکاران طی پژوهشی کاهش زاویه تماس آب در فیلم نشاسته ذرت بعد از تیمار با پلاسمای تخلیه سد دی‌الکترونیک در ۸۰ کیلو ولت به مدت ۵ دقیقه، از ۵۴ به ۲۱ درجه را مشاهده نمودند. انرژی آزاد سطح پس از تیمار با پلازما به دلیل افزایش در اجزاء قطبی به طور قابل توجهی بالاتر بوده است. در تیمارهای کوتاه مدت نسبت به تیمارهای طولانی مدت افزایش انرژی آزاد سطح سریع‌تر اتفاق می‌افتد [۱].

## ۴-۱-۴- ساختار کریستالی

عمدتاً تیمار پلازما منجر به تخریب و بریدگی زنجیره پلیمرهای تحت تیمار می‌شود. این امر سبب تشکیل زنجیره‌هایی با دم‌های رادیکال و تحرک متفاوت می‌شود که در نتیجه منجر به بازآرایی زنجیره پلیمر و تغییر در تبلور پلیمر می‌شود [۱].

## ۴-۱-۵- خصوصیات ممانعت‌کنندگی

بیشتر مطالعات موجود در مقالات علمی نشان می‌دهند که تیمار پلازما با گازهایی مانند: هوا، اکسیژن و دی‌اکسید کربن هیچ تأثیری بر نفوذپذیری پلیمرها به بخار آب و اکسیژن ندارد و یا تأثیر کمی دارد. با این حال، مطالعاتی نیز صورت گرفت که نتیجه آن کاهش نفوذپذیری به بخار آب پس از تیمار با پلازما بود. از دیدگاه بسته‌بندی مواد غذایی، استفاده از پلاسمای سرد به طور کلاسیک در اصلاح سطح متمرکز شده است [۱].

## ۴-۱-۶- فعال‌سازی سطح

فعال‌سازی سطح و عملگر نمودن<sup>۵</sup> مواد پلیمری، مربوط به تغییرات ساختاری یا شیمیایی در لایه سطح پلیمرها به منظور تسهیل در اتصال گروه‌های کاربردی خاص روی سطح برای دستیابی به عملکرد مطلوب‌تر می‌باشد. فعال‌سازی سطح معمولاً برای تغییر یا بهبود خاصیت چسبندگی و چاپ‌پذیری بر روی سطوح اعمال می‌شود، بدین صورت که گونه‌های پلازما با گروه‌های شیمیایی در سطح پلیمر، واکنش داده و گروه‌های عملکردی جدیدی مانند هیدروکسیل (OH-)، کربونیل (CO-)، کربوکسیل (COOH-)، آمینو (NH<sub>2</sub>-)، و آمید (NHCO) ایجاد می‌کند؛ این عمل سبب تغییر سطوح پلیمری از آبگریز به آبدوست می‌شود [۱].

## ۴-۱-۷- چسبندگی

چسبندگی به تمایل سطوح مختلف، برای چسبیدن به یکدیگر به دلیل واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی بین مولکولی در مرز مشترک دو سطح اشاره دارد. تیمار

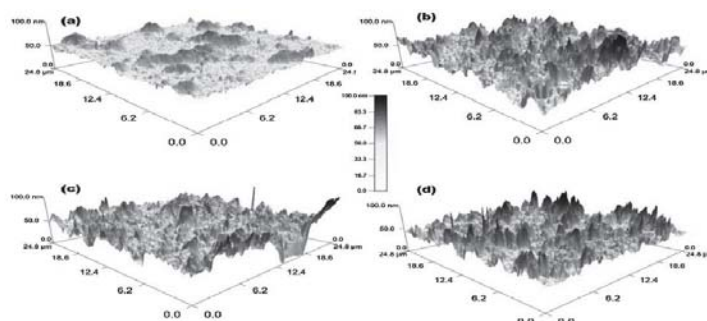
- 1- Hydroxyl
- 2- Carboxylase
- 3- Carboxylate
- 4- Pankaj

## 5- Functionalization

فصلنامه علمی علوم و فنون  
**بسته‌بندی**

پلاسمای می‌تواند برای اصلاح کل انرژی آزاد سطحی پلیمرها به منظور افزایش خاصیت چسبندگی یا ضدچسبندگی، بسته به نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۴) [۱].

دانشیه کم / پلی‌وینیلیدن کلراید / پلی‌اتیلن ترفتالات گزارش کرده‌اند [۱].



شکل ۴- افزایش زبری و توپوگرافی سطح فیلم تیمار شده توسط پلاسمای سرد [۹]

## ۵- اصلاح سطح فیلم‌ها و پوشش‌های زیست

### تخریب‌پذیر توسط پلاسمای سرد

تجمع پلاستیک‌هایی بر پایه نفت، که به طور عمده در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند، عامل یک مشکل جدی زیست محیطی می‌باشد. به همین دلیل تلاش‌های محققان به توسعه فیلم‌ها و پوشش‌های زیست تخریب‌پذیر افزایش یافته است. اما این بیوپلیمرها خصوصیات سطحی مورد نیاز در برخی از کاربردها را ندارند، از این رو از پلاسمای سرد برای اصلاح سطح بیوپلیمرها استفاده می‌کنند که به بررسی برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

پانکاج و همکاران (۲۰۱۵) طی پژوهشی فیلم‌های ژلاتین را تحت تیمار با پلاسمای سرد قرار دادند. هدف از این کار، ارزیابی سازگاری فیلم ژلاتین گاوی با فناوری جدید و آلودگی زدایی با استفاده از پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک در فشار اتمسفری بود. تیمار پلاسمای سرد باعث افزایش زبری و توپوگرافی سطح فیلم شد، همچنین با افزایش غلظت گروه‌های قطبی مانند: C=O و C-O-H باعث افزایش نسبت O/C سطح فیلم شد. این افزایش قطبیت در سطح به دلیل افزایش آبدوستی فیلم ژلاتین بود و جزء قطبی انرژی آزاد سطح را افزایش داد. تیمار پلاسمای سرد در ولتاژهای بالاتر نیز باعث افزایش ساختار

### ۴-۱-۸- چاپ

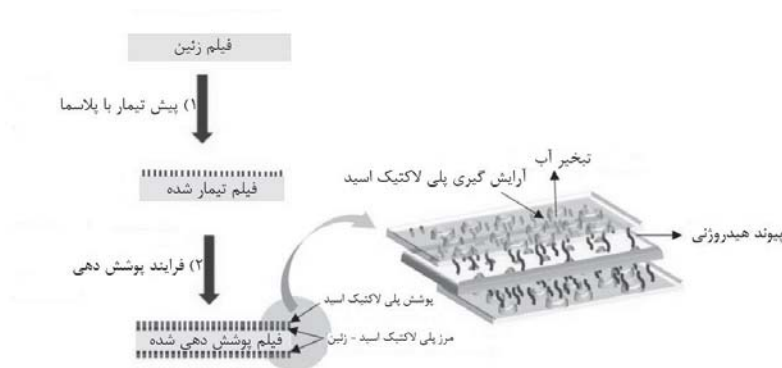
همان‌طور که قبلاً بحث شد، تیمار پلاسمای سرد می‌تواند زاویه تماس و انرژی آزاد سطح پلیمر را تغییر داده و باعث افزایش چاپ‌پذیری سطح شود [۱].

### ۴-۱-۹- استریل کردن سطح

روش‌های استریلیزاسیون<sup>۱</sup> مرسوم مانند گرمای خشک، بخار داغ، اشعه ماوراء بنفش و مواد شیمیایی مانند اکسید اتیلن و هیدروژن پراکسید، به طور سنتی در استریلیزاسیون ابزارهای پزشکی و مواد بسته‌بندی صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تیمار با پلاسمای سرد به عنوان جایگزینی برای فرآیندهای معمول استریلیزاسیون سطوح، پتانسیل زیادی از خود نشان داده است. پلاسمای سرد می‌تواند برای استریل کردن طیف وسیعی از مواد بسته‌بندی، بدون هیچ گونه خطری برای سلامتی و محیط زیست استفاده شود. محققان استفاده از تیمار پلاسمای را برای استریل کردن مواد بسته‌بندی مختلف مانند فویل‌های پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌استایرن و بسته‌بندی‌های چند لایه بر پایه پلی‌اتیلن با

### 1- Sterility

خصوصیات فیلم‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که پیش تیمار پلاسمای سرد سازگاری و چسبندگی بین لایه‌های زئین و پلی‌لاکتیک اسید را افزایش می‌دهد. همچنین ارزیابی توسط طیف‌سنجی فروسرخ نشان داد که پیش تیمار پلاسمای سرد باعث تغییر در ترکیب پروتئین و افزایش پیوندهای هیدروژنی بین زئین و پلی‌لاکتیک اسید می‌شود. قرار گرفتن زئین در برابر پلاسمای سرد به مدت ۶۰ ثانیه قبل از پوشش‌دهی با پلی‌لاکتیک اسید، آبرگریزی سطح را  $24/11\%$ ، مقاومت کششی  $50/47\%$ ، ازدیاد طول تا نقطه شکست  $29/67\%$  و ممانعت در برابر بخار آب را تا  $44/34\%$  در مقایسه با فیلم زئین تیمار نشده افزایش می‌دهد. علاوه بر این، فیلم‌های پوششی اصلاح شده مانعی قوی در برابر اشعه فرابنفش بوده و زیست تخریب‌پذیری بسیار خوبی را نشان می‌دهند (شکل ۵) [۱۰].



شکل ۵- فرایند دو مرحله‌ای تولید فیلم زئین پوشش‌دهی شده با پلی‌لاکتیک اسید متخلخل [۱۱]

پانکاج و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک را بر روی سطح، خواص ساختاری، حرارتی و جذب رطوبت فیلم‌های خوراکی زئین مورد بررسی قرار دادند. تیمار پلاسما باعث افزایش زبری سطح و تعادل رطوبتی فیلم زئین گردیده و با سطح ولتاژ به کار رفته رابطه مستقیم دارد. همچنین اختلاف معنی‌داری در پایداری حرارتی فیلم زئین پس از تیمار پلاسما مشاهده نشده است. تیمار پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک فیلم زئین منجر به تغییر در ساختار پروتئین می‌شود که با

ماریچ سوم<sup>۱</sup> فیلم‌های ژلاتین شد. با این حال، هیچ تغییر قابل توجهی در خصوصیات ممانعت‌کنندگی فیلم مانند: نفوذپذیری به اکسیژن و بخار آب مشاهده نشد [۸].  
ین وو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹) طی پژوهشی تأثیرات جت پلاسما فشار اتمسفری را بر خصوصیات مختلف فیزیکوشیمیایی نشاسته ذرت پس از تیمار با جت پلاسما (۳۰ دقیقه) در توان‌های مختلف (۴۰۰ وات - ۸۰۰ وات) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که پس از تیمار با پلاسما، با افزایش شدت پلاسما، کاهش قابل توجهی در خواص چسبندگی، ویسکوزیته<sup>۳</sup> نهایی و برگشت به عقب نمونه‌های نشاسته (به ترتیب تا  $87/1\%$ ،  $92/0\%$  و  $93/3\%$  مشاهده می‌شود. ظاهراً، جت پلاسما می‌تواند حلالیت و شفافیت خمیر نمونه‌های نشاسته را افزایش دهد. اصلاحات در خصوصیات فیزیکوشیمیایی نشاسته ذرت با استفاده از روش جت پلاسما ممکن است در کاربردهای غذایی که

نیازمند ویسکوزیته پایین و شفافیت زیاد خمیر حاصل از مواد تشکیل دهنده نشاسته است، مفید باشد [۹].

چن و همکاران (۲۰۲۰) یک راهبرد دو مرحله‌ای برای ایجاد پوشش پلی‌لاکتیک اسید متخلخل بر روی فیلم‌های زئین با هدف بهبود عملکرد آن مورد مطالعه قرار دادند، در این پژوهش اثر پیش تیمار پلاسمای سرد بر ساختار و

- 1- Triple Helical Structure
- 2- Wu T-Y and etal
- 3- Viscosity



استفاده از پراش پرتو X و طیف‌سنجی فروسرخ تأیید می‌شود [۱۱].

سونگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) اثرات تیمار پلاسمای سرد بر خواص فیزیکی و شیمیایی و زیست تخریب‌پذیری فیلم‌های پلی‌لاکتیک اسید را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه فیلم‌های پلی‌لاکتیک اسید، به مدت ۴۰ دقیقه با توان ۹۰۰ وات و فشار ۶۶۷ پاسکال در معرض پلاسمای سرد با گاز ورودی اکسیژن قرار گرفتند. خصوصیات حرارتی، مکانیکی، کششی، نوری، مورفولوژی<sup>۲</sup> سطح، قابلیت چاپ‌پذیری، زاویه تماس آب، ساختار شیمیایی، تغییرات وزن و قابلیت زیست تخریب‌پذیری فیلم‌ها در مدت زمان نگهداری تا ۵۶ روز مورد بررسی قرار گرفت. خواص کششی و نوری فیلم‌های پلی‌لاکتیک اسید تحت تأثیر پلاسمای سرد قرار نگرفت. در حالی که زبری سطح و زاویه تماس آب در فیلم‌های پلی‌لاکتیک اسید توسط تیمار پلاسمای سرد افزایش یافته و در طی نگهداری به مدت ۵۶ روز افزایش بیشتری می‌یابد. قابلیت چاپ‌پذیری فیلم‌های پلی‌لاکتیک اسید تیمار شده با پلاسمای سرد افزایش یافته و در تمام مدت نگهداری ثابت مانده است. آب‌دوستی ناشی از پلاسمای سرد نیز در طول دوره نگهداری پایدار می‌ماند. فیلم‌های پلی‌لاکتیک اسید پس از تیمار پلاسمای سرد ۱/۹٪ از وزن خود را از دست دادند، اما پس از ۱۴ روز نگهداری ۹۹/۵٪ این وزن از دست رفته را باز یافتند. تجزیه نوری، خواص حرارتی و میکروبی فیلم‌ها به طور قابل توجهی توسط پلاسمای سرد بهبود یافت ( $P < 0/0$ ) [۱۲].

گیون‌چن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹) آزمایشی به منظور افزایش ویژگی‌های عملکردی و اصلاح فیلم‌های زئین با روش دو مرحله‌ای از ترکیب با کیتوزان و به دنبال آن قرار گرفتن در معرض پلاسمای سرد، انجام دادند. پس از اصلاح دو مرحله‌ای، زاویه تماس آب در فیلم‌های زئین به طور قابل توجهی از ۷۵/۱۸ درجه به ۲۹/۱۹ درجه کاهش پیدا کرد. علاوه بر این، فیلم‌ها افزایش قابل توجهی هنگام ازدیاد طول

در نقطه پاره شدن، از ۱/۱۳٪ به ۴/۱۳٪ نشان دادند، که عمدتاً به حضور کیتوزان نسبت داده شد. علاوه بر این، فیلم کامپوزیت پس از تیمار پلاسمای ۶۰ ثانیه‌ای، مقاومت کششی مطلوب، افزایش ممانعت در برابر نفوذ بخار آب و همچنین بهبود پایداری حرارتی را نشان داد [۱۳].

رومانی و همکاران (۲۰۱۹) مطالعه‌ای با هدف کاهش حساسیت فیلم‌های پروتئینی ماهی به آب از طریق استفاده از پلاسمای تخلیه تابشی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که توان و زمان قرار گرفتن در معرض پلاسمای مهم‌ترین شاخص‌ها در این تحقیق بودند. همچنین کاهش نفوذ پذیری به بخار آب و حلالیت که از ویژگی‌های مهم ماده مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی می‌باشد در بعضی از تیمارها مشاهده شد [۱۴].

#### ۶- تأثیر پلاسمای سرد بر خصوصیات نشاسته

تغییر در خواص نشاسته عمدتاً به دلیل دیپلمریزاسیون<sup>۴</sup> و اتصالات عرضی زنجیره‌های جانبی آمیلوزه و آمیلوپکتین<sup>۵</sup> می‌باشد. پس از تیمار پلاسمای کاهش در وزن مولکولی، ویسکوزیته و دمای ژلاتینه شدن مشاهده می‌شود. اچینگ با استفاده از پلاسمای، انرژی سطح و آب دوستی گرانول‌های نشاسته را افزایش می‌دهد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پلاسمای سرد یک فناوری جایگزین برای اصلاح خواص نشاسته است [۳].

#### ۶-۱- مکانیسم اصلاح نشاسته توسط پلاسمای سرد

پلاسمای سرد به روش‌هایی از قبیل اتصالات عرضی، دیپلمریزاسیون و اچینگ پلاسمای، می‌تواند نشاسته را اصلاح کند [۱۵]. بررسی‌هایی که درباره خواص نشاسته‌های تحت تیمار با پلاسمای سرد انجام داده‌اند، به این نتیجه رسیده‌اند که تأثیر پلاسمای سرد بر نشاسته‌ها به نوع گاز ورودی، ولتاژ به کار رفته و زمان تیمار بستگی دارد [۳].

4- Depolymerization

5- Amylose

6- Amylopectin

1- Song

2- Morphology

3- Chen G



- jet. Food chemistry.” 2019;283:46-51.
10. Chen G, Chen Y, Jin N, Li J, Dong S, Li S, et al. (2020). “**Zein films with porous polylactic acid coatings via cold plasma pre-treatment.**” Industrial Crops and Products. 2020;150:112382.
  11. Pankaj SK, Bueno- Ferrer C, Misra N ,Bourke P, Cullen P. (2014). “**Zein film: Effects of dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma.**” Journal of Applied Polymer Science. 2014;131(18).
  12. Song AY, Oh YA, Roh SH, Kim JH, Min SC. (2016). “**Cold oxygen plasma treatments for the improvement of the physicochemical and biodegradable properties of polylactic acid films for food packaging.**” Journal of food science. 2016;81(1):E86-E96.
  13. Chen G, Dong S, Zhao S, Li S, Chen Y. (2019). “**Improving functional properties of zein film via compositing with chitosan and cold plasma treatment.**” Industrial Crops and Products. 2019;129:318-26.
  14. Romani VP, Olsen B, Collares MP, Oliveira JRM, Prentice C, Martins VG. (2019). “**Plasma technology as a tool to decrease the sensitivity to water of fish protein films for food packaging.**” Food Hydrocolloids. 2019;94:210-6.
  15. Thirumdas R, Trimukhe A, Deshmukh R, Annapure U. (2017). “**Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch.**” Carbohydrate polymers. 2017;157:1723-31.
  1. Pankaj S, Thomas S. (2016). “**Cold plasma applications in food packaging.**” Cold Plasma in Food and Agriculture: Elsevier; p. 293-307.
  2. Pankaj SK, Bueno-Ferrer C, Misra N, Milosavljević V, O'donnell C, Bourke P, et al. ((2014). “**Applications of cold plasma technology in food packaging.**” Trends in Food Science & Technology. 35(1):5-17.
  3. Thirumdas R, Kadam D, Annapure U. (2017). “**Cold plasma: an alternative technology for the starch modification.**” Food Biophysics. 2017;12(1):129-39.
  4. Liao X, Liu D, Xiang Q, Ahn J, Chen S, Ye X, et al. (2017). “**Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review.**” Food Control. 2017;75:83-91.
  5. Misra N, Schlüter O, Cullen P. (2016). “**Plasma in food and agriculture.**” Cold plasma in food and agriculture: Elsevier; p. 1-16.
  6. Pankaj SK, Wan Z, Keener KM.( 2018). “**Effects of cold plasma on food quality: A review.**” Foods. 7(1):4.
  7. Ekezie F-GC, Sun D-W, Cheng J-H. (2017). “**A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends.**” Trends in Food Science & Technology. 2017;69:46-58.
  8. Pankaj S, Bueno-Ferrer C, Misra N, O'neill L, Tiwari B, Bourke P, et al. (2015). “**Characterization of dielectric barrier discharge atmospheric air cold plasma treated gelatin films.**” Food packaging and shelf life. 2015;6:61-7.
  9. Wu T-Y, Chang C-R, Chang T-J, Chang Y-J, Liew Y, Chau C-F. (2019). “**Changes in physicochemical properties of corn starch upon modifications by atmospheric pressure plasma**

آدرس نویسنده:

زنجان- کیلومتر ۵ جاده قدیم تبریز- دانشگاه

زنجان، دانشکده کشاورزی- گروه علوم و

مهندسی صنایع غذایی