

طراحی بسته‌بندی فعال مواد غذایی حاوی سنسورهای هالوکرومیک به کمک نانوالیاف حاصل از روش الکتروهایدرودینامیک

الهام آل‌حسینی^۱، سید مهدی جعفری^{۲*}

تاریخ دریافت مقاله: تیرماه ۱۳۹۸

تاریخ پذیرش مقاله: آبان ماه ۱۳۹۸

چکیده

با پیشرفت دانش و فناوری، صنعت بسته‌بندی مواد غذایی در حال تکامل است. فرآیند الکتروروسی روشی کاربردی، ساده و ارزان است و به عنوان یکی از بهترین روش‌های تولید الیاف (در محدوده نانومتر تا میکرومتر) کاربرد گسترده‌ای پیدا نموده است. اصول این فرآیند بر پایه، اعمال میدان الکتریکی بالا بر یک محلول پلیمری، ایجاد جت الکترواستاتیکی و در نهایت شکل‌گیری الیاف روی صفحه جمع‌کننده استوار است. با توجه به ویژگی‌هایی همچون تخلخل و سطح مخصوص بالا نانوالیاف الکتروروسی شده، می‌توان از پوشش‌های تولید شده با این روش، در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی استفاده نمود. به کارگیری نانوالیاف در بسته‌بندی‌های مواد غذایی، به علت افزایش ویژگی‌های محافظتی بسته‌بندی، موجب افزایش طول عمر و حفظ کیفیت ماده غذایی درون بسته‌بندی می‌شود. همچنین با استفاده از روش الکتروروسی می‌توان حسگرهای حساس به pH را تولید و در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده نمود که به مصرف‌کننده در ارزیابی سریع تازگی محصولات کمک خواهد کرد. با توجه به اینکه امروزه فناوری تولید نانوالیاف از استقبال فراوانی برخوردار است، لذا در این مطالعه، به معرفی فرآیند الکتروروسی، عوامل مؤثر بر قطر نانوالیاف و کاربردهای استفاده از این نانوالیاف در بسته‌بندی مواد غذایی پرداخته می‌شود.

۱- مقدمه

بسته‌بندی مواد غذایی نقش کلیدی و مهمی در کیفیت، بهداشت، افزایش عمر مفید، حمل‌ونقل و فروش محصول تولیدی دارد. در عصر حاضر فناوری نانو به عنوان رویکردی نوین در عرصه تولید نانوالیاف، منشأ دستیابی به پیشرفت و تحولات گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله پزشکی، آرایشی، صنایع بسته‌بندی، صنایع غذایی، پوشاک و ... شده است [۱].

واژه‌های کلیدی

الکتروروسی^۳، بسته‌بندی فعال مواد غذایی، نانوالیاف، نانوسنسور

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران (Elham.alehosseini@gmail.com).

۲- استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

(x نویسنده مسئول: smjafari@gau.ac.ir)

3- Electrospinning Process



داشته باشد [۹۸]. همچنین استفاده از نانوسنسورها در بسته‌بندی مواد غذایی، می‌تواند به شناسایی برخی از ترکیبات شیمیایی، سموم و پاتوژن‌ها در مواد غذایی کمک نموده و با وجود آن‌ها در بسته‌ها، دیگر نیازی به درج تاریخ انقضاء روی بسته‌بندی مواد غذایی نمی‌باشد. یکی از روش‌های سریع برای ارزیابی زمان واقعی تازگی مواد غذایی، استفاده از حسگرهای دارای مواد هالوکرومیک^۷ در بسته‌بندی آن‌ها می‌باشد. حسگرهای هالوکرومیک، دارای ترکیباتی هستند که با تغییر pH، دچار تغییر رنگ می‌شوند [۱۰]. نانوحسگرهای تولید شده به روش الکتروریسی به عنوان یک بارکد شیمیایی در بسته‌بندی مواد غذایی قرار گرفته و نسبت به وجود متابولیت‌هایی که در اثر فساد مواد غذایی تولید می‌شوند، حساس بوده و در اثر واکنش با آن‌ها، رنگ بسته‌بندی تغییر می‌کند و به مصرف‌کننده هشدار پرهیز از مصرف آن فرآورده را می‌دهد [۱۱، ۱۲].

با توجه به اهمیت ترکیب بسته‌بندی در کیفیت نهایی مواد غذایی، لذا در این مطالعه، به معرفی فرآیند الکتروریسی، عوامل مؤثر بر قطر نانوالیاف و کاربردهای استفاده از این نانوالیاف در بسته‌بندی‌های مواد غذایی پرداخته می‌شود.

۲- الکتروریسی

فرآیند الکتروریسی در سال ۱۹۳۴ توسط فرمهالس^۸ معرفی شد [۱۳]. به طور کلی یک سامانه الکتروریسی از یک سرنگ جهت نگه داشتن محلول پلیمری، پمپ سرنگ، منبع با ولتاژ بالا و صفحه جمع‌کننده تشکیل شده است (شکل ۱) [۱۴].

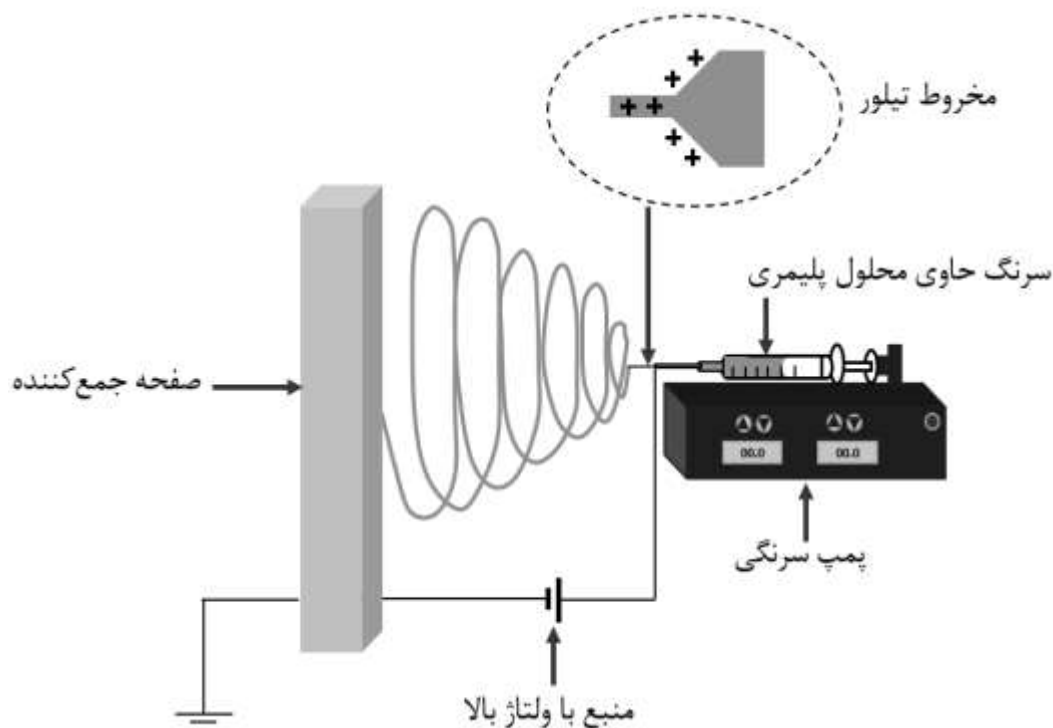
فرآیند الکتروهدرودینامیک^۱ روشی به منظور ریزپوشانی ترکیبات فعال زیستی بوده و شامل دو فرآیند الکتروپاشش^۲ و الکتروریسی می‌باشد. با توجه به برخی از شاخص‌های مؤثر همچون غلظت محلول پلیمری و رفتار رئولوژیکی آن، در صورتی که محلول پلیمری به ذرات منفرد شکسته شوند، فرآیند مذکور الکتروپاشش نامیده می‌شود و محصول نهایی آن ساختارهای کپسول مانند می‌باشد. همچنین در صورتی که در حین انتقال محلول پلیمری، جت سیال پیوستگی و انسجام خود را حفظ نماید، فرآیند مذکور الکتروریسی نامیده شده و محصول نهایی آن الیاف می‌باشد [۲].

هنگامی که قطر الیاف پلیمری از میکرومتر به نانومتر کاهش می‌یابد، نسبت سطح به حجم الیاف افزایش یافته و ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی عالی مانند استحکام کششی، محافظتی و قابلیت انعطاف‌پذیری در گروه‌های عاملی سطحی در آن‌ها پدیدار می‌شود [۳]. در بین روش‌های رایج تولید نانوالیاف (کشش^۳، سنتز قالبی^۴، جداسازی فازی^۵، خودآرایی^۶ و الکتروریسی)، الکتروریسی مزایای زیادی از قبیل سهولت تولید، امکان صنعتی شدن، قابلیت کنترل ابعاد نانوالیاف و تکرارپذیری را دارد [۴]. اصول کلی حاکم بر فرآیند الکتروریسی، اعمال میدان الکتریکی بالا بر یک محلول پلیمری و ایجاد جت الکترواستاتیکی و در نهایت شکل‌گیری نانوالیاف روی صفحه جمع‌کننده استوار است. قطر نانوالیاف تولیدی با استفاده از روش الکتروریسی با متغیرهای مختلفی مانند ویسکوزیته محلول پلیمری، ولتاژ، شدت جریان حجمی و ... قابل کنترل است [۵-۷].

استفاده از نانوالیاف تولید شده به روش الکتروریسی در بسته‌بندی مواد غذایی می‌تواند موجب بهبود بسته‌بندی مواد غذایی و قابلیت‌های آن‌ها شود و در نتیجه، حصول اطمینان از ایمنی مواد غذایی و حمایت از مصرف‌کننده را به دنبال

- 1- Electrohydrodynamic Process
- 2- Electrospray Process
- 3- Drawing
- 4- Template Synthesis
- 5- Phase Separation
- 6- Self-Assembly

7- Halochromic
8- Formulas



شکل ۱- شماتیکی از دستگاه الکتروسی و تشکیل نانوالیاف

برای تولید نانوالیاف با روش الکتروسی، ابتدا یک محلول از پلیمرهای طبیعی (کیتوزان^۱، کلاژن^۲ و ...) و یا پلیمرهای مصنوعی (پلی‌لاکتیک اسید^۳، پلی‌کاپرولاکتون^۴ و ...) تهیه می‌شود. سپس با اعمال نیرو به پیستون سرنج حاوی محلول پلیمری، سیال با شدت جریان حجمی مشخص (معمولاً ۰/۱ تا ۵ میلی‌لیتر بر ساعت) پمپ شده و قطره‌ای در نوک سوزن تشکیل می‌شود. سوزن از جنس فلز بوده و هادی جریان الکتریکی می‌باشد و به یک منبع با ولتاژ بالا (معمولاً ۵ تا ۳۰ کیلوولت) متصل است که می‌تواند جریان الکتریکی را به قطره پلیمری انتقال دهد. بارهای همنام روی سطح قطره تجمع پیدا کرده و یکدیگر را دفع می‌نمایند. هنگامی که میدان الکتریکی بر نیروی کشش سطحی قطره پلیمری غلبه نماید، قطره کشیده شده و مخروط تیلور شکل می‌گیرد [۱۵، ۱۶]. افزایش ولتاژ اعمالی منجر به ازدیاد طول

مخروط می‌شود که بعد از عبور از ولتاژ آستانه، جت ریسندگی بیرون می‌آید. صفحه جمع‌کننده که معمولاً در فاصله ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متری از نوک سوزن قرار دارد، به زمین و یا ولتاژ مخالف با ولتاژ سوزن متصل است. ایجاد میدان الکترواستاتیک قوی بین سوزن و صفحه جمع‌کننده باعث ایجاد یک جریان پیوسته از محلول موسوم به جت از مخروط تیلور شده و به سمت صفحه جمع‌کننده پرتاب می‌شود تا بار الکتریکی را تخلیه نماید [۲، ۱۷، ۱۸].

یک محلول پلیمری با وزن مولکولی بالاتر نسبت به محلول پلیمری با وزن مولکولی پایین‌تر، ویسکوزیته بیشتری خواهد داشت [۱۹]. در ویسکوزیته بالا، درگیری بین زنجیره‌های پلیمری در محلول بیشتر می‌شود و بارهای الکتریکی که روی جریان شتاب‌دار محلول الکتروسی سوار هستند، می‌توانند محلول پلیمری را به طور کامل بکشند. با کاهش ویسکوزیته، کشش سطحی با تأثیر روی طول جریان شتاب‌دار محلول الکتروسی، باعث تشکیل مهره در الیاف می‌شود [۲۰]. مورفولوژی الیاف تولیدی

- 1- Chitosan
- 2- Collagen
- 3- Polylacticacid (PLA)
- 4- Polycaprolactone (PCL)

مولکول‌های پلیمری و به دنبال آن افزایش دما، نیروهای کولمب کشش بیشتری را بر مولکول‌های محلول پلیمری اعمال می‌کنند [۲۴]. رطوبت محیط نیز روی مورفولوژی الیاف تولیدی و همچنین سرعت تبخیر حلال تأثیرگذار است. یک حلال فرار ممکن است با سرعت زیاد در رطوبت محیطی بسیار پایین تبخیر شود [۴]. معمولاً فرآیند الکتروریسی در فشارهای بسیار کم محیطی، به دلیل تخلیه مستقیم بارهای الکتریکی بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده انجام نمی‌شود. در فشارهای پایین‌تر از فشار اتمسفر، محلول پلیمری درون سرنگ تمایل بیشتری برای بیرون رانده شدن از نوک سوزن داشته و موجب ایجاد یک جریان ناپایدار محلول شتاب‌دار می‌شود [۴]. با توجه به موارد ذکر شده، پیدا نمودن یک نقطه بهینه به منظور انجام فرآیند الکتروریسی موفق که قادر به تولید الیافی با قطری قابل قبول باشد، کاملاً ضروری به نظر می‌رسد.

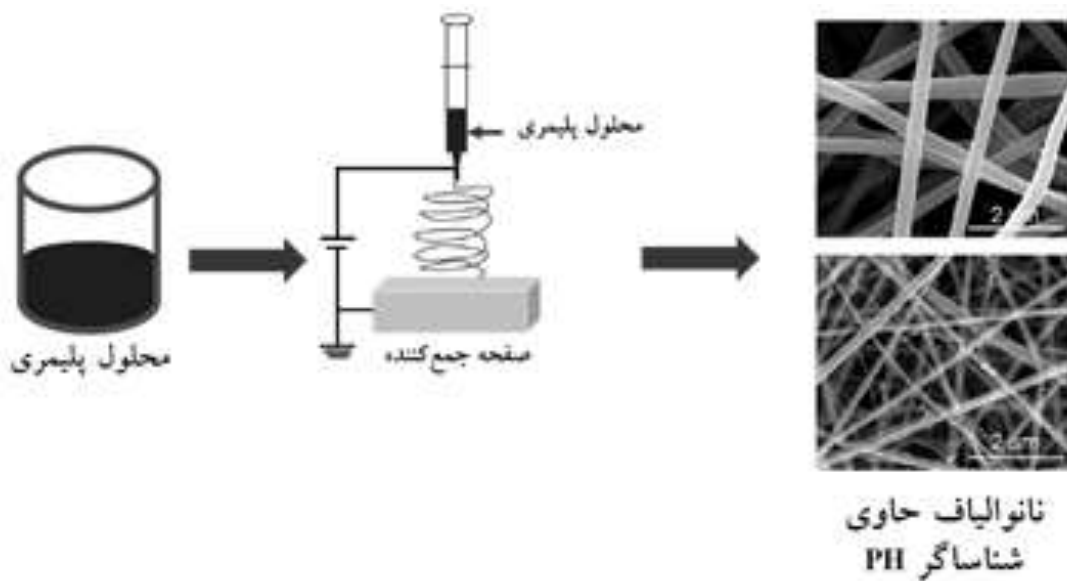
۳- کاربرد الکتروریسی و نانوالیاف در بسته‌بندی‌های فعال مواد غذایی

مواد بسته‌بندی جدید دارای قابلیت‌هایی همچون فعالیت ضد میکروبی، عملکرد هوشمند، قابلیت تجزیه زیستی و ... هستند [۲۵، ۲۶]. مواد فعال مانند عصاره‌های گیاهی، متابولیت‌های ثانویه و ... که دارای ویژگی‌های ضد میکروبی، ضد اکسیدانی و ... می‌باشند را می‌توان در داخل ماتریس نانوالیاف تولیدی به روش الکتروریسی وارد نموده و در نهایت یک سامانه بسته‌بندی فعال ایجاد نمود (شکل ۲) [۲۷ و ۵۴].

ارتباط مستقیمی با حلال مورد استفاده دارد و یک محلول با خاصیت دی‌الکتریک بزرگتر، موجب شکل‌گیری مهره‌ها و الیافی با قطر کمتر می‌شود [۳]. برای انجام فرآیند الکتروریسی، محلول پلیمری باید دارای هدایت الکتریکی حداقلی باشد و محلول‌های پلیمری با هدایت الکتریکی صفر نمی‌توانند الکتروریسی شوند. هنگامی که پلیمر در حلال حل می‌شود، هدایت محلول پلیمری به علت دسترسی به اجزاء یونی موجود در پلیمر افزایش می‌یابد [۳، ۱۷]. همچنین وقتی غلظت مولکول‌های آزاد حلال، در یک جت محلول افزایش می‌یابد، مولکول‌های محلول پلیمری تمایل بیشتری به جمع شدن دور هم را داشته و یک شکل کروی را به وجود می‌آورند [۱۵].

یکی از عوامل مهم دستگاهی تأثیرگذار روی فرآیند الکتروریسی، ولتاژ بالای اعمال شده به محلول پلیمری می‌باشد. در یک فاصله ثابت (فاصله نوک سوزن تا صفحه جمع‌کننده) با افزایش ولتاژ، میانگین قطر الیاف به دلیل افزایش نیروی الکترواستاتیکی و اعمال نیروی بیشتر روی قطره‌های پرتاب شده، کاهش می‌یابد؛ اما پس از مدتی با کاهش زمان پرواز و اعمال نیروهای وارد شده جهت کشیده شدن جت در یک فاصله ثابت، پس از یک نقطه مشخص، میانگین قطر الیاف تولیدی افزایش می‌یابد [۲۱]. قطر الیاف در یک ولتاژ ثابت با افزایش فاصله بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده کاهش می‌یابد، البته در تحقیقاتی نیز عکس این مورد مشاهده شده است [۱۷، ۲۱]. زمانی که ولتاژ و فاصله بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده ثابت در نظر گرفته می‌شود، با کاهش قطر داخلی سوزن، میانگین قطر الیاف تولیدی کاهش می‌یابد [۲۲]. همچنین با افزایش شدت جریان حجمی محلول پلیمری، اندازه مهره‌ها و یا قطر الیاف تولیدی افزایش می‌یابد [۲۳].

سرعت تبخیر و ویسکوزیته محلول پلیمری تحت تأثیر دمای محلول قرار می‌گیرد. با بالا رفتن قابلیت حرکت



شکل ۲- نمونه‌ای از نانوالیاف الکترورسی شده



شکل ۳- دستگاه الکترورسی صنعتی

زئین^۱ نیز به عنوان یک ماده ساختاری به دلیل ویژگی‌های تولید فیلم در مصارف بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۰-۳۲]. نتایج مطالعه یائو^۲ و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که با افزودن ماده ایجادکننده اتصال عرضی هگزا متیلن دی ایزوسیانات^۳ می‌توان قدرت

قابلیت تشکیل فیلم و خاصیت ضد میکروبی کیتوزان، موجب استفاده از این بیوپلیمر طبیعی در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی شده است و می‌توان نانوالیاف آن را با استفاده از روش الکترورسی تولید نمود [۲۸، ۲۹]. شکل (۳) نمونه‌ای از دستگاه الکترورسی صنعتی را نشان می‌دهد.

- 1- Zein
- 2- Yao
- 3- Isocyanide

فعالیت ضدباکتریایی در مقابل استافیلوکوکوس اپیدرمیدیس^۷ می‌شود [۴۰].

در مطالعه دیگری، مسچرونی^۸ و همکاران (۲۰۱۳) بیان نمودند که ترکیبات آروماتیک^۹ ریزپوشانی شده در نانوالیاف پولولان^{۱۰} و بتاسیکلودکسترین^{۱۱} در رطوبت نسبی محیط و دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد پایدار هستند و استفاده از این نانوالیاف در بسته‌بندی‌های فعال مواد غذایی می‌تواند مانع از دست رفتن عطر مواد غذایی شود [۴۱]. واحد^{۱۲} و همکاران (۱۳۹۰) نانوالیافی شامل دی‌اکسیدتیتانیوم^{۱۳} (به عنوان ماده ضدباکتریایی) و پلیمر سلولز استات و حلال‌های استون و دی‌متیل‌استامید را با استفاده از روش الکترورسی تولید نمودند و آزمون‌های میکروبی را جهت بررسی رشد اشرشیا کلی^{۱۴} روی نانوالیاف انجام دادند [۴۲].

دیز پاسکوال و دیز ویسنت^{۱۵} (۲۰۱۵) فیلم‌های ضدباکتریایی پلی‌بوتیلن‌آدیپات‌کوتری‌فتالات^{۱۶} حاوی مقادیر مختلفی از نانوالیاف کیتوزان تولید نمودند. افزودن نانوالیاف کیتوزان به این پلیمر، شکنندگی و نفوذپذیری به اکسیژن و بخار آب را کاهش داد. همچنین این فیلم در مقابل پاتوژن‌های غذایی مانند سالمونلا اینتریتیدیس^{۱۷}، اشرشیاکلی، استافیلوکوکوس اورئوس و باسیلوس سوبتیلیس^{۱۸} از خود فعالیت ضد میکروبی نشان داد [۴۳].

نتایج آمانا^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که استفاده از روغن زیتون در نانوالیاف پلی‌اورتان قادر به مهار رشد پاتوژن‌هایی همچون استافیلوکوکوس اورئوس^{۲۰} و

کششی بافت حاصل از نانوالیاف زئین الکترورسی شده را افزایش داد [۳۳]. همچنین نئو^۱ و همکاران (۲۰۱۳) بیان نمودند که اسید گالیک پس از قرارگیری در درون الیاف الکترورسی شده زئین با قطرهای ۳۲۷ تا ۳۸۷ نانومتر، فعالیت ضداکسیدانی خود را به خوبی حفظ می‌کند [۳۴]. با توجه به مزایای نانوالیاف سلولزی همچون افزایش مدت ماندگاری ماده غذایی، بهبود کیفیت محصول و همچنین عمل نمودن به عنوان حامل مواد فعال مانند ضداکسیدان‌ها و مواد ضد میکروبی می‌توان از فیلم‌های مرکب بر پایه این نانوالیاف در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده نمود [۳۵].

علاوه بر این، برای بهبود خواص مکانیکی و حرارتی فیلم‌هایی بر پایه پلیمرهای طبیعی می‌توان از پلیمرهایی مانند پلی‌کاپرولاکتون^۲، پلی‌لاکتیک اسید، پلی‌وینیل‌الکل، پلی‌اتیلن‌اکساید و ... استفاده نمود [۲۶، ۳۶، ۳۷]. تسوسومی و هارا^۳ (۲۰۰۸) بیان کردند که الیاف پلی‌وینیل‌الکل در ماتریس پلی‌استایرن قادر به تولید فیلمی با خواص مکانیکی بسیار خوب است [۳۸]. کیاسی و یویر^۴ (۲۰۱۲) نانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل (با قطری حدود ۲۰۰ نانومتر) حاوی وانیلین و کمپلکس سیکلودکسترین^۵ (آلفا، بتا و گاما) را تولید نمودند. نتایج نشان داد که در نانوالیاف فاقد سیکلودکسترین ۸۱ درصد وانیلین بعد از ۸ روز از بین رفت. در حالی که با به کارگیری آلفا، بتا و گاما سیکلودکسترین در نانوالیاف به ترتیب تنها ۶۰ درصد، ۶۶ درصد و ۲۰ درصد وانیلین از بین می‌رود. همچنین آن‌ها بیان نمودند که این نانوالیاف به علت خاصیت ضد میکروبی و زیست تخریب‌پذیری دارای چشم انداز خوبی برای استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی است [۳۹].

وانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که الیاف تولید شده به روش الکترورسی از ایزوله پروتئین سویا و پلی‌اتیلن‌اکساید حاوی عصاره تمشک منجر به افزایش

- 7- Staphylococcus Epidermidis
- 8- Mascheroni
- 9- Aromatic
- 10- Pololan Nanofibers Pullulan
- 11- Betacyclodkstryn
- 12- Vahed
- 13- Titanium Dioxide (TiO₂)
- 14- Escherichia Coli
- 15- Díez-Pascual and Díez-Vicente
- 16- Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate)
- 17- Salmonella Enteritidis
- 18- Bacillus Subtilis
- 19- Amna
- 20- Staphylococcus Aureus

- 1- Neo
- 2- Polycaprolactone
- 3- Tsutsumi and Hara
- 4- Kayaci and Uyar
- 5- Cyclodextrin
- 6- Wang

سالمونلا تیفی موریوم^۱ می‌شود و این نانوالیاف را می‌توان در بسته‌بندی گوشت و محصولات گوشتی استفاده نمود [۴۴].

نتایج مطالعه دیگری حاکی از آن بود که استفاده از نانو فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید حاوی اسانس دارچین و بتاسیکلودکستین^۲ در بسته‌بندی مواد غذایی دارای فعالیت ضد میکروبی است و می‌تواند عمر مفید گوشت را افزایش دهد [۴۵].

کارا^۳ و همکاران (۲۰۱۶) فیلم‌های ضد میکروبی پلی‌لاکتیک‌اسید را از الیاف الکتروسیسی شده آلایل ایزوتیوسیانات^۴ و پلی‌لاکتیک‌اسید تولید و در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که این فیلم‌ها می‌توانند فعالیت لیستریا^۵ و اشرشباکلی را مهار نمایند [۴۶]. همچنین فبرا^۶ و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که استفاده از نانوالیاف الکتروسیسی شده زئین به عنوان لایه داخلی در یک فیلم چند لایه ویژگی‌های نفوذپذیری به اکسیژن را کاهش می‌دهد [۴۷].

مونت موریلونیت^۷ مهم‌ترین سیلیکات لایه‌ای است که به علت دسترسی آسان، زیست سازگاری و قیمت پایین در تولید کامپوزیت‌های بیوپلیمری استفاده می‌شود [۴۸].

آگاروال^۸ و همکاران (۲۰۱۴) اثر نانوالیاف الکتروسیسی شده مونت موریلونیت - نایلون ۶ روی فیلم پلی‌پروپیلن را در بسته‌بندی چیپس سیب‌زمینی و نان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان نمودند که استفاده از این نانوالیاف موجب کاهش پراکسیداسیون چربی و جذب رطوبت در چیپس سیب‌زمینی و افزایش طول عمر نگهداری نان به مدت ۲ روز شد [۴۹].

در تحقیقی دیگر، نانوالیاف پلی‌آمید ۶.۶ حساس به pH تولید شد. شناساگر pH به محلول پلیمری قبل از

الکتروسیسی اضافه و رفتار هالوکرومیک بریلینت^۹ زرد و برومو کرزول ارغوانی بررسی شدند. نتایج نشان داد که ساختار نانوالیاف تغییرات رنگی را در نتیجه تغییر pH به خوبی نشان می‌دهند [۵۰].

آگاروال و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که اندیکاتورهای تولیدی به روش الکتروسیسی و با استفاده از پلیمر نایلون ۶ و تلفیق رنگ‌های متیل رد، فنول رد، فنول فتالین^{۱۰}، برومو تیمول بلو^{۱۱} و برومو کرزول^{۱۲} سبز موفق به نمایش تغییرات رنگی در دامنه pH از ۱ تا ۱۰ بودند [۵۱].

وان در اسچورن^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۳) نانوالیاف پلی‌کاپرولاکتون - کیتوزان فعال شده با شناساگر pH نیترازین^{۱۴} زرد را تولید نمودند. نتایج حاکی از آن بود که نانوالیاف پلی‌کاپرولاکتون - کیتوزان در اثر تغییرات pH، پس از ۵ دقیقه و نانوالیاف پلی‌کاپرولاکتون بعد از ۳ ساعت تغییر رنگ دادند. آن‌ها اظهار داشتند که این اختلاف به دلیل افزایش ماهیت هیدروفیلیک^{۱۵} نانوالیاف دارای کیتوزان می‌باشد [۵۲].

نتایج مطالعه دیگری نشان داد که سنسورهای تولیدی بر پایه نانوالیاف الکتروسیسی شده سلولز با رنگدانه آنتوسیانین^{۱۶} استخراج شده از کلم قرمز، توانایی تشخیص مقادیر pH را در دامنه بین ۱ تا ۱۴ دارند (شکل ۴) [۵۳].

- 9- Halochromic Brilliant
- 10- Phthalene
- 11- Bromo Thymol Blue
- 12- Bromo Cruzol
- 13- Van Der Schueren
- 14- Nitrazine
- 15- Hydrophilic
- 16- Anthocyanins

- 1- Salmonella Typhimurium
- 2- Beta Cyclodextrin
- 3- Kara
- 4- Allyl Isothiocyanate
- 5- Listeria Innocua
- 6- Fabra
- 7- Montmorillonite
- 8- Agarwal



شکل ۴- سنسور هالوکرومیک

فشار بخار حلال، ویسکوزیته و تنش سطحی حلال، کافی بودن منبع ولتاژ، مناسب بودن فاصله بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده، دما، رطوبت محیط و ... در زمان شکل‌گیری الیاف اهمیت زیادی دارد.

۵- منابع

1. Ghorani, B., & Tucker, N. (2015). "Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology." Food Hydrocolloids, 51, 227.
2. Alehosseini, A., Ghorani, B., Sarabi-Jamab, M., & Tucker, N. (2017). "Principles of electrospaying: A new approach in protection of bioactive compounds in foods." Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1.
3. Ghorani, B., Russell, S. J., & Goswami, P. (2013). "Controlled morphology and mechanical characterisation of electrospun cellulose acetate fibre webs." International Journal of Polymer Science, 2013.

۴- نتیجه‌گیری

بسته‌بندی‌های مواد غذایی به سرعت در حال حرکت به سمت توسعه مواد با ویژگی‌های حفاظتی بالا می‌باشند. همچنین استفاده از فناوری نانو، امید و چشم‌انداز روشی برای دستیابی به بسته‌بندی مواد غذایی با قابلیت‌های ایمنی و نگهداری بیشتر را ایجاد نموده است. استفاده از نانوالیاف در بسته‌بندی‌های مواد غذایی به علت افزایش ویژگی‌های محافظتی بسته‌بندی، موجب افزایش طول عمر و حفظ کیفیت ماده غذایی درون بسته‌بندی می‌شود. همچنین با استفاده از روش الکتروروسی می‌توان حسگرهای حساس به pH را تولید و در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده نمود که به مصرف‌کننده در ارزیابی سریع تازگی محصولات کمک شایانی خواهد نمود.

برای تشکیل نانوالیاف در فرآیند الکتروروسی با اعمال ولتاژ مناسب به محلول پلیمری، نیروی دافعه بر کشش سطحی محلول پلیمری غلبه کرده و جت تشکیل می‌شود. با تبخیر حلال از جت، تغییر فاز مایع به جامد صورت گرفته و نانوالیاف تشکیل می‌شود. در فرآیند الکتروروسی، در دسترس بودن حلال مناسب برای انحلال پلیمر در آن، مناسب بودن

15. Reneker, D. H., Yarin, A. L., Fong, H., & Koombhongse, S. (2000). "Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning." *Journal of Applied physics*, 87(9), 4531.
16. Yarin, A. L., Koombhongse, S., & Reneker, D. H. (2001). "Bending instability in electrospinning of nanofibers." *Journal of Applied physics*, 89(5), 3018.
17. Ghorani, B., Alehosseini, A., & Tucker, N. (2017). "8 - nanocapsule formation by electrospinning." In S. M. Jafari (Ed.), *Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries*, (pp. 264): Academic Press.
18. Tan, S., Inai, R., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2005). "Systematic parameter study for ultra-fine fiber fabrication via electrospinning process." *Polymer*, 46(16), 6128.
19. Shenoy, S. L., Bates, W. D., Frisch, H. L., & Wnek, G. E. (2005). "Role of chain entanglements on fiber formation during electrospinning of polymer solutions: Good solvent, non-specific polymer-polymer interaction limit." *Polymer*, 46(10), 3372.
20. Gupta, P., Elkins, C., Long, T. E., & Wilkes, G. L. (2005). "Electrospinning of linear homopolymers of poly (methyl methacrylate): Exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent." *Polymer*, 46(13), 4799.
21. Lin, Y., Yao, Y., Yang, X., Wei, N., Li, X., Gong, P., Li, R., & Wu, D. (2008). "Preparation of poly (ether sulfone) nanofibers by gas- jet/electrospinning." *Journal of Applied Polymer Science*, 107(2), 909.
4. Ramakrishna, S. (2005). "An introduction to electrospinning and nanofibers." World Scientific.
5. Fang, J., Niu, H., Lin, T., & Wang, X. (2008). "Applications of electrospun nanofibers." *Chinese science bulletin*, 53(15), 2265.
6. Fang, J., Wang, X., & Lin, T. (2011). "Functional applications of electrospun nanofibers." InTech-Open Access Publisher.
7. Andraday, A. L. (2008). "Science and technology of polymer nanofibers." John Wiley & Sons.
8. Han, W., Yu, Y., Li, N., & Wang, L. (2011). "Application and safety assessment for nano-composite materials in food packaging." *Chinese science bulletin*, 56(12), 1216.
9. Farhang, B. (2009). "Nanotechnology and applications in food safety." In *Global issues in food science and technology*, (pp. 401): Elsevier.
10. Liao, F., Chen, C., & Subramanian, V. (2005). "Organic tfts as gas sensors for electronic nose applications." *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107(2), 849.
11. Greiner, A., & Wendorff, J. H. (2007). "Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers." *Angewandte Chemie International Edition*, 46(30), 5670.
12. Tassanawat, S., Phandee, A., Magaraphan, R., Nithitanakul, M., & Manuspiya, H., (2007). "Ph-sensitive pp/clay nanocomposites for beverage smart packaging." In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2007. NEMS'07. 2nd IEEE International Conference on, (pp. 478): IEEE.
13. Formhals, A. (1934). "Us patent 1975504." US Pat, 1975504.
14. Frenot, A., & Chronakis, I. S. (2003). "Polymer nanofibers assembled by electrospinning." *Current opinion in colloid & interface science*, 8(1), 64.

30. Corradini, E., Souto de Medeiros, E., Carvalho, A. J., Curvelo, A. A., & Mattoso, L. H. (2006). **"Mechanical and morphological characterization of starch/zein blends plasticized with glycerol."** Journal of Applied Polymer Science, 101(6), 4133.
31. Shukla, R., & Cheryan, M. (2001). **"Zein: The industrial protein from corn."** Industrial crops and products, 13(3), 171.
32. Lagaron, J., Gimenez, E., Sanchez-Garcia, M., Ocio, M., & Fendler, A., (2006). **"Second generation nanocomposites: A must in passive and active packaging and biopackaging applications."** In The 15th IAPRI World Conference in Packaging, (pp. 1766).
33. Yao, C., Li, X., & Song, T. (2007). **"Electrospinning and crosslinking of zein nanofiber mats."** Journal of Applied Polymer Science, 103(1), 380.
34. Neo, Y. P., Ray, S., Jin, J., Gizdavic-Nikolaidis, M., Nieuwoudt, M. K., Liu, D., & Quek, S. Y. (2013). **"Encapsulation of food grade antioxidant in natural biopolymer by electrospinning technique: A physicochemical study based on zein-gallic acid system."** Food chemistry, 136(2), 1013.
35. Naghavi, E. A. (2015). **"Nanocellulose-based composite films in food packaging."** Scientific quarterly journal of packaging science and technology, 22. (In Persian)
36. Pittarate, C., Yoovidhya, T., Srichumpuang, W., Intasanta, N., & Wongsasulak, S. (2011). **"Effects of poly (ethylene oxide) and zno nanoparticles on the morphology, tensile and thermal properties of cellulose acetate nanocomposite fibrous film."** Polymer journal, 43(12), 978.
37. Vieira, M. G. A., da Silva, M. A., dos Santos, L. O., & Beppu, M.
22. Mo, X., Xu, C., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2004). **"Electrospun p (Ila-cl) nanofiber: A biomimetic extracellular matrix for smooth muscle cell and endothelial cell proliferation."** Biomaterials, 25(10), 1883.
23. Zong, X., Kim, K., Fang, D., Ran, S., Hsiao, B. S., & Chu, B. (2002). **"Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes."** Polymer, 43(16), 4403.
24. De Vrieze, S., Van Camp, T., Nelvig, A., Hagström, B., Westbroek, P., & De Clerck, K. (2009). **"The effect of temperature and humidity on electrospinning."** Journal of materials science, 44(5), 1357.
25. Han, J. H. (2014). **"A review of food packaging technologies and innovations."** In Innovations in food packaging (second edition), (pp. 3): Elsevier.
26. Neo, Y. P., Ray, S., & Perera, C. O. (2018). **"Chapter 4 - fabrication of functional electrospun nanostructures for food applications."** In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), Role of materials science in food bioengineering, (pp. 109): Academic Press.
27. Zhou, B., Jin, X., Li, J., Xu, W., Liu, S., Li, Y., & Li, B. (2014). **"Vacuum-assisted layer-by-layer electrospun membranes: Antibacterial and antioxidative applications."** RSC Advances, 4(97), 54517.
28. Sun, K., & Li, Z. (2011). **"Preparations, properties and applications of chitosan based nanofibers fabricated by electrospinning."** Express Polymer Letters, 5(4).
29. Torres- Giner, S., Pérez- Masiá, R., & Lagaron, J. M. (2016). **"A review on electrospun polymer nanostructures as advanced bioactive platforms."** Polymer Engineering & Science, 56(5), 500.

44. Amna, T., Yang, J., Ryu, K.-S., & Hwang, I. (2015). "Electrospun antimicrobial hybrid mats: Innovative packaging material for meat and meat-products." *Journal of food science and technology*, 52(7), 4600.
45. Wen, P., Zhu, D.-H., Feng, K., Liu, F.-J., Lou, W.-Y., Li, N., Zong, M.-H., & Wu, H. (2016). "Fabrication of electrospun polylactic acid nanofilm incorporating cinnamon essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complex for antimicrobial packaging." *Food chemistry*, 196, 996.
46. Kara, H. H., Xiao, F., Sarker, M., Jin, T. Z., Sousa, A. M., Liu, C. K., Tomasula, P. M., & Liu, L. (2016). "Antibacterial poly (lactic acid)(pla) films grafted with electrospun pla/allyl isothiocyanate fibers for food packaging." *Journal of Applied Polymer Science*, 133(2).
47. Fabra, M. J., Lopez-Rubio, A., & Lagaron, J. M. (2013). "High barrier polyhydroxyalcanoate food packaging film by means of nanostructured electrospun interlayers of zein." *Food Hydrocolloids*, 32(1), 106.
48. De Azeredo, H. M. (2009). "Nanocomposites for food packaging applications." *Food Research International*, 42(9), 1240.
49. Agarwal, A., Raheja, A., Natarajan, T., & Chandra, T. (2014). "Effect of electrospun montmorillonite-nylon 6 nanofibrous membrane coated packaging on potato chips and bread." *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 424.
50. Van der Schueren, L., Mollet, T., Ceylan, Ö., & De Clerck, K. (2010). "The development of polyamide 6.6 nanofibres with a ph-sensitive function by M. (2011). "Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review." *European polymer journal*, 47(3), 254.
38. Tsutsumi, H., & Hara, C., (2008). "Characterization of new type polymer composites prepared by in situ coffering electrospun fibers into polymer matrixes." In *Technical Proceedings of the 2008 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, NSTI-Nanotech, Nanotechnology*, vol. 2 (pp. 733).
39. Kayaci, F., & Uyar, T. (2012). "Encapsulation of vanillin/cyclodextrin inclusion complex in electrospun polyvinyl alcohol (pva) nanowebs: Prolonged shelf-life and high temperature stability of vanillin." *Food chemistry*, 133(3), 641.
40. Wang, S., Marcone, M. F., Barbut, S., & Lim, L.-T. (2013). "Electrospun soy protein isolate-based fiber fortified with anthocyanin-rich red raspberry (*rubus strigosus*) extracts." *Food Research International*, 52(2), 467.
41. Mascheroni, E., Fuenmayor, C. A., Cosio, M. S., Di Silvestro, G., Piergiovanni, L., Mannino, S., & Schiraldi, A. (2013). "Encapsulation of volatiles in nanofibrous polysaccharide membranes for humidity-triggered release." *Carbohydrate polymers*, 98(1), 17.
42. Vahed, S., Zamani, m., Asadi, Z., & Amohidari, M., (2011). "Investigation of antibacterial properties of nanofibers produced by electrospinning process in food packaging." In *The first national food safety seminar*. (In Persian)
43. Díez-Pascual, A. M., & Díez-Vicente, A. L. (2015). "Antimicrobial and sustainable food packaging based on poly (butylene adipate-co-terephthalate) and electrospun chitosan nanofibers." *RSC Advances*, 5(113), 93095.

- electrospinning."** European polymer journal, 46(12), 2229.
51. Agarwal, A., Raheja, A., Natarajan, T., & Chandra, T. (2012). **"Development of universal ph sensing electrospun nanofibers."** Sensors and Actuators B: Chemical, 161(1), 1097.
52. Van der Schueren, L., De Meyer, T., Steyaert, I., Ceylan, Ö., Hemelsoet, K., Van Speybroeck, V., & De Clerck, K. (2013). **"Polycaprolactone and polycaprolactone/chitosan nanofibres functionalised with the ph-sensitive dye nitrazine yellow."** Carbohydrate polymers, 91(1), 284.
53. Devarayan, K., & Kim, B.-S. (2015). **"Reversible and universal ph sensing cellulose nanofibers for health monitor."** Sensors and Actuators B: Chemical, 209, 281.
54. Eslah, S., Nouri, M., (2016). **" A review on applications of electrospun nanofibers in food packaging"**, Journal of Packaging Sciences and Skills Scientific. Vol. 6, No. 24. Winter 2016. 48-60.

آدرس نویسنده

گلستان - گرگان - میدان بسیج - دانشگاه علوم
کشاورزی و منابع طبیعی گرگان - دانشکده صنایع
غذایی