مروری بر کاربردهای نانوالیاف الکتروریسی شده در بسته‌بندی مواد غذایی

ساناز اصلاح[1*]، مهدی نوری[2]

تاریخ دریافت مقاله: مرداد ماه ۱۳۹٤

تاریخ پذیرش مقاله: دی ماه ۱۳۹٤

چکیده

بسته‌بندی مواد غذایی نقش مهمی را در حفاظت از ماده غذایی در طی فرآیندهای تولید، کنترل، ذخیره‌سازی، نقل و انتقال و در نهایت تحویل آن به مشتری ایفا می‌کند. نوآوری در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی، موجب بهبود کیفیت و مشتری‌پسند شدن بسته‌بندی‌ها، زیست‌تخریب‌پذیر شدن آن‌ها و ایجاد خصوصیاتی از این قبیل گردیده است. امروزه فناوری نانو در صنایع غذایی، کاربردهای بسیاری از جمله: در زمینه کپسوله کردن و تحویل مواد در سایت‌های هدف، وارد کردن نانوذرّات ضدباکتری به درون ماده غذایی، تشخیص آلاینده‌ها، بهبود فرآیند ذخیره‌سازی ماده غذایی و غیره یافته است. بسته‌بندی‌های مواد غذایی نانو به علت افزایش خاصیت محافظتی بسته‌بندی، باعث افزایش سلامت ماده غذایی شده و مصرف‌کننده را از فساد و آلوده شدن ماده غذایی مطّلع کرده و حتّی در بعضی از موارد، برای افزایش طول عمر ماده غذایی درون بسته‌بندی نگهدارنده‌هایی را منتشر می‌کنند. الکتروریسی یکی از روش های ساخت مواد با ساختار نانو بوده که با به کارگیری نیروهای الکترواستاتیک به یک روش ساده برای تولید الیاف پلیمری، سرامیکی و کامپوزیتی با محدوده قطری میکرومتر تا نانومتر مبدّل شده است. لایه‌های حاصله از نانوالیاف الکتروریسی شده دارای خصوصیات منحصر به فردی مانند سطح مخصوص و تخلخل بالا دارند که زمینه استفاده آن‌ها را در کاربردهای مختلف از جمله صنایع بسته‌بندی مواد غذایی، فراهم می‌آورد. از این‌رو الکتروریسی یک روش نویدبخش برای تولید مواد بسته‌بندی فعال و هوشمند برای مواد غذایی محسوب می‌شود. در این مقاله، به طور مختصر به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه به کارگیری نانوالیاف الکتروریسی شده در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی

الکتروریسی، نانوالیاف، مواد بسته‌بندی، بسته‌بندی فعال، بسته**بندی** هوشمند

۱- مقدمه

بسته‌بندی مواد غذایی با پیشرفت دانش و فنّاوری و همچنین با تغییر سبک زندگی مشتریان در حال تکامل است [۱]. در اقتصاد جهانی امروز، بسته‌بندی نه تنها برای توزیع مؤثر، حفاظت مواد غذایی و سایر محصولات مورد نیاز مصرف‌کننده، بلکه به منظور تسهیل مصرف نهایی و تحویل ماده غذایی به مشتری ضرورت دارد. از این‌رو، صنعت بسته‌بندی به سومین صنعت جهان تبدیل شده است و حدود ۲٪ تولید ناخالص ملّی را در کشورهای توسعه‌یافته تشکیل می‌دهد [۳و۲].

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی نساجی و علوم الیاف، گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(* نویسنده مسئول: sanaz.eslah@yahoo.com)

۲- دکتری تخصصی مهندسی شیمی نساجی و علوم الیاف، دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی نساجی دانشگاه گیلان، رشت، ایران(mnouri69@yahoo.com).

بسته‌بندی از مواد غذایی در برابر شرایط نامطلوب داخلی و خارجی مانند بخار آب، گازها، میکروارگانیسم‌ها، گرد و غبار، ضربه‌ها و ارتعاشات مکانیکی در حین توزیع و ذخیره‌سازی محافظت می‌کند. با توجّه به پیچیدگی و مشغله زیاد سبک زندگی جدید مشتریان در دنیای مدرن، تولیدکنندگان مواد غذایی در حال تلاش برای تولید سامانه‌های بسته‌بندی کاربردی و راحتی هرچه بیشتر مصرف نهایی این سامانه‌ها هستند. بسته‌بندی‌ها علاوه بر داشتن این عملکردهای خاص، اطّلاعات ضروری در مورد محصول را به مشتری ارائه داده و در واقع جنبه تبلیغاتی نیز برای محصول خواهند داشت. در سامانه‌های بسته‌بندی مدرن، این عملکردها از مکانیسم‌های فعل و انفعالی ناشی از فرآیندهای بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی نشأت می‌گیرند.

فناوری نانو یک ابزار میان‌رشته‌ای قدرتمند برای ایجاد و توسعه فرآورده‌های جدید است. پیش‌بینی شده است که این فنّاوری تا سال ۲۰۲۰ اقتصاد جهانی را حداقل تا حد سه هزار میلیارد دلار تحت تأثیر قرار دهد و نیاز به استخدام شش میلیون نفر را در صنایع مختلف ایجاد کند[٤]. با این روند جهانی انتظار می‌رود که فنّاوری نانو در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی و برای توسعه کاربرد بسته‌بندی‌های پیشرفته جهت تأمین نیازهای به روز مشتریان، عامل پیش‌رونده‌ای محسوب شود. فنّاوری نانو عبارتست از: به کارگیری موادی با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر در یک و یا چند بعد. معمولاً نانو مواد به سه دسته کلی ذرّات، صفحات و الیاف، طبقه‌بندی می‌شوند[۱]. این مواد با توجّه به ابعاد نانومقیاس‌شان، دارای نسبت سطح به حجم و فعالیت سطحی بالایی هستند و زمانی که به پلیمرهای سازگاری افزوده شوند، قادرند خصوصیات نانوکامپوزیت[1] تهیه شده، مانند استحکام مکانیکی، پایداری حرارتی و رسانایی الکتریکی آن را بهبود دهند[۱]. بنابراین به کارگیری نانومواد برای بهبود خصوصیات مکانیکی و محافظتی بسته‌بندی‌های مواد غذایی و همچنین ایجاد ساختارهای پیشرفته برای کاربردهای فعال و هوشمند، نوید بخش به نظر می‌رسد.

کاربردهای فنّاوری نانو در صنایع غذایی شامل تولید سنسورهای جدید، روش‌های فرآوری و تولید مواد بسته‌بندی فعال می‌باشد. با وجود اینکه در حال حاضر از ساختارهای ذرّه‌ای مانند نانوذرّات جامد و یا مایع با نسبت ابعادی[2] (نسبت بعد طولی به عرضی) پایین، در مصارف صنایع غذایی، به عنوان حاملین عملکردهای خاصی مانند رنگ، طعم، آنتی‌اکسیدان‌ها[3] و آنتی‌بیوتیک‌ها[4] استفاده می‌شود؛ نانوساختارهای غیر ذرّه‌ای از جمله نانوالیاف نیز دارای کاربردهای بالقوه‌ای در این صنایع هستند. نانوالیاف به علت داشتن خصوصیاتی همچون سطح مخصوص و تخلخل بالا، ساختارهای پرمصرفی هستند، چرا که تخلخل بالای آن‌ها اغلب باعث کاتالیز[5] بسیاری از واکنش‌ها شده و یا به عنوان بستری برای جذب مقادیر زیادی از گازها و مایعات به کار گرفته می‌شوند. الکتروریسی[6] یک روش ساده و مقرون به صرفه برای تولید نانوالیاف از پلیمرهای زیستی و مصنوعی می‌باشد. از طرفی می‌توان الیاف را با جذب گروه‌های عاملی روی سطحشان یا الکتروریسی مخلوطی از پلیمرهای مختلف عامل‌دار نمود. از این رو، الیاف کامپوزیتی بسیاری تولید شده‌اند که دارای قابلیت رفع نیازهای مختلفی، در صنایع گوناگون، همچون صنایع غذایی هستند. اگرچه به کارگیری نانوالیاف همچنان به علت مشکلات مربوط به تولید الیاف از نوع خوراکی[7]، محدود می‌باشد[۵]. به عبارتی، هدف تولید نانومواد جدیدی با خصوصیات ضدمیکروبی تقویت شده به ویژه نسبت به پاتوژن(عوامل بیماری‌زای غذایی) خاصی می‌باشد که باعث بهبود عملکرد عوامل زیست کنترل‌گر شده و سلامت ماده غذایی را در دوره زمانی طولانی‌تری تضمین می‌کند.

هدف از این مقاله، مرور مختصری از پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه تولید نانوالیاف زیستی برای به

1- Nanocomposite

2- Aspect Ratio
3- Antyoxidant
4- Antibiotics
5- Catalyzed
6- Electrospinning
7- Food Grade Fibers

کارگیری در بسته‌بندی مواد غذایی بـه روش الکتروریـسی و بهینه‌سازی شاخص‌های تولید در فرآینـد الکتروریـسی بـرای تولید نانوکامپوزیت‌هایی با خصوصیات بهبود یافته جهت بـه کارگیری در صنایع غذایی می‌باشد.

۲- نقطه ضعف‌هـای بـسته‌بنـدی‌هـای موجـود / فرصت‌های فناوری نانو در بسته‌بندی مواد غذایی

تولیـد غیـر پایـدار، قابـل بازیافـت نبـودن، خـصوصیات حفاظتی و مکانیکی ناکافی برخی از چالش‌هـای پـیش‌رو در زمینه بسته‌بندی مواد غذایی محسوب می‌شوند. اگرچه فلـز و شیشه مواد محـافظ خـوبی بـرای جلـوگیری از انتقـال جـرم ناخواسته در بسته‌بندی‌های مواد غذایی هستند، بـه کـارگیری پلاستیک‌ها همچنان به دلیل وزن کـم ،قابلیـت شـکل‌پـذیری بالا، مقرون به صرفه بودن و تطبیق‌پـذیری بالایـشان مرسـوم است. در نتیجه بیش از ٤٠ درصد از پلاستیک مصرفی صنایع بسته‌بندی، به بسته‌بندی مواد غذایی مربوط مـی‌شـود [٦]. بـا این حال، اکثر مواد بسته‌بندی از مشتقات نفتـی تهیـه شـده و سازگار با مواد خـوراکی نیـستند. بـه عـلاوه پلاسـتیک‌هـای حاصله از مشتقات نفتی، زیست‌تخریب‌پـذیر نمـی‌باشـند. بـا توجه به اینکه بیش از ۳۰ درصد از زباله‌های خـشک شـهری آمریکای شمالی را مـواد بـسته‌بنـدی تـشکیل داده‌انـد، جنبـه زیست محیطی بسته‌بندی‌ها مورد توجّه است[۱].

از دیگر مسائل مهم در بسته‌های مـواد غـذایی، خاصـیت محافظتی ضعیف آن‌ها در برابر گازها و بخـار آب مـی‌باشـد. برای مثال فرآورده‌های گوشتی، سبزیجات و میوه‌هـا نیازمنـد بسته‌بندی‌هایی با خاصیت نفوذپذیری اکسیژن با نـرخ انتقـال مناسبی هستند، در حالی کـه محـصولات فـرآوری شـده بـه چنین انتقال جرمی نیاز ندارند. تطبیق دادن خاصیت محافظتی در برابر عوامـل خـارجی و نـوع محـصولی کـه قـرار اسـت بسته‌بندی گردد یکی از زمینه‌های بحث برانگیز است.

از طرفـی، اگرچـه مخلـوط‌هـای پلیمـری و سـاختارهای کامپوزیتی چندلایـه بـرای افـزایش خـصوصیات عملکـردی پلیمرهای گرمانرم طراحی شده‌اند، مـسئله بهـای بـالای ایـن کامپوزیت‌ها و بازیافت آن‌ها همچنـان بـه قـوت خـود بـاقی است. از دیگر چالش‌هـایی کـه بـسیاری از تولیدکننـدگان مواد غذایی با آن مواجه هستند، دستیابی به ماندگاری کافی محصولاتـشان همـراه بـا حفـظ سـلامت و کیفیـت اولیـه محصول است. این مـسئله بیـشتر در مـورد کـشورهای در حال توسعه کـه زیرسـاخت صـحیحی بـرای توزیـع مـواد غذایی وجود ندارد، مطرح است.

تکثیر میکروارگانیسم‌ها بـه علـت آلـودگی و تغییـرات دمایی، کاهش کیفیت ماده غذایی به علت اکسیداسیون[1] یـا برهمکنش با عوامل خارجی مضر، نمونـه‌هـایی از مـسائل مربوط به بهداشت و کیفیت ماده غذایی هـستند، کـه بایـد مرتفع گردند. در طول دهه گذشته، فعالیت‌هـای تحقیقـاتی فشرده و گسترده‌ای در دانشگاه‌ها و صنعت، با بهره‌بـرداری از فنّاوری نانو جهت غلبـه بـر بـسیاری از مـشکلات ذکـر شده، صورت گرفته است. در این گزارش، تلاش شده کـه پیشرفت‌های صورت گرفته با استفاده از فنّاوری نانو و بـه ویژه روش الکتروریسی برای تولیـد لایـه‌هـای نـانولیفی و نانوبایوکامپوزیت‌های مـورد اسـتفاده در بـسته‌بنـدی مـواد غذایی نشان داده شود [۱].

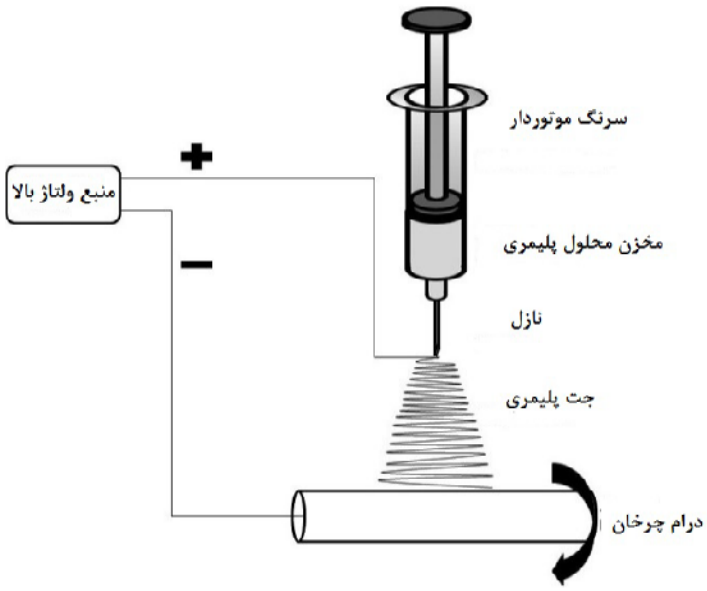
۳- الکتروریسی

الکتروریسی یک فرآینـد فیزیکـی بـرای تولیـد الیـاف بسیار ظریف، توسط قـرار دادن یـک محلـول پلیمـری در معرض میدان‌های الکتریکی بـسیار قـوی مـی‌باشـد. بـرای تشکیل چنین الیافی، یک محلول یا مذاب پلیمری از درون لوله موئین عبور داده می‌شود و یـک قطـره از محلـول یـا مذاب پلیمر در نوک آن شکل می‌گیرد. ولتـاژ بـالایی بـین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده اعمال می‌شود. زمـانی کـه میدان الکتریکی بر کشش سطحی قطـره غلبـه کنـد، رشـته سیّالی از محلول پلیمری شکل گرفته و بـه سـمت صـفحه جمع‌کننده شتاب می‌گیـرد. همـانطور کـه جریـان در هـوا حرکت می‌کند، حـلال در هـوا تبخیـر و سـاختار پلیمـری بی‌بافت روی صفحه هدف جمع می‌شود. ابعاد الیـاف نـانو

1- Oxidation

بستگی به عواملی مثل خصوصیات حلال (ویسکوزیته[1]، هدایت الکتریکی و کشش سطحی) و شرایط ریسندگی (ولتاژ اعمال شده، نرخ ریسندگی و طول ریسندگی) دارد از بین همه این عوامل ویسکوزیته و وزن مولکولی از مهم‌ترین عواملی هستند که ابعاد الیاف نانو را تعیین می‌کنند. برای ایجاد آرایش‌یافتگی ترجیحی و یا ساختار لوله‌ای شکل معمولاً از یک درام[2] الکتریکی چرخان به‌عنوان صفحه هدف استفاده می‌شود(شکل ۱). یکی از خصوصیات جالب توجّه الکتروریسی، ارزان بودن تجهیزات و سهولت فرآیند آن است. یک نمونه از تجهیزات الکتروریسی شامل پمپ سرنگی، منبع ولتاژ بالا و صفحه جمع‌کننده در(شکل ۱) نشان داده شده است[۷].

محلول و یا مذاب مناسب برای شکل‌گیری الیاف از طریق الکتروریسی اساساً باید دارای خصوصیات ویسکوالاستیک[3] خاص،هدایت الکتریکی درمحدوده مشخص



شکل ۱- نمایی از تجهیزات الکتروریسی

و انرژی سطحی معینی باشند. چنین الزاماتی تنها توسط پلیمرهایی که محدوده وزن مولکولی مناسبی دارند، برآورده

1- Viscosity
2- Drum
3- Visco-Elastic

می‌شود. کاربرد الکتروریسی مذاب[4] اغلب به دلیل بالاتر بودن قطر نانوالیاف حاصل از آن، نسبت به الکتروریسی محلول پلیمری محدودتر است. در فرآیند الکتروریسی از محلول‌های پلیمری، خصوصیات حلال مانند نقطه جوش و هدایت الکتریکی آن، نقش مهمی را در فرآیند الکتروریسی و نانوالیاف حاصل از آن ایفا می‌کنند.

از طریق اصلاح و بهبود تجهیزات الکتروریسی، به خصوص در جمع‌آوری الیاف، علاوه بر تغییرات مشاهده شده در قطر نانوالیاف، ساختارهای جدید و جالب توجّه دیگری مانند الیاف مسطح و سیلندری، لوله‌های توخالی و الیاف متخلخل، ساختارهای پوسته- مغزی و کواکسیال[5](هم‌محور) چند لایه و همچنین الیاف دارای اتصالات عرضی[6] و مولتی جت (چند رشته‌ای)، نیز قابل

حصول است و این تنظیم‌پذیری ساختار، امکان تقویت خواص ماده الکتروریسی شده را برای کاربرد خاصی فراهم می‌کند. الیاف متشکله از مخلوط‌های پلیمری نیز با

4- Melt Electrospinning
5- Coaxial
6- Cross-Linked Fibers

الکتروریسی محلول‌های پلیمری حاوی گونه‌های مختلف پلیمری در یک حلال مشترک، قابل تولید هستند [۸] .

یکی دیگر از مشخصه‌های جالب فرآیند الکتروریسی، قابلیت شکل‌گیری ساختارهای متخلخلی است که باعث افزایش سطح مخصوص ساختار حاصل می‌گردد. این منافذ در الکتروریسی مخلوط دو پلیمر، زمانی ایجاد می‌شود که یکی از اجزای پلیمری پس از تشکیل الیاف به صورت جزئی از طریق حل شدن در حلالی که پلیمر دیگر در آن غیرقابل‌حل است، به صورت جزئی حذف گردد[۹]. حتّی امکان تنظیم تراکم حفرات و ابعاد آن‌ها نیز از طریق کنترل بیشتر شاخص‌های فرآیند وجود دارد [۱۰]. یکی از روش‌های تولید نانوالیاف بسیار متخلخل، الکتروریسی روی بسترهای بسیار سرد مانند نیتروژن مایع می‌باشد. از طرف دیگر، سطوح الیاف بسته به فرّاریت حلال مورد استفاده در الکتروریسی ممکن است همیشه صاف و مسطح نباشد. برای مثال اگر حلال فرّاریت خوبی نداشته باشد و کاملاً تبخیر نشود، الیاف به هم چسبیده و در نهایت یک شبکه سه بعدی که دارای ساختاری اسفنج مانند یا مشابه فوم هستند، حاصل می‌شود [۱۱].

برای تولید نانوالیاف پوسته- مغزی و یا توخالی نیز می‌توان از الکتروریسی هم محور استفاده کرد. این روش بیشتر برای مواردی که قابلیت تشکیل الیاف از طریق الکتروریسی وجود ندارد، مانند روغن‌ها و پلیمرهایی با وزن مولکولی کم، کاربرد دارد. تجهیزات مورد نیاز برای این روش مشابه تجهیزات معمول الکتروریسی بوده به استثنای دو سوزنی که به صورت متحدالمرکز بوده و درون دو مخزن مختلف از محلول‌های پلیمری هستند. در صورتی که دو محلول غیرقابل امتزاج و شامل دو پلیمر مختلف باشند، نانوالیاف با ساختار پوسته- مغزی شکل گرفته، در صورتی که محلول داخلی عاری از پلیمر باشد، با استفاده از محلول پلیمری خارجی الیاف توخالی به دست می‌آید. همینطور اگر از الکترودهای مسطح برای جمع‌آوری الیاف نانو استفاده شود، لایه‌های بدون بافتی از الیاف با آرایش همسانگرد یا ایزوتروپیک[1] خواهیم داشت، که با استفاده از یک درام سیلندری چرخان، امکان جمع‌آوری الیاف به صورت موازی و آرایش‌یافته وجود دارد [۱۲].

توسعه این فنّاوری، شیوه‌های نوینی را برای تولید نانوالیاف به شیوه‌ای کارآمدتر و کنترل‌شده‌تر، به ارمغان آورده است. بنابراین توانایی تولید نانوالیاف پلیمری با ابعاد و تخلخل قابل کنترل به صورت لایه‌های بی‌بافت و ساختارهای سه‌بعدی متخلخل، می‌تواند منابع جدید بسیاری برای کاربردهای مبتنی بر پلیمرهای طبیعی فراهم آورد [۸]. الکتروریسی یک فرآیند بالا به پایین است که باعث تولید الیاف پیوسته و ارزان قیمتی با قابلیت چینش و جمع‌آوری آسان شده و فرآوری آن‌ها برای کاربردهای مختلف نیز به آسانی صورت می‌گیرد. به کارگیری چنین ساختارهای ظریفی به عنوان اجزای سازنده محصولاتی در مقیاس بزرگ توجه قابل ملاحظه‌ای را در صنایع مواد عامل‌دار شده جهت به کارگیری در داربست‌های مهندسی بافت، رهایش دارو و مواد بسته‌بندی فعال و زیست‌فعال برای مواد غذایی و به طور کلی برای تولید مواد عملکردی پیشرفته، به خود معطوف داشته است.

٤- کاربردهای الکتروریسی در بسته‌بندی مواد غذایی

سهولت و تطبیق‌پذیری روش الکتروریسی، فرصت‌های جدیدی را برای محققان جهت ارزیابی عملکرد نانوالیاف به عنوان عامل تقویت‌کننده خصوصیات، در ماده بستر فراهم می‌آورد. اغلب کامپوزیت‌ها از دو فاز متراکم توده‌ای و فاز تقویت‌کننده تشکیل شده‌اند. در واقع از نقطه‌نظر مکانیکی ترکیبی از استحکام فاز تقویت‌کننده و سختی فاز متراکم بستر بوده که این نشان‌دهنده برتری مواد کامپوزیتی در مقایسه با مواد ساده می‌باشد. زمانی که از تقویت‌کننده‌های لیفی شکل با مقطع عرضی حدود ۱۰۰ نانومتر استفاده گردد، به کامپوزیت حاصله، نانوکامپوزیت گفته می‌شود.

1- Isotropic

از طرف دیگر انتظار می‌رود که نانوالیاف نـه تنهـا باعـث بهبود خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌ها گردنـد، بلکـه دارای مزایای بیشتری در مقایسه با کامپوزیت‌های معمول شوند. بـه عـلاوه کـاربرد ایـن نانوالیـاف در بـسترهای زیـست‌پلیمـری تجدیدپذیر، دسته جدیدی از نانوکامپوزیت‌ها، تحـت عنـوان نانو بایوکامپوزیت‌ها[1] با اثرات محیطی کمتر و قابلیـت بیـشتر را معرفی کرده که می‌توان آن‌هـا را بـه عنـوان نـسل جدیـد کامپوزیت‌ها در نظر گرفت[۱۳].

در مورد خاصیت استحکام‌بخشی نانوالیاف، بسته به نـوع کـاربرد، چیـدمان نانوالیـاف در کامپوزیـت مـی‌توانـد بـه دو صورت مرتّب و آرایش یافته در جهت محوری کامپوزیـت و یا به صورت تصادفی باشد. در مواردی که مقاومت در برابـر بار حائز اهمیت باشد، کارآمدترین چیدمان زمـانی اسـت کـه نانوالیاف برای تشکیل یک روکش نانوکامپوزیتی هم راستا بـا جهت اعمال تـنش آرایـش یابنـد. چنـین مـوادی در جهـت چینش نانوالیاف مستحکم بوده؛ امـا در جهـت عمـود بـر آن ضعیف هستند.

توزیع تصادفی نانوالیـاف، بـه شـکل نانوکامپوزیـت‌هـای بی‌بافت نیز در مصارف دیگری مانند لایه‌هـا و روکـش‌هـای ممانعت‌کننده در برابر گازها می‌توانند کـارایی داشـته باشـند. فضاهای نانومتری تولیـد شـده در سـاختار نانوکامپوزیـت از طریق مش‌های نانو[2] الیاف به دلیل ایجاد اثر پیچشی در نفوذ گازها باعث کاهش نفوذپـذیری گازهـا بـه درون کامپوزیـت می‌شود. نانوالیاف الکتروریسی شده را می‌تـوان بـه عنـوان یک عامل تقویت‌کننده بـا اسـتفاده از روش‌هـای مختلـف ماننـد مخلـوط کـردن مـذاب و قالـب‌گیـری حـلال بـا ماتریس‌هـای پلیمـری ترکیـب کـرد و نانوکامپوزیـت‌هـای جدیـد متـشکله از لایـه‌هـای نـانولیفی گنجانـده شـده در ماتریس[3] پلیمری تولید نمود. در موارد دیگـری کـه تأکیـد بیشتری روی عاملیت نانوکامپوزیت وجود دارد(شـکل ۲)، نانوالیاف زیست‌فعال برای بهبود محرک‌های خارجی و یـا انتقال ماده دارویی به ماده غذایی روی سطح ماتریس قـرار می‌گیرنـد(شـکل ۳). بنـابراین نانوالیـاف مـی‌تواننـد بـرای تشکیل یک شبکه مستحکم‌تر و سـخت‌تـر بـه درون یـک ماتریس رزینی نفوذ کننـد، شـبکه‌ای کـه بـه علـت سـطح مخـصوص بـالای ایـن نانوالیـاف از چقرمگـی بـالاتری برخوردار می‌باشند. به عنوان مثال، گزارش شده اسـت کـه گنجانـدن الیـاف پلـی‌وینیـل‌الکـل [4](PVA) در مـاتریس پلی‌استایرن[5](PS) منجر به تولید یک فیلم تقویـت شـده بـا خصوصیات مکانیکی بهبود یافته می‌شود [۱٤].

ب الف

شکل ۲- تقویت نانوکامپوزیت‌ها بر اساس الیاف الکتروریسی شده الف) نانوکامپوزیت‌های ورقه‌ای ب) نانوکامپوزیت‌های بی‌بافت [۸]

1- Nanobiocomposites
2- Nanomesh
3- Matrix
4- Polyvinyl Alcohol
5- Polystyrene

شکل ۳- طراحی نانوکامپوزیت‌های نانولیفی برای مواد بسته‌بندی جدید مواد غذایی [۸]

در پژوهش دیگری، افزایش ۱۳ و ٦ برابری استحکام پارگی و مدول یانگ[1]، از طریق ترکیب کردن الیاف سلولزی با محدوده قطری ۸۰۰-۲۰۰ نانومتر با بستر پروتئین سویای ایزوله شده، گزارش شده است [۱۵].

از شناخته شده‌ترین مواد بسته‌بندی به دست آمده از مشتقات نفتی، پلی‌اتیلن[2] (PE) و پلی‌پروپیلن[3] (PP) می‌باشند که به دلیل در دسترس بودن در مقیاس وسیع، بهای کم و ویژگی‌های عملکردی مطلوب، بیش از ۵۰ سال است که در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد نه تنها ارزان قیمت، شفاف و بهداشتی برای مواد غذایی هستند، بلکه انعطاف‌پذیر و سازگار با مواد غذایی نیز می‌باشند؛ اما در مقایسه با سایر پلیمرها نظیر پلی‌وینیل‌الکل و پلی‌اتیلن ترفتالات قابلیت نفوذپذیری بالاتری را برای اکسیژن فراهم می‌آورند. از این‌رو، در یکی از مطالعات پژوهشی، برای کاهش نفوذ پذیری اکسیژن، افزایش مقاومت مکانیکی و افزایش خاصیت ضدباکتریایی بسته‌بندی‌های تهیه شده از مشتقات نفتی، نانوکامپوزیتی از نانوالیاف مس به عنوان عامل ضدباکتریایی و پلی‌اتیلن دانسیته بالا[4] (HDPE) تهیه نمودند. نشان داده شد که خصوصیات مکانیکی این نانوکامپوزیت به شدّت در حضور نانوالیاف مس با ساختار آن وابسته است[۲۸]. الکتروریسی این نانوکامپوزیت لیفی برای مصارف بسته‌بندی مورد بررسی قرار نگرفته است.

از طرف دیگر، می‌توان نفوذپذیری گاز و بخار پلیمرها و بیوپلیمرها را با اختلاط آن‌ها با لایه‌های نازکی از نانوالیاف به صورت لایه‌های میانی یا پوششی روی بستر اصلی، به طرز چشمگیری بهبود داد. نشان داده شده که اختلاط نانوالیاف الکتروریسی شده زئین[5] با فیلم‌های مبتنی بر پلی‌لاکتیک‌اسید[6] (PLA)، نفوذپذیری اکسیژن را در مقایسه با فیلم‌های تقویت نشده، بیشتر از ۷۱٪ کاهش می‌دهد [۱٦].

علاوه بر بهبود خواص مکانیکی و کاهش نفوذپذیری گاز و بخارات، می‌توان از نانوالیاف در کامپوزیت‌های مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی برای بسته‌بندی‌های فعال استفاده کرد. نوعی از سامانه‌های بسته‌بندی فعال شامل به کارگیری عوامل ضدمیکروب با قابلیت نفوذ در کالا و جلوگیری‌کننده از رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها[7] در حین ذخیره‌سازی می‌باشد. با این وجود، مواد بسته‌بندی خوراکی‌ها زمانی توسط مشتریان قابل قبول هستند که طبیعی، غیرسمّی و کارآمد باشند، و طعم و بوی نامطبوعی

1- Young's Modulus
2- Polyethylene
3- Polypropylene
4- High Density Polyethylene
5- Zein
6- Polylactic Acid
7- Microorganisms

ایجاد نکنند [۱۷]. از این‌رو در سال‌های اخیر، به کارگیری ترکیبات طبیعی یا عصاره‌های گیاهی زیست‌فعال به عنوان عوامل ضدمیکروبی در بسته‌بندی‌های مواد غذایی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعاتی نیز در زمینه بهینه‌سازی شاخص‌های الکتروریسی برای تولید بسته‌بندی‌های جدید مواد غذایی مبتنی بر بیوپلیمرها همراه با خصوصیات عاملی ترکیبات فعال کپسوله شده، صورت گرفته است. برای مثال در پژوهشی از الیاف الکتروریسی شده حاصل از ایزوله پروتئین سویا [۱](SPI) / پلی‌اتیلن اکسید[۲](PEO) و پلی‌لاکتیک اسید (PLA) برای رهایش کنترل شده ترکیب ضدمیکروبی آلیل ایزوتیوسیانات [۳](AITC) استفاده گردید. آلیل ایزوسیانات یا به صورت مستقیم و یا به صورت کپسوله شده درون β- سیکلودکسترین[۴] به محلول‌ها اضافه شد و رهایش (AITC) در رطوبت‌های نسبی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. رفتار تعاملی این نانوالیاف الکتروریسی شده می‌تواند برای به کارگیری در بسته‌بندی‌های فعال مواد غذایی نویدبخش باشد [۱۸].

به طرز مشابهی فعالیت ضدمیکروبی کیتوسان[۵]، برای تولید بستر لیفی الکتروریسی شده غیرمحلول زئین/کیتوسان با خصوصیت ضدمیکروبی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که این الیاف به علت احتباس مقادیری از تری فلوئورواستیک اسید[۶]، می‌توانند به سامانه‌های بسیار نازک با خاصیت ضدمیکروبی تبدیل شوند[۱۹]. متأسفانه ممکن است این سامانه به علت رهایش اسید قوی تری فلوئورواستیک اسید که موجب خصوصیت ضدمیکروبی می‌شود، بسیار خطرناک باشد. بنابراین از آنجایی که حصول این ویژگی در شرایط اسیدی معتدل‌تر، مطلوب‌تر است؛ ترکیب کردن زئین با کیتوسان ضدمیکروبی طبیعی انتخاب بهتری برای کسب خاصیت ضدمیکروبی به حساب می‌آید. همچنین ترکیبات زیست فعال غذایی نیز می‌توانند به عنوان عوامل ضدمیکروبی مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال نشان داده شده است که کاتچین‌های[۷] موجود در چای دارای خاصیت ضد باکتری هستند. اپی گالاکتوکاتچین ۳- گالات[۸]، یکی از مهم‌ترین کاتچین‌های ضدباکتری است که دارای خاصیت کشندگی انواع باکتری‌هایی مانند اشرشیا کلی[۹] می‌باشد. زمانی که کمپلکس $EGCG- Cu^{II}$ درون پلی‌وینیل‌الکل، الکتروریسی شود، فعالیت ضد باکتریایی قوی‌ای حاصل می‌شود [۲۰].

پلئوروسیدین[۱۰]، یک ترکیب ضدمیکروبی جدید است که در محدوده گسترده‌ای از لحاظ درجه حرارت، میزان نمک و Ph دارای خاصیت باکتری‌کشی است. در پژوهش انجام شده توسط ونگ[۱۱] و همکاران در سال ۲۰۱۵، به منظور حفظ زیست فعالی و خاصیت ضد میکروبی پپتید[۱۲] در بسته‌بندی‌های مواد غذایی، این ماده را به همراه پلی‌وینیل‌الکل، الکتروریسی نمودند، چرا که کاربرد مستقیم این پپتید در بسته‌بندی‌ها به علت از دست دادن خاصیت ضدمیکروبی خود عملاً غیرممکن است. الگوی رهایش این ماده از الیاف، نشان‌دهنده رهایش آنی ماده در ابتدا بوده که نرخ این رهایش، توسط دمای محیط قابل تنظیم می‌باشد. مطالعات آزمایشگاهی به وضوح نشان دادند که پپتید گنجانده شده در الیاف، از عوامل بیماری‌زای ناشی از مواد غذایی جلوگیری به عمل می‌آورد [۲۵].

در پژوهش دیگری برای افزایش خاصیت ضدباکتریایی سلولز باکتریایی[۱۳](BC)، که به علت خلوص بالای محتوای سلولزی و ساختار شبکه‌ای نانولیفی اصلاح شده آن، ماده‌ای با قابلیت به کارگیری در مواد بسته‌بندی فعال می‌باشد، ε- پلی‌لایسین[۱۴](EPL) که یک پپتید طبیعی

1- Soy Protein Isolate
3- Polyethylene Oxide
3- Allyl Iso Thio Cyanate
4- β-Cyclodextrin
5- Chitosan
6- Trifluoroacetic Acid

۷- ترکیبات آنتی‌اکسیدان فنلی موجود در چای با خاصیت ضدسرطان هستند.

8- Epigallocatechin-3-Gallate
9- Escherichia Coli
10- Pleurocidin
11- Whang
12- Peptide
13- Bacterial Cellulose
14- ε-Poly-L-lysine, EPL

می‌باشد، به عنوان یک نگهدارنده غذایی بهداشتی توسط عملیات اتصال عرضی روی سطح نانو الیاف(BC) نشانده شد. نشان داده شد که نانوالیاف کامپوزیتی BC/EPL در مقابل باکتری گرم- منفی اشرشیا و گرم مثبت استافیلوکوکوس اورئوس[1] دارای فعالیت ضدباکتریایی می‌باشند و این فعالیت با افزایش غلظت(EPL) سطحی بیشتر می‌شود[۲۶].

در تحقیق انجام شده توسط خانم سیده سارا اثناعشری و همکاران در سال ۲۰۱٤ [۲۷]، تولید موفقیت‌آمیز نانوالیاف همگن و یکنواخت کفیران[2] برای اولین بار گزارش شده است. استفاده از این نانوالیاف بیوپلیمری تولید شده به علت زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر بودن و از همه مهم‌تر خوراکی بودن آن در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی پیشنهاد شده است.

همچنین نشان داده شده است که الیاف الکتروریسی شده[3](PVA) حاوی نانوذرّات چای پیو- ره[4] نیز فعالیت ضد باکتریایی مؤثری در مقابل باکتری اشرشیا نشان می‌دهد. به کارگیری چنین ترکیبات زیست فعالی در بسته‌بندی‌های فعال مواد غذایی بر اساس مکانیزم رهایش کنترل شده آن‌ها همچنان در دست بررسی است. ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۳، از خاصیت آنتی‌اکسیدانی ترکیبات فنلی طبیعی یعنی عصاره تمشک و گالیک اسید[5] برای تولید نانوالیافی با خصوصیات آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی استفاده نمودند. بسترهای لیفی تولید شده توانایی بالقوه‌ای را در حفظ مواد غذایی در بسته‌بندی‌های فعال نشان دادند [۲۱].

در پژوهش دیگری (۲۰۱٦) نانوالیاف پلی‌وینیل‌الکل (PVA) حاوی روغن اسانس دارچین[6](CEO) کپسوله شده در β- سیکلودکسترین β-CD، به روش الکتروریسی تهیه شده و نتایج، حاکی از فعالیت عالی ضدمیکروبی فیلم‌های تهیه شده از این نانوالیاف به خصوص در مقابل باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیاکلی می‌باشد. پایداری حرارتی فیلم‌های تهیه شده به علت وجود برهمکنش‌های مولکولی بین سه جزء تشکیل‌دهنده نانوالیاف بهبود یافت. به علاوه نشان داده شد که فیلم‌های نانولیفی PVA/ CEO/b-CD به طور مؤثری باعث افزایش ماندگاری توت فرنگی می‌شود، از این رو، می‌توانند ماده مناسبی برای بسته‌بندی فعال این ماده غذایی محسوب شوند[۳۰].

در پژوهش مشابه دیگری نشان داده شده که الیاف زئین حاوی گالیک اسید دارای پایداری حرارتی و شیمیایی بالایی بوده و علاوه بر داشتن خصوصیات ضد باکتری و ضدقارچی مناسب، فعالیت آب[7] پایینی را نیز به همراه دارند[۱۷]. این الیاف با داشتن رهایش سریع ترکیب فعال می‌توانند گزینه‌های خوبی برای بسته‌بندی مواد غذایی بوده و حتّی به عنوان پوشش‌های خوراکی برای مواد غذایی خشک مورد استفاده قرار گیرند.

علاوه بر این‌ها، مواد فرّار طبیعی با خاصیت ضدمیکروبی نیز در سامانه‌های بسته‌بندی فعال مواد غذایی حائز اهمیت هستند. مهم‌ترین مسئله در به کارگیری این گونه مواد، جلوگیری از تخریب این مواد فرّار و رهایش کنترل شده این ترکیبات می‌باشد. در این راستا، ماشرونی[8] و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۲۲]، قابلیت الکتروریسی را در کپسوله کردن ترکیبات معطر[9] برای انتشار رطوبت تولید شده، مورد ارزیابی قرار دادند. به طوری که یک ترکیب معطر مدل، پریل آلدهید[10]، در پلولان[11] و β- سیکلودکسترین کپسوله شده و غشاهای نانو لیفی به روش الکتروریسی از آن‌ها تولید گردید و به رطوبت تولید شده اجازه رهایش داده شد. فرآیند کپسوله شدن سریع و مؤثر بوده و محصول نهایی یک غشای نانولیفی فعال است که

1- Staphylococcus Aureus
2- Kefiran
3- Electrospun Fibers
4- Pu-reh
5- Gallic Acid
6- Cnnamon Essential Oil(CEO)

7- Water Activity
8- Mascheroni
9- Aroma Compound
10- Perillaldehyde is an Aroma Compound
11- Pullulan

می‌تواند مستقیماً برای کاربردهای بسته‌بندی فعال مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد.

علاوه بر این، کاربردهای بالقوه، بـه کـارگیری نانوالیـاف الکتروریسی شده در بسته‌بندی‌های هوشمند نیز مورد بررسی و مطالعـه قـرار گرفتـه اسـت. بـسته‌بنـدی هوشـمند، بـه بسته‌بندی‌های متشکله از مواد شـیمیایی یـا سنـسورهایی کـه نشان‌دهنده وضعیت کیفیـت و سـلامت مـواد غـذایی در اثـر تغییرات شرایط محیط داخلی و خارجی بسته‌بندی می‌باشـند، اطلاق می‌شود. در واقع یک بسته‌بندی هوشمند به عنوان یک ابزار ارتباطی به مشتری کمک می‌کند که درباره کیفیت اغذیه بـسته‌بنـدی شـده اطّـلاع کـسب کنـد [۲۳]. در ایـن میـان، بسته‌بندی‌های هوشمندی که حائز اهمیت بسیاری در صـنایع خوراکی‌ها و نوشدنی‌ها هستند، از نانوحسگرهای حساس بـه (pH)[1] به عنوان جزئی از ماده بسته‌بنـدی اسـتفاده مـی‌کننـد. حسگرهای (pH) لیفی شکلی، با افزودن رنگزاهـای حـساس به (pH) بـه محلـول پلیمـری پلـی‌آمیـد ٦ و ٦ تهیـه گردیـد. هرچند حسگر تولید شـده تنهـا بـرای محـدوده کـوچکی از pHها مناسب بود [٢٤].

جدای از کاربردهای نانوالیاف در بسته‌بندی‌هـای فعـال و هوشمند، گزینه‌های بالقوه‌ای نیز برای استفاده در ساختارهای چندلایه هستند. زمـانی کـه نانوالیـاف الکتروریـسی شـده در لایه‌های میانی مواد بسته‌بندی قرار می‌گیرنـد، باعـث تقویـت خـصوصیات مکـانیکی، نـوری و عملکـردی بـسته‌بنـدی می‌گردند. از طرف دیگر، بسته‌بندی مواد غذایی بـا خاصـیت کنترل حرارتی و ممانعت در برابر نفوذ اکسیژن بسیار مطلوب است. برای مثال ثابت نگه داشتن دمای غذاهای منجمد شـده در حین فرآیند نقل و انتقال و ذخیره‌سازی بسیار مهم بوده و معمولاً مواد تغییر فازدهنده‌ای مانند دودکان[2] این نقـش را بـه عهده دارند. بنـابراین کپـسوله کـردن ایـن ترکیـب در الیـاف الکتروریسی شده زئین، تولیـد مـواد بـرای بـسته‌بنـدی‌هـای زیستی را امکان‌پذیر می‌سازد. کسب رانـدمان بـالاتر کپـسوله کردن دودکان توسط نانوالیاف، با استفاده از الکتروریسی هـم محور امکان‌پذیر است. نانوالیاف زئین عـلاوه بـر کپـسوله کردن، به عنوان عامل تقویت‌کننده در ساختارهای چندلایـه نیز کارایی دارد. ترکیب این نانوالیاف بـا مـاتریس پلیمـری پلی‌لاکتیک‌اسید/پلـی‌اتـیلن گلایکـول(PLA/PEO)، ایجـاد مواد بسته‌بندی کامپوزیتی شفاف با کاهش ۷۰ درصـدی در نفوذپذیری اکسیژن را تسهیل کرده است [١٦].

جالب توجّه است بدانید که این فنّاوری(الکتروریـسی) با به کارگیری تجهیزات صنعتی کارآمد و دقیق برای تولیـد بسته‌بندی مواد غذایی در والنسیای اسپانیا بر مبنـای تولیـد لایه‌های میانی و پوشش‌های الکتروریسی شـده بـه منظـور بهبود خاصیت محافظتی پلیمرهای مـورد اسـتفاده در ایـن صنعت، به عرصه تجارت رسیده است. از دیگر مزایایی که می‌توان برای تجاری شدن این فنّاوری و به عنـوان مزیـت آن نسبت به ساختارهای چندلایه نام برد، عبارتند از: حفظ شفافیت لایه، عدم نیـاز بـه بینـدرها (اتـصال‌دهنـده‌هـا) و چسب‌هایی که معمولاً مشکل عدم زیست‌تخریب‌پذیری و تجدیدناپذیری دارند، قابل کنترل بودن ضخامت لایه میانی یا پوششی بـسته بـه میـزان ممانعـت مـورد نیـاز در برابـر اکسیژن، عوامل خارجی و عدم تأثیرگـذاری چـشمگیر بـر انعطاف‌پذیری و عملکرد مکانیکی ساختار.

۵- نتیجه گیری

امـروزه بـا رشـد روزافـزون فنّـاوری الکتروریـسی و پلیمرهای قابل ریسندگی با این روش و فراهم آمدن امکـان تولید نانوالیاف عامـل‌دار مـی‌تـوان بـر بـسیاری از موانـع و معضلات موجود در صنایع بسته‌بندی مواد غذایی غلبه کرد. بنابراین به کارگیری گسترده‌تر نانوالیاف الکتروریـسی شـده در صنایع بسته‌بندی، به ویـژه بـسته‌بنـدی مـواد غـذایی در آینده نزدیک پیش‌بینی می‌شود.

بـا ایـن حـال، ادغـام نانوالیـاف در مـواد بـسته‌بنـدی خوراکی‌ها، کنترل، جهـت‌گیـری و همچنـین کـسب سـایر مشخصه‌های مورد نیاز بـرای یـک بـسته‌بنـدی مطلـوب بـا قابلیت تولید مجدّد و امکان کنترل شرایط تولیـد، همچنـان چالش اصلی محققان در زمینه بهبود بسته‌بندی مواد غـذایی

1- pH-Sensitive Nanosensors
2- Dodecane

بوده، و نیازمند مطالعات تحقیقاتی بیشتری در آینده می‌باشد.

٦- منابع

1. Mihindukulasuriya, S. D. F., & Lim, L. T. (2014). **"Nanotechnology development in food packaging: A review"**, Trends in food science & technology, 40(2), 149-167.
2. Han, J. H. (Ed.). (2005). **"Innovations in food packaging"**, Academic Press.
3. Robertson, G. L. (2012). **"Food packaging: principles and practice"**, CRC press.
4. Duncan, T. V. (2011). **"Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors"**, Journal of colloid and interface science, 363(1), 1-24.
5. Weiss, J., Kanjanapongkul, K., Wongsasulak, S., & Yoovidhya, T. (2012). **"Electrospun fibers: Fabrication, functionalities and potential food industry applications"**. In Nanotechnology in the food, Beverage and Nutraceutical Industries. Woodhead publishing limited cambridge, UK.
6. Rhim, J. W., Park, H. M., & Ha, C. S. (2013). **"Bio-nanocomposites for food packaging applications",** Progress in polymer science, 38(10), 1629-1652.
7. Pham, Q. P., Sharma, U., & Mikos, A. G. (2006). **"Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue engineering applications: a review"**, Tissue engineering,12(5), 1197-1211.
8. Torres-Giner, S. (2011). **"Electrospun nanofibers for food packaging applications"**. In J. M. Lagaron (Ed.), Multifunctional and nanoreinforced polymers for food packaging. Woodhead Pub.
9. Torres-Giner, S., Ocio, M. J., & Lagaron, J. M. (2008). **"Development of active antimicrobial fiber - based chitosan polysaccharide Nanostructures using electrospinning"**, Engineering in life sciences, 8(3), 303-314.
10. Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. E., Yong, T., Ma, Z., & Ramaseshan, R. (2006). **"Electrospun nanofibers: solving global issues"**, Materials today, 9(3), 40-50.
11. Gomes, D. S., da Silva, A. N., Morimoto, N. I., Mendes, L. T., Furlan, R., & Ramos, I. (2007). **"Characterization of an electrospinning process using different PAN/DMF concentrations"**, Polimeros, 17(3), 206-211.
12. Xu, C. Y., Inai, R., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2004). **"Aligned biodegradable nanofibrous structure: a potential scaffold for blood vessel engineering"**, Biomaterials, 25(5), 877-886.
13. Pandey, J. K., Reddy, K. R., Kumar, A. P., & Singh, R. P. (2005). "**An overview on the degradability of polymer nanocomposites"**. Polymer degradation and stability, 88(2), 234-250.
14. Tsutsumi, H., & Hara, C. **"Characterization of new type polymer composites prepared by in situ coffining electrospun fibers into polymer matrixes."**
15. Chen, G., & Liu, H. (2008). **"Electrospun cellulose nanofiber reinforced soybean protein isolate composite film."** Journal of applied polymer science, 110(2), 641-646.
16. Busolo, M. A., Torres-Giner, S., & Lagaron, J. M. (2009). **"Enhancing the gas barrier properties of polylactic acid by means of electrospun ultrathin zein fibers."** In ANTEC, proceedings of the 67th annual technical conference, Chicago (Vol. 5, pp. 2763-2768).
17. Neo, Y. P., Swift, S., Ray, S., Gizdavic-Nikolaidis, M., Jin, J., & Perera, C. O. (2013). **"Evaluation of gallic acid loaded zein sub-micron electrospun fibre mats as novel active packaging materials."** Food chemistry, 141(3), 3192-3200.

18. Vega-Lugo, A. C., & Lim, L. T. (2009). **"Controlled release of allyl isothiocyanate using soy protein and poly (lactic acid) electrospun fibers."** Food Research International, 42(8), 933-940.
19. Torres-Giner, S., Ocio, M. J., & Lagaron, J. M. (2009). **"Novel antimicrobial ultrathin structures of zein/chitosan blends obtained by electrospinning."** Carbohydrate Polymers, 77(2), 261-266.
20. Sun, L. M., Zhang, C. L., & Li, P. (2011). **"Characterization, antimicrobial activity, and mechanism of a high-performance (−)-epigallocatechin-3-gallate (EGCG)− CuII/polyvinyl alcohol (PVA) nanofibrous membrane."** Journal of agricultural and food chemistry, 59(9), 5087-5092.
21. 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), 467-472.
22. 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), 17-25.
23. Kuswandi, B., Wicaksono, Y., Abdullah, A., Heng, L. Y., & Ahmad, M. (2011). **"Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety."** Sensing and instrumentation for food quality and safety, 5(3-4), 137-146.
24. 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 electrospinning."** European polymer Journal, 46(12), 2229-2239.
25. Wang, X., Yue, T., & Lee, T. C. (2015). **"Development of Pleurocidin-poly (vinyl alcohol) electrospun antimicrobial nanofibers to retain antimicrobial activity in food system application."** Food Control, 54, 150-157.
26. Gao, C., Yan, T., Du, J., He, F., Luo, H., & Wan, Y. (2014). **"Introduction of broad spectrum antibacterial properties to bacterial cellulose nanofibers via immobilising ε-polylysine nanocoatings."** Food Hydrocolloids, 36, 204-211.
27. Esnaashari, S. S., Rezaei, S., Mirzaei, E., Afshari, H., Rezayat, S. M., & Faridi-Majidi, R. (2014). **"Preparation and characterization of kefiran electrospun nanofibers."** International journal of biological macromolecules, 70, 50-56.
28. Bikiaris, D. N., & Triantafyllidis, K. S. (2013). **"HDPE/Cu-nanofiber nanocomposites with enhanced antibacterial and oxygen barrier properties appropriate for food packaging applications."** Materials Letters, 93, 1-4.
29. Fabra, M. J., Busolo, M. A., Lopez-Rubio, A., & Lagaron, J. M. (2013). **"Nanostructured biolayers in food packaging".** Trends in food science & technology, 31(1), 79-87.
30. Wen, P., Zhu, D. H., Wu, H., Zong, M. H., Jing, Y. R., & Han, S. Y. (2016). **"Encapsulation of cinnamon essential oil in electrospun nanofibrous film for active food packaging."** Food Control, 59, 366-376.

آدرس نویسنده

استان گیلان- رشت- دانشگاه گیلان- دانشکده فنی.