

الکتروریزپوشانی: مبانی و کاربرد آن در صنایع غذایی

محمد امین میری^{۱*}، بهروز قرآنی^۲، حمید رضا میری^۳

۱- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

۲- استادیار، گروه نانوفناوری مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران.

۳- استادیار، گروه علوم آزمایشگاهی، دانشگاه علوم پزشکی تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۲۸)

چکیده

ریزپوشانی را می‌توان به صورت فرآیند پوشاندن یک ماده درون ماده دیگر و در نتیجه تولید ذراتی با قطر چند نانومتر تا چند میلی‌متر تعریف نمود. با توجه به حساسیت ترکیبات زیست فعال، روش‌های مختلفی برای ریزپوشانی وجود دارد که الکتروریزپوشانی یا انجام عملیات ریزپوشانی با استفاده از فرایندهای الکتروهیدرودینامیک (الکتروپاشش-الکتروریسی) به عنوان روشی ساده و مؤثر جهت حفظ و افزایش زیست دسترسی این دسته از ترکیبات معرفی شده که توانسته است طی سالهای اخیر مورد توجه زیاد محققین صنایع غذایی و دارویی قرار گیرد. در فرایند الکتروریزپوشانی از نیروهای الکترواستاتیکی جهت ایجاد جت‌های باردار الکتریکی از محلول‌های پلیمری حاوی ترکیبات زیست فعال استفاده می‌شود که پس از تبخیر حلال، ساختارهای فوق‌العاده نازک و کوچکی تولید می‌گردد که در صورت اتمایز شدن قطرات در میدان الکتریکی و تشکیل کپسول (گویچه شکل)، این فرایند الکتروپاشش و در صورت تشکیل نانوالیاف و تشکیل جت پایدار این فرایند الکتروریسی نامیده می‌شود. نانوالیاف دارای ویژگی‌های برجسته‌ای مانند نسبت بالای سطح به حجم، اندازه منافذ کوچک با تخلخل زیاد می‌باشد. این ویژگی‌ها باعث شده است که از نانوالیاف برای دارو رسانی، فیلتراسیون، مهندسی بافت، ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال یا غذا-داروها، تثبیت آنزیم، طراحی سنسورهای هوشمند و بسته‌بندی مواد غذایی استفاده گردد. لذا در این مقاله سعی شده است به معرفی جامع فرایند الکتروریسی یا تشکیل نانوالیاف، مبانی فرآیند، روش اجرا و کاربردهای آن در ریزپوشانی مواد غذایی که از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای در حوزه صنایع غذایی و دارویی برخوردار می‌باشد، پرداخته شود.

کلید واژگان: ریزپوشانی، الکتروریزپوشانی، نانوالیاف، فرایندهای الکتروهیدرودینامیک، ترکیبات زیست فعال

* مسئول مکاتبات: hr.miri1354@gmail.com

۱- مقدمه

ریزپوشانی را می‌توان به صورت فرآیند پوشاندن یک ماده درون ماده دیگر و در نتیجه تولید ذراتی با قطر چند نانومتر تا چند میلی‌متر تعریف نمود [۱]. ماده‌ای که ریزپوشانی می‌شود را می‌توان هسته مرکزی، جزء فعال، پرکننده، فاز داخلی، یا فاز محموله نامید. ماده پوشاننده را روکش، غشاء، پوسته، حامل، دیواره، فاز خارجی یا ماتریس می‌نامند. ماده حامل که در محصولات یا فرآورده‌های غذایی استفاده می‌شود باید درجه خوراکی داشته باشد و بتواند حصار برای ماده فعال و پیرامون آن به وجود آورد. این روش کاربردهای مفید بسیاری در صنایع غذایی دارد، زیرا می‌تواند مواد ریزپوشانی شده را در برابر شرایط بد و احتمالاً مخرب حفاظت کند. همچنین از این روش برای پوشش بو و طعم بخش فعال که ممکن است خواص ارگانولپتیک محصولات غنی شده را تحت تأثیر قرار دهد، استفاده می‌شود. علاوه بر اثرات حفاظتی ریزپوشانی روی ترکیبات غذایی، می‌توان از آنها برای بهبود خواص سیالیت، انتقال و جا به جایی مواد استفاده نمود، زیرا این مواد به جای مایع بودن به فرم جامد هستند [۱]. دو نوع اصلی کپسول‌ها را می‌توان تعریف نمود؛ نوع مخزنی و نوع ماتریسی. نوع مخزنی، پوسته‌ای در اطراف ماده فعال دارد. این نوع همچنین با نام‌های کپسول، تک هسته یا هسته-پوسته^۱ شناخته می‌شود. اعمال فشار می‌تواند به شکست کپسول‌های نوع مخزنی و در نتیجه آزادسازی محتوای آنها منجر شود. ماده فعال در نوع ماتریسی توزیع بسیار بیشتری در سراسر ماده حامل دارد؛ این پراکنش می‌تواند به صورت ریزقطراتی نسبتاً کوچک یا به شکلی یکنواخت‌تر در تمام کپسول باشد. همچنین برخلاف آنچه در نوع مخزنی است، در کپسول‌های نوع ماتریسی مواد فعال عموماً در سطح نیز وجود دارند. اما کپسول‌ها ممکن

است استوانه‌ای، بیضوی، یا دارای شکل نامنظم نیز باشند. همچنین کپسول‌ها را می‌توان بر اساس اندازه ذراتشان تعریف نمود، به عنوان مثال نانوذرات، ریزکپسول‌ها، ریزمخزن‌ها و غیره [۲]. در تکنولوژی ریزپوشانی، مواد پوشاننده یا مواد دیواره‌ای، ممکن است از جنس قندها، صمغ‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها باشند [۲]. با توجه به حساسیت ترکیبات زیست‌فعال، روش‌های مختلفی شامل خشک کردن پاششی، خشک کردن انجمادی، سرد کردن پاششی و خشک کردن پاششی، به دام انداختن در ساختارهای لیپوزومی، نیوزومی و فیتوزومی، توده‌سازی و اکستروژن وجود دارد که هر یک از روش‌های اشاره شده علاوه بر مزایا، دارای یک سری معایب نیز می‌باشند. از جمله این معایب می‌توان به استفاده از درجه حرارت‌های بالا به ویژه در خشک کن پاششی، ایجاد خلل و فرج روی سطح ذرات تولیدی، مصرف زیاد انرژی، محدودیت در تولید ذرات با قطر مشابه، راندمان پایین ریزپوشانی، عدم تبخیر کامل حلال مورد استفاده یا استفاده از حلال‌های سمی در حین فرایند، پیچیده بودن فرایند و هزینه تولید بالا اشاره نمود [۳-۵]. لذا طی سالهای اخیر، فرایند الکتروریزپوشانی یا انجام عملیات ریزپوشانی با استفاده از فرایندهای الکتروهیدرودینامیک^۲ (الکتروپاشش^۳-الکتروریسی^۴) به عنوان روشی ساده، آسان و مؤثر جهت حفظ و افزایش زیست‌دسترسی ترکیبات موثره توانسته از جایگاه ویژه‌ای بین محققین صنایع غذایی و دارویی برخوردار گردد. فرایندهای الکتروهیدرودینامیک روشی برای تولید جریان یا قطرات سیال با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی قوی است که پس از تبخیر حلال، ساختارهای فوق‌العاده نازک و کوچکی تولید می‌گردد که در صورت اتمایز شدن قطرات در میدان الکتریکی و تشکیل کپسول، این فرایند به علت ماهیت غیر مستمر آن الکتروپاشش و

2. Electrohydrodynamic atomization
3. Electrospray
4. Electrospinning

1. Core-Shell

کدام از این پیوندها نسبتاً ضعیف هستند، ولی مجموع این تعاملات می‌تواند ساختار بسیار پایداری را ایجاد کند که با مشخصات ساختاری سیستم بیولوژیک تطابق زیادی داشته باشد. برای تجمع نانو الیاف می‌توان از ماشین چرخنده (روتور) استفاده نمود. در این حالت با حرکت دورانی و سریع محفظه، الیاف روی هم فشرده و جمع می‌شوند. شکل ۱ ساختار مرتب شاخه‌های آمینو اسید در شبکه پپتیدهای آمفی فیلیک را نشان می‌دهد. ویژگی ترکیبات سازنده زنجیره جانبی اسیدهای آمینه، در سیستم پپتیدهای آمفی فیل، ویژگی‌های مرتبط با آرایش، خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی سیستم را تعیین می‌کند، بنابراین سیستم پپتیدهای آمفی فیلیک (PA) می‌تواند به صورت مناسب برای کاربردهای ویژه استفاده شود. با استفاده از روش خودآرایی می‌توان نانوالیافی با قطر ۲۵-۵۰ nm تولید نمود. در مهندسی بافت از این نوع داربست‌ها به علت تهیه نسبتاً آسان و مقرون به صرفه بودن هزینه تولید بسیار استفاده می‌شود. از طرف دیگر، این نوع از ساختارهای لیفی به علت دارا بودن قطر کم، از انعطاف پذیری بسیار بالایی برخوردار می‌باشند که از اهمیت شایان توجهی در حوزه مهندسی بافت برخوردار می‌باشد [۱۳ و ۱۲].

۲- جدایش فازی

به طور کلی مراحل تولید نانوالیاف با استفاده از این روش، شامل حل نمودن پلیمر در حلال، جداسازی فازی و ژل شدن در دمای پایین، استخراج حلال، فریزکردن و خشک کردن انجمادی می‌باشد (شکل ۲). مورفولوژی نانوالیاف تولید شده با این روش را می‌توان با تنظیم پارامترهایی مثل دمای ژلاتینه شده و غلظت پلیمر کنترل نمود [۱۴]. شبکه نانو لیفی با منافذ مرتبط با هم با استفاده از پلیمرهایی نظیر پلی-ال-لاکتیک اسید (PLLA)، پلی-لاکتیک-کو-گلیکولیک اسید (PLGA) و پلی-دی-ال-لاکتیک اسید (PDLA) با ابعادی به اندازه ۵۰-۵۰۰ نانومتر و با

در صورت تشکیل نانوالیاف و تشکیل جت پایدار این فرایند الکتروریسی نامیده می‌شود [۶]. از مزایای روش الکتروریزیوشانی می‌توان به ریزپوشانی با کارایی بالا، رهایش ثابت و پایدار مواد ریزپوشانی شده، حذف نیروهای برشی، تک مرحله‌ای بودن فرایند و از همه مهمتر قابلیت انجام فرایند در دما و فشار محیط (فرایند سرد) و در نتیجه حفاظت بیشتر مواد زیستی و بیوپلیمرها از تخریب‌های فیزیکی و شیمیایی اشاره نمود [۷].

نانوالیاف دارای ویژگی‌های برجسته‌ای مانند نسبت بالای سطح به حجم، اندازه منافذ کوچک با تخلخل بسیار زیاد می‌باشد [۸]. در طی سالیان اخیر، محققین نشان داده‌اند که مواد فعال زیستی ریزپوشانی شده در فیبرهای پلیمری در مقایسه با سایر روش‌ها، ثبات و عملکرد بهتر و بیشتری را دارا می‌باشند [۹] و در نتیجه باید به اهمیت و کارایی ویژه نانوالیاف در علوم و صنایع غذایی تاکید بیشتری گردد. الیاف یا رشته‌های پلیمری را می‌توان با روش‌های متفاوت دیگری مانند خودآرایی^۵، جدایش فازی^۶ و قالب سنتزی^۷ تولید کرد. این روش‌ها در زیر به صورت خلاصه توضیح داده می‌شود.

۲- روش‌های مختلف تولید نانوالیاف

۲-۱- خود آرایی

فرایند خود آرایی روشی است که در آن واحدهای سازنده اولیه، خودشان را در یک ساختار منظم برای یک هدف خاص آرایش می‌دهند. سازوکار اصلی برای روش خودآرایی، نیروهای بین مولکولی است [۱۰ و ۱۱]. خودآرایی نانوالیاف بوسیله پیوندهای غیرکوالانسی که معمولاً پیوند هیدروژنی، یونی، برهمکنش آبدوست و واندروالس می‌باشند، به وقوع می‌پیوندد. هرچند هر

5. Self-Assembly
6. Phase separation
7. Template synthesis

زمان زیادی لازم است.

تخلخل ۹۸/۵٪ تولید شده است. البته لازم به ذکر می‌باشد که

برای تبدیل پلیمر به ساختار نانولیفی با استفاده از این روش مدت

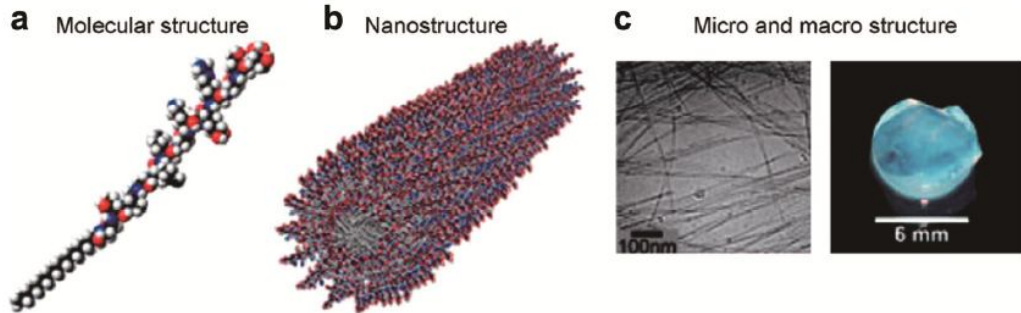


Fig 1 Schematics of the (a) molecular structure and (b) nanostructure, and images of the (c) micro and macro structure of a self assembling peptide amphiphile nanofiber network.

می‌تواند به نحوی قابل کنترل باشد، اما تا حدودی دشوار بوده و شاید جهت‌گیری الیاف ناممکن باشد [۱۲ و ۱۵ و ۱۴].

مزیت منحصر به فرد این روش توانایی طراحی نانوساختارهای سه‌بعدی بدون استفاده از تجهیزات پیچیده می‌باشد. به علاوه، تخلخل و خواص مکانیکی ساختارهای تولید شده (داربست)

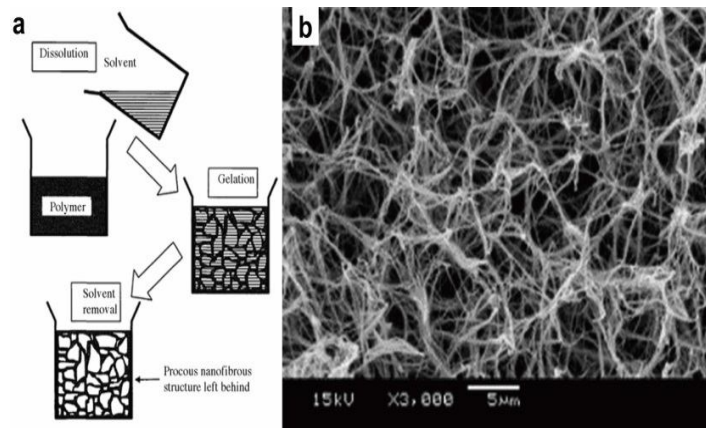


Fig 2 A schematic (a) of nanofiber formation by phase separation, and an SEM image (b) of nanofibrous structure fabricated by this technique.

آب باید استفاده گردد تا عمل اکستروژن پلیمرها از حفرات، بتواند صورت پذیرد. همچنین در سمت دیگر قالب باید محلولی قرار گیرد که پلیمرها به محض تماس با آن منجمد شوند. عدم وجود حلال و دمای پایین در تولید الیاف، امکان ریزپوشانی کردن مواد موثره دارویی برای آزادسازی پیوسته را فراهم می‌سازد (۱۶).

۲-۳- تولید با استفاده از قالب

در این روش از یک قالب، جهت تولید ماده یا ساختار دلخواه استفاده می‌شود (شکل ۳). قالب‌های مورد استفاده در این روش، ابزار متخلخلی هستند که حفرات موازی دارند. بر اساس اندازه تخلخل قالب، می‌توان نانوالیافی با قطرهای متفاوت و چگالی‌های متفاوت تولید کرد. در یک سمت این قالب از فشار

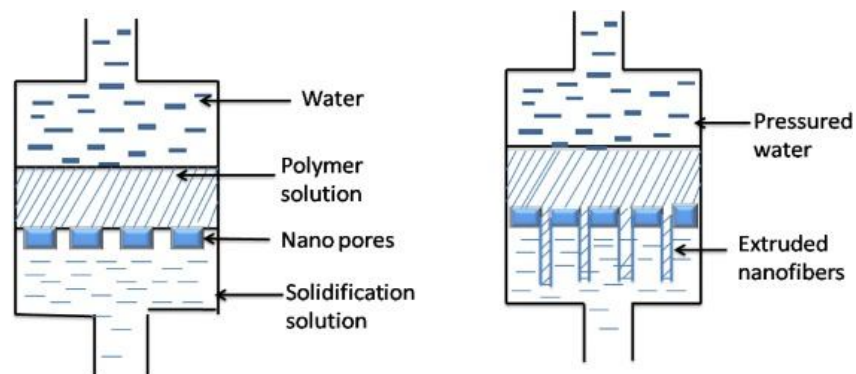


Fig 3 Nanofibers obtained by template synthesis.

۲-۴- الکتروریسی

الکتروریسی روشی ساده برای ایجاد الیاف به شکل شبکه‌ای بی‌بافت است. قطر الیاف الکتروریسی شده بسته به خصوصیات محلول پلیمر و شرایط فرآیند، از میکرومتر تا نانومتر متغیر است. این روش نسبت به دیگر فرایندها ارزانتر و ساده‌تر است و روش آسانی برای تولید صنعتی نانوالیاف بوده و برای طیف وسیعی از مواد پلیمری قابل استفاده است. نانوالیاف الکتروریسی شده به دلیل داشتن قطر کمتر از میکرون و نسبت زیاد سطح به حجم، تمایل دارند که برهم‌کنشی قوی‌تر با محیط اطراف خود داشته و این ویژگی آنها را به موادی ایده‌آل برای طراحی سنسورها، رهایش کنترل‌شده و تثبیت آنزیم‌ها مبدل ساخته است. از آنجا که طی فرایند الکتروریسی گرما حذف می‌شود و فرآیند نسبتاً ساده است، نانوالیاف الکتروریسی شده می‌تواند به عنوان حامل‌های نوین و ابتکاری برای انتقال ترکیبات زیست‌فعال و ریزپوشانی ترکیبات حساس عمل کند [۱۷-۱۹]. این فرایند به دلیل سرعت بالاتر تولید نسبت به سایر روش‌ها، سادگی تنظیم و راه‌اندازی، هزینه‌های کمتر تولید، توانسته در طی سالیان اخیر مورد استقبال قابل توجه صنایع و مراکز تحقیقاتی مختلف قرار بگیرد.

یک طرح معمول برای الکتروریسی عبارت است از نگهداری یک محلول پلیمری درون سرنگی مجهز به یک سوزن که با استفاده از یک پمپ تزریق، محلول پلیمری از درون آن عبور داده می‌شود. سوزن معمولاً به الکتروود مثبت متصل می‌شود، در حالی که الکتروود مخالف (معمولاً متصل به زمین) به جمع‌کننده وصل است. در الکتروریسی با استفاده از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا، یک جت دارای بار الکتریکی از سیالات پلیمری ایجاد می‌شود. شکل نیم‌کروی قطره معلق در انتهای نوک سوزن با افزایش ولتاژ به شکل مخروطی تغییر می‌کند که با نام مخروط تیلور^۴ معروف است. با اعمال یک ولتاژ بحرانی به سوزن، بار تجمع‌یافته در قطره پلیمری بر کشش سطحی آن غلبه نموده و باعث می‌شود تا محلول پلیمری از نوک سوزن به سمت جمع‌کننده پرتاب شود. همزمان با حرکت فورانی محلول پلیمری در هوا به سمت جمع‌کننده، حلال تبخیر شده، جت در انتهای مسیر خشک و جامد شده که در نتیجه، منجر به تشکیل یک لایه الیاف (به صورت شبکه‌ای بی‌بافت) بر روی جمع‌کننده می‌گردد (شکل ۴) [۱۵ و ۱۴]. نمای شماتیک این فرآیند در شکل ۴ نشان داده شده است.

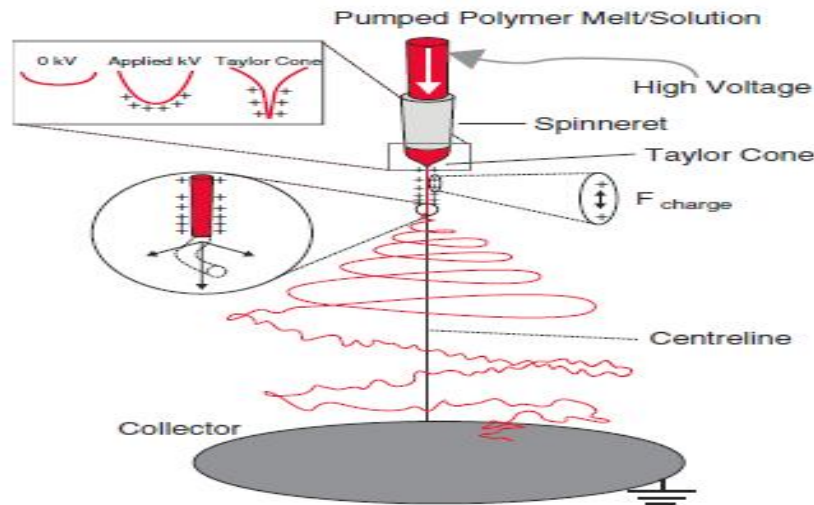


Fig 4 Design of electrospinning process

با توجه به اینکه اندازه الیاف پلیمری الکتروریزی شده از میکرومتر تا نانومتر می‌تواند تغییر نماید، لذا این سؤال پیش می‌آید که ساختار بلوری در نانوالیاف چه تغییری می‌کند و ساختار بلوری آن چه تفاوتی با پلیمر حجیم دارد. همچنین، فرآیند الکتروریزی که دارای ولتاژ بالایی است چه تاثیری می‌تواند بر روی ساختار بلورین نانوالیاف بگذارد. به کاربرد ولتاژ بالاتر ممکن است منجر به ایجاد نیروی الکتریکی قویتر شده و در نتیجه کشش بیشتری به جت پلیمری در حین فرآیند اعمال گردد و در نتیجه، ممکن است به علت تغییر در نیروهای اعمال شده به سطح جت، شکل‌گیری بلورها در مقایسه با حالتی که از ولتاژ کمتری استفاده می‌شود متفاوت باشد. اگر نانوالیاف بر روی یک صفحه یا استوانه دوار جمع گردد، سرعت گردش بیشتر ممکن است منجر به ازدیاد طول بیشتر جت شده و انتظار می‌رود که زنجیره‌های پلیمری در راستای محور طولی الیاف و به طور منظم قرار گیرند. ساختار بلورین نانوالیاف پلیمری را می‌توان با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD)، ترموگرام‌های آنالیز حرارتی روبشی افتراقی (DSC)، میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM) و طیف سنجی رزونانس مغناطیس هسته‌ای (NMR) بررسی نمود. جهت شناسایی گروه‌های عاملی نانوالیاف و تعیین نوع واکنش یا پیوندهای برقرار شده با ترکیبات

۳- خصوصیات اصلی نانوالیاف

بطورکلی، خصوصیات اصلی نانوالیاف را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم نمود که شامل قطر و مورفولوژی، ساختار مولکولی و خواص مکانیکی می‌باشد.

۳-۱- قطر و مورفولوژی

اندازه‌گیری میانگین قطر، محاسبه خلل و فرج سطح الیاف، اندازه‌گیری تخلخل و ضخامت لایه‌ها و همچنین بررسی مورفولوژی نانوالیاف الکتروریزی شده (تشکیل الیاف بدون گویچه^۴) از اهمیت بسزایی در مطالعه ساختاری نانوالیاف برخوردار بوده و یکی از فاکتورهای اصلی برای تعیین شرایط بهینه در این فرآیند می‌باشد (۲۲). مورفولوژی نانوالیاف را می‌توان بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM) و میکروسکوپ نیرو اتمی (AFM) مورد بررسی قرار داد. جهت بررسی اندازه خلل و فرج بر روی رشته‌های لیفی جمع شده روی سطح جمع‌کننده نیز می‌توان از پروسیمتری با تفکیک مولکولی استفاده نمود که روش برناتور-امیت-تلر (BET) معمولترین روش می‌باشد [۱۰].

۳-۲- ساختار مولکولی

برای رسیدن به تداوم جریان شتابدار محلول در طول الکتروریسی لازم است. در محلول پلیمری با ویسکوزیته کم، مقدار ملکول‌های حلال بیشتر بوده و میزان آمیختگی زنجیره‌ها کمتر است و در نتیجه به علت عدم درگیری زنجیره‌های پلیمری، گویچه‌ها در میان الیاف تشکیل می‌شوند. زمانی که ویسکوزیته یا به عبارت دیگر میزان درهم آمیختگی زنجیره‌های پلیمری در محلول افزایش می‌یابد، بارهای الکتریکی قرار گرفته بر روی جت قادرند کشش کاملی به محلول وارد آورده و در نتیجه باعث تشکیل الیاف پیوسته در حین فرایند گردند. نکته قابل تأمل این می‌باشد که با افزایش ویسکوزیته قطر الیاف نیز افزایش خواهد یافت [۲۳].

۴-۲- کشش سطحی

در الکتروریسی، بار محلول پلیمری باید به حد کافی زیاد باشد تا بر کشش سطحی محلول غلبه کند. سرعت محلول پلیمری از نوک سوزن به سمت جمع‌کننده افزایش یافته و بر اثر اعمال ولتاژ بالا، جت الکتروریسی در حین فرایند تشکیل می‌گردد. حال اگر بر اثر کشش سطحی زیاد، تعادل بین نیروهای اعمال شده بر سطح جت تغییر پیدا نماید، محلول پلیمری به شکل قطرات ریز تجزیه شده (اتمایز شدن محلول پلیمری) و به جای تشکیل یک جت پایدار و تولید نانوالیاف، فرآیند الکتروپاشش صورت خواهد پذیرفت [۱۰].

۴-۳- هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی فاکتور دیگری است که می‌تواند بر فرآیند الکتروریسی موثر باشد. معمولاً، هدایت الکتریکی به نوع پلیمر، حلال و نمک‌های قابل یونیزه بستگی دارد. افزایش هدایت الکتریکی محلول منجر به افزایش بار الکتریکی جت و در نتیجه کشش بیشتر آن و کاهش قطر الیاف می‌گردد [۲۴ و ۱].

۴-۴- ولتاژ

فرآیند الکتروریسی زمانی آغاز خواهد شد که نیروی الکترواستاتیک در محلول بر کشش سطحی آن غلبه کند. بطور کلی، هرگاه ولتاژ اعمال شده بیشتر از ۶ kV شود قادر است تا محلول معلق از نوک سوزن را هنگام شروع فرایند به شکل مخروطی تیلور تبدیل نماید. با کنترل ولتاژ اعمال شده می‌توان

ریزپوشانی شده می‌توان از تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) استفاده نمود [۱۰ و ۱۱].

۳-۳- خواص مکانیکی

نانوالیاف پلیمری الکتروریسی شده قابلیت بکارگیری در زمینه‌های تخصصی متعددی همانند تولید فیلم‌های خوراکی، طراحی و ساخت سامانه‌های فیلتراسیون پیشرفته، ساخت سنسورهای هوشمند، استفاده در ساخت بافت‌های مصنوعی و غیره را دارد. اما نکته حائز اهمیت این می‌باشد که برای بررسی طول عمر و دوام مواد/پلیمر در چنین کاربردهایی باید خواص مکانیکی لایه بررسی شود. هنگامی که قطر الیاف از میکرون تا حد نانو کاهش می‌یابد، چه تغییری در خواص مکانیکی ایجاد می‌گردد و یا اینکه تغییر در ساختار بلوری نانوالیاف چه تاثیری بر خواص مکانیکی آنها و لایه‌های تشکیل شده از آنها می‌گذارد. برای آزمایش مکانیکی لایه‌های نانوالیاف از روش آزمایش استحکام کششی استفاده می‌شود [۱۱].

۴-۴- فرآیند الکتروریسی: عوامل موثر بر قطر

و مورفولوژی نانوالیاف

۴-۱- وزن مولکولی و غلظت محلول

وزن مولکولی پلیمر نشان دهنده طول زنجیره پلیمری است و بر ویسکوزیته محلول تاثیر گذار است زیرا طول پلیمر مشخص کننده میزان درهم آمیختگی زنجیره‌های پلیمری در حلال است. طی فرایند الکتروریسی، جت محلول پلیمری از نوک سوزن خارج شده و به سمت صفحه جمع‌کننده کشیده خواهد شد، در حین کشش محلول پلیمری درهم آمیختگی زنجیره‌های مولکولی از فروپاشی جت در اثر چرخش در میدان الکتریکی جلوگیری می‌کند که این امر موجب پیوسته بودن حرکت جت می‌گردد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که غلظت محلول پلیمری در فرایند الکتروریسی و تشکیل نانوالیاف از اهمیت زیادی برخوردار بوده و در نتیجه محلول‌های پلیمر مونسومری زمانی که وارد میدان الکتریکی و فرایند الکتروریسی شوند به شکل الیاف در نخواهند آمد [۱۰]. افزایش در غلظت، مشابه افزایش وزن مولکولی موجب افزایش درهم آمیختگی زنجیره‌های پلیمری می‌شود که

قطرالیاف ناشی از کاهش شدت میدان الکتریکی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و فرایند به سمت تشکیل کپسول یا گویچه سوق پیدا می‌نماید [۳۰].

۴-۷- قطر روزنه پیپت یا سوزن

قطر داخلی سوزن یا روزنه تأثیر بسزایی بر فرایند الکتروریزی دارد. قطر داخلی کوچک‌تر از مسدود شدن سوزن کاسته و به همان نسبت میزان گویچه‌ها در نانوالیاف الکتروریزی شده کاهش می‌یابد. همچنین کاهش قطر داخلی سوزن، منجر به کاهش قطر الیاف در فرایند الکتروریزی می‌گردد [۳۱].

۴-۸- دمای فرآیند

دمای محلول، بر افزایش نرخ تبخیر تأثیر دارد و همچنین ویسکوزیته محلول پلیمری را تغییر می‌دهد. افزایش قابلیت حرکت مولکول‌های پلیمر و در نتیجه افزایش دما اجازه می‌دهد تا نیروهای کولمب کشش بیشتری را بر مولکول‌های پلیمر اعمال نمایند و در نتیجه مانع از تشکیل گویچه‌ها در ساختار نانوالیاف و بالطبع افزایش تشکیل الیاف با قطر و ظرافت کمتری گردد [۳۲ و ۲۷].

۵- روش‌های الکتروریزپوشانی بر پایه

تشکیل نانوالیاف

فرایندهای الکتروهیدرودینامیک، الکتروپاشش و الکتروریزی، به عنوان فناوریهای «خواهر» در نظر گرفته می‌شوند [۳۳]. با این حال، مواردی وجود دارد که می‌تواند دو فرایند را از هم متمایز نمود. روش الکتروپاشش روش متمایز کردن مایع به وسیله نیروهای الکتریکی و در نتیجه تشکیل کپسول (گویچه شکل) در سطح جمع‌کننده می‌باشد [۳۴]، در حالی که در فرایند الکتروریزی به علت تشکیل جت یا جت پایدار (جت سیال پیوسته) در حین فرایند، الیاف به صورت لایه‌ای بی‌بافت روی سطح جمع‌آوری می‌گردند [۳۵]. در ساختار جت، درگیری بین مولکول‌های موجود در سیال نقش مهمی در رخداد فرایند

رشته‌هایی با قطر ده‌ها نانومتر تا چند میکرون تولید نمود. بطور کلی، نتایج متفاوتی از تاثیر پارامترهای فرآیند بر مورفولوژی و قطر الیاف گزارش شده است. به عنوان مثال گزارش شده است که با افزایش ولتاژ می‌توان گویچه‌ها را کاملاً از روی سطح نانوالیاف از بین برد. دلیل آن تاثیر ولتاژ بر روی شکل و بار سطحی مخروط تشکیل شده بر روی نوک سوزن، سرعت خروج محلول پلیمری از نازل (سرعت چکیدن) و همچنین سرعت جریان در طی فرایند می‌باشد [۲۵]. ولتاژ بالاتر موجب افزایش بار الکتریکی محلول و قوی‌تر شدن میدان الکتریکی شده و در نتیجه کشش بیشتری به جت از نوک سوزن تا سطح جمع‌کننده اعمال می‌گردد. این تغییرات باعث کاهش یا از بین رفتن کامل گویچه‌ها و در نهایت منجر به بهبود ویژگی‌های مورفولوژی در ساختار نانوالیاف می‌گردد [۲۶].

۴-۵- سرعت جریان

گزارش شده است با تغییر سرعت جریان، تغییر جزئی در ساختار مورفولوژی الیاف مشاهده می‌گردد و کمترین تاثیر را در مقایسه با سایر پارامترهای فرآیند دارد [۲۷]. وقتی سرعت جریان در حین فرایند افزایش یابد، تعداد گویچه‌ها در ساختار نانوالیاف به همان نسبت افزایش یافته و همچنین در بیشتر موارد باعث افزایش قطر الیاف به علت خروج بیش از حد محلول از نوک سوزن می‌گردد [۲۷ و ۲۸ و ۱۰]. مطالعات نشان داده است که با کاهش سرعت جریان محلول، زمان لازم برای تبخیر حلال افزایش یافته و در نتیجه جت تشکیل شده در حین فرایند بیشتر کشیده می‌شود [۲۸]. بنابراین سرعت جریان کمتر جهت تولید الیاف ظریف‌تر و فاقد گویچه مطلوب می‌باشد.

۴-۶- فاصله بین نازل تا جمع‌کننده

افزایش فاصله میان نازل تا جمع‌کننده منجر به طولانی‌تر شدن زمان پرواز جت در حین فرایند می‌گردد. در نتیجه شکل‌گیری الیاف با مورفولوژی ایده آل افزایش و میانگین قطر آنها کاهش خواهد یافت [۲۹]. در مواردی، هنگامی که فاصله بین نوک سوزن تا سطح جمع‌کننده، در یک ولتاژ ثابت، افزایش می‌یابد،

مشابه یا سیستمهای حلال دو جزئی یا چند جزئی حل می‌شود (شکل ۵) [۴۰]. طی فرآیند الکتروریسی، همزمان با حرکت محلول پلیمری از نوک سوزن به سمت جمع‌کننده، میدان الکتریکی باعث تبخیر کامل حلال شده و در نتیجه الیاف به صورت شبکه‌ای بی بافت روی سطح جمع‌کننده انباشته می‌گردند [۳۰]. بنابراین، به علت تبخیر حلال و فعل و انفعالات صورت گرفته در حین فرایند، ماده فعال درون ماتریس پلیمری محبوس گشته و عملیات ریزپوشانی بدین طریق انجام می‌پذیرد. این روش برای ریزپوشانی ترکیبات بیولوژیکی حساس مانند پروتئین‌ها، سلول‌ها و آنزیم‌ها مناسب نیست. زیرا برخی از حلال‌های آلی که برای الکتروریسی پلیمرهای مصنوعی استفاده می‌شود ممکن است باعث ایجاد تغییرات کنفورماسیونی در پروتئین‌ها شده و یا حساسیت بیولوژیکی آنها را بعد از هم‌زدن مکانیکی، هم‌وزن‌سازی یا فرآیند اولتراسونیک تخریب نمایاند [۴۱].

الکتروپاشش و الکتروریسی بازی کرده که به ترتیب منتهی به تولید گویچه و یا الیاف می‌شوند. اگر غلظت محلول پلیمری کم باشد، جت در فاصله اندکی از رأس مخروط تیلور ناپایدار شده و به قطرات کوچکی متلاشی می‌شود. این قطرات باردار در فضا پراکنده و به علت دافعه الکتریکی از هم فاصله گرفته و به سمت جمع‌کننده کشیده می‌شوند [۳۶].

فرآیند الکتروریزپوشانی برای ترکیبات زیست فعال به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که عبارتند از الکتروریزپوشانی تک محوره، دو محوره، انجام فرایند الکتروریزپوشانی بر پایه محلول‌های امولسیون و بارگذاری سطحی بعد از الکتروریسی.

۵-۱- الکتروریزپوشانی محلول‌های پلیمری بر

اساس سیستم تک محوره

حل نمودن مستقیم ماده فعال (ترکیبات موثره یا زیست فعال) در حامل پلیمری رایج‌ترین روش الکتروریزپوشانی می‌باشد [۳۷-۳۹]. قبل از انجام فرآیند، ماده فعال و پلیمر در یک حلال

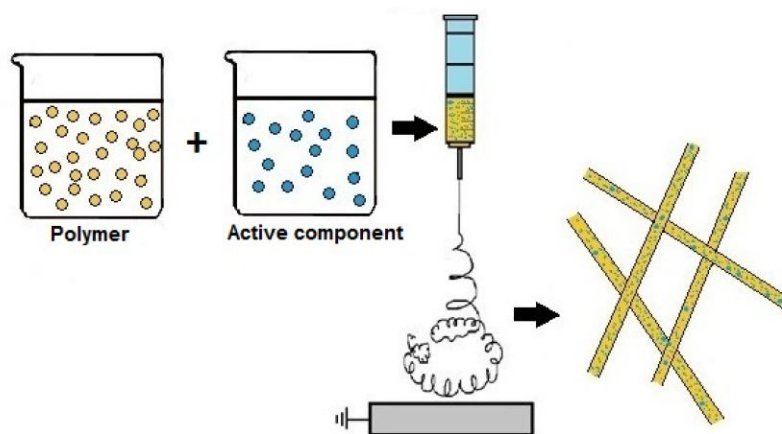


Fig 5 Schematic illustration of blend electrospinning.

برخلاف الکتروریسی تک محوره که ماده فعال به طور تصادفی در داخل ماتریس الیاف توزیع می‌گردد، الکتروریسی دو محوره قادر به ریزپوشانی ماده فعال در داخل مرکز الیاف می‌باشد [۴۲ و ۴۳]. ماده فعال و پلیمر طی فرآیند الکتروریسی در سوزن

۵-۲- الکتروریزپوشانی محلول‌های پلیمری بر

اساس سیستم دو محوره

برخوردار باشد (شکل ۶b). همچنین ماده فعال می‌تواند محلول/ترکیبی با قابلیت الکتروریسی یا فاقد قابلیت الکتروریسی باشد، اما محلول پلیمری به عنوان دیواره یا پوسته باید قابلیت الکتروریسی از همه لحاظ را دارا باشد. مهمترین مزیت الکتروریسی دو محوره نسبت به الکتروریسی تک محوره انعطاف‌پذیری در نوع و اندازه الیافی است که تولید می‌شود [۴۴].

دو محوره (متحد مرکز) جدا از هم قرار دارند به طوری که در نهایت، نانوالیاف با ساختار هسته-پوسته حاصل می‌گردد (شکل ۶a). در این روش، ماده فعال در قسمت داخلی سوزن دو محوره (به عنوان هسته) و محلول پلیمری در فضای بین سوزن داخلی و خارجی (به عنوان پوسته یا دیواره ماده ریزپوشانی کننده) قرار می‌گیرد و به طور همزمان رسیده می‌شوند. نکته مهم در این روش این می‌باشد که مخروط تیلور باید از پایداری کاملی

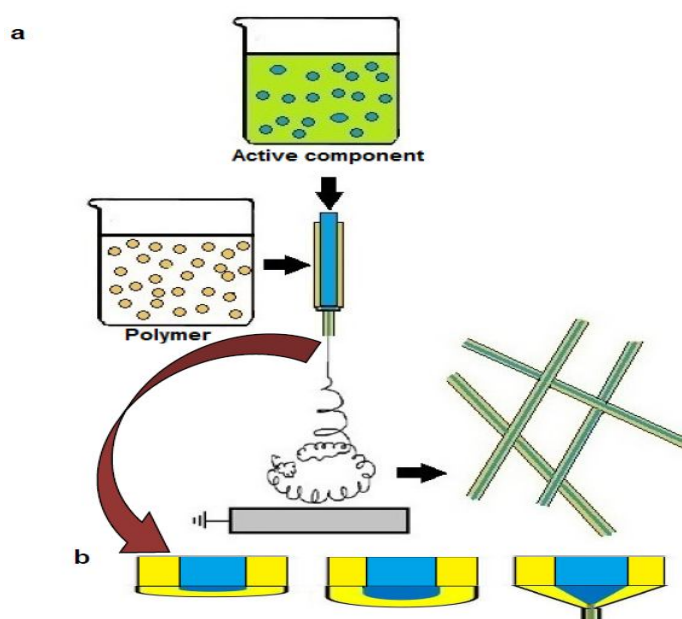


Fig 6 Schematic illustration of (a) co-axial electrospinning, (b) a stable deformation of 'core and sheath Taylor cone' under the influence of electrostatic charges during co-axial electrospinning.

برای تشکیل ساختار هسته - پوسته نیازمند یک سوزن دو محوره است، در این روش، قابلیت تشکیل همان ساختار نانوالیاف (هسته-پوسته) به آسانی و با استفاده از یک سوزن ساده و سیستم تک محوری امکان پذیر می‌باشد. ژو و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که کشش و طویل شدن محلول امولسیون پلیمری تحت تاثیر نیروهای الکترواستاتیکی منجر به د-امولسیفیکاسیون^۱ و تشکیل ساختار هسته-پوسته می‌گردد (شکل ۷b) [۴۶].

۳-۵ الکتروریزپوشانی بر پایه محلول‌های

امولسیونی

شکل ۷a شماتیکی از فرایند الکتروریسی بر پایه محلول‌های امولسیونی را نشان می‌دهد. در الکتروریسی امولسیون آب در روغن (w/o)، پلیمر در حلال آلی و ترکیب فعال در فاز آبی حل می‌شود. الکتروریسی امولسیون یک فرآیند ریزپوشانی کنترل شده با رهایش یکنواخت می‌باشد. در این روش، ماده فعال توسط امولسیفایرها یا مواد فعال سطحی احاطه و به درون یک حامل پلیمری اضافه می‌شود [۴۵]. برخلاف الکتروریسی دو محوره که

10. De-emulsification

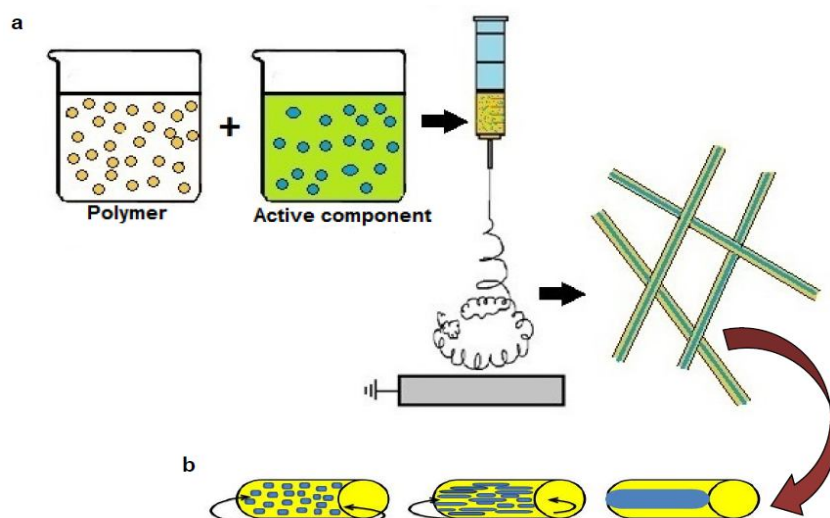


Fig 7 Schematic illustration of (a) emulsion electrospinning, (b) de-emulsification process of the polymeric emulsion under the influence of electrostatic charges during emulsion electrospinning.

محللول پلیمری روی ماده فعال ممکن است ایجاد گردد، جلوگیری نمود. اما انکپسولاسیون به روش جذب فیزیکی برای رهایش کنترل شده مناسب نیست زیرا که ماده فعال جذب شده بر سطح غشا الیاف ممکن است به راحتی در حین آماده‌سازی شسته شود [۴۸ و ۱].

تثبیت شیمیایی شامل تثبیت ماده فعال بر روی سطح نانوالیاف از طریق تشکیل یک پیوند شیمیایی می‌باشد بطوری که ماده فعال را نمی‌توان به آسانی از سطح نانوالیاف جدا نمود (شکل ۸b). رایج‌ترین گروه‌های عاملی سطحی برای تثبیت شیمیایی عبارتند از گروه‌های عاملی کربوکسیل، آمین و هیدروکسیل. همچنین ماده فعال از طریق روش‌های مختلفی همانند اتصالات عرضی^{۱۱} و فعالسازی گروه‌های عاملی سطحی می‌تواند پیوند کووالانسی برقرار کند. پیوند کووالانسی قوی‌ترین و پایدارترین سامانه‌های ریزپوشانی در تثبیت شیمیایی را ایجاد می‌نماید [۴۹ و ۵۰].

تجمع لایه-لایه یکی دیگر از روش‌های موثر در بارگذاری ترکیبات فعال در سطح نانوالیاف بعد از انجام فرایند الکتروریسی می‌باشد (شکل ۸c). در این روش لایه‌ای از پلی‌الکترولیت‌ها بر

۵-۴- بارگذاری سطحی بعد از الکتروریسی

ریزپوشانی می‌تواند بعد از انجام فرایند الکتروریسی و از طریق بارگذاری ماده فعال به وسیله جذب فیزیکی، تثبیت شیمیایی یا روش تجمع لایه - لایه^{۱۱} صورت پذیرد (شکل ۸). غشاهای نانوالیاف حاصل از الکتروریسی داربست مناسبی برای بارگذاری سطحی می‌باشد: (۱) سطح زیاد غشا باعث افزایش ظرفیت بارگذاری به ازاء واحد جرم می‌باشد؛ (۲) ساختار متخلخل قابلیت دسترسی سایت‌های فعال برای افزایش سرعت واکنش را فراهم می‌سازد [۴۷ و ۱].

روش جذب فیزیکی یک فرایند ساده غوطه‌وری می‌باشد (شکل ۸a). بدین صورت که نانوالیاف الکتروریسی شده در یک سوسپانسیون یا محلول خالص حاوی ماده فعال غوطه‌ور شده و ماده فعال از طریق نیروهای الکتروستاتیکی روی سطح الیاف جذب می‌گردند. روش جذب فیزیکی این امکان مهم را به وجود می‌آورد که از نانوالیاف به عنوان داربست برای بارگذاری ترکیبات مختلف استفاده نمود. همچنین با استفاده از این روش، از تغییرات فیزیکی یا شیمیایی که در حین انجام فرایند یا تهیه

12. Cross linking

11. Layer-by-Layer Assembly

می‌توانند قویاً جذب سطح یاف گردد تا یک کمپلکس پایدار ریزپوشانی تشکیل شود [۵۱].

سطح سویترا باردار رسوب نموده و یک پوشش چند لایه شکل می‌گیرد. پلی‌الکترولیت‌ها یا سایر ترکیبات باردار الکتروستاتیکی

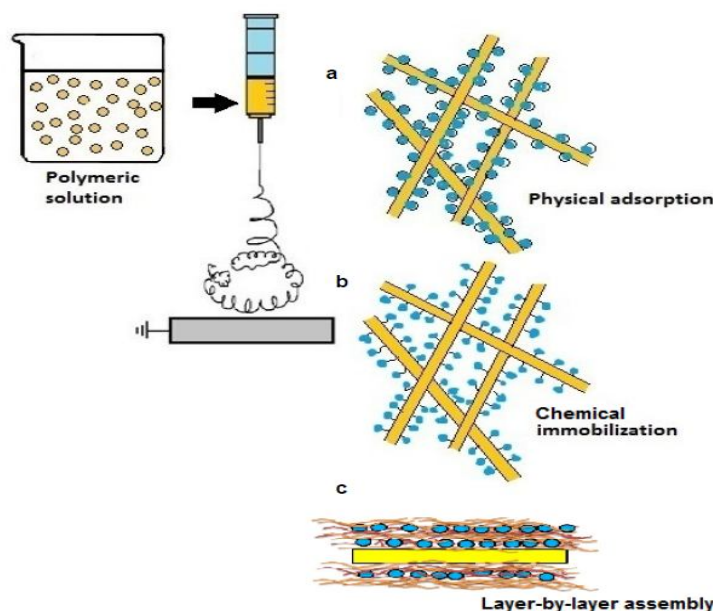


Fig 8 Schematic illustration of (a) physical adsorption, (b) chemical immobilization, (c) layer-by-layer (LbL) assembly.

می‌شوند. ژلاتین، آلژینات، کلاژن، زئین، گلیادین، کازئین، پروتئین‌های آب‌پنیر، پروتئین سویا، انواع صمغ‌ها و موسیلاژها، کیتوزان، نشاسته، استات نشاسته، نشاسته هیدروکسی پروپیل، و مشتقات سلولز انواعی از بیوپلیمرهای غذایی می‌باشند که پیش از این الکتروریزی شده‌اند. عدم سمیت، زیست تخریب‌پذیری و مقاومت مکانیکی بالای آنها از جمله مزایای این بیوپلیمرها می‌باشد [۵۲ و ۵۳ و ۲۷]. بسیاری از این بیوپلیمرها قابلیت الکتروریزی در محلول‌های آبی را ندارند. ویسکوزیته پایین و داشتن ویژگی‌های شل‌شونده با برش (رفتار سودوپلاستیک) دلیل عدم الکتروریزی محلول‌های آبی بیوپلیمرها می‌باشد. اما می‌توان از طریق مخلوط کردن محلول‌های آبی با پلیمرهای کمکی آنها را الکتروریزی نمود.

۶- پلیمرهای مورد استفاده برای

الکتروریزی

پلیمرهای طبیعی و سنتزی بسیار زیادی در طی سالیان اخیر مورد تحقیق قرار گرفته و قابلیت الکتروریزی شدن آنها بررسی شده است (جدول ۱) [۵ و ۲۳ و ۲۷ و ۵۲ و ۵۳]. پلی‌گلیکولیک اسید، پلی‌لاکتیک اسید و پلی‌کاپرولاکتون پلیمرهای سنتزی می‌باشند که برای استفاده در مهندسی بافت الکتروریزی شده‌اند. این پلیمرها به طور موفقیت‌آمیزی در سیستم‌های هدفمندرسانی و ریزپوشانی نیز استفاده شده‌اند، اما استفاده از آنها برای کاربردهای غذایی مجاز نیست (۱). در مقابل، بیوپلیمرهای غذایی مانند پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها به طور عمومی ایمن شناخته شده‌اند (GRAS)^{۱۳} و بطور گسترده‌ای در محصولات غذایی استفاده

13 - Generally recognized as safe

Table 1 List of some biopolymers used in electrospinning (52, 53)

Polymer nature	Kind of Polymer
Protein	Gelatin, collagen, elastin, silk, soy zein, gliadin, hordein, amaranth, casein, wheat, whey, marine sources proteins
Polysaccharides	cellulose and cellulose, alginate Chitosan, starch, cyclodextrins dextran, pullulan, derivatives
Synthetic	Poly lactic acid, poly capro lactone, poly vinyl alcohol, poly ethilen oxide

ترکیبات عملگر به طور معمول به شکل کپسوله در می‌آیند تا ثبات فرآورده نهایی حفظ شود و طعم گزنده و تلخ آن در هنگام خوردن احساس نشود. فرناندز و همکاران (۲۰۰۹) گزارش نمودند که کاروتن کپسول شده در مقایسه با نوع غیرکپسوله، در مواجهه با تابش طیف فرابنفش مرئی افزایش معنی‌دار پایداری نوری را از خود نشان داد. نتیجه‌گیری مطالعات ایشان این بود که رشته‌های الکترورسی شده پروتئینی چشم‌اندازی نویدبخش برای تثبیت بیشتر ترکیبات غذایی دارای ارزش افزوده ایجاد نموده‌اند [۵۵]. لی و همکاران (۲۰۰۹) اظهار داشتند که با ایجاد پیوند هیدروژنی، برهم‌کنش‌های آب‌گریزی و احتمالاً با ریزپوشانی فیزیکی مولکول‌ها توسط بیوپلیمر زئین، از نشت اپیگالوکاتچین گالات به درون آب (به عنوان شاخصی از ثبات آن) به نحو موفقیت‌آمیزی پیشگیری شد [۸]. در تحقیقی، ثبات شیمیایی گالیک‌اسید بارگذاری شده درون رشته‌های الکترورسی شده پروتئینی پس از ۳۰ روز نگهداری در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. نتایج نشانگر تفاوت ناچیز طیف‌های بررسی شده با ATR-FTIR (طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز با بازتابش کلی کاهش یافته) بین نانوالیاف نگهداری شده و تازه گالیک‌اسید در زئین بودند. همچنین نتایج نشان داد که گالیک‌اسید پوشش‌یافته در نانوالیاف زئین می‌تواند پس از ۹۰ روز نگهداری در دمای اتاق پایداری خود را حفظ کند [۴۱]. به علاوه، مطالعات نشان دادند که گالیک‌اسید پوشش‌یافته ویژگی فنی خود را حفظ نموده و فرآیند الکترورسی فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی آن را دستخوش تغییرات قرار نداده است [۴۱].

۷- کاربردهای نانوالیاف حاصل از الکترورسی

برای ریزپوشانی ترکیبات غذایی

توسعه فرآورده‌های غذایی دانشمندان این علم را بر آن داشته است تا در جستجو و معرفی روش‌های نوینی برای فرآوری و توسعه محصولات غذایی باشند. صنعت غذا هر روز ویژگی‌های پیچیده‌تری را برای ترکیبات غذایی انتظار دارد که اغلب تنها با استفاده از روش‌های ریزپوشانی امکان‌پذیرند [۵۴]. فناوری ریزپوشانی ویژگی‌های تازه‌ای را در اختیار سازندگان مواد غذایی می‌گذارد که انتقال، نگهداری و حمل این مواد را آسان‌تر نموده، از ترکیبات حساس یا فعال غذاهای عملگر نیز محافظت می‌کند. در قیاس با صنایع دارویی، در صنایع غذایی اغلب ریزپوشانی با عملیات بزرگ مقیاس تر و کم هزینه‌تر ترجیح داده می‌شود. در جدول ۲ انواع ترکیبات غذایی که در صنعت امروز غذا کپسوله می‌شوند، به طور خلاصه نشان داده شده است. با این وجود، تأکید این بخش بر آن دسته از مواد غذایی است که با استفاده از فرآیند الکترورسی به طور موفقیت‌آمیز کپسوله شده‌اند.

ریزپوشانی با استفاده از فرآیند الکترورسی برای تثبیت مولکول‌های غذایی عملگر با مزایای سلامتی بخش همچون اپیگالوکاتچین گالات [۸]، گالیک‌اسید [۴۱]، بتا-کاروتن [۵۵] و اسیدهای چرب چند حلقه‌ای اشباع [۵۶] در داخل میکرو/نانوالیاف الکترورسی شده زئین انجام شده است. کلیه این مطالعات، عملی بودن روش الکترورسی به عنوان ابزاری نوین جهت طراحی و ساخت حامل‌های لیفی برای ماندگاری بیشتر و انتقال موثرتر مولکول‌های زیست‌فعال را نشان دادند. تمامی این

Table 2 Food samples encapsulated and their applications (30, 41)

Category of food ingredients	Applications
Acidulants	Used to assist in the development of color and flavor in meat emulsions, dry sausage products, uncooked processed meats, and meat containing products
Antioxidants	To prevent degradation during processing and storage. To achieve control release of the components. To enable the handling and processing. To reduce the component interaction with other ingredients.
Colourants	To ease the handling process. To offer improved stability, solubility. To improve stability. To ease the handling process.
Enzymes or microorganisms	To increase the availability of enzyme to the substrate. To enhance the viability of the microorganisms. To facilitate the separation and recovery of enzyme. To reuse the enzyme.
Flavoring agents (such as oils, spices, seasonings and sweeteners)	To increase the availability of enzyme to the substrate. To transform liquid flavorings into stable, free flowing powder in order to ease the handling and processing. To improve flowability and reduce hygroscopicity. To prolong the sensory perception. To improve stability.
Lipids	To ease the handling process. To prevent oxidative degradation during processing and storage. To achieve control release of the components. To control release the preservatives at the suitable time.
Preservatives	To ease the handling process. To reduce the component interaction with other ingredients. To control the deposition. To reduce off-flavors.
Vitamins and minerals	To permit time-release of nutrients. To enhance the stability to extremes in temperature and moisture. To reduce each nutrient interaction other ingredients

غذایی عملگر ریزپوشانی شده بود که این اثر با کند نمودن فرآیندهای تجزیه‌ای اکسیداسیون یا هیدرولیز حاصل گردید [۵۶].
یو و همکاران (۲۰۱۰) اظهار داشتند که نانوالیاف قادر به افزایش سرعت انحلال ترکیبات کم محلول می‌باشند [۵۷]. این امر به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد الیاف الکتروریسی است، به طوری که لایه حاصل از این الیاف سطح زیادی را برای تماس ماده فعال با محیط انحلال فراهم می‌نماید. علاوه بر این، به دلیل ویژگی خیس شدن سریع سطح و سطح تماس زیاد احتمالاً انتقال حلال به درون شبکه الیاف و ماده فعال به محیط انحلال را

تورس-گینر و همکاران (۲۰۱۰) به منظور تثبیت اسید چرب امگا-۳، الکتروریسی مخلوط دکوزا هگزانوئیک اسید^{۱۴} (DHA) / زئین را انجام دادند (۵۶). بررسی ایشان به این جمع‌بندی رسید که DHA کپسول شده میزان کمتری از آلدئیدهای مؤثر بر بو و مزه (پروپانال، ۴،۲-هپتادینال^{۱۵}، و ۷،۴،۲-دکاتریانال^{۱۶}) را در مقایسه با نمونه‌های DHA آزاد منتشر کردند. کار این محققان نیز نشان‌دهنده پایدار کنندگی بالقوه فرآیند الکتروریسی بر ترکیبات

14. Docosahexaenoic acid
15. 2,4-heptadienal
16. 2,4,7-decatrienal

بارگذاری موفق آمیز اوژنول در میسل‌های سورفکتانت به درون الیاف جامد الکترورسی شده PVA، باعث محافظت بیشتر آنها شده و قابلیت انتقال آن را تسهیل نموده با بهبود حلالیت آنها در آب، به طور بالقوه ویژگی عملگر آنها را ارتقاء داده است [۶۰ و ۶۱]. الکترورسی را می‌توان به دلیل کارایی بالای انحلال، برای پخش نمودن سایر ترکیبات چربی دوست مورد استفاده قرار داد، که این می‌تواند به انتقال غذاهای عملگر چربی دوست کمک نماید.

سیکلودکسترین‌ها خانواده‌ای از الیگوساکاریدهای حلقوی هستند که ساختار مولکولی مارپیچ‌شکلی دارند. از این رو، طعم‌دهنده‌ها و رایحه‌های غذایی فرار مثل وانیلین، درون انواع مختلفی از سیکلودکسترین‌ها ادغام شده‌اند تا کمپلکس‌های در برگیرنده سیکلودکسترین تشکیل گردند. الکترورسی برای ساخت الیاف ژئین و PVA حاوی کمپلکس سیکلودکسترین‌های مختلف به کار گرفته شده است [۶۳ و ۶۲]. ریزپوشانی سیکلودکسترین‌ها در ژئین و PVA که در این مطالعات گزارش شده به دلیل ویژگی‌های ژئین و ویژگی‌های انتقال‌دهندگی سیکلودکسترین‌ها، می‌تواند منجر به ویژگی‌های نوید بخشی در این حامل‌های پلیمری شود.

برخی از مزایای کاربرد الیاف الکترورسی برای ریزپوشانی کردن آنزیم‌ها [۶۴] عبارتند از: ۱) انواع مختلفی از پلیمرها را می‌توان برای تامین نیازهای مختلف به عنوان مواد پشتیبان، الکترورسی نمود؛ ۲) تخلخل بالا و ارتباطات بینابینی الیاف الکترورسی، پلتفرمی عالی برای انتقال جرم با حداقل ممانعت به وجود می‌آورد؛ ۳) سطوح الیاف را می‌توان به نحوی که مناسب فعالیت آنزیم باشد، اصلاح نمود. ریزپوشانی لیپاز بر روی الیاف الکترورسی با استفاده از جذب سطحی فیزیکی [۶۵]، مخلوط کردن مستقیم [۶۶] یا از طریق ایجاد پیوند کووالانس [۶۷] انجام شده است. این روش‌های تثبیت لیپاز درون شبکه الیاف الکترورسی، می‌تواند برای هیدرولیز روغن‌های گیاهی، بیوکاتالیست‌ها یا واکنش‌های ترانس استریفیکاسیون مورد استفاده قرار گیرد. شبکه الیاف الکترورسی به دلیل سطح مقطع زیاد خود، دارای ظرفیت بالای بارگیری آنزیم است. مطالعات مذکور عموماً نشان دادند که لیپاز ریزپوشانی شده همان فعالیت کاتالیزوری نوع آزاد را دارد، با این تفاوت که پایداری آن بالاتر و

سرعت می‌بخشد (۵۷). یو و همکاران (۲۰۱۰) دیسپرسیون‌های جامدی از فرولیک اسید را در الیاف الکترورسی کمپوزیت پلی وینیل پیرولیدون (PVP)¹⁷ تولید نمودند. در این پژوهش، فرولیک اسید به طور همزمان با PVP (ماتریس سازنده رشته)، سدیم دودسیل سولفات و سوکرالوز (به عنوان سورفکتانت‌ها) در محلول آبی اتانول حل شد. فرولیک اسید یک آنتی‌اکسیدان فنلی است و گزارش شده که حلالیت کمی در آب دارد. فرولیک اسید ادغام شده به صورت ذرات جامد پراکنده در الیاف کامپوزیت الکترورسی شده، در مقایسه با فیلم‌های مشابه و نوع خالص فرولیک اسید، انحلال سریع‌تری در آب نشان داد [۵۷]. الیاف الکترورسی گزینه خوبی به عنوان سامانه‌های انتقالی با انحلال سریع برای ترکیباتی مثل ریبولوین که حلالیت ضعیفی در آب دارند، محسوب می‌گردند. [۵۸]. آرچی و همکاران (۲۰۱۰) از هگزادکان به عنوان یک سامانه از مدل چربی دوست به منظور تولید الیاف الکترورسی شده از پلی وینیل الکل (PVA)¹⁸ حاوی نانوامولسیون‌های روغن در آب (O/W) استفاده نمودند. قطرات روغن ادغام شده، ثبات اندازه، بدون هیچ گونه اتصال قطرات پراکنده شده روغن به یکدیگر نشان دادند. بررسی ایشان گویای امکان‌پذیر بودن استفاده از روش الکترورسی برای ریزپوشانی امولسیون‌های روغن در آب بود، در حالی که امولسیون‌های روغن در آب می‌توانند به عنوان حاملی برای مواد زیست‌فعال و چاشنی‌های چربی دوست با سینتیک‌های پایدار عمل کنند (۵۹). همچنین الکترورسی برای میکروامولسیون‌های حاوی اسانس، نظیر اوژنول در میسل‌های سورفکتانت و با حامل PVA، برای پخش ترکیبات چربی دوست انجام شده است [۶۰ و ۶۱]. بر اساس یافته‌های گایسینسکی و همکاران (۲۰۰۵) اسانس‌ها، هنگامی که در سامانه‌های غذایی استفاده می‌شوند، همواره کم‌اثر می‌گردند، زیرا اغلب آنها ترکیباتی آب‌گریز هستند، لذا بر علیه میکروارگانیزم‌هایی که اساساً در فاز آبی سامانه غذایی زندگی می‌کنند، فعالیت محدودی نشان می‌دهند. کاربرد PVA آب‌دوست به عنوان حامل، به خاطر انحلال همزمان PVA، توجیه‌کننده آزادسازی سریع میکروامولسیون‌ها می‌باشد (۶۰، ۶۱). کریچل و همکاران (۲۰۰۹، ۲۰۱۰) اظهار نمودند که

17. Polyvinyl pyrrolidone

18. Polyvinyl alcohol

شدند. نانوالیاف الکتروریسی شده عموماً راندمان بارگذاری بالایی داشتند، بی آنکه مورفولوژی آنها مختل شود. ثابت شد که عصاره‌های گیاهی بارگذاری شده پایداری خوبی نشان دادند و خواص عملکردی خود را پس از فرآیند الکتروریسی حفظ نمودند. تثبیت موفق این عصاره‌ها درون حامل‌های پلیمری خواص عملکردی رشته‌های ساخته شده را بهبود بخشید.

فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی یا ضد میکروبی این رشته‌های الکتروریسی شده حاکی از آنست که می‌توان آنها را احتمالاً به عنوان اجزای بسته‌بندی فعال یا سایر مواد عملگر دارای ساختار نانو برای کاربردهای غذایی مورد استفاده قرار داد.

۸- نتیجه‌گیری و آینده کاربرد

الکتروریزپوشانی در صنایع غذایی

نانوتکنولوژی یکی از زمینه‌های فعال تحقیق در مورد فیزیک حالت جامد، شیمی، علم مواد، بیولوژی سلولی، بیوتکنولوژی و صنایع غذایی می‌باشد. نانوذرات، نانوالیاف و یا نانوکامپوزیتها دارای خواص شگفت‌انگیزی نسبت به مواد در اندازه میکرو و بزرگتر هستند که یکی از این خواص نسبت سطح به حجم بزرگتر آنها می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تولید نانوالیاف وجود دارد که از میان آنها الکتروریسی تنها روش تولید نانوالیاف در مقیاس تجاری می‌باشد. الکتروریزپوشانی به روش الکتروریسی دارای مزایای قابل توجهی از جمله قابلیت کنترل اندازه لیاف، ایجاد لیاف منفرد و کارایی بالای ریزپوشانی می‌باشد. نسبت سطح به حجم بالا که ظرفیت قابل توجهی برای اتصال و آزادسازی گروه‌های عملگر، جذب مولکولها، یونها و دیگر ذرات در مقیاس نانو را فراهم می‌کند. از نانوالیاف با توزیع اندازه خوب، انتظار می‌رود که آزادسازی قابل پیش‌بینی ماده فعال را در تمام مدت مورد نیاز تأمین کند. با توجه به این مزایا محققین علوم غذایی از الکتروریسی برای ریزپوشانی کردن مواد استفاده می‌کنند تا بدین وسیله خواص عملکردی همانند کارایی، اثربخشی، پایداری و حل پذیری مواد فعال را در ابعاد نانو افزایش دهند. این مسئله به خاطر آن است که مواد دارای ساختار نانو، حل‌پذیری و فراهمی زیستی بالایی نشان داده، آزادسازی کنترل‌شده آنها افزایش یافته و دقت بالاتری در هدف‌گیری در

عمر ماندگاری آن بیشتر است. سایر آنزیم‌هایی که با استفاده از فرایند الکتروریسی ریزپوشانی شده‌اند عبارتند از سامانه گلوکز اکسیداز/کاتالاز با هدف محافظت مواد غذایی [۶۸]، آنزیم تیروزیناز به عنوان بیوسنسوری برای ترکیبات فنلی [۷۰] و سلولاز برای تولید قندهای احیاکننده را نام برد [۷۱].

علاوه بر این، الکتروریسی به عنوان روشی سریع و میانبر برای خشک کردن و ریزپوشانی باکتری‌های زنده با تأثیر کم بر روی قدرت بقای آنها مورد تأیید واقع شده است. ریزپوشانی بیفیدوباکترهای زنده با استفاده از فرآیند الکتروریسی و کاربرد PVA و WPC به عنوان حامل‌های پلیمری بررسی شده است [۷۲ و ۷۳]. در مطالعات ایشان ریزپوشانی بیفیدوباکترهای زنده در WPC با روش جایگذاری مستقیم (الکتروریسی تک محوره) انجام شد و کپسوله کردن باکتری‌های زنده درون PVA با کمک الکتروریسی دو محوره، صورت گرفت. با این وجود هر دو بررسی نشان دهنده پایداری و بقای باکتری‌های زنده، پس از فرآیند الکتروریسی بود و امکان استفاده از روش الکتروریسی را برای اینگونه مصارف اثبات نمود.

کاربرد عصاره‌های زیست‌فعال گیاهان به عنوان ترکیبات عملگر در غذا یکی از موضوعات مستمر تحقیقاتی در صنایع غذایی بوده است. با این حال، طبیعت مواد زیست‌فعال کاربرد مستقیم آنها را در ماتریس‌های غذایی محدود نموده است و لذا تکنولوژی ریزپوشانی با تبدیل عصاره‌های گیاهی مایع به ترکیبات عملگر خشک، و در عین حال، محافظت و پایداری شیمیایی مواد زیست‌فعال گیاهی، این عمل را تسهیل نموده است. الکتروریسی یک فرآیند ریزپوشانی کاربردی برای تثبیت عصاره‌های فعال گیاهی مایع در حامل‌های پلیمری است. عصاره‌های گیاهی که تاکنون به صورت کامپوزیت‌های رشته‌ای لیفی درآمده‌اند از زردچوبه^{۱۹} [۷۴] و تیمول [۷۵]، تهیه شده بودند. پلیمرهایی از قبیل ژئین، سلولز استات، پروتئین ایزوله سویا، ژلاتین، پلیمرهای مبتنی بر کیتوزان، پلی لاکتیک اسید (PLA)، پلی اتیلن اکساید (PEO)، پلی وینیل الکل (PVA)، پلی وینیل پیرولیدون (PVP)، پلی کاپرولاکتون PCL، PCL/PLA و PCL / پلی تری متیلن کربنات (PTMC) در مطالعات مزبور به عنوان حامل استفاده

19. *Curcuma longa* L.

- [5] Pérez-Masiá, R., López-Nicolás, R., Periago, M.J., Ros, G., Lagaron, J.M., and López-Rubio, A. 2015. Encapsulation of folic acid in food hydrocolloids through nanospray drying and electro spraying for nutraceutical applications. *Food Chemistry*, 168, 124-33.
- [6] Alehosseini, A., Ghorani, B., Sarabi-Jamab, M., Tucker, N. 2017. Principles of electro spraying: A new approach in protection of bioactive compounds in foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, doi: 10.1080/10408398.2017.1323723.
- [7] Alehosseini, A., Sarabi-Jamab, M., Ghorani, B., Kadkhodai, R., Wongsasulak, S. 2017. Evaluating the performance of artificial neural networks (ANNs) for predicting the effect of polymer concentration and operating voltage on the physical properties of electro sprayed particles. *Journal of Innovative Food Technologies*, 4, 31-43. [In Persian]
- [8] Li, Y., Lim, L. T., and Kakuda, Y. 2009. Electrospun Zein Fibers as Carriers to Stabilize (-)-Epigallocatechin Gallate. *Journal of Food Science*, 74: 233-240.
- [9] Wen, P., Wen, Y., Zong, M. H., Linhardt, R. J., and Wu, H. 2017. Encapsulation of Bioactive Compound in Electrospun Fibers and Its Potential Application. *J. Agric. Food Chem.* 65, 9161-9179.
- [10] Ramakrishna. S., Fujihara. K., Teo. W., Lim. T., Ma. Z. 2005. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers. World Scientific Publishing Co. Singapore.
- [11] Shadpour, M., Tavakoli, M. 2007. A review on electrospinning and nanofiber. 2006. Almas Danesh Publishing Co. Tehran. [In Persian]
- [12] Kazemi, M. 2015. Microencapsulation of Nicin by electrospinning and its effect on *Listriamonocitogenesis*, M.Sc. Thesis. Ferdowsi University. Mashhad. Iran. [In Persian]
- [13] Lavik E, Klassen H, Warfvinge K, Langer R, Young M. 2005. Fabrication of degradable polymer scaffolds to direct the integration and differentiation of retinal progenitors. *Biomaterials*. 26(16):3187-96.
- [14] Xing, X., Yu, H., Zhu, D., Zheng, J., Chen, H., Chen, W., and Cai, J. 2012. Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Polymer Fibers as Building Blocks for Miniaturized Photonics Integration. In book: Optical

مقایسه با ذرات دارای ابعاد میکرون دارند. از دیگر مزایای الکتروریزپوشانی، انجام فرآیند در دمای محیط است که برای ریزپوشانی حساس به حرارت حائز اهمیت است. فرایندهای الکتروهیپرودینامیک (الکتروپاشش-الکتروریسی) کاربردهای دیگری نیز در صنایع غذایی دارد، اما آنچه که در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است کاربرد آن به عنوان روشی نوین در ریزپوشانی می باشد. کارهای انجام گرفته در این زمینه در مقیاس آزمایشگاهی است و جهت استفاده و توسعه صنعتی نیازمند انطباق آن با استانداردهای صنعت غذا است مانند استفاده از پلیمرهای خوراکی ایمن (GRAS) و مقرون به صرفه اقتصادی، استفاده از حلال‌های غیر سمی، افزایش سرعت انجام فرآیند و راندمان تولید با استفاده از سیستم‌های بدون نازل و گریز از مرکز می باشد. خوشبختانه این امر بخوبی با الگوگیری طراحی و تنظیمات دستگاه از سایر صنایعی که از این سیستم بصورت تجاری استفاده می کنند امکان پذیر بوده و می تواند طی چند سال آینده به صورت گسترده وارد صنعت غذا گردد.

۹- منابع

- [1] Alborzi, S. 2012. Encapsulation of Folic Acid in Sodium Alginate-Pectin-Poly (Ethylene Oxide) Electrospun Fibers to Increase Its Stability. Ph.D. Thesis, University of Guelph.
- [2] Zuidam, N. J., and Nedovic, V. A. 2010. Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing. Springer, New York.
- [3] Ghorani, B., Alehosseini, A., and Tucker, N. 2016. Electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology, in Innovative processing technologies for foods with bioactive compounds, J.J. Moreno, Editor. CRC Press. p. 259- 292.
- [4] Hernández-Rodríguez, L., Lobato-Calleros, C., Pimentel-González, D.J., and Vernon-Carter, E.J. 2014. Lactobacillus plantarum protection by entrapment in whey protein isolate: κ -carrageenan complex coacervates. *Food Hydrocolloids*, 36, 181-188.

- diameter of electrospun nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 115: 3130-3136.
- [26] Lee K, Kim H, Khil M, Ra Y, Lee D. 2003. Characterization of nano-structured poly (ϵ -caprolactone) nonwoven mats via electrospinning. *Polymer*, 44(4):1287-94.
- [27] Ghorani, B., and Tucker, N. 2015. Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology. *Food Hydrocolloids*, 51: 227-2404.
- [28] Yuan, X., Zhang, Y., Dong, C., and Sheng, J. 2004. Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning. *Polymer International*, 53: 1704-1710.
- [29] Chowdhury, M., and Stylios, G. 2010. Effect of experimental parameters on the morphology of electrospun Nylon 6 fibres. *International journal of Basic & Applied Sciences*, 10: 116-131
- [30] Miri, M. A. 2017. Zein Electrospun Nanofibers as Nanocarrier of Vitamin C: Characterisation and Kinetic Stability Study. Ph.D. Thesis. Ferdowsi University. Mashhad. Iran. [In Persian]
- [31] Mo, X., Xu, C., Kotaki, Mea., Ramakrishna, S. 2004. Electrospun (PLLA-CL) nanofiber: a biomimetic extracellular matrix for smooth muscle cell and endothelial cell proliferation. *Biomaterials*, 25(10):1883-90.
- [32] Nangrejo, M., Bragman, F., Ahmad, Z., Stride, E., Edirisinghe, M. 2012. Hot electrospinning of polyurethane fibres. *Materials Letters*, 68: 482-485.
- [33] Kostakova, E., Zemnova, E., Mikes, P., Soukupova, J., Matheisova, H., Klouda, K. 2012. Electrospinning and electrospraying of polymer solutions with spherical fullerenes. Brno, Czech Republic, EU.
- [34] Xie, J., Jiang, J., Davoodi, P., Srinivasan, M. P., Wang, C. H. 2014. Electrohydrodynamic atomization: A two-decade effort to produce and process micro-/nanoparticulate materials. *Chemical Engineering Science*, 125, 32-57.
- [35] Angammana, C. J., Jayaram, S. H. 2015. Fundamentals of electrospinning and processing technologies. *Particulate Science and Technology: An International Journal*, 34(1): 72-82.
- Communication: Chapter: 12. Publisher: InTech. Editors: Narottam Das.
- [15- Murugan, R., and Ramakrishna, S. 2007. Design Strategies of Tissue Engineering Scaffolds with Controlled Fiber Orientation, *Tissue Engineering*. 13(8): 1845-66.
- [16] Tao SL, Desai TA. 2007. Aligned Arrays of Biodegradable Poly (ϵ -caprolactone) Nanowires and Nanofibers by Template Synthesis. *Nano letters*. 7(6):1463-8.
- [17] Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J.D., Hirvonen, J.K., Beck Tan, N.C., 2001. Controlled deposition of electrospun poly (ethylene oxide) fibers. *Polymer* 42 (19), 8163-8170.
- [18] Sill, T. J., and von Recum, A. 2008. Electrospinning: applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*, 29 (13), 1989-2006.
- [19] Li, Y., Lim, L.T., and Kakuda, Y. 2009. Electrospunzein fibers as carriers to stabilize (-)-epigallocatechingallate. *Journal of Food Science*, 74 (3), C233-C240.
- [20] Carroll, C. P., and Joo, Y. L. 2006. Electrospinning of viscoelastic Boger fluids: Modeling and experiments. *Physics of fluids*, 18: 053102.
- [21] Supaphol, P., Mit-uppatham, C., and Nithitanakul, M. 2005. Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: effects of solvent system and emitting electrode polarity on morphology and average fiber diameter. *Macromolecular materials and engineering*, 290: 933-942.
- [22] Haider, A., Haider, S., Kang, I. K. 2015. A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*, doi: 10.1016/j.arabjc.2015.11.015.
- [23] Miri, M. A., Habibi Najafi, M. B., Movaffagh, J. 2016. Optimization of Electrospinning Process of Zein Using Central Composite Design. *Fibers and Polymers*. 17(5), 769-777.
- [24] Bhardwaj, N., & Kundu, S. C. 2010. Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology advances*, 28 (3), 325-347.
- [25] Jacobs, V., Anandjiwala, R. D., and Maaza, M. 2010. The influence of electrospinning parameters on the structural morphology and

- (lactic-co-glycolic acid). *Polymer*, 49, 5294-5299.
- [46] Xu, X., Zhuang, X., Chen, X., Wang, X., Yang, L., and Jing, X. 2006. Preparation of core-sheath composite nanofibers by emulsion electrospinning. *Macromolecular Rapid Communications*, 27, 1637-1642.
- [47] Huang, X. J., Ge, D., Xu, Z. K. 2007. Preparation and characterization of stable chitosan nanofibrous membrane for lipase immobilization. *European Polymer Journal*, 43, 3710-3718.
- [48] Choi, J., Kim, H., and Yoo, H. 2015. Electrospinning strategies of drug-incorporated nanofibrous mats for wound recovery. *Drug Delivery and Translational Research*, 5(2):137-145.
- [49] Yoo, H. S., Kim, T. G., and Park, T. G. 2009. Surface-functionalized electrospun nanofibers for tissue engineering and drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 61, 1033-1042.
- [50] Hsieh, Y. L., Abott, A., Ellison, M. S., and Gibson, H. 2005. Functional fibers for immobilization of biomolecules. Project M02-CD05. National Textile Center Research Briefs-Materials Competency Report.
- [51] Drew, C., Wang, X., Samuelson Lynne, A., and Kumar, J. 2006. Electrostatic assembly of polyelectrolytes on electrospun fibers. In: *Polymeric Nanofibers* (pp. 137-148): ACS symposium series, American Chemical Society, Washington, DC.
- [52] Kathpalia, H., & Gupte, A. 2013. An introduction to fast dissolving oral thin film drug delivery systems: a review. *Current drug delivery*, 10(6), 667-684.
- [53] Mendes, A. C., Stephansen, K., & Chronakis, I. S. 2017. Electrospinning of food proteins and polysaccharides. *Food Hydrocolloids*, 68, 53-68.
- [54] Gouin, S. 2004. Microencapsulation: Industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in Food Science and Technology*, 15: 330-347.
- [55] Fernandez, A., Torres-Giner, S., and Lagaron, J. M. 2009. Novel route to stabilization of bioactive antioxidants by encapsulation in electrospun fibers of zein prolamine. *Food Hydrocolloids*, 23:1427-1432.
- [36] Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G., and Brenner, M. P. 2001. Electrospinning and electrically forced jets. II. Applications, *Physics of Fluids*, 13, 8, 2221-2236.
- [37] Natu, M. V., de Sousa, H. C., & Gil, M. H. 2010. Effects of drug solubility, state and loading on controlled release in bicomponent electrospun fibers. *International Journal of Pharmaceutics*, 397, 50-58.
- [38] Wang, C., Tong, S. N., Tse, Y. H., & Wang, M. 2012. Conventional electrospinning vs. emulsion electrospinning: A comparative study on the development of nanofibrous drug/biomolecule delivery vehicles. *Advanced Materials Research*, 410, 118-121.
- [39] Wang, Y., Wang, B., Qiao, W., & Yin, T. 2010. A novel controlled release drug delivery system for multiple drugs based on electrospun nanofibers containing nanoparticles. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 99, 4805-4811.
- [40] Ghorani, B., Goswami, P., Blackburn, R. S., Russell, S. J. 2018. Enrichment of cellulose acetate nanofibre assemblies for therapeutic delivery of l-tryptophan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 108, 1-8.
- [41] Neo, Y. P. 2013. Electrospinning as a novel encapsulation method for food applications. Ph.D.Thesis, University of Auckland.
- [42] Su, Y., Liu, Y., Su, Q., Lim, M. W. Q., & Mo, X. 2011. Encapsulation and controlled release of heparin from electrospun poly (L-lactic acid-co-caprolactone) nanofibers. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 22, 165-177.
- [43] Zhang, Y. Z., Wang, X., Feng, Y., Li, J., Lim, C. T., and Ramakrishna, S. 2006. Coaxial electrospinning of (fluorescein isothiocyanate-conjugated bovine serum albumin) – encapsulated poly (ε-caprolactone) nanofibers for sustained release. *Biomacromolecules*, 7, 1049-1057.
- [44] Chakraborty, S., Liao, I. C., Adler, A., and Leong, K. W. 2009. Electrohydrodynamics: A facial technique to fabricate drug delivery systems. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 61, 1043-1054.
- [45] Liao, Y., Zhang, L., Gao, Y., Zhu, Z. T., and Fong, H. 2008. Preparation, characterization, and encapsulation/release studies of a composite nanofiber mat electrospun from an emulsion containing poly

- membranes by adsorption. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 42: 45-51.
- [66] Wang, Y., and Hsieh, Y. L. 2008. Immobilization of lipase enzyme in polyvinyl alcohol (PVA) nanofibrous membranes. *Journal of Membrane Science*, 309: 73-81.
- [67] Li, S.-F., and Wu, W. T. 2009. Lipase-immobilized electrospun PAN nanofibrous membranes for soybean oil hydrolysis. *Biochemical Engineering Journal*, 45: 48-53.
- [68] Ge, L., Zhao, Y.-S., Mo, T., Li, J.-R., and Li, P. 2012. Immobilization of glucose oxidase in electrospun nanofibrous membranes for food preservation. *Food Control*, 26: 188-193.
- [70] Arecchi, A., Scampicchio, M., Drusch, S., and Mannino, S. 2010. Nanofibrous membrane based tyrosinase-biosensor for the detection of phenolic compounds. *Analytica Chimica Acta*, 659: 133-136.
- [71] Hung, T. C., Fu, C. C., Su, C.-H., Chen, J.-Y., Wu, W. T., and Lin, Y. S. 2011. Immobilization of cellulase onto electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofibrous membranes and its application to the reducing sugar production from microalgae. *Enzyme and Microbial Technology*, 49: 30-37.
- [72] López-Rubio, A., Sanchez, E., Sanz, Y., and Lagaron, J. M. 2009. Encapsulation of living bifidobacteria in ultrathin PVOH electrospun fibers. *Biomacromolecules*, 10: 2823-2829.
- [73] Lopez-Rubio, A., & Lagaron, J. M. 2012. Whey protein capsules obtained through electrospinning for the encapsulation of bioactives. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 13, 200-206.
- [74] Brahatheeswaran, D., Mathew, A., Aswathy, R. G., Nagaoka, Y., Venugopal, K., Yoshida, Y., Maekawa, T., and Sakthikumar, D. 2012. Hybrid fluorescent curcumin loaded zein electrospun nanofibrous scaffold for biomedical applications. *Biomedical Materials*, 7: 045001.
- [75] Karami, Z., Rezaeian, I., Zahedi, P., and Abdollahi, M. 2013. Preparation and performance evaluations of electrospun poly (ϵ -caprolactone), poly (lactic acid), and their hybrid (50/50) nanofibrous mats containing thymol as an herbal drug for effective wound healing. *Journal of Applied Polymer Science*, 129: 756-766.
- [56] Torres-Giner, S., Martinez-Abad, A., Ocio, M. J., and Lagaron, J. M. 2010. Stabilization of a neuraceutical omega-3 fatty acid encapsulation in ultrathin electrospun zein prolamin. *Journal of food science*, 75: N69-N79.
- [57] Yu, D.-G., Yang, J.-M., Branford-White, C., Lu, P., Zhang, L., and Zhu, L.-M. 2010. Third generation solid dispersions of ferulic acid in electrospun composite nanofibers. *International Journal of Pharmaceutics*, 400, 158-164.
- [58] Li, X., Kanjwal, M. A., Lin, L., and Chronakis, I. S. 2013. Electrospun polyvinyl-alcohol nanofibers as oral fast-dissolving delivery system of caffeine and riboflavin. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 103: 182-188.
- [59] Arecchi, A., Mannino, S., and Weiss, J. 2010. Electrospinning of poly(vinyl alcohol) nanofibers loaded with hexadecane nanodroplets. *Journal of Food Science*, 75: N80-N88.
- [60] Kriegel, C., Kit, K. M., McClements, D. J., and Weiss, J. 2009. Nanofibers as carrier systems for antimicrobial microemulsions. Part I: Fabrication and characterization. *Langmuir*, 25, 1154-1161.
- [61] Kriegel, C., Kit, K. M., McClements, D. J., and Weiss, J. 2010. Nanofibers as carrier systems for antimicrobial microemulsions. II. Release characteristics and antimicrobial activity. *Journal of Applied Polymer Science*, 118, 2859-2868.
- [62- Kayaci, F., and Uyar, T. 2012a. Electrospun zein nanofibers incorporating cyclodextrins. *Carbohydrate Polymers*, 90: 558-568.
- [63- Kayaci, F., and Uyar, T. 2012b. Encapsulation of vanillin/cyclodextrin inclusion complex in electrospun polyvinyl alcohol (PVA) nanowebs: Prolonged shelf-life and high temperature stability of vanillin. *Food Chemistry*, 133: 641-649.
- [64] Wang, Z.-G., Wan, L.-S., Liu, Z.-M., Huang, X.-J., and Xu, Z.-K. 2009. Enzyme immobilization on electrospun polymer nanofibers: An overview. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 56: 189-195.
- [65] Wang, Z.-G., Wang, J.-Q., and Xu, Z.-K. 2006. Immobilization of lipase from *Candida rugosa* on electrospun polysulfone nanofibrous

Electroencapsulation: Fundamentals and applications in food industry

Miri, M. A. ^{1*}, Ghorani, B. ², Miri, H. R. ³

1. Ph.D. Department of Food Science and Technology, University of Zabol, Zabol, Iran.

2. Ph.D. Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran.

3. Ph.D. Department of laboratory sciences, Torbat Heydariyeh University of Medical Sciences, Torbat Heydariyeh, Iran.

(Received: 2018/11/04 Accepted:2019/05/18)

Encapsulation may be defined as a process to entrap one substance within another substance, thereby producing particles with diameters of a few nm to a few mm. Due to the sensitivity of bioactive compounds there are different encapsulation techniques. In recent years, electroencapsulation or encapsulation using electrohydrodynamic processes (electrospinning and elcrospraying) which is a simple and effective technique to preserve and increase bioavailability of components, has attracted particular attention of food and drug scientists. In this technique the electrostatic force is used to form charged jet from polymer solution containing bioactive components. After that solvent is evaporated, ultrathin structures are formed. The process is called electrospraying if the droplets are atomized in the electric field and the capsule (bead shape) is formed. In the event of the formation of a stable jet and nanofibers, the process is called electrospinning. Nanofibers have outstanding features such as high surface area to volume ratio and high porosity. These features have led to the use of nanofibers for drug delivery, filtration, tissue engineering, encapsulation of bioactive compounds, enzyme stabilization, as bimolecular sensors and food packaging. This paper presents a comprehensive review of the fundamentals of electrospinning to produce nanofibers suitable for food technology application particularly for use in encapsulation.

Key words: Encapsulation, Electroencapsulation, Nanofiber, Electrohydrodynamic processes, Bioactive compounds.

* Corresponding Author E-mail Address: hr.miri1354@gmail.com