اصول و مبانی الکتروپاشش و کاربرد آن در نانوریزپوشانی ترکیبات غذایی

متین سلیمانی فر[1]، سید مهدی جعفری[2*]، الهام اسدپور[3]

1- دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، گروه صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان، دامغان، ایران
2- استاد دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
3- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، موسسه آموزش عالی بهاران، گرگان، ایران

(تاریخ دریافت: 98/09/09 تاریخ پذیرش: 98/12/10)

چکیده

ریزپوشانی یکی از مهم‌ترین فرآیندهایی است که به منظور بهبود پایداری شیمیایی ترکیبات معطر و فرار، جلوگیری از برهمکنش‌های نامطلوب آنها با ترکیبات غذایی، و رهایش هوشمند آنها به درون محصول در صنعت غذا انجام می‌گیرد. در برخی موارد با غنی سازی محصولات غذایی با ترکیبات زیست فعال اثرات نامطلوب در طعم و بافت محصولات غذایی ایجاد می‌گردد. ریزپوشانی با استفاده از فرایندهای الکتروهیدرودینامیک مانند الکتروپاشش 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 محققین صنایع غذایی و دارویی قرار گیرد. الکتروپاشش به عنوان یکی از روش‌های پاشش مایع به علت تولید قطرات با سایز بسیار ریز و توزیع یکسان از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. یکی از مزیت‌های سامانه الکتروپاشش این است که کنترل بالایی روی توزیع و پراکندگی اندازه ذرات، با ذرات تقریبا یکنواخت وجود دارد. همچنین کپسول‌های تهیه شده با دستگاه الکتروپاشش توانایی زیادی در جلوگیری از تخریب کاروتنوئیدها و ویتامین‌ها و سایر ترکیبات حساس به حرارت دارند. در واقع در طی ریزپوشانی ترکیبات غذایی، آنزیمی و یا مواد دیگر (مانند انواع روغن‌های فرار، مواد مولد طعم و رنگ، آنزیم‌ها و غیره) در اندازه میکرو یا نانو توسط مواد دیواره که می‌توانند انواع لیپیدها، بیوپلیمرهای پروتئینی و پلی ساکاریدی و یا کمپلکس آنها باشند احاطه و در برابر عوامل خارجی محافظت می‌شوند. در این مقاله سعی شده است، به معرفی جامع فرآیند الکتروپاشش، مبانی فرآیند، روش اجرا و کاربردهای آن در ریزپوشانی مواد غذایی که از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای در حوزه صنایع غذایی و دارویی برخوردار می‌باشند، پرداخته شود.

کلید واژگان: الکتروپاشش، ریزپوشانی، مواد غذایی، ترکیبات زیست فعال

*مسئول مکاتبات: smjafari@gau.ac.ir

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

1- مقدمه

یکی از روش‌های نوین حفظ ترکیبات حساس و زیست فعال مواد غذایی نانوریزپوشانی یا همان قرار گیری مواد در نانوکپسول‌ها است. از دیگر مزایای نانو ریزپوشانی می‌توان به افزایش ماندگاری مواد غذایی، رهایش کنترل شده، بالارفتن راندمان تولید، کاهش ضایعات و همچنین ایجاد ارزش افزوده در صنایع غذایی و تولید محصولات فراسودمند در کنار امکان نوآوری و تنوع در تولید محصولات غذایی اشاره کرد [1]. ریزپوشانی راهی برای غلبه بر ناپایداری‌های ترکیبات زیست فعال ناشی از شرایط فرآوری است و امکان رهایش کنترل شده آنها را در روده کوچک فراهم می‌سازد [2]. 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 پائین ریزپوشانی، عدم تبخیر کامل حلال مورد استفاده یا استفاده از حلال‌های سمی در حین فرآیند، پیچیده بودن فرآیند و هزینه تولید بالا از معایب سایر روش‌های نانوریزپوشانی مانند خشک کردن پاششی، خشک کردن انجمادی، سرد کردن پاششی، به دام انداختن در ساختارهای لیپوزومی و اکستروژن است. لذا طی سال‌های اخیر، فرآیند الکتروریزپوشانی با استفاده از فرآیندهای الکتروهیدرودینامیک[1] (الکتروپاشش[2]) به عنوان روشی ساده با راندمان بالا توانسته از جایگاه ویژه‌ای بین محققین صنایع غذایی و داروئی برخوردار گردد [1].

سامانه الکتروپاشش اساسا شامل استفاده از ولتاژ بالا، سرعت جریان و تغییر در فاصله نوک سوزن تا جمع کننده[3] ذرات، همچنین ویژگی‌های محلول پلیمری نظیر گرانروی[4]، غلظت و چگالی[5] است (شکل 1) [3]. حوزه‌های به دست آمده از این سامانه ممکن است به علت پارامترهایی نظیر، پتانسیل الکترواستاتیک، سرعت جریان، فاصله نوک سوزن تا جمع کننده و پارامترهای محلول مانند؛ غلظت، گرانروی و چگالی، متفاوت باشند. عوامل محیطی مانند؛ فشار و دما برروی ویژگی‌های نانوکپسول‌های تولیدی مؤثر خواهد بود. در این سامانه محلول پلیمری از لوله‌ی موئینه و تحت میدان الکتریکی قوی باردار می‌شود. زمانی که نیروی الکترواستاتیک ایجاد شده در محلول از کشش سطحی آن قوی‌تر باشد قطره سیال در نوک لوله موئین به سرعت به سمت صفحه جمع کننده حرکت کرده که به آن جت سیال گفته می‌شود که در این لحظه طی برخورد با مولکول‌های هوا حلال تبخیر می‌گردد. بر اثر تبخیر حلال، ذرات کوچک‌تر شده در نتیجه بار الکتریکی آنها افزایش می‌یابد. دانسیته‌ی بارهای الکتریکی ذره افزایش یافته و در نهایت با انفجار آن، قطرات ریزتر تولید می‌شوند [4]. از مزایای این روش نسبت به سایر روش‌های ریزپوشانی، راندمان بالا، تولید نانوذرات در شرایط معمولی و بدون نیاز به اعمال حرارت برای حذف حلال یا دمای پایین برای تشکیل ذرات، همچنین ساده بودن فرآیند می‌باشد [5]. نانوذرات الکتروپاشش شده را می‌توان از طیف گسترده‌ای از بیوپلیمرهایی که ویژگی‌های فیزیکی آنها تغییر داده شده از حلال آبی با افزودنی‌های مناسب تولید کرد. مزایای استفاده از پوشش‌ها در فرآیند الکتروپاشش عبارتند از؛ راندمان انتقال بالاتر، کنترل بهتر فرآیند تولید که منجر به کاهش هزینه فرآیند و کاهش آلودگی محیط زیست و محصول می‌شود. اخیرا این تکنولوژی برای افزایش پایداری ترکیبات حساس در طول تولید، با کاهش تبخیر و تجزیه زیست فعال‌های فرار (به ویژه عطرها)، پوشش دادن طعم‌های نامطلوب پلی فنل‌ها، افزایش طول عمر با محدود کردن تماس با اکسیژن، آب، نور (درمورد اسیدهای چرب غیر اشباع مهم است) و افزایش نسبت مواد خوراکی (مانند ویتامین‌ها) که در دسترس بدن است، به کار می‌رود [6]. هدف از این پژوهش بررسی سامانه الکتروپاشش و عوامل مؤثر بر آن است. همچنین بررسی مزایای آن نسبت به سایر روش‌های نانوریزپوشانی که در نهایت سبب می‌شود، این فرآیند با سرعت بیشتر و بهتری صورت پذیرد و از سوی دیگر به دلیل عدم استفاده از حرارت، آسیب جدی به ماده زیست‌فعال وارد نگردد.

1. Electrohydrodynamic spraying
2. Electrospray
3. Collector
4. Viscosity
5. Density

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

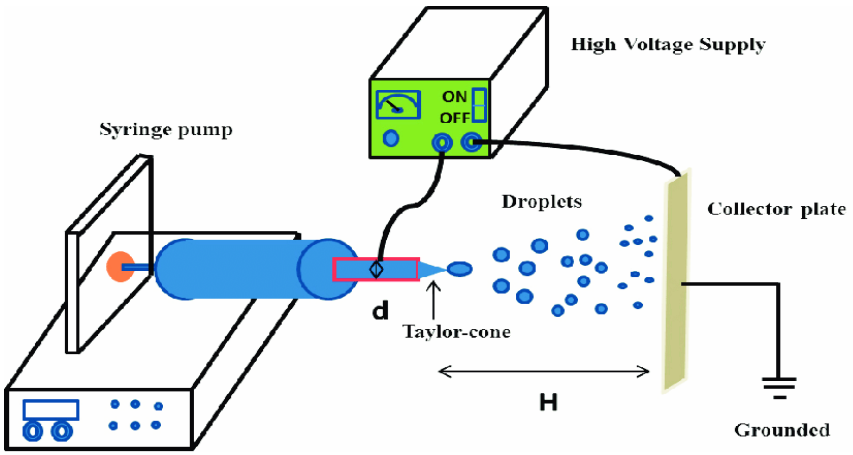

Fig 1 Schematic of an electrospraying device [6]

2- اصول و مبانی الکتروپاشش

الکتروپاشش یکی از روش‌های پاشش مایع است و با تزریق مایع داخل میدان الکتریکی بین دو الکترود ایجاد می‌شود. حال اگر دامنه شدت جریان مایع تزریقی و اختلاف پتانسیل بین دو الکترود که نشان دهنده‌ی قدرت میدان است، تغییر کند منقاره‌ی مایع خروجی اشکال مختلفی به خود می‌گیرد که این تغییر شکل اساس ایجاد حالت‌های مختلف خواهد بود. مطالعه روی حالت-های پاشش به علت اینکه بیانگر حالت‌های رفتار مایع در میدان الکتریکی تحت شرایط مختلف است، از اهمیت بالایی برخوردار است و از پایه‌ای‌ترین و مهم‌ترین مسائل موجود در این علم محسوب می‌شود. مهم‌ترین حالت پاشش در الکتروپاشش حالت جت مخروطی است که در این حالت، قطرات بسیار ریز در ابعاد میکرو و نانو با توزیع قطر یکسان تولید می‌شوند که به این دلیل بسیار مورد توجه قرار گرفته است. الکتروپاشش به علت تولید قطرات بسیار ریز شامل دامنه‌ی وسیعی از کاربردهای مختلف نظیر تولید توان در پیشرانه‌های میکرو[1]، احتراق داخل محفظه احتراق‌های با ابعاد کوچک[2]، طیف نگاری جرمی و رنگ آمیزی است. نخستین بار ریلی (1882) اثر بار الکتریکی بر پایداری یک قطره منفرد را مطالعه و بیشترین باری را که یک قطره می‌تواند حمل کند را محاسبه کرد [7]. زلنی (1914) نخستین کسی بود که پدیده‌ی الکتروپاشش را به صورت نظام مند مورد بررسی و مطالعه قرار داد. او رفتار قطرات سیال را در انتهای سوزن بررسی نمود و در این آزمایش تجربی چندین رژیم مختلف مانند (چکیدن[3]، متناوب[4]، جت مخروطی[5] و نوسانی[6]) را برای الکتروپاشش گزارش کرد [8]. دسته بندی جامع‌تر از حالت‌های مختلف الکتروپاشش، بعدها توسط کلوپیو و پرانت فاش انجام شد. کلوپیو (1990) و پرانت فاش (1994) توانستند برای نخستین بار با استفاده از عکس برداری حالت‌های الکتروپاشش را دسته بندی کنند. آنها بیان کردند که حالت‌های مختلف و افشانه-های حاصل می‌توانند خصوصیات مختلفی داشته باشند. بنا به این تفاوت‌ها الکتروپاشش را به حالت‌های چکیدن، چکیدن میکرو[7]، جت مخروطی، دوکی شکل[8]، جت ساده[9] و جت منشعب[10] دسته بندی کرده و حالت چندگانه را به عنوان حالت خاصی از جت مخروطی معرفی کردند [9, 10].

2-1- بیوپلیمرهای مورد استفاده در الکتروپاشش

اولین قدم برای توضیح کاربرد الکتروپاشش در ریزپوشانی ترکیبات غذایی، تعریف موادی است که می‌تواند برای این تکنولوژی به کار رود. طیف گسترده‌ای از پلیمرهایی که می‌توانند

1. Micro thrusters
2. Small-scale combustor

3. Dripping
4. Intermittent
5. Cone-Jet
6. Oscillating
7. Micro dripping
8 .Spindle
9. Simple jet
10. Ramified jet

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

در الکتروپاشش به کار روند، وجود دارد. در صورتی که این پلیمرها برای ریزپوشانی مواد غذایی در نظر گرفته شوند، باید ایمن (GRAS[1]) شناخته شوند. به علاوه انتخاب مواد دیواره به فاکتورهای زیادی نظیر، توانایی خودسامانی و هزینه مواد خام بستگی دارد. همچنین باید توجه داشت که، اندازه، مورفولوژی، بارگذاری، نفوذپذیری، اتصال زیستی، پایداری محیطی از نانوحامل‌ها مهم می‌باشد. در نتیجه اغلب مواد با منشأ طبیعی ترجیح داده می‌شوند، زیرا آنها راحت‌تر با نیازهای، تجزیه زیستی و عدم سمیت سازگاری دارند. اخیرا ماتریس‌های کاربردی با استفاده از منشأ بیولوژیکی مانند، پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و چربی‌ها به منظور جلوگیری از خطرات احتمالی زیست محیطی و بهداشتی ناشی از مواد غیر قابل تجزیه مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از پلیمرهای قابل استفاده در مواد غذایی و بیوپلیمرهایی به عنوان سامانه‌های دارو رسانی زیست فعال برای استفاده در مواد غذایی مورد بررسی قرار گرفته است.

2-1-1- پروتئین‌ها

درمیان بیوپلیمرهای قابل استفاده در مواد غذایی، پروتئین‌ها جهت بهبود بافت یا ویژگی‌های حسی به کار می‌روند [6] (جدول 1). پروتئین‌های شیر مزیت‌های فراوانی در مقایسه با مواد زیستی دیگر دارند و به طور رایج برای ریزپوشانی پروبیوتیک‌ها استفاده می‌شوند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد، پروتئین‌های آب پنیر[2] (WP) به عنوان مواد زیستی برای ریزپوشانی پروبیوتیک‌ها در نظر گرفته می‌شود [11]. به طور معمول WP در سه نوع اصلی می‌باشد؛ کنسانتره (WPC)[3]، ایزوله (WPI)[4] و (WPH)[5]. WPC ارزان‌ترین و رایج‌ترین شکل پروتئین آب پنیر است، و به عنوان محصولات جانبی از تولیدات پنیر به وجود می‌آید و حاوی 35 تا 85 درصد پروتئین می‌باشد که به صورت پودر خشک و محلول موجود است. WPI، پروتئین تولیدی با درجه خلوص بالا (90 درصد پروتئین براساس وزن خشک) و WPH که نوعی پروتئین است و تاحدودی هیدرولیز شده است [11]. WPI، یکی از پروتئین‌های رایج مورد استفاده جهت ریزپوشانی با دستگاه الکتروپاشش می‌باشد. WPC از خصوصیات عملکردی ویژه‌ای برخوردار است. این ویژگی‌ها سبب شده که از آنها به عنوان یک ترکیب مناسب برای دیواره کپسول‌ها استفاده شود. WPC، ایزوله پروتئین سویا، آلبومین تخم مرغ، کلاژن، ژلاتین، زئین، گلوتن گندم و کازئین از جمله پروتئین‌های مورد استفاده برای ریزپوشانی در الکتروپاشش می‌باشند [6]. زئین گروهی از پروتئین‌های پرولامین موجود در ذرت است، که کاربردهای غذایی و صنعتی گسترده‌ای دارد. این پروتئین به دلیل آمینو اسیدهای آبگریز فراوان (گلوتامین، پرولین، لوسین، آلانین) که حدود 30 درصد ترکیبات آن را تشکیل می‌دهد، محلول نمی-باشد. این ویژگی برای زیرپوشانی ترکیبات زیست فعال می‌تواند سودمند باشد، زیرا پیوند متقابل از پلیمر و ترکیب زیست فعال لازم نیست. زئین یک پلیمر غیرسمی است که با محیط زیست سازگار و زیست تخریب پذیر می‌باشد که برای تولید فیلم‌هایی با خصوصیات مناسب از نظر نفوذپذیری و مقاومت حرارتی استفاده می‌شود [12]. کازئین و مشتقات آن توانایی تولید ژل تحت تأثیر آنزیم و اسید را در دمای اتاق دارند، از این رو شرایط مناسب برای ریز پوشانی بدون تأثیر بر سرعت زنده مانی ترکیبات زیست فعال را دارند. انواع رایج کازئین‌های مورد استفاده در ریزپوشانی، کازئین طبیعی و سدیم کازئینات است [6]. ژلاتین به علت تجزیه زیستی و خواص الکتریکی به طور گسترده‌ای برای رهایش داروهای کنترل شده مورد بررسی قرار گرفته است. ژلاتین دارای خواص منحصر به فرد در تشکیل ژل می‌باشد، همچنین با قیمت کم در دسترس است [13]. گلیادین یک نوع پروتئین موجود در گندم و چند غلات دیگر است، که در دسته گیاهی تریتوکوم قرار دارد. گلیادین‌ها و گلوتنین‌ها دو ترکیب اصلی گلوتن گندم هستند [14]. اخیرا گلوتن برای ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال نظیر دارو و روغن ماهی مورد استفاده قرار گرفته است [15]. پروتئین کرم ابریشم[6] یک ماده بیولوژیکی شناخته شده در مهندسی بافت و تحویل دارو است.

1. Generally regarded as safe
2. Whey proteins
3. Whey protein concentrate
4. Whey protein isolate
5. Whey protein hydrolysate
6. Silk fibroin

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

از جمله مواد سازگار با محیط زیست می‌باشد، که در انواع مختلف با کاربردهای متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال استفاده از SF در تشکیل ذرات به ندرت گزارش شده است. اثر گرانروی برشی بر روی تولید میکروذرات SF کروی به وسیله‌ی دستگاه الکتروپاشش توسط کیم و همکاران (2015) مورد مطالعه قرار گرفت [16].

Table 1 List of some proteins used in electrospraying [6]

Protein	Bioactive Compounds	References
Collagen	Drugs	(Nagarajan et al. 2014)[17]
Collagen	Epigallocatechin gallate (EGCG)	(Gómez-Mascaraque et al. 2015b)[18]
Silk Fibroin	Cisplatin	(Qu et al. 2014) [19]
Soy Protein Isolate (SPI)	α-linolenic acid	(Gómez-Mascaraque & López-Rubio 2016)[20]
WPC	*β*-carotene Folic Acid *Bifidobacteriumstrains* *Lactobacillus plantarum*	(López-Rubio & Lagaron 2012; Rocío Pérez-Masiá et al. 2015; López-Rubio et al. 2012; Gomez-Mascaraque et al. 2016) [21, 22, 5, 23]
Wheat Gluten	Fish oil	(Tapia-Hernández et al. 2015)[23]
Zein-Alginate	*Lactobacillus acidophilus*	(Laelorspoen et al. 2014)[24]
Zein	Catechins	(Bhushani et al. 2017)[25]

2-1-2- کربوهیدرات

کربوهیدرات‌ها برای ریزپوشانی مناسب می‌باشند، زیرا آنها با محیط زیست سازگار و زیست تخریب پذیر بوده و برای دستیابی به ویژگی‌های مورد نیاز دارای توان بالایی هستند. سیستم‌های تحویل بر پایه‌ی پلی ساکارید می‌توانند با استفاده از طیف وسیعی از ترکیبات زیست فعال با گروه‌های کاربردی خود ارتباط برقرار کنند، این امر باعث می‌شود آنها حامل‌های چند منظوره برای اتصال و غلبه بر انواع مختلف مواد غذایی حاوی مواد زیست فعال آبدوست و آبگریز باشند [6] (جدول 2). کیتوزان یک پلی‌مر داستیله شده طبیعی پلی کاتیونی است، که از واحدهای N- استیل D- گلوکز آمین و D- گلوکز آمین تشکیل شده است. کیتوزان در وزن‌های مولکولی مختلف وجود دارد و دارای ویژگی‌های جالب توجهی است که به موجب آن می‌تواند کاربردهای زیادی در صنعت و به ویژه انتقال دارو داشته باشد. ذرات کیتوزان می‌توانند به صورت، میکروکپسول، میکروسفر و نانوذرات تولید شوند. کیتوزان از طریق گروه‌های آمین خود در واکنش‌های مختلف شرکت می‌کند [26]. از دیدگاه بیولوژیکی، کیتوزان ویژگی خاصی برای پیوستن به سطوح مخاطی دارد، در واقع پلیمر مطلوبی برای انتقال دارو و مواد زیست فعال است. سطح کیتوزان دارای بار مثبت می‌باشد، بنابراین انتظار می‌رود ذرات با حداقل تراکم به حالت پایدار درآیند [6]. کاراگینان پلی-مرهایی با ساختار خطی متشکل از واحدهای D- گالاکتوز هستند که به طور متناوب با پیوندهای آلفا (1-3) و بتا (1-4) متصل شده‌اند [6]. رودریگز و همکاران (2011)، گزارش کردند

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

که افزودن آلژینات، کیتوزان، صمغ زانتان، L- کاراگینان و WPC (50 درصد پروتئین) پارامترهای مؤثر بر بقای پنج گونه از لاکتوباسیلوس و بیفیدوباکتریوم می‌باشند [27]. اسید آلژینیک، همچنین به نام آلژین یا آلژینات، یک پلی ساکارید آنیونی است که به طور گسترده‌ای در دیواره سلولی جلبک‌های قهوه‌ای توزیع شده است، که از طریق اتصال به آب، یک صمغ چسبناک تشکیل می‌دهد. آلژینات‌ها به طور طبیعی پلی ساکاریدها به دست آمده از جلبک‌های دریایی قهوه‌ای هستند و شامل دو واحد مونومر، اسید D- مانورانیک و اسید L- گولورونیک می‌باشند [6]. اخیرا قائب و همکاران (2015)، تولید نانوذرات آمیلوز و آمیلوپکتین از نشاسته ذرت در محدوده‌ی سایز 100 نانومتر توسط دستگاه الکتروپاشش را مورد بررسی قرار دادند [24].

Table 2 List of some carbohidrates used in electrospray [6]

Carbohydrates	Bioactive Compounds	References
Alginate-Chitosan	*Lactobacillus plantarum*	(Coghetto et al. 2016)[28]
Alyssum homolocarpum seed gum	D-limonene	(Khoshakhlagh et al. 2017)[29]
Bacterial cellulose from *(Komagataeibactersucrofermentans)*	Epigallocatechin gallate (EGCG)	(Paximada et al. 2017)[30]
Cellulose	Natural pigment of red cabbage	(Wu et al. 2014; Devarayan & Kim 2015)[31, 32]
Cellulose	Epigallocatechin gallate (EGCG)	(Gómez-Mascaraque et al. 2016) [22]
Guar Gum	Folic Acid	(Rocío Pérez-Masiá et al. 2015) [33]
Inulin	Indomethacin	(Jain et al. 2014)[31]

2-1-3- لیپیدها

نانوذرات لیپید جامد براساس اسید استئاریک و اتیل سلولز برای ریزپوشانی طعم‌های وانیلین، اتیل مالتول و مالتول بدون اینکه واکنش شیمیایی بین مواد تشکیل دهنده قابل اندازه گیری باشد، استفاده شده‌اند. نانوذرات ریزپوشانی شده (30 تا 90 نانومتر) نشان می‌دهند که از نظر پایداری در برابر فروریختگی، تجمع، افت طعم یا کاهش و تنزل طی فرآوری و انبارداری بهبود یافته‌اند (جدول 3) [6]. ویژگی‌های تولید قطره از اتانول در حضور تری گلیسریدها نظیر، روغن حاوی تری گلیسریدها با زنجیره متوسط و روغن سویا با استفاده از نازل واحد و چندگانه دستگاه الکتروپاشش مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان دهنده‌ی تولید قطراتی با قطر 2 میکرومتر بود [32].

2-1-4- پلیمرهای سنتزی

هیدروژل‌های پلی اتیلن گلیکول[1] (PEG) برای ریزپوشانی و تحویل مواد زیستی حساس مانند، سلول‌ها، داروها و پروتئین‌ها به دلیل مقاومت به جذب پروتئین به کار می‌روند. ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال در هیدروژل‌های PEG، از فعالیت این ترکیبات محافظت کرده و کنترل بالایی بر روی رهایش آنها دارد [6]. پلی لاکتید یا پلی لاکتید اسید[2] (PLA)، یک پلی استر آلیفاتیک ترموپلاستیک قابل تجزیه که از منابع تجدیدپذیرمانند، نشاسته ذرت، ریشه‌های تاپیوکا، چیپس یا نشاسته، نیشکر مشتق شده که در مقادیر تجاری به راحتی در دسترس می‌باشند (جدول 3) [6].

1. Polyethylene gleycol
2. Polylactic acid

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

Table 3 List of some lipids and synthetic Polymers used in electrospray [6]

Lipid	Synthetic Polymer	Bioactive Compounds	References
-	Polyethylene glycol (PEG)	Cells, drugs & proteins	(Lin & Anseth 2009) [21]
Stearic acid-Ethyl cellulose	-	Vanillin & Maltol	(Eltayeb, Bakhshi, et al. 2013) [34]

3- عوامل مؤثر بر کارایی روش الکتروپاشش

پارامترهای فرآیند دستگاه الکتروپاشش مانند ویژگی‌های محلول و حلال، ولتاژ اعمال شده، سرعت جریان، اندازه سوزن و فاصله جمع کننده تا نوک سوزن به منظور تولید محصولی پایدار با توزیع مناسب ذرات باید بهینه شوند. عدم کنترل شرایط فرآیند می‌تواند بر روی اندازه و مورفولوژی ذراتی که توسط روش الکتروپاشش تولید شده است، مؤثر باشد. تغییرات شرایط الکتروپاشش می‌تواند تعیین کننده‌ی خروج جریان از سوزن، برای تولید ذرات نامنظم یا کره‌ای شکل باشد (شکل 2) [6]. اندازه ذرات، مورفولوژی سطح، تراکم و توزیع، برخی از ویژگی‌هایی هستند که بر بازده ترکیبات زیست فعال و حامل‌های تحویل تأثیر می‌گذارند، از این رو باید کنترل شوند. افزایش مقدار برخی از ویژگی‌های الکتروپاشش مانند هدایت الکتریکی و ولتاژ اعمال شده به محلول با کاهش قطر ذرات ارتباط دارد. با این حال، افزایش مقدار پارامترهای الکتروپاشش مانند سرعت جریان، گرانروی و درصد مواد جامد محلول پاشش شده باعث افزایش میزان ذرات می‌شود. کنترل اندازه کپسول تولید شده بسیار مهم است، زیرا این ویژگی به شدت به ثبات و بازده تحویل ترکیبات زیست فعال پاشش شده بستگی دارد. ممکن است با تغییر پارامترهای فرآیند مانند ویژگی‌های محلول، شرایط فرآیند و شرایط محیطی، ذرات با مورفولوژی و اندازه‌های مختلف تولید شوند [6].

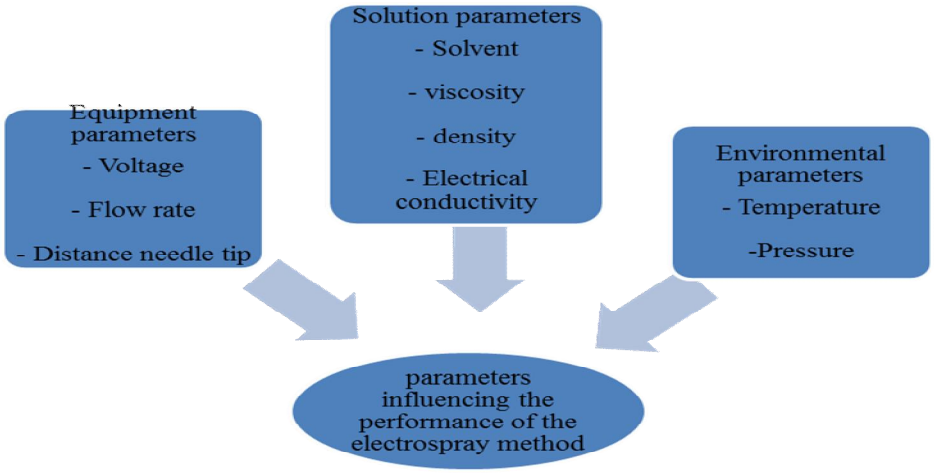

Fig 2 Parameters for obtaining micro and nanoparticles by electrospraying method [3]

3-1- شرایط و ویژگی های خوراک ورودی

3-1-1- نوع محلول پلیمری

نوع پلیمر، وزن مولکولی و غلظت سه عامل حیاتی است که امکان بررسی ویژگی‌های مورفولوژی ذرات تولید شده با دستگاه الکتروپاشش را تعیین می‌کند. تغییر در غلظت پلی‌مر و وزن مولکولی بر گرانروی و کشش سطحی محلول مؤثر است و این

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

عوامل به شدت بر ماهیت ذرات الکتروپاشش شده تأثیر می‌گذارد. به طور کلی کاهش وزن مولکولی باعث افزایش حلالیت محلول پلیمری می‌شود. علاوه بر این‌ها، ویژگی‌های فیزیکی دیگری مانند، گرانروی، استحکام، انعطاف پذیری و درجه پراکندگی زنجیره مولکولی با وزن مولکولی افزایش می‌یابد. اگر غلظت پلی‌مر به اندازه کافی بالا نباشد، جت به علت بی ثباتی، ناپایدار می‌شود، از این رو ذرات میکرو و ریز کروی تشکیل می‌شود. اندازه ذرات را می‌توان با تغییر غلظت محلول یا ماده معلق شده کنترل کرد [6].

3-1-2- حلال

حلال‌ها اجزای اصلی هر نوع محلول پاشش شده می‌باشند، در نتیجه بر فرآیند تولید ذرات و خصوصیات آنها تاثیر می‌گذارند. دو مورد از ویژگی‌های مهم که بر روی تولید ذرات در روش پاشش مایع تأثیر می‌گذارند عبارتند از، حلالیت حلال‌ها و سینتیک خشک کردن حلال. اگر سرعت تبخیر حلال آهسته باشد، مورفولوژی ذرات بیشتر کروی خواهد بود، زیرا زمان بیشتری برای تبخیر حلال وجود دارد. حلال‌هایی که محلولیت پائینی دارند، معمولا دارای اثر متقابل پلیمر- پلیمر بوده و در آنها زنجیره‌های پلی‌مری مارپیچ مشاهده می‌شود، در حالیکه حلال-هایی با محلولیت بالا، حاوی زنجیره‌های پلیمری گسترش یافته بوده و دارای اثر متقابل پلیمر- حلال می‌باشند [6].

3-1-3- گرانروی

گرانروی پارامتری است که به وزن مولکولی محلول پلیمری، غلظت و حلال بستگی دارد. در غلظت های بالا، گرانروی محلول بیشتر و بالعکس است. چنانچه گرانروی خیلی کم باشد، ممکن است ترکیب زیست فعال، ریزپوشانی نشود. پارامتر دیگر مؤثر بر گرانروی، وزن مولکولی محلول پلیمری است. وزن مولکولی بالاتر منجر به تشکیل ذرات درشت‌تر می‌شود [3].

3-1-4- چگالی

این پارامتر مستقیماً با غلظت و گرانروی محلول پلیمر رابطه دارد. با افزایش غلظت و گرانروی، تمایل به افزایش چگالی بیشتر می-شود و بالعکس. چگالی تأثیر مهمی در رشد مخروط تیلور [1]دارد. در چگالی بالاتر، مخروط تیلور تمایل به قطره‌ای شدن دارد، در حالی که در مقادیر کمتر، مخروط تیلور به حالت جت یا چندتایی تغییر شکل می‌دهد [3].

3-1-5- هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی پارامتر دیگری است که مانند گرانروی تحت تأثیر سرعت جریان و پتانسیل الکتریکی قرار دارد، علاوه بر این تمایل یک عامل برای عبور بار الکتریکی (در این حالت یک ماده پلیمری) تعریف شده است. اگر پتانسیل الکتریکی زیاد، سرعت جریان کم و غلظت آن زیاد باشد، هدایت الکتریکی بیشتری به دست می‌آید. هدایت الکتریکی بالاتر منجر به کشش سطحی پایین‌تر و قطر ذرات کوچکتر می‌شود. همچنین، اگر پتانسیل الکتریکی کم، سرعت جریان زیاد و غلظت کم باشد، این پارامتر کاهش یافته و ذرات با قطر بزرگتری بر اثر کشش سطحی بالا ایجاد می‌شود [3].

3-2- شرایط دستگاه

3-2-1- ولتاژ

یکی از عناصر مهم در هر فرآیند الکتروپاشش، استفاده از ولتاژ بالا برای تغییر محلول پلی‌مری است، اعمال این ولتاژ قدرت میدان الکتریکی بین سوزن (نیدل) و نقطه جمع آوری و در نتیجه قدرت نیروی کششی را کنترل می‌کند. هنگامی که محلول شارژ می‌شود، میدان الکتریکی خارجی با غلبه نیروی الکترواستاتیک محلول بر کشش سطحی در الکتروپاشش آغاز می‌گردد [35].

3-2-2- قطر سوزن سرنگ[2]

قطر یک سوزن سرنگ (اغلب یک سوزن سرنگ زیرپوستی دارای لبه ضخیم) با درجه آن رابطه عکس دارد، به طوری که هرچه سوزن‌ها کوچکتر باشند دارای درجه بالاتری می‌باشند. پایداری مخروط تیلور به درجه سوزن بستگی دارد. سوزن‌هایی با قطر کوچکتر برای تولید میکروذرات پایدار مناسب می‌باشند. بهرحال محلول‌های ویسکوالاستیک تهیه شده از پلی‌مرهایی با دمای انتقال شیشه‌ای[3] بالا به راحتی سوزن‌های مناسب را طی فرآیند الکتروپاشش مسدود می‌کنند. قطر قطره‌ها معمولا دو برابر قطر جت است وبا افزایش سایز روزنه مجاری خروجی جت افزایش می‌یابد [36].

1. Taylor cone

2. Spinneret
3. Glass phase

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

3-2-3- سرعت جریان

سرعت جریان محلول پلیمری توسط مقدرا محلول موجود در نوک سوزن طی فرآیند الکتروپاشش تعیین می‌شود. برای یک ولتاژ معین، اگر مخروط تیلور پایدار حفظ شود، یک سرعت جریان متناظر وجود دارد. مدل سازی از اندازه ذرات توسط سرعت جریان منظم تحت یک حالت مخروطی جت می‌تواند به درستی تعیین ابعاد قطرات الکتروپاشش شده بر اساس سرعت جریان محلول پلی‌مری کمک کند. به عبارت دیگر با دانستن این پارامتر رفتار مواد در تعیین اندازه ذرات را می‌توان پیش بینی کرد. حالت ناپایدار مخروط جت، زمانی مشاهده می‌شود که سرعت جریان ناشی از ولتاژ اعمال شده که مربوط به انتقال جرم نامنظم در انتهای نازل است، باشد یا ولتاژ اعمال شده بیش از حد بالا بوده و تخلیه هسته قبل از بارگیری کافی انجام شود. به طور کلی، سرعت جریان بالا در الکتروپاشش منجر به تولید ذرات بزرگ می‌شود زیرا سرعت پرتاب قطره‌ها از سوزن بالاتر است و حلال به طور کامل تبخیر نمی‌شود. درمقابل، سرعت جریان پائین منجر به تولید ذرات کوچک‌تر، زیرا سرعت پائین‌تر پرتاب علت تبخیر بالاتر حلال است [6].

4-2-3- فاصله نوک سوزن تا جمع کننده (TCD)[1]

اتمیزه کردن قطره بین نوک سوزن، جایی که مخروط تیلور شکل گرفته است و جمع کننده انجام می‌شود. همانطور که انتظار می‌رود، TCD تأثیر مستقیم بر زمان پرواز و قدرت میدان الکتریکی دارد. TCD اندازه ذرات را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مورفولوژی محصول نهایی را از طریق میزان تبخیر از حلال مشخص می‌نماید. زمانی که فاصله تا جمع کننده خیلی کوتاه باشد، زمان کافی برای تبخیر حلال وجود ندارد و ذرات بزرگ با پایداری کم تشکیل می‌شوند. افزایش TCD منجر به طولانی شدن زمان پرواز قطره و زمان تبخیر حلال که به استحکام ذرات قبل از رسیدن به جمع کننده می‌شود [6]. قطرات الکتروپاشش شده که از پوشش شیشه‌ای در فاصله‌های مختلف از سر سوزن جمع‌آوری شده‌اند دارای مورفولوژی متفاوت می‌باشند. برای TCD، 3 سانتی‌متر، قطره‌هایی با لبه‌های گرد به دست آمده که نشان می‌دهد شکاف کولومبیک[2] در آنها رخ نداده است. زمانی که TCD به 6 سانتی‌متر افزایش می‌یابد، بخشی از قطره‌ها به تکه‌های کوچک با مورفولوژی زبر و خشن شکسته می‌شوند. با افزایش TCD به 9 سانتی‌متر، تنها قطره‌های قطعه قطعه کوچکی با مورفولوژی زبر به دست می‌آیند. علاوه بر این، این قطره‌ها نشان دهنده دو اندازه کاملا متمایز ناشی از شکسته شدن قطرات اولیه به دلیل شکاف کولمبیک است [37].

3-3- عوامل و شرایط محیطی

به نظر می‌رسد پارامترهای محیطی، به خصوص رطوبت و دما، بر مورفولوژی و بهره‌وری فرآیند الکتروپاشش تأثیر می‌گذارند، به این دلیل که رابطه مستقیم بین تبخیر حلال و درجه حرارت و همچنین بین هدایت الکتریکی حلال و درجه حرارت وجود دارد، به علاوه رطوبت بالا قادر است از عملکرد هر فرآیند الکتروپاشش جلوگیری کند. الکتروپاشش در دمای محیط و عمدتا در فشار اتمسفر انجام می‌شود. بنابراین، این روش با مولکول‌های ضعیف که حساس به درجه حرارت بالا یا نیروی برشی هستند، سازگار است [6].

4- مورفولوژی ذرات تولید شده توسط سامانه الکتروپاشش

اصولا حفره‌هایی برروی سطح برخی از ذرات تولید شده توسط سامانه الکتروپاشش مشاهده می‌شود، که یک مورفولوژی رایج برای ذرات بیوپلیمر است و در نتیجه‌ی خشک شدن ایجاد می‌شود، به طوریکه یک لایه پوسته پلیمری بر روی سطح نانوحامل‌ها در مراحل اولیه خشک شدن تشکیل شده و به دنبال آن به دلیل کاهش آب و تبخیر آن در سطح ذرات چروکیدگی دیده می‌شود [6]. در حقیقت، وقتی غلظت خوراک دهی پایین است، قطرات الکتروپاشش شده به صورت نامنظم هنگام تبخیر آب تغییر شکل می‌دهند، زیرا آنها نمی‌توانند ذرات کروی را به دلیل عدم وجود درهم تنیدگی کافی درون مولکولی در زنجیره بیوپلیمری محصور کنند [25]. با توجه به مورفولوژی‌های مختلف ذرات در تصاویر SEM، می‌توان توضیح داد که تبخیر سریع‌تر باعث ظهور ذرات متخلخل، توخالی و حتی تکه تکه می‌شود، در حالی که انتشار سریع پلیمر داخل قطرات، منجر به تولید ذرات متراکم و جامد می‌گردد [18]. به طور کلی دو

1. Tip to collector distance
2. Coulombic fission

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

مکانیسم اصلی در سامانه الکتروپاشش برای مورفولوژی ذرات مطرح می‌باشد، تبخیر حلال از قطرات (از نوک سوزن تا رسیدن به صفحه جمع کننده) و هم زمان انتشار محلول پلیمری طی تبخیر. اما برخلاف تصور عمومی، ذرات متراکم که در این شرایط تولید می‌شوند لزوماً کروی نیستند. در حقیقت، دو مکانیسم دیگر، جدا از تبخیر حلال و انتشار پلیمر، در مورفولوژی ذرات نهایی نقش دارند: درهم آمیختگی زنجیره و شکافت کولومبیک. درهم آمیختگی زنجیره‌ها، از تغییر شکل ذرات الکتروپاشش شده توسط شکافت کلومبیک طی فرآیند تبخیر جلوگیری می‌کند و ذرات به شکل کروی در می‌آیند، در حالیکه اگر شکافت صورت گیرد (به علت پایین بودن غلظت پلیمر)، کافی نبودن در هم آمیختگی زنجیره‌ها منجر به تشکیل ذرات با اشکال نامنظم دیگری می‌شود. این دو مورد به طور مستقیم با تبخیر ناقص حلال مرتبط است، زیرا زمانیکه غلظت حلال در مقایسه با غلظت پلیمر بالاتر باشد، ذرات الکتروپاشش شده که در این شرایط تشکیل می‌شوند هنگام رسیدن به صفحه جمع کننده، هنوز مقداری حلال در آنها باقی مانده که منجر به تشکیل ذرات صاف (نه کروی)، تقریبا جامد و غیریکنواخت می‌گردد که پس از نشستن برروی صفحه جمع کننده بیشتر خشک می‌شوند [25].

5- کاربردهای الکتروپاشش در صنعت غذا

روش الکتروپاشش برای ریزپوشانی موادی مانند، ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، داروها، ویروس‌ها، باکتری‌ها، DNA و عوامل رشد پوستی به کار می‌رود. در این رابطه، تمایل زیادی به استفاده از نانو یا میکرو ذرات تولید شده توسط الکتروپاشش، در زمینه‌ی مواد غذایی، پزشکی و به ویژه محافظت از مواد مغذی می‌باشد. نانو یا میکرو ذرات تولید شده توسط الکتروپاشش، به عنوان سیستم‌های کارآمد برای حفاظت از ترکیبات زیست فعال و افزایش فعالیت بیولوژیکی طولانی مدت خود عمل می‌کنند. در حالت ایده آل، با استفاده از این روش می‌توان سرعت رهایش مورد نیاز برخی درمان‌های مشخص را، با کنترل مورفولوژی ذرات، اندازه و ماتریکس پلیمری فراهم کرد. همچنین این روش به طور کلی برای تحویل طیف گسترده‌ای از ترکیبات زیست فعال، با احاطه کردن مولکول های کوچک توسط ماکرومولکول‌های بزرگتر تعریف شده است [6]. روش الکتروپاشش یک روش کارآمد برای تولید نانو ذرات آمیلوز، آمیلوپکتین و نشاسته با اندازه ذرات متوسط حدود 100 نانومتر است [27]. ژلاتین نیز به عنوان حامل خوراکی برای ریزپوشانی پلی فنل‌ها جهت بهبود غذاهای فراسودمند استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای اخیر الکتروپاشش بهبود زمان ماندگاری کاپ کیک‌ها است. مقدار قابل توجهی از نان‌ها، کیک‌ها و سایر محصولات پخته شده به دلیل آلودگی با کپک و مخمر متحمل افت کیفیت می‌شوند. آنها در کمتر از 4 ثانیه، با استفاده از الکتروپاشش محلول سوربات پتاسیم را داخل کاپ کیک‌ها پراکنده کردند. نتایج نشان داد شارژ الکترواستاتیک محلول سوربات پتاسیم، پوشش کلی سطح را بهبود می‌بخشد و شروع رشد قارچ و کپک را کند می‌کند [6].

6- نتیجه گیری و روند آینده

نتایج بررسی شده در تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که الکتروپاشش یک روش عملی و مناسب برای تولید سیستم‌های تحویل و ریزپوشانی است. ذرات پلیمری الکتروپاشش شده جهت حفاظت از مواد مغذی و تحویل آنها، در طول فرآوری، انبارداری و عبور و رساندن به محل هدف در بدن مورد استفاده قرار گیرند. مزایای استفاده از روش الکتروپاشش برای ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال مواد غذایی، رهایش کنترل شده، انجام فرآیند در دمای اتاق، کاهش دناتوره شدن پروتئین، بازده ریزپوشانی است. طیف گسترده‌ای از پلی‌مرهای مواد غذایی و پلی‌مرهای زیستی برای این روش قابل استفاده می‌باشند. دستگاه الکتروپاشش مدرن برای ترکیبات زیست فعالی که مدت زمان کوتاهی قبل از ریزپوشانی در دستگاه مستقر می‌باشند، مؤثر است. توزیع اندازه ویژگی مهمی است، زیرا اندازه ذرات به شدت بستگی به پروفایل رهایش و دسترسی بیولوژیکی ترکیبات زیست فعال محصولات غذایی دارد. جت‌های یکنواخت و ثابت، نشان دهنده محصور کردن ذرات مونودیسپرس می‌باشند. غلظت‌های بیشتر از الیاف پیوسته در الکتروریسی به کار می‌روند، در حالی که برای الکتروپاشش غلظت‌های پائین‌تر و انسجام بین مولکولی کمتر برای تولید نانو و میکرو ذرات نیاز است. همچنین

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

مورفولوژی ذرات هم از نظر توده‌ای شدن ترکیبات زیست فعال و هم پروفایل رهایش بسیار حائز اهمیت است. انتخاب ولتاژ الکتروپاشش در رسیدن به یک جت پایدار و پس از آن تولید ذرات پایدار اهمیت دارد. پتانسیل واضح برای توسعه ذرات الکتروپاشش جهت بهبود طراحی و عملکرد محصولات جدید و سامانه رسانش برای ترکیبات غذایی کاربردی وجود دارد و نیازمندی‌های روز افزونی برای فناوری نانو در زمینه صنایع غذایی احساس می‌شود. الکتروپاشش، تکنولوژی با هزینه پائین و انرژی کم می‌باشد که قادر به تولید محصولات مورد نیاز است. توسعه الکتروپاشش جهت فرآوری مواد و محصولات نوین ادامه خواهد یافت. تاکنون طیف وسیعی از پلیمرهای طبیعی و سنتزی در فرآیند الکتروپاشش استفاده شده است اما در کاربردهای غذایی تنها پلیمرهای ایمن شناخته شده قابل استفاده هستند [38]. پلی ساکاریدها و پروتئین‌ها به عنوان یک بیوپلیمر و هیدروکلوئید، کاربردهای مختلفی در صنایع غذایی می‌توانند داشته باشند، که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از؛ قوام دهنده، ژل دهنده، پایدار کننده، امولسیفایر، تشکیل دهنده‌ی پوشش و فیلم، عامل ضد بیاتی، جایگزین چربی و ریزپوشانی. عوامل تأثیر گذار بر خصوصیات این مواد، وزن مولکولی، شکل مولکولی، بار سطحی، قدرت یونی، pH، دما، غلظت و نوع برهمکنش‌ها بین پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها است. در سال‌های اخیر، استفاده از نانوذرات بیوپلیمری، در سامانه‌های غذایی و دارویی به عنوان عامل ریزپوشانی برای ترکیبات زیست فعال، غذا و داروها (مانند ویتامین‌ها، کاروتنوئیدها، اسیدهای چرب امگا سه، فلاوونوئیدها، استرول‌ها و غیره) مورد توجه زیادی قرار گرفته است و در سامانه‌های رهایشی و دارورسانی، جهت انتقال هدف دار، کاربردهای فراوانی یافته‌اند. پروتئین‌ها به علت داشتن هردو نواحی آب گریز و آب دوست می‌توانند حامل خوبی برای انواع مختلف ترکیبات زیست فعال در محیط‌های آبی باشند [6]. فرآیندهای الکتروهیدرودینامیک (الکتروریسی و الکتروپاشش) کاربردهای دیگری نیز در صنایع غذایی دارند، اما آنچه که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است کاربرد آن به عنوان روشی نوین در ریزپوشانی می‌باشد. 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 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 می‌باشد. خوشبختانه این امر به خوبی با الگوگیری و تنظیمات دستگاه از سایر صنایعی که از این سیستم به صورت تجاری استفاده می‌کنند، امکان پذیر بوده و می‌تواند طی چند سال آینده به صورت گسترده وارد صنعت غذا گردد.

6- منابع

[1] Mohammadi, A., Jafari, S.M., Esfanjani, A.F. and Akhavan, S. 2016. Application of nano-encapsulated olive leaf extract in controlling the oxidative stability of soybean oil. Food chemistry, 190: 513-519.

[2] Bagheri, L., Shamekhi, M.A. and Kargozari, M. 2015. Encapsulation of Chamomile Extract in Nanoparticles Prepared via Anti-solvent Precipitation Technique. Journal of Food Processing and Preservation, 9 (1): 67-84.

[3] Jafari, S.M. 2017. Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries, Academic Press.

[4]Tapia-Hernandez, J.A., Torres-Chavez, P.I., Ramirez-Wong, B., Rascon-Chu, A., Plascencia-Jatomea, M., Barreras-Urbina, C.G., Rangel-Vazquez, N.A. and Rodriguez-Felix, F. 2015. Micro-and nanoparticles by electrospray: advances and applications in foods. Journal of agricultural and food chemistry, 63(19): 4699-4707.

[5] López-Rubio, A. and J.M. Lagaron. 2012. Whey protein capsules obtained through electrospraying for the encapsulation of bioactives. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 13: 200-206.

[6] Alehosseini, A., Ghorani, B., Sarabi-Jamab, M. and Tucker, N. 2018. Principles of electrospraying: A new approach in protection of bioactive compounds in foods. Critical reviews in food science and nutrition, 58 (14): 2346-2363.

[7] Rayleigh, L. 1882. XX. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 14(87): 184-186.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

[8] Zeleny, J. 1914. The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces. Physical Review, 3(2): 69.

[9] Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B. 1990. Electrostatic spraying of liquids: Main functioning modes. Journal of electrostatics, 25 (2). 165-184.

[10] Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B. 1994. Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review. Journal of Aerosol Science, 25 (6): 1021-1036.

[11] Poulin, J.F., Caillard, R. and Subirade, M. 2011. Subirade, β-Lactoglobulin tablets as a suitable vehicle for protection and intestinal delivery of probiotic bacteria. International journal of pharmaceutics, 405(1-2): 47-54.

[12] Escamilla-García, M., Calderon, D. and Chanona- Perez, R.R. 2013. Physical and structural characterisation of zein and chitosan edible films using nanotechnology tools. International journal of biological macromolecules, 61: 196-203.

[13] Okutan, N. Terzi, P. and Altay, F. 2014. Altay, Affecting parameters on electrospinning process and characterization of electrospun gelatin nanofibers. Food Hydrocolloids, 39: 19-26.

[14] Gulfam, M., Kim, J. E., Lee, J. M., Ku, B., Chung, B. H. and Chung, B. G. 2012. Anticancer drug-loaded gliadin nanoparticles induce apoptosis in breast cancer cells. Langmuir. 21(28): 8216-8223.

[15] Gómez-Mascaraque, L.G. and López-Rubio, A. 2016. López-Rubio, Protein-based emulsion electrosprayed micro-and submicroparticles for the encapsulation and stabilization of thermosensitive hydrophobic bioactives. Journal of colloid and interface science, 465: 259-270

[16] Kim, M.K., Jeong Yan, L., Hanjin, O., Dae Woong, S. and Hyo Won, K. 2015. Effect of shear viscosity on the preparation of sphere-like silk fibroin microparticles by electrospraying. International journal of biological macromolecules, 79: 988-995.

[17] Nagarajan, U., Kawakami, K., Zhang, Sh., Chandrasekaran, B. and Nair, B. U. 2014. Fabrication of solid collagen nanoparticles using electrospray deposition. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 62(5): 422-428.

[18] Gómez-Mascaraque, L.G., Lagarón, J.M. and López-Rubio, A. 2015. López-Rubio, Electrosprayed gelatin submicroparticles as edible carriers for the encapsulation of polyphenols of interest in functional foods. Food Hydrocolloids, 49: 42-52.

[19] Qu, J., Liu, Y., Yu, Y., Li, J., Luo, J. and Li, M. 2014. Silk fibroin nanoparticles prepared by electrospray as controlled release carriers of cisplatin. Materials Science and Engineering: C. 44: 166-174.

[20] Gómez-Mascaraque, L.G. and López-Rubio, A. 2016. López-Rubio, Protein-based emulsion electrosprayed micro-and submicroparticles for the encapsulation and stabilization of thermosensitive hydrophobic bioactives. Journal of colloid and interface science, 465: 259-270.

[21] Lin, C.C. and Anseth, K.S. 2009. PEG hydrogels for the controlled release of biomolecules in regenerative medicine. Pharmaceutical research, 26(3): 631-643.

[22] Gomez-Mascaraque, L.G., Morfin, R. C., Pérez-Masiá, R., Sanchez, G. and Lopez-Rubio, A. 2016. Optimization of electrospraying conditions for the microencapsulation of probiotics and evaluation of their resistance during storage and in-vitro digestion. LWT-Food Science and Technology, 69: 438-446

[23] Pérez-Masiá, R., López-Nicolás, R., Periago, M.J., Ros, G., Lagaron, G.M. and López-Rubio, A. 2015. Encapsulation of folic acid in food hydrocolloids through nanospray drying and electrospraying for nutraceutical applications. Food Chemistry, 168: 124-133.

[24] Laelorspoen, N., Wongsasulak, S., Yoovidhya, T. and Devahastin, S. 2014. Microencapsulation of Lactobacillus acidophilus in zein–alginate core–shell microcapsules via electrospraying. Journal of functional foods, **7**: 342.

[25] Bhushani, J.A., Kurrey, N. K. and Anandharamakrishnan, C. 2017. Anandharamakrishnan, Nanoencapsulation of green tea catechins by electrospraying technique and its effect on controlled release and in-vitro permeability. Journal of food engineering, 199: 82-92.

[26] Asghari, S. M., Ebrahimi Samani, S., Seraj, Z., Khajeh, Kh. and Hosseinkhani, S. 2013.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

436: 937-943
[33] Pérez-Masiá, R., Lagaron, J.M. and Lopez-Rubio, A. 2015. Morphology and stability of edible lycopene-containing micro-and nanocapsules produced through electrospraying and spray drying. Food and Bioprocess Technology, 8(2): 459-470.
[34] Eltayeb, M., Stride, E. and Edirisinghe, M. 2013. Edirisinghe, Electrosprayed core–shell polymer–lipid nanoparticles for active component delivery. Nanotechnology, 24(46): 465604.
[35] Wang, K. and Stark, J.P. 2010. Voltage effects on the nanoelectrospray characteristics in fully voltage-controlled atomisation of gold nanocolloids. Analytica chimica acta, 679(1-2): 81-84.
[36] Jain, E., Scott, K.M., Zustiak, S.P. and Sell, S.A. 2015. Fabrication of Polyethylene Glycol Based Hydrogel Microspheres Through Electrospraying. Macromolecular Materials and Engineering, 300(8): 823-835.
[37] Guo, Q., Mather, J.P., Yang, P., Boden, M. and Mather, P.T. 2015. Fabrication of polymeric coatings with controlled microtopographies using an electrospraying technique. PloS one. 10(6): e0129960.
[38] Ghorani, B. and Tucker, N. 2015. Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology. Food Hydrocolloids, 51: 227-240.
[39] Jones, O., Decker, E.A. and McClements, D.J. 2010. McClements, Thermal analysis of β-lactoglobulin complexes with pectins or carrageenan for production of stable biopolymer particles. Food Hydrocolloids, 24(2-3): 239-248.
Optimization of chitosan nanoparticle synthesis. Journal of Biotechnology of Tarbiat Modarres University, 4 (2): 21-28.
[27] Ghaeb, M., Tavanai, H. and Kadivar, M. 2015. Electrosprayed maize starch and its constituents (amylose and amylopectin) nanoparticles. Polymers for Advanced Technologies, 26(8): 917-923.
[28] Coghetto, C.C., Brinques, G. B., Siqueira, N. M., Pletsch, J., Soares, R.M.D. and Ayub, M.A.Z. 2016. Electrospraying microencapsulation of Lactobacillus plantarum enhances cell viability under refrigeration storage and simulated gastric and intestinal fluids. Journal of Functional Foods, 24: 316-326.
[29] Khoshakhlagh, K., Koocheki, A., Mohebbi, M. and Allafchian, A. 2017. Development and characterization of electrosprayed Alyssum homolocarpum seed gum nanoparticles for encapsulation of d-limonene. Journal of colloid and interface science, 490: 562-575.
[30] Paximada, P., Echegoyen, Y., Koutinas, A., Mandala, I. and Lagaron, J.M. 2017. Encapsulation of hydrophilic and lipophilized catechin into nanoparticles through emulsion electrospraying. Food Hydrocolloids, 64: 123-132.
[31] Devarayan, K. and Kim, B.S. 2015. Reversible and universal pH sensing cellulose nanofibers for health monitor. Sensors and Actuators B: Chemical, 209: 281-286.
[32] Zhang, X., Kobayashi, I., Uemura, K. and Nakajima, M. 2013. Direct observation and characterization of the generation of organic solvent droplets with and without triglyceride oil by electrospraying. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

Principles and Fundamentals of Electrospraying and its Applications in Encapsulation of Food Compounds

Soleimanifar, M. [1], Jafari, S. M. [2*], Assadpour, E. [3]

1. PhD Student of Food Science and Technology, Islamic Azad University, Damghan Branch, Damghan, Iran.
2. Professor, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Baharan Institute of Higher Education, Gorgan, Iran.

(Received: 2019/11/30 Accepted:2020/02/29)

Nanoencapsulation is one of the most important processes to improve the chemical stability of aromatic and volatile compounds, to prevent their undesirable interactions with food ingredients, and their intelligent release into the food industry. Encapsulation may be defined as the 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 the 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 bioavailibility of components, has attracted particular attention of food and drug scientists. Electrospray is very important as one of the liquid spraying methods due to the production of tiny droplets and uniform distribution. One of the advantages of the electrospray system is that it has high control over the particle size distribution, with the particles almost uniform. Electrospray capsules also have the potential to prevent the destruction of carotenoids and vitamins. In addition to the protective effects of encapsulation on nutrients, they can also be used to improve the fluidity, transport, and displacement properties of materials, since they are solid form rather than liquid. In fact, during the microencapsulation of nutrients, enzymes or other substances (such as volatile oils, taste and colorants, enzymes, etc.) in micro or nano size by wall materials that can form lipids, protein biopolymers and polysaccharides or their complex is surrounded and protected from external factors. This article briefly describes the properties of the electrospray method and its applications.

Key words: Electrospray, Encapsulation, Food Ingredients, Bioactive Compounds

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-09-19]

[DOI: 10.52547/fsct.17.99.163]

* Corresponding Author E-Mail Address: smjafari@gau.ac.ir