JRIFST
مقالهٔ کامل پژوهشی

www.journals.rifst.ac.ir
نشریه پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی
سال 1400، جلد 10، شماره 3، صفحات 248-235
DOI: 10.22101/JRIFST.2020.219597.1157

درون‌پوشانی لیکوپن با استفاده از نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل

میثم کمیجانی[1]، محبت محبی[2*]، بهروز قرآنی[3]

1- دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
2- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
* نویسندهٔ مسئول (m-mohebbi@um.ac.ir)
3- دانشیار، گروه نانوفناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: 1398/11/22
تاریخ بازنگری: 1399/04/03
تاریخ پذیرش: 1399/04/25
تاریخ انتشار برخط: 1399/04/29

واژه‌های کلیدی
الکتروریسی
زیست‌دسترسی
صمغ دانهٔ ریحان
لیکوپن
نانوالیاف

چکیده

در این پژوهش نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل با استفاده از روش الکتروریسی تهیه گردید. محلول‌های صمغ دانهٔ ریحان (1 درصد وزنی-حجمی) و پلی‌وینیل الکل (10 درصد وزنی-حجمی) با نسبت‌های مختلف 10:90، 20:80، 30:70، 40:60، 50:50، 60:40، 70:30، 80:20 و 90:10 با هم مخلوط و برای الکتروریسی مورد استفاده قرار گرفتند. باتوجه‌به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص شد که نسبت حجمی پلی‌وینیل الکل (70) به صمغ دانهٔ ریحان (30) بهینه بود. در ادامه غلظت‌های (0/4، 0/6 و 0/8 درصد وزنی-وزنی) لیکوپن به محلول بهینه اضافه شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان حاوی لیکوپن موردبررسی قرار گرفت. راندمان درون‌پوشانی لیکوپن در نانوالیاف در محدودهٔ 91/67-80/04 درصد به‌دست آمد. ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان حاوی لیکوپن با استفاده از آزمون گرماسنج روبشی افتراقی موردبررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد لیکوپن در فرم آزاد دارای ساختار بلوری بود اما پس از بارگذاری در نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان به فرم آمورف درآمده و یک ساختار همگن را تشکیل داد. نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ مادون‌قرمز بیانگر عدم تعامل شیمیایی بین ترکیبات سازنده و درون‌پوشانی موفقیت‌آمیز بود. درون‌پوشانی لیکوپن در نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان سبب افزایش زیست‌دسترسی لیکوپن در روده نسبت به حالت آزاد شد. نتایج این پژوهش نشان داد نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان دارای پتانسیل بالایی به‌عنوان حامل مناسب برای درون‌پوشانی لیکوپن دارد.

مقدمه

لیکوپن[1]، از متداول‌ترین و قوی‌ترین آنتی‌اکسیدان‌های کاروتنوئیدی است که دارای فواید بسیاری برای سلامتی انسان است و به‌عنوان ماده‌ای ارزشمند توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است (حجتی و رضوی، 1390). ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی لیکوپن و توانایی آن در دفع اکسیژن در شرایط آزمایشگاهی ثابت شده است. این ترکیب می‌تواند باعث تحریک ایمنی شود و اثرات حفاظتی در برابر طیف گسترده‌ای از انواع سرطان‌ها را داشته باشد

[1] Lycopene

(Shi & Maguer, 2000). زیست‌دسترسی[1] یکی از مهم‌ترین نکات درمورد ترکیبات زیست‌فعال است که باید مدنظر قرار بگیرد. به‌طورکلی درصد زیست‌دسترسی برای ترکیبات زیست‌فعال لیپوفیلی برابر با مقدار میسل (مقداری از یک ترکیب که از ساختار غذایی در شرایط گوارشی آزادشده و درنهایت برای جذب در روده قابل‌دسترس است) نسبت به مقدار کل ترکیب موجود در ساختار غذایی است (Marze, 2015). زیست‌دسترسی کاروتنوئیدها به سبب عوامل مختلف نظیر حلالیت کم در محیط‌های آبی، حساسیت به شرایط نامطلوب محیطی (نور، دمای بالا و اکسیداسیون) و آزادشدن محدود از ساختار غذا یا دارو، کم و تا اندازه‌ای متغیر است (Marze, 2015). زیست‌دسترسی لیکوپن در روده به‌طور معمول در رژیم غذایی 3-0/1 درصد است (Reboul *et al.*, 2006). به‌همین‌منظور، برای افزایش زیست‌دسترسی و بهبود رهایش کنترل‌شدهٔ ترکیبات زیست‌فعال مانند لیکوپن می‌توان از روش‌های مختلف درون‌پوشانی استفاده کرد.

درون‌پوشانی فرایند به‌دام‌انداختن یک جزء خاص (جزء فعال) در نوعی ماتریکس است. ماتریکس می‌تواند یک جزء یا ترکیبی از اجزاء مختلف (مانند پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها، چربی‌ها، آب یا مواد معدنی) باشد. درون‌پوشانی با پوشش‌دهی اجزاء حساس و ناپایدار سبب افزایش ماندگاری آنها می‌شود. درون‌پوشانی در صنعت غذا بنابه‌دلایلی نظیر کاهش واکنش هسته دربارهٔ عوامل محیطی (نور، اکسیژن و آب)، کاهش سرعت تبخیر یا انتقال مواد هسته به محیط خارج، کنترل رهاسازی مواد هسته و جابه‌جایی آسان‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد (McClements, 2013).

الکتروریسی یک روش نوین درون‌پوشانی است که از نیروهای الکترواستاتیک می‌تواند برای تولید الیاف با قطر 10 تا صدها نانومتر استفاده شود (Rezaei, Tavanai, & Nasirpour, 2016). سطح ویژهٔ زیاد، تخلخل، ظرفیت بارگذاری راندمان درون‌پوشانی بالا و همچنین امکان رهایش هم‌زمان و آسان ترکیبات مختلف، از ویژگی‌های نانوالیاف الکتروریسی‌شده است که شرایط را برای به‌دام‌انداختن ترکیبات زیست‌فعال مهیا می‌سازد (Ghorani & Tucker, 2015). علاوه‌بر این، به‌دلیل اینکه الکتروریسی در درجه‌حرارت محیط عمل می‌کند برای حفظ ساختار و به‌دام‌انداختن افزودنی‌های ناپایدار حرارتی مانند ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها مناسب است (Mascheroni *et al.*, 2013). بیوپلیمرهای طبیعی مانند پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها به‌دلیل رهایش پایدار و کنترل‌شده می‌توانند برای درون‌پوشانی ترکیبات زیست‌فعال مورد استفاده قرار بگیرد (McClements & Xiao, 2014). مطالعه‌های قبلی نشان داده است که الیاف پروتئینی و پلی‌ساکاریدی تولیدی با استفاده از فرایند الکتروریسی می‌توانند برای بهبود ویژگی‌ها و افزایش زیست‌دسترسی لیکوپن مورد استفاده قرار بگیرند. چهارپاشلو، محبی و قرآنی (1398) لیکوپن را به‌منظور افزایش زیست‌دسترسی، در الیاف پروتئینی زئین حاصل از روش الکتروریسی بارگذاری کردند. در این پژوهش، نتایج حاکی از درون‌پوشانی موفقیت‌آمیز لیکوپن در نانوالیاف زئینی بود. استفاده از نانوالیاف زئین سبب رهایش کنترل‌شده در دستگاه گوارش و افزایش در زیست‌دسترسی لیکوپن شده است.

صمغ دانهٔ ریحان یک منبع غنی از آنتی‌اکسیدان و دارای پتانسیل درمانی و بیولوژیکی فراوانی ازجمله خاصیت ضدحساسیت، ضدعفونت و ضدسرطانی است (Godhwani, Godhwani, & Was, 1988).

Kurd، Fathi و Shekarchizadeh (2017) نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان را به‌عنوان منبع جدید هیدروکلوئید به‌همراه پلی‌وینیل الکل در نقش عامل کمکی ازطریق فرایند الکتروریسی بررسی کردند. محلول صمغ دانهٔ ریحان و پلی‌وینیل الکل با نسبت‌های مختلف حجمی ترکیب شد و برای الکتروریسی مورد استفاده قرار گرفت. براساس نتایج این پژوهش، نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان می‌تواند برای درون‌پوشانی ترکیبات زیست‌فعال و تولید فیلم‌های بسته‌بندی استفاده شود (Kurd *et al.*, 2017).

این پژوهش با هدف بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی الیاف صمغ دانهٔ ریحان و توانایی آن برای افزایش زیست‌دسترسی لیکوپن در محیط شبیه‌سازی‌شدهٔ گوارش موردمطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد اولیهٔ موردنیاز در این پژوهش شامل پلی‌وینیل الکل (با وزن مولکولی 85000-124000 و درجهٔ هیدرولیز 89-87 درصد) و نمک‌های صفراوی (شرکت سیگما آلدریچ،

[1] Bioaccessibility

ساخت آلمان) تهیه شد. لیکوپن با درجهٔ خلوص 90 درصد از شرکت پاب چم (ساخت امریکا) و اسید استیک گلاسیال با خلوص 99/7 درصد از شرکت سام چون (ساخت کره‌جنوبی) تهیه شد. صمغ دانهٔ ریحان (شرکت ریحان گام پارسیان، ساخت ایران)، پپسین، تریپسین و لیپاز (شرکت سولاربیو، ساخت چین) خریداری شدند. سایر مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش مانند کلرید سدیم، هیدروژن فسفات پتاسیم، اوره، بی‌کربنات سدیم، هگزان، هیدروکسید سدیم، اسید کلریدریک و توئین 80 از شرکت مرک (ساخت آلمان) خریداری شد.

تهیهٔ محلول صمغ دانهٔ ریحان

غلظت (1 درصد وزنی-حجمی) صمغ دانهٔ ریحان ازطریق حل‌کردن پودر آن در آب دیونیزه در دمای 25 درجهٔ سانتی‌گراد توسط همزن (RCT-Digital، ساخت آلمان) با سرعت 400 دور بر دقیقه تا زمان رسیدن به یک محلول همگن تهیه شد. محلول‌ها 24 ساعت قبل از آزمایش به‌منظور هیدراتاسیون کامل و ایجاد پیوندهای بین‌مولکولی در یخچال قرار گرفت (Kurd *et al.*, 2017).

تهیهٔ محلول پلی‌وینیل الکل

غلظت (10 درصد وزنی-حجمی) پلی‌وینیل الکل ازطریق حل‌کردن پودر پلی‌وینیل الکل در آب دیونیزه در دمای 75 درجهٔ سانتی‌گراد همراه با یک همزن مغناطیسی با سرعت 400 دور بر دقیقه به مدت 2 ساعت به‌دست‌آمد (Fahami & Fathi, 2018b).

تهیهٔ محلول لیکوپن در مخلوط صمغ دانهٔ ریحان و پلی‌وینیل الکل

لیکوپن با غلظت‌های 0/4، 0/6 و 0/8 درصد وزنی-وزنی و توئین 80 به میزان 1 درصد وزنی-حجمی به محلول با نسبت بهینه حجمی پلی‌وینیل الکل و صمغ دانهٔ ریحان اضافه شد.

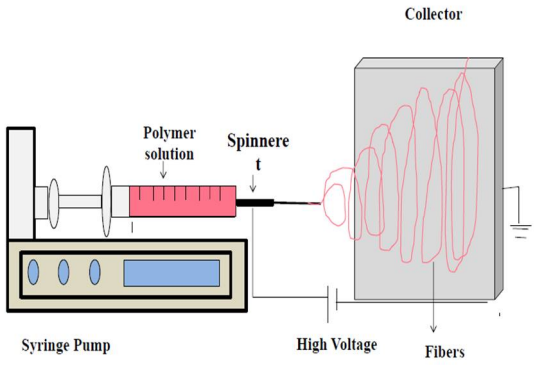
بررسی ویژگی‌های محلول

جهت اندازه‌گیری ویسکوزیتهٔ محلول‌های پلیمری از ویسکومتر (Brookfield، model RVDV-III، Middleboro، MA، ساخت آمریکا) و با اسپیندل SC4-27 استفاده شد. اندازه‌گیری ویسکوزیتهٔ ظاهری برای محلول‌های صمغ دانهٔ ریحان و پلی‌وینیل الکل در نسبت‌های حجمی مختلف در سرعت برشی 85 دور بر ثانیه و در دمای 25 درجهٔ سانتی‌گراد صورت پذیرفت (Rezaeinia, Ghorani, Emadzadeh, & Tucker, 2019).

از هدایت‌سنج (XS Con6، Labbox، Barcelona، ساخت اسپانیا) برای تعیین هدایت الکتریکی در دمای 25 درجهٔ سانتی‌گراد انجام شد. کشش سطحی محلول‌ها با استفاده از دستگاه کشش‌سنج (KRÜSS GmbH، ساخت آلمان) در دمای 25 درجهٔ سانتی‌گراد تعیین شد (Rezaeinia *et al.*, 2019).

فرایند الکتروریسی

در این پژوهش از دستگاه الکتروریسی (Electrospinning، Starter Kit–Yflow، ساخت اسپانیا) مجهز به منبع تغذیه با ولتاژ بالا (0-35 کیلوولت) استفاده شده است. محلول پلیمری درون یک سرنگ با حجم 10 میلی‌لیتر وارد شد و به‌وسیلهٔ یک لولهٔ باریک ازطریق پمپ دارای کنترل دیجیتالی به سوزن منتقل شد. قطب منفی منبع تغذیهٔ دستگاه به صفحهٔ جمع‌کننده و قطب مثبت دستگاه به سر سوزن فولادی با شمارهٔ گیج 18 متصل بود. تمام پارامترهای دستگاهی مانند ولتاژ، فاصلهٔ سوزن تا جمع‌کننده و نرخ تغذیهٔ ثابت و به‌ترتیب برابر با 25 کیلوولت، 15 سانتی‌متر و 0/2 میلی‌لیتر بر ساعت بود. جهت جمع‌آوری نانوالیاف از یک جمع‌کنندهٔ استاتیکی به ابعاد 10×10 سانتی‌متر استفاده شد. شرایط محیطی مانند دما و رطوبت نسبی به‌ترتیب 25±3 درجهٔ سانتی‌گراد و 22±2 درصد بودند. شکل (1) نمایی از اجزا و فرایند الکتروریسی را نشان می‌دهد.



شکل 1- نمایی از اجزا و فرایند الکتروریسی

میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای بررسی مورفولوژی الیاف و انتخاب بهترین نسبت حجمی از نسبت‌های حجمی مختلف از صمغ دانهٔ ریحان 1 درصد و پلی‌وینیل الکل 10 درصد از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Hitachi S-4100، ساخت اسپانیا) در ولتاژ 20 کیلوولت و در بزرگ‌نمایی 25000 استفاده شد. میانگین قطر الیاف با اندازه‌گیری 100 نمونه به‌صورت تصادفی و با نرم‌افزار ImageJ نسخهٔ 48.1 تعیین شد (Kurd *et al.*, 2017).

تعیین راندمان درون‌پوشانی

برای محاسبهٔ راندمان درون‌پوشانی لیکوپن 0/1 گرم از نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن با 10 میلی‌لیتر هگزان (حلال لیکوپن) حاوی 0/05 درصد وزنی-حجمی بوتیل هیدروکسی‌تولوئن (BHT[1]) به مدت 2 دقیقه مخلوط شد. بوتیل هیدروکسی‌تولوئن به‌منظور جلوگیری از اکسیداسیون لیکوپن در حین اندازه‌گیری استفاده شد (Fish, Perkins-Veazie, & Collins, 2002). مخلوط حاصل سانتریفیوژ (HERMLE، Z36HK، ساخت آلمان) شد (5 دقیقه، 3140 متر بر مجذور ثانیه). لایهٔ بالایی (حاوی لیکوپن در هگزان) جداسازی شده، میزان لیکوپن در آن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (WPA، S2000UV/Vis، ساخت انگلستان) و در طول موج 472 نانومتر (بیشترین جذب لیکوپن در هگزان) اندازه‌گیری شد (Fish *et al.*, 2002). مقدار لیکوپن با استفاده از رابطهٔ (1) و میزان راندمان درون‌پوشانی از رابطهٔ (2) محاسبه شد:

رابطهٔ (1)

$$\text{میزان لیکوپن}\left(\frac{mg}{100\,g}\right) = \frac{Abs472 \times Mw \times e \times 100}{\varepsilon \times L \times g}$$

در رابطهٔ (1)، Abs472 میزان جذب لایهٔ بالایی در طول موج 472 نانومتر، M_w وزن مولکولی لیکوپن (536/9 گرم بر مول)، V حجم هگزان مصرفی (برحسب میلی‌لیتر)، ε ضریب خاموشی لیکوپن در هگزان ($17/2\times10^4$)، L طول کووت (1 سانتی‌متر) و g وزن نمونه (0/1گرم) است (Salvia-Trujillo & McClements, 2016).

رابطهٔ (2)

$$\text{راندمان درون‌پوشانی} = \frac{WT - WF}{WT} \times 100$$

در رابطهٔ (2)، W_T نشان‌دهندهٔ مقدار کل لیکوپن مورد استفاده در تهیهٔ نانوالیاف و W_F مقدار کل لیکوپن آزاد در محلول است (Fahami & Fathi, 2018b).

طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ مادون‌قرمز

برای ارزیابی اثرات متقابل شیمیایی گروه‌های عاملی و تعاملات احتمالی طیف‌های پودر لیکوپن، پودر پلی‌وینیل الکل، پودر صمغ دانهٔ ریحان و نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن از دستگاه طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ مادون‌قرمز (FTIR، AVATAR 370، Thermo Nicolet، ساخت آمریکا) استفاده شد. در این آزمون از قرص بروماید[2] در محدودهٔ 400-4000 بر سانتی‌متر و در دمای 25 درجهٔ سانتی‌گراد استفاده شد (Dehcheshmeh & Fathi, 2019).

ویژگی‌های حرارتی

برای تعیین ویژگی‌های حرارتی پودر لیکوپن، پودر پلی‌وینیل الکل، پودر صمغ دانهٔ ریحان و نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن از دستگاه گرماسنج روبشی افتراقی (DSC 822e/400، Mettler Toledo، ساخت کانادا) استفاده شد. در این آزمون از 4 میلی‌گرم نمونه استفاده گردید. این آزمون در محدودهٔ دمایی 25 تا 400 درجهٔ سانتی‌گراد با سرعت گرمایش 5 درجهٔ سانتی‌گراد بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفت (Santos *et al.*, 2014).

تهیهٔ محلول‌های شبیه‌سازی‌شدهٔ بزاق، معده و روده

محلول شبیه‌سازی‌شدهٔ بزاق (SSF[3])، که حاوی نسبت‌های مشخصی از آنزیم آلفا-آمیلاز و نمک‌های مختلف بود، براساس منابع گزارش شده تهیه شد (Zhang *et al.*, 2016). ترکیبات مورد استفاده در محلول بزاق شبیه‌سازی‌شده را با استفاده از آب دیونیزه به حجم رسانده و pH در 6/8 تنظیم شد.

[1] Butylated hydroxytoluene

[2] Bromide tablet

[3] Simulated saliva fluid

محلول شبیه‌سازی‌شدهٔ معده (SGF[1])، برای تهیهٔ این محلول، 2 گرم سدیم کلرید و 7 میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک 37 درصد با استفاده از آب دیونیزه به حجم 1 لیتر رسانده شد. به میزان 3/2 میلی‌گرم بر میلی‌لیتر پپسین به محلول اضافه شد و pH محلول در 2/5 تنظیم گردید (Zhang *et al.*, 2016).

محلول شبیه‌سازی‌شدهٔ روده (SIF[2])، با استفاده از محلول‌های 3/75 مولار سدیم کلرید و 0/25 مولار کلسیم کلرید تهیه و pH در 7 تنظیم شد (Zhang *et al.*, 2016). همچنین محلول لیپاز با غلظت 24 میلی‌گرم بر میلی‌لیتر و محلول نمک‌های صفراوی با غلظت 46/87 میلی‌گرم بر میلی‌لیتر تهیه و محلول پانکراس با غلظت 16/25 میلی‌گرم بر میلی‌لیتر تهیه و pH آنها در 7 تنظیم شد (Salvia-Trujillo & McClements, 2016).

میزان زیست‌دسترسی لیکوپن در روده

به‌منظور تعیین میزان زیست‌دسترسی لیکوپن در روده، نخست محلول‌های شبیه‌سازی‌شدهٔ دهان، معده و روده تهیه شد (Zhang *et al.*, 2016). 0/1 از نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن را با 20 میلی‌لیتر محلول شبیه‌سازی‌شدهٔ بزاق (SSF) ترکیب‌شده و pH مخلوط به 6/8 رسانده شد. مخلوط حاصل برای انکوباسیون به مدت 10 دقیقه در حمام آب مجهز به سیستم تکان‌دهنده در دمای 37 درجهٔ سانتی‌گراد و سرعت برشی 100 دور بر دقیقه قرار گرفت. مخلوط حاصل از مرحلهٔ فاز دهان به‌همراه نانوالیاف موجود با 20 میلی‌لیتر محلول شبیه‌سازی‌شدهٔ معده (SGF) ترکیب شده و pH در 2/5 تنظیم شد. مخلوط حاصل 2 ساعت در حمام آب مجهز به سیستم تکان‌دهنده در دمای 37 درجهٔ سانتی‌گراد و سرعت برشی 100 دور بر دقیقه قرار گرفت. مخلوط حاصل از اتمام فاز معده به‌همراه الیاف موجود در آن به بشر شیشه‌ای 100 میلی‌لیتری منتقل شد. مخلوط در حمام آب مجهز به سیستم تکان‌دهنده قرار داده شد و pH مخلوط به 7 رسانده شد. 1/5 میلی‌لیتر محلول شبیه‌سازی‌شدهٔ روده و 3/5 میلی‌لیتر محلول نمک‌های صفراوی اضافه شد و pH مخلوط در 7 تنظیم شد. در ادامه 2/5 میلی‌لیتر محلول لیپاز و 3 میلی‌لیتر محلول پانکراس اضافه شد و به مدت 2 ساعت در حمام با دمای 37 درجهٔ سانتی‌گراد و سرعت برشی 100 دور بر دقیقه نگهداری شد. جهت تعیین میزان زیست‌دسترسی لیکوپن در رودهٔ کوچک مخلوط حاصل از اتمام فاز روده سانتریفیوژ شد (40 دقیقه، 25480 متر بر مجذور ثانیه) و لایهٔ بالایی (میسل) که لیکوپن در آن حل شده بود، جمع‌آوری گردید. غلظت لیکوپن خام، لیکوپن موجود در نمونه‌های نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن و همچنین میسل حاصل از اتمام فاز روده ازطریق استخراج سانتریفیوژی تعیین گردید. بدین‌منظور ابتدا 10 میلی‌لیتر هگزان (حاوی 0/05 درصد BHT) را به 0/1 گرم از نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن و 0/1 گرم از میسل حاصل از اتمام فاز روده که در دو لولهٔ آزمایش به‌طور مجزا قرار داشتند، اضافه شد. لوله‌های آزمایش دو بار به مدت 10 ثانیه ورتکس و سپس سانتریفیوژ (5 دقیقه، 3140 متر بر مجذور ثانیه) شدند. 2 میلی‌لیتر آب دیونیزه به لوله‌های آزمایش اضافه‌شده، 5 دقیقه در دمای محیط قرار داده شد تا دو فاز از هم جدا شوند. در ادامه لایهٔ بالایی جمع‌آوری شد و مقدار جذب آن توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج 472 نانومتر تعیین شد. از حلال هگزان به‌عنوان جذب نمونهٔ شاهد استفاده شد (Zhang *et al.*, 2016). میزان زیست‌دسترسی از رابطهٔ (3) تعیین گردید:

رابطهٔ (3)

$$\text{زیست دسترسی} = \frac{\text{غلظت لیکوپن در میسل}}{\text{غلظت لیکوپن در نانوالیاف}} \times 100$$

آنالیز آماری

برای انجام آزمایش‌ها از طرح کاملا تصادفی و برای مقایسهٔ اختلاف میانگین بین اعداد (3 تکرار برای هر آزمایش) از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان 95 درصد استفاده گردید. نتایج به‌صورت میانگین و انحراف استاندارد بیان شد. جهت تجزیه‌وتحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS نسخهٔ 22 استفاده شد. جهت برازش نتایج، مدل‌سازی و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای Matlab نسخهٔ 2013 و Microsoft Excel نسخهٔ 2013 استفاده گردید.

[1] Simulated gastric fluid
[2] Simulated intestinal fluid

نتایج و بحث

بررسی ویژگی‌های مورفولوژی و قطر الیاف

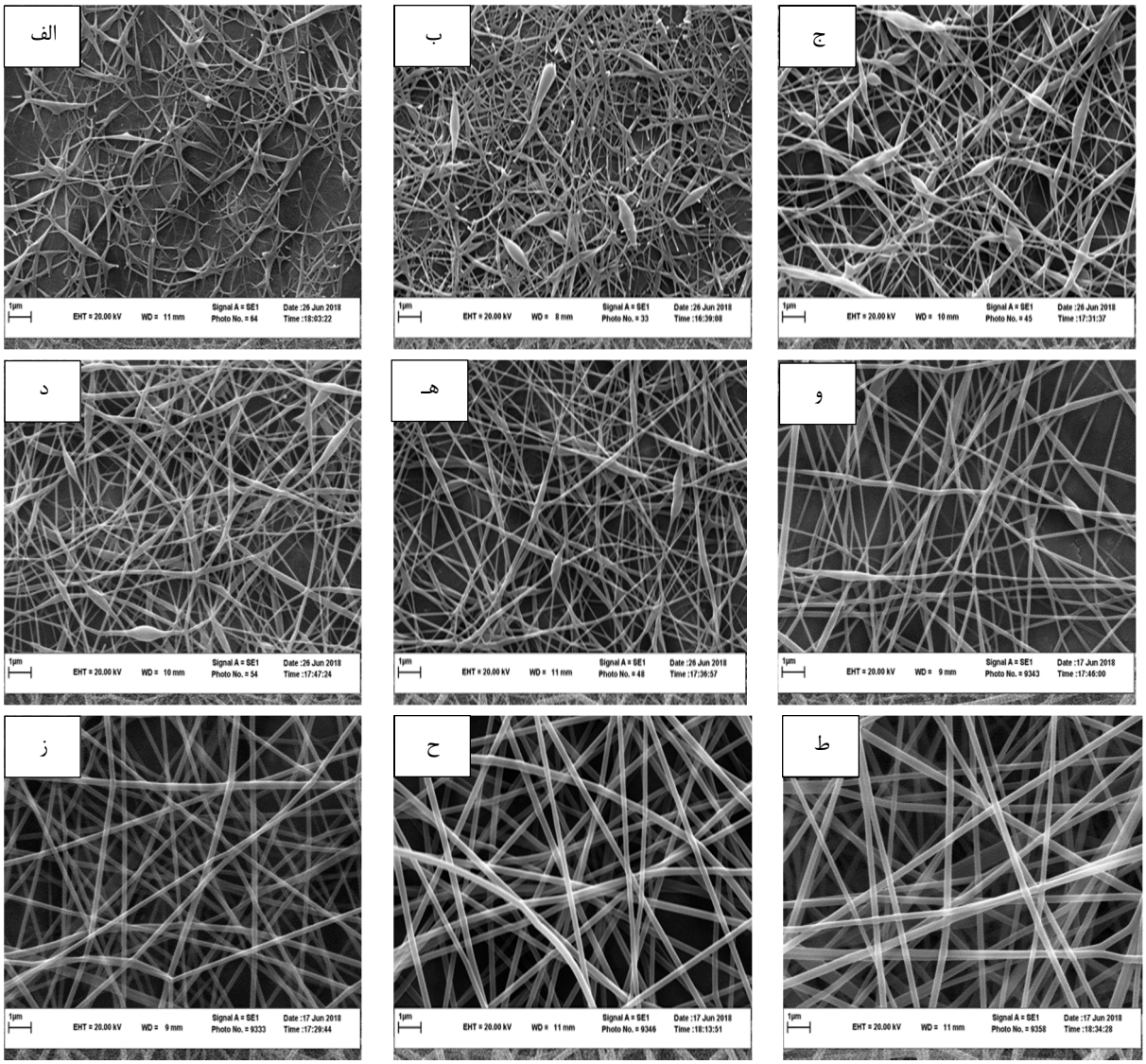
ویسکوزیته، هدایت الکتریکی، کشش سطحی و میانگین قطر الیاف دارای نسبت‌های حجمی مختلف صمغ دانهٔ ریحان و پلی‌وینیل الکل در جدول (1) نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود با افزایش نسبت حجمی صمغ دانهٔ ریحان ویسکوزیتهٔ ظاهری و هدایت الکتریکی محلول‌ها افزایش یافت. صمغ دانهٔ ریحان به‌دلیل وجود گروه‌های کربوکسیل دارای بار منفی هدایت الکتریکی بیشتری نسبت به پلی‌وینیل الکل (بدون بار) دارد (Chastellain, Petri, & Hofmann, 2004; Hosseini-Parvar, Osano, & Matia-Merino, 2016). همچنین هدایت الکتریکی یک محلول، تراکم بار الکتریکی و میزان کشیدگی یک جت محلول پلیمری را نشان می‌دهد. بنابراین در شرایط دستگاهی (ولتاژ، نرخ تغذیه، فاصلهٔ بین سوزن و جمع‌کننده) و شرایط محیطی ثابت برای فرایند الکتروریسی، محلولی با هدایت الکتریکی بالاتر به‌دلیل کشیدگی بیشتر جت قطر الیاف کمتر می‌شود (Tan, Inai, Kotaki, & Ramakrishna, 2005). کشش سطحی نقش مهمی در مورفولوژی الیاف الکتروریسی‌شده دارد. برای شروع الکتروریسی به محلول باردارشده‌ای نیاز است تا بر کشش سطحی محلول غلبه کند. با افزایش نسبت حجمی صمغ دانهٔ ریحان کشش سطحی افزایش یافته است. همچنین شکل الیاف از حالت الیاف یکنواخت و بدون مهره به حالت کروی و دارای مهره تبدیل شد (شکل 2). در محلول‌هایی با کشش سطحی بالا نسبت سطح به واحد جرم کاهش می‌یابد و مولکول‌های حلال تمایل به تجمع به یکدیگر و ایجاد شکل کروی دارند. به‌همین‌خاطر جت محلول در حین فرایند الکتروریسی نمی‌تواند شکل پایدار خود را در نوک تیلور حفظ کند و منجربه‌تولید مهره می‌شود (Ghorani & Tucker, 2015; Ramakrishna, 2005). درنهایت، نسبت حجمی پلی‌وینیل الکل (70) به صمغ دانهٔ ریحان (30) به‌دلیل یکنواختی الیاف و مقدار پلی‌وینیل الکل کمتر به‌عنوان نسبت بهینه برای بارگذاری غلظت‌های مختلف لیکوپن (0/4، 0/6 و 0/8 درصد) انتخاب گردید.

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکی محلول‌های صمغ دانهٔ ریحان و پلی‌وینیل الکل در نسبت‌های حجمی مختلف

نسبت صمغ (1 درصد) به پلی‌وینیل الکل (10 درصد)	هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	ویسکوزیتهٔ ظاهری (پاسکال.ثانیه)	کشش سطحی (میلی‌نیوتون بر متر)	میانگین قطر الیاف (نانومتر)
90:10	1809±0/11[a]	0/863±0/002[a]	52/4±0/06[a]	105±38
80:20	1721±0/12[b]	0/838±0/007[b]	51/1±0/04[b]	117±30
70:30	1619±0/34[c]	0/810±0/002[c]	49/6±0/07[c]	125±31
60:40	1503±0/21[d]	0/788±0/002[d]	45/9±0/05[d]	132±33
50:50	1418±0/12[e]	0/771±0/006[e]	42/3±0/08[e]	137±36
40:60	1337±0/14[f]	0/752±0/003[f]	40/1±0/03[f]	145±38
30:70	1221±0/26[g]	0/736±0/008[g]	38/5±0/07[g]	148±40
20:80	1089±0/12[h]	0/715±0/005[h]	37/6±0/03[h]	154±43
10:90	985±0/18[i]	0/687±0/003[i]	36/9±0/02[i]	165±42

داده‌ها براساس میانگین ± انحراف استاندارد و در 3 تکرار برای هر نمونه نمایش داده شده است.

a-i: اختلاف معنی‌دار در هر ستون را نشان می‌دهد (P<0/05).



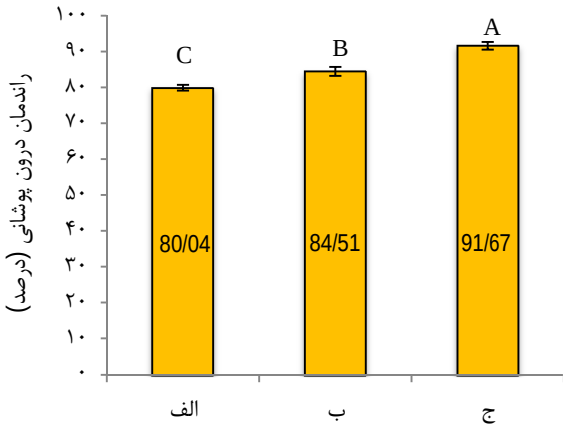
شکل 2- تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از الیاف الکتروریسی‌شده حاصل از محلول‌های صمغ دانهٔ ریحان (1 درصد) و پلی‌وینیل الکل (10 درصد) در حلال آب دیونیزه و در نسبت‌های حجمی متفاوت، الف) محلول با نسبت حجمی صمغ (90) به پلی‌وینیل الکل (10)، ب) محلول با نسبت حجمی صمغ (80) به پلی‌وینیل الکل (20)، ج) محلول با نسبت حجمی صمغ (70) به پلی‌وینیل الکل (30)، د) محلول با نسبت حجمی صمغ (60) به پلی‌وینیل الکل (40)، هـ) محلول با نسبت حجمی صمغ (50) به پلی‌وینیل الکل (50)، و) محلول با نسبت حجمی صمغ (40) به پلی‌وینیل الکل (60)، ز) محلول با نسبت حجمی صمغ (30) به پلی‌وینیل الکل (70)، ح) محلول با نسبت حجمی صمغ (20) به پلی‌وینیل الکل (80) و ط) محلول با نسبت حجمی صمغ (10) به پلی‌وینیل الکل (90)

تعیین راندمان درون‌پوشانی لیکوپن و بررسی مورفولوژی نانوالیاف حاوی لیکوپن

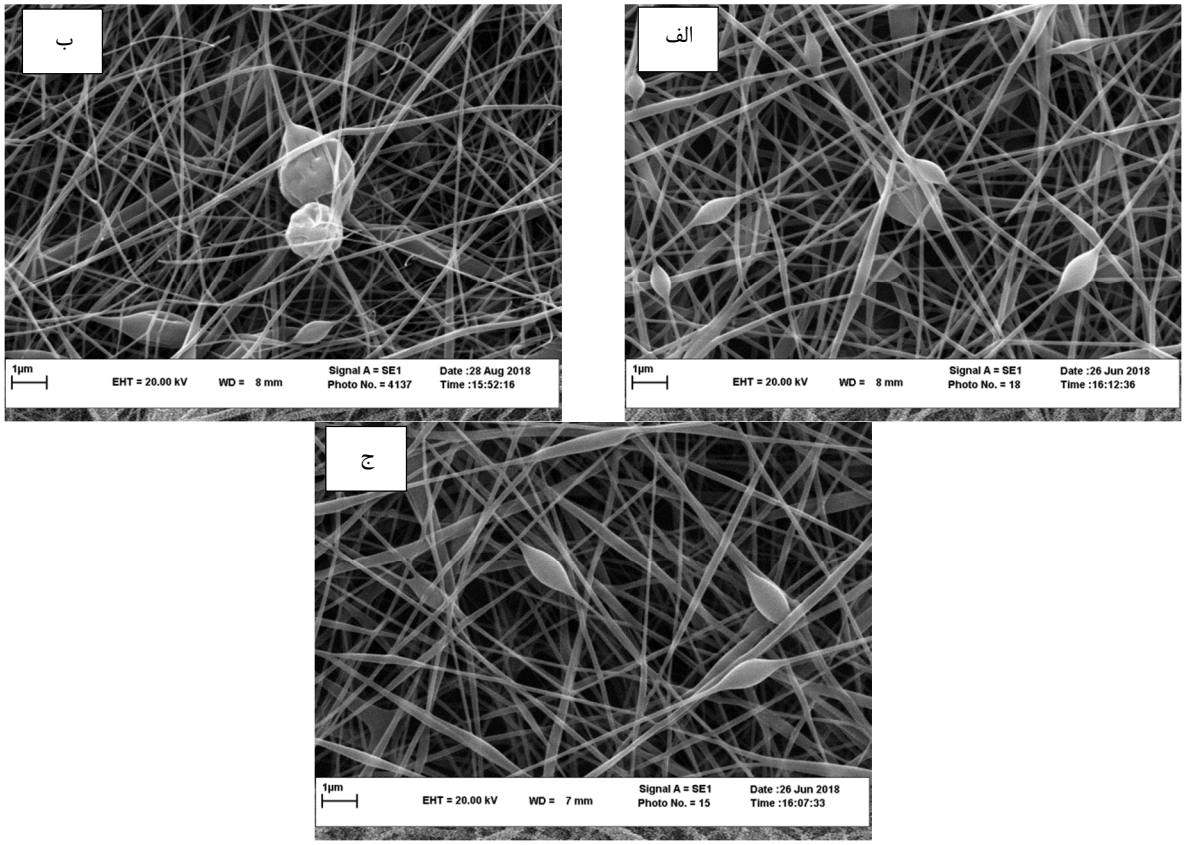
راندمان درون‌پوشانی لیکوپن در نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل در 3 غلظت بارگذاری لیکوپن در شکل (3) نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود بیشترین راندمان درون‌پوشانی لیکوپن تحت غلظت بارگذاری 0/8 درصد لیکوپن و برابر با 91/67 درصد است. کمترین راندمان درون‌پوشانی 80/04 درصد به‌دست‌آمد که مربوط به نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل تحت بارگذاری 0/4 درصد لیکوپن است. با افزایش غلظت لیکوپن درصد راندمان درون‌پوشانی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ($P<0/05$). باتوجه‌به اینکه در ولتاژ ثابت میزان محلول کشیده‌شده در نوک سوزن مقدار ثابتی است، محلول با غلظت بیشتر مادهٔ درون‌پوشانی‌شده می‌تواند باعث افزایش راندمان درون‌پوشانی شود (Ghorani & Tucker, 2015). در پژوهش‌های قبلی لیکوپن را در بیوپلیمرهای مختلف مانند دکستران و کنسانترهٔ پروتئین آب‌پنیر با استفاده از

روش‌های خشک‌کردن پاششی و الکتروپاشش بارگذاری کردند و حداکثر راندمان درون‌پوشانی حدود 75 درصد به‌دست‌آمد (Pérez-Masiá, Lagaron, & Lopez-Rubio, 2014). در پژوهشی دیگر که لیکوپن را با استفاده از خشک‌کن پاششی در حاملی از ژلاتین و ساکارز بارگذاری کردند و نتایج نشان داد که بیشترین راندمان درون‌پوشانی 82/2 درصد است (Shu, Yu, Zhao, & Liu, 2006). همچنین، در پژوهش صورت‌گرفته توسط چهارپاشلو و همکاران (1398) که لیکوپن را در الیاف زئین بارگذاری کردند بیشترین میزان راندمان درون‌پوشانی 88/07 درصد به‌دست‌آمد. به‌طورکلی مشاهده شد که درون‌پوشانی ازطریق فرایند الکتروریسی نسبت به سایر روش‌ها مانند خشک‌کردن پاششی و الکتروپاشش‌شده دارای راندمان درون‌پوشانی بیشتری است. بنابراین می‌توان گفت که الکتروریسی صمغ دانهٔ ریحان پتانسیل بالایی برای به‌دام‌انداختن لیکوپن و افزایش راندمان درون‌پوشانی دارد.

مورفولوژی نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی 0/4، 0/6 و 0/8 درصد لیکوپن در شکل (4) نمایش داده شده است. قطر نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی 0/4، 0/6 و 0/8 درصد لیکوپن به‌ترتیب برابر با 137±35، 138±34 و 140±36 نانومتر به‌دست‌آمد (غلظت لیکوپن تأثیر معنی‌داری بر قطر نانوالیاف نداشت).



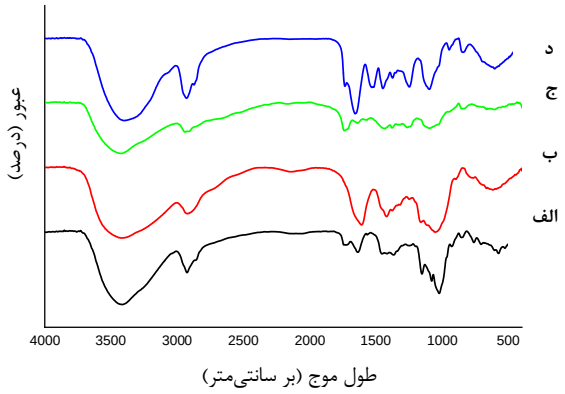
شکل 3- راندمان بارگذاری لیکوپن در نمونه‌های مختلف نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل تحت بارگذاری، الف) 0/4 درصد لیکوپن، ب) 0/6 درصد لیکوپن و ج) 0/8 درصد لیکوپن



شکل 4- تصویر حاصل از نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل تحت بارگذاری، الف) 0/4، ب) 0/6 و ج) 0/8 درصد لیکوپن

طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ مادون‌قرمز

به‌منظور بررسی برهم‌کنش مناسب بین لیکوپن و اجزاء سازندهٔ نانوالیاف (پلی‌وینیل الکل و صمغ دانهٔ ریحان) و همچنین تعیین گروه‌های عاملی از طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ مادون‌قرمز استفاده شد. شکل (5) نتایج حاصل از طیف‌های دستگاه طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ مادون‌قرمز را برای صمغ دانهٔ ریحان، لیکوپن، پلی‌وینیل الکل و نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن نشان می‌دهد. شکل (5-الف) پیک‌های شاخص صمغ دانهٔ ریحان را نشان می‌دهد، در این طیف پیک‌های 3420، 2923، 1610، 1420 و 1058 بر سانتی‌متر شاخص است که به‌ترتیب به نوارهای OH از گروه کربوکسیلیک اسیدها، ارتعاش‌های کششی و خمشی $-CH_2$ و -CH، ارتعاش‌های کششی C=C، ارتعاش‌های کششی C=N و ارتعاش‌های کششی C-O-C گلیکوزیدها مربوط است (Kang *et al.*, 2011). در شکل (5-ب) طیف مربوط به لیکوپن مشاهده می‌شود که در آن پیک‌های 2924 و 2851 بر سانتی‌متر به‌ترتیب مربوط به ارتعاش‌های کششی متقارن و نامتقارن CH_2 است. پیک‌های شاخص دیگر لیکوپن در فرکانس‌های 1643، 1450، 1156، 1082، 960 و 707 بر سانتی‌متر و به‌ترتیب متعلق به ارتعاش‌های کششی C=C، ارتعاش‌های متقارن CH_2، ارتعاش‌های کششی C-C، ارتعاش‌های کششی CH-CH، گروه RCH=CH-R و خمشی CH_2 است (چهارپاشلو و همکاران، 1398). شکل (5-ج) پیک‌های شاخص پلی‌وینیل الکل را نشان می‌دهد. پیک‌های 3423، 2941، 1738، 1433، 1096 و 896 بر سانتی‌متر شاخص و به‌ترتیب به ارتعاش‌های کششی OH، ارتعاش‌های کششی CH_2، ارتعاش‌های C-H از گروه آلکیل‌ها، گروه CH_2، ارتعاش‌های C-O و ارتعاش‌های C-C مربوط است (Kurd *et al.*, 2017). شکل (5-د) نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن را نشان می‌دهد. حضور پیک‌های شاخص لیکوپن (709، 964 و 1452 بر سانتی‌متر) در نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن نشان داد که بین اجزاء موجود در ساختار نانوالیاف تعامل فیزیکی است و هیچ‌گونه تعامل شیمیایی میان ترکیبات سازندهٔ نانوالیاف وجود نداشت و لیکوپن با موفقیت بارگذاری گردید (Rezaeinia *et al.*, 2019).

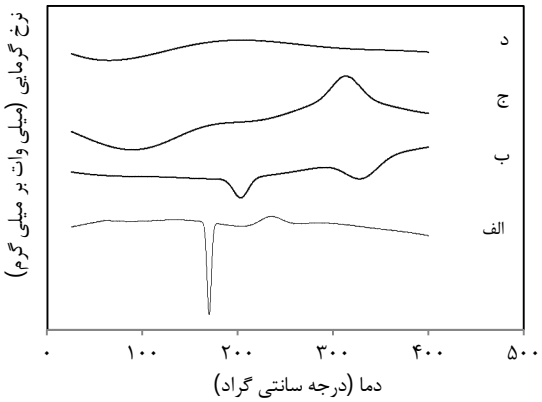


شکل 5- طیف‌های حاصل از FTIR مربوط به نمونه‌های مختلف، الف) صمغ دانهٔ ریحان، ب) لیکوپن، ج) پلی‌وینیل الکل و د) نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن

ویژگی‌های حرارتی

به‌منظور بررسی ویژگی‌های حرارتی ترکیبات تشکیل‌دهندهٔ نانوالیاف از گرماسنج روبشی افتراقی استفاده شد. ترموگرام‌های لیکوپن، پلی‌وینیل الکل، صمغ دانهٔ ریحان و نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن در شکل (6) نشان داده شده است. در ترموگرام لیکوپن در شکل (6-الف) یک پیک اندوترمیک شدید یا تیز در 173 درجهٔ سانتی‌گراد وجود داشت که به نقطهٔ ذوب لیکوپن مربوط بود. همچنین یک پیک اگزوترمیک در دمای 237 درجهٔ سانتی‌گراد وجود داشت که به دمای تجزیهٔ حرارتی لیکوپن نسبت داده شد (Pu & Tang, 2017). شکل (6-ب) ترموگرام پلی‌وینیل الکل را نشان می‌دهد که دارای یک پیک اندوترمیک در 203 درجهٔ سانتی‌گراد مربوط به دمای ذوب پلی‌وینیل الکل است. همچنین تجزیهٔ حرارتی پلیمر پلی‌وینیل الکل در 320 درجهٔ سانتی‌گراد رخ داد (Sudhamani, Prasad, & Udaya Sankar, 2003). همان‌طورکه در شکل (6-ج) مشاهده می‌شود ترموگرام صمغ دانهٔ ریحان در 85 درجهٔ سانتی‌گراد دارای پیک است. این نقطه، دمای شیشه‌ای را نشان می‌دهد. تجزیهٔ حرارتی صمغ دانهٔ ریحان نیز در محدودهٔ 330-280 درجهٔ سانتی‌گراد با قلهٔ 316 درجهٔ سانتی‌گراد رخ داد (Ige *et al.*, 2017). شکل (6-د) ترموگرام لیکوپن بارگذاری‌شده در نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل را نشان می‌دهد. در این ترموگرام پیک اندوترمیک لیکوپن در 173 درجهٔ سانتی‌گراد حذف شده است که نشان می‌دهد جزء درون‌پوشانی‌شدهٔ (لیکوپن) ساختار بلوری خود را ازدست‌داده است و در

ساختار نانوالیاف بیشتر به فرم آمورف وجود دارد (Pu & Tang, 2017).

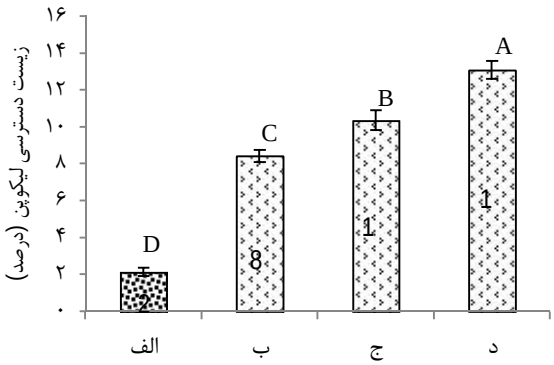


شکل 6- ترموگرام‌های مربوط به نمونه‌های مختلف

الف) لیکوپن، ب) پلی‌وینیل الکل، ج) صمغ دانهٔ ریحان و د) نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل حاوی لیکوپن

بررسی زیست‌دسترسی لیکوپن در شرایط شبیه‌سازی‌شدهٔ دستگاه گوارش

باتوجه‌به شکل (7) بیشترین میزان زیست‌دسترسی نمونه‌های نانوالیاف در رودهٔ کوچک 13/08 درصد بود که مربوط به نمونه با الیاف الکتروریسی‌شدهٔ به‌دست‌آمده از محلول لیکوپن با غلظت 0/8 درصد بود. کمترین میزان زیست‌دسترسی در نمونه‌ها در رودهٔ کوچک 8/43 درصد بود و مربوط به نمونه با الیاف الکتروریسی‌شده با غلظت 0/4 درصد لیکوپن به‌دست‌آمد. مشاهده شد که زیست‌دسترسی نمونه‌ها در رودهٔ کوچک با افزایش غلظت بارگذاری لیکوپن 0/4، 0/6 و 0/8 درصد در رودهٔ کوچک به‌طور معنی‌دار افزایش یافت ($P<0/05$). زیست‌دسترسی تمام نمونه‌ها نسبت به لیکوپن خام که برابر با 2/13 درصد بود دارای اختلاف معنی‌دار بودند ($P<0/05$). حداکثر میزان زیست‌دسترسی لیکوپن در این پژوهش 13/08 درصد به‌دست‌آمد که در مقایسه با دیگر پژوهش صورت‌گرفته توسط Salvia-Trujillo و McClements (2016) که برابر با 12/5 گزارش کرده بودند، بیشتر بود. علت بالاتربودن میزان زیست‌دسترسی لیکوپن در رودهٔ کوچک نسبت به پژوهش‌های فوق را می‌توان به‌دلیل وجود گروه‌های کربوکسیل فراوان در صمغ دانهٔ ریحان نسبت داد. در pH اسیدی معده (pH=2/5) گروه‌های کربوکسیل با تبدیل‌شدن به پروتون و ایجاد ساختاری پایدار، محیط اسیدی معده را به‌خوبی تحمل کرد و در pH=7 روده گروه‌های کربوکسیلیک به آنیون تبدیل‌شده و سبب انقباض‌های بین‌مولکولی و تضعیف ساختار نانوالیاف در رودهٔ کوچک (نقطهٔ هدف) گردید (Fahami & Fathi, 2018a). فرایند جذب لیکوپن شامل آزادشدن لیکوپن از ساختار نانوالیاف، سپس حل‌شدن در مخلوط میسل‌های درون مایع روده‌ای، جمع‌آوری مخلوط میسل‌ها توسط نمک‌های صفراوی و لیپوپروتئین‌های ترشح‌شده از بدن است. در ادامه مخلوط میسل‌ها می‌توانند لیکوپن را ازطریق لایهٔ مخاطی به سلول‌های پوششی روده انتقال دهند (McClements & Xiao, 2014). درنهایت، استفاده از نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان توانست در مقایسه با پژوهش Salvia-Trujillo و McClements (2016) که لیکوپن را در سامانهٔ امولسیونی بارگذاری‌کرده و بالاترین میزان زیست‌دسترسی لیکوپن در روده را 12/5 درصد گزارش کرده بودند، مقدار زیست‌دسترسی بالاتری (13/08 درصد) از لیکوپن را در روده نشان دهد و این نشان از توانایی این سامانه به‌عنوان حاملی نوین و کارآمد برای بارگذاری لیکوپن محسوب می‌شود.



شکل 7- زیست‌دسترسی لیکوپن در نمونه‌های مختلف

الف) لیکوپن به فرم آزاد (بدون درون‌پوشانی)، ب) نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل تحت بارگذاری 0/4 درصد لیکوپن، ج) نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل تحت بارگذاری 0/6 درصد لیکوپن و د) نانوالیاف صمغ دانهٔ ریحان/پلی‌وینیل الکل تحت بارگذاری 0/8 درصد لیکوپن

نتیجه‌گیری

باتوجه‌به نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ مادون‌قرمز مشخص شد که هیچ‌گونه تعامل شیمیایی بین لیکوپن و ترکیبات مورد استفاده در تهیهٔ نانوالیاف وجود نداشت. باتوجه‌به ترموگرام‌های گرماسنج روبشی

افتراقی مشخص گردید که لیکوپن قبل از بارگذاری در نانوالیاف دارای ساختار کریستالی و پس از بارگذاری دارای ساختار آمورف بود و با موفقیت بارگذاری گردیده است. باتوجه‌به اینکه این پژوهش با هدف افزایش زیست‌دسترسی لیکوپن در رودهٔ کوچک طراحی‌شده بود، توانست زیست‌دسترسی را تا 13/08 درصد افزایش دهد. درنهایت باتوجه‌به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان گفت که استفاده از الیاف صمغ دانهٔ ریحان پتانسیل بالایی جهت استفاده در سامانه‌های تحویل دارو و رهایش کنترل‌شده دارد.

منابع

چهارپاشلو، ا.، محبی، م.، و قرآنی، ب. (1398). الکتروریزپوشانی لیکوپن در ساختار میکروالیاف پروتئینی: بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و زیست‌دسترسی. *فناوری‌های جدید در صنعت غذا*، *6*(4)، 467-481. doi:https://doi.org/10.22104/jift.2018.2626.1623

حجتی، م.، و رضوی، س. (1390). مروری بر ویژگی‌های لیکوپن و نقش میکروارگانسیم‌ها در تولید آن. *علوم و صنایع غذایی ایران*، *8*(30)، 11-25.

Charpashlo, E., Mohebbi, M., & Ghorani, B. (2019). Electro-Encapsulation of Lycopene in Protein Microfiber Structure: Physicochemical and Bioaccessibility Characteristics. *Innovative Food Technologies, 6*(4), 467-481. doi:https://doi.org/10.22104/jift.2018.2626.1623 (in Persian)

Chastellain, M., Petri, A., & Hofmann, H. (2004). Particle size investigations of a multistep synthesis of PVA coated superparamagnetic nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science, 278*(2), 353-360. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.06.025

Dehcheshmeh, M. A., & Fathi, M. (2019). Production of core-shell nanofibers from zein and tragacanth for encapsulation of saffron extract. *Int J Biol Macromol, 122*, 272-279. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.176

Fahami, A., & Fathi, M. (2018a). Development of cress seed mucilage/PVA nanofibers as a novel carrier for vitamin A delivery. *Food Hydrocolloids, 81*, 31-38. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.008

Fahami, A., & Fathi, M. (2018b). Fabrication and characterization of novel nanofibers from cress seed mucilage for food applications. *Journal of Applied Polymer Science, 135*(6), 45811. doi:https://doi.org/10.1002/app.45811

Fish, W. W., Perkins-Veazie, P., & Collins, J. K. (2002). A Quantitative Assay for Lycopene That Utilizes Reduced Volumes of Organic Solvents. *Journal of Food Composition and Analysis, 15*(3), 309-317. doi:https://doi.org/10.1006/jfca.2002.1069

Ghorani, B., & Tucker, N. (2015). Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology. *Food Hydrocolloids, 51*, 227-240. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.05.024

Godhwani, S., Godhwani, J. L., & Was, D. S. (1988). Ocimum sanctum- A preliminary study evaluating its immunoregulatory profile in albino rats. *Journal of Ethnopharmacology, 24*(2), 193-198. doi:https://doi.org/10.1016/0378-8741(88)90151-1

Hojjati, M., & Razavi, S. H. (2011). Review on lycopene characteristics and role of microorganisms on its production. *Journal of food science and technology (Iran), 8*(30), 11-25. (in Persian)

Hosseini-Parvar, S. H., Osano, J. P., & Matia-Merino, L. (2016). Emulsifying properties of basil seed gum: Effect of pH and ionic strength. *Food Hydrocolloids, 52*, 838-847. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.09.002

Ige, P. P., Badgujar, R. R., Nerkar, P. P., Mahajan, H. S., Sonawane, R. O., & Surana, S. J. (2017). Study of physicochemical properties of flutamide-loaded Ocimum basilicum microspheres with ex vivo mucoadhesion

and in vitro drug release. *Particulate Science and Technology, 36*(5), 583-591. doi:https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1278293

Kang, J., Cui, S. W., Chen, J., Phillips, G. O., Wu, Y., & Wang, Q. (2011). New studies on gum ghatti (Anogeissus latifolia) part I. Fractionation, chemical and physical characterization of the gum. *Food Hydrocolloids, 25*(8), 1984-1990. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.12.011

Kurd, F., Fathi, M., & Shekarchizadeh, H. (2017). Basil seed mucilage as a new source for electrospinning: Production and physicochemical characterization. *Int J Biol Macromol, 95*, 689-695. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.116

Marze, S. (2015). Bioaccessibility of lipophilic micro-constituents from a lipid emulsion. *Food & Function, 6*(10), 3218-3227. doi:https://doi.org/10.1039/C5FO00441A

Mascheroni, E., Fuenmayor, C. A., Cosio, M. S., Di Silvestro, G., Piergiovanni, L., Mannino, S., & Schiraldi, A. (2013). Encapsulation of volatiles in nanofibrous polysaccharide membranes for humidity-triggered release. *Carbohydrate Polymers, 98*(1), 17-25. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.04.068

McClements, D. J. (2013). Utilizing food effects to overcome challenges in delivery of lipophilic bioactives: structural design of medical and functional foods. *Expert Opinion on Drug Delivery, 10*(12), 1621-1632. doi:https://doi.org/10.1517/17425247.2013.837448

McClements, D. J., & Xiao, H. (2014). Excipient foods: designing food matrices that improve the oral bioavailability of pharmaceuticals and nutraceuticals. *Food & Function, 5*(7), 1320-1333. doi:https://doi.org/10.1039/C4FO00100A

Pérez-Masiá, R., Lagaron, J. M., & Lopez-Rubio, A. (2014). Morphology and Stability of Edible Lycopene-Containing Micro- and Nanocapsules Produced Through Electrospraying and Spray Drying. *Food and Bioprocess Technology, 8*(2), 459-470. doi:https://doi.org/10.1007/s11947-014-1422-7

Pu, C., & Tang, W. (2017). Encapsulation of lycopene in Chlorella pyrenoidosa: Loading properties and stability improvement. *Food Chemistry, 235*, 283-289. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.069

Ramakrishna, S. (2005). *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*: World Scientific.

Reboul, E., Richelle, M., Perrot, E., Desmoulins-Malezet, C., Pirisi, V., & Borel, P. (2006). Bioaccessibility of Carotenoids and Vitamin E from Their Main Dietary Sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54*(23), 8749-8755. doi:https://doi.org/10.1021/jf061818s

Rezaei, A., Tavanai, H., & Nasirpour, A. (2016). Fabrication of electrospun almond gum/PVA nanofibers as a thermostable delivery system for vanillin. *Int J Biol Macromol, 91*, 536-543. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.06.005

Rezaeinia, H., Ghorani, B., Emadzadeh, B., & Tucker, N. (2019). Electrohydrodynamic atomization of Balangu (Lallemantia royleana) seed gum for the fast-release of Mentha longifolia L. essential oil: Characterization of nano-capsules and modeling the kinetics of release. *Food Hydrocolloids, 93*, 374-385. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.018

Salvia-Trujillo, L., & McClements, D. J. (2016). Enhancement of lycopene bioaccessibility from tomato juice using excipient emulsions: Influence of lipid droplet size. *Food Chemistry, 210*, 295-304. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.125

Santos, C., Silva, C. J., Büttel, Z., Guimarães, R., Pereira, S. B., Tamagnini, P., & Zille, A. (2014). Preparation and characterization of polysaccharides/PVA blend nanofibrous membranes by electrospinning method. *Carbohydrate Polymers, 99*, 584-592. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.008

Shi, J., & Maguer, M. L. (2000). Lycopene in Tomatoes: Chemical and Physical Properties Affected by Food Processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 40*(1), 1-42. doi:https://doi.org/10.1080/10408690091189275

Shu, B., Yu, W., Zhao, Y., & Liu, X. (2006). Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying. *Journal of Food Engineering, 76*(4), 664-669. doi:https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.062

Sudhamani, S. R., Prasad, M. S., & Udaya Sankar, K. (2003). DSC and FTIR studies on Gellan and Polyvinyl alcohol (PVA) blend films. *Food Hydrocolloids, 17*(3), 245-250. doi:https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00057-7

Tan, S. H., Inai, R., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2005). Systematic parameter study for ultra-fine fiber fabrication via electrospinning process. *Polymer, 46*(16), 6128-6134. doi:https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.05.068

Zhang, R., Zhang, Z., Zou, L., Xiao, H., Zhang, G., Decker, E. A., & McClements, D. J. (2016). Enhancement of carotenoid bioaccessibility from carrots using excipient emulsions: influence of particle size of digestible lipid droplets. *Food & Function, 7*(1), 93-103. doi:https://doi.org/10.1039/C5FO01172H

Encapsulation of Lycopene by Using Basil Seed Gum/Polyvinyl Alcohol Nanofibers

Meysam Komijani[1], Mohebbat Mohebbi[2*], Behrouz Ghorani[3]

1- MSc. Graduate, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* Corresponding author (m-mohebbi@um.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

Abstract

In this study, nanofibers of basil seed gum (BSG) were prepared by electrospinning method. To reduce repelling interaction and helping the process of electrospinning, aiding agents such as polyvinyl alcohol (PVA) can be used. PVA (10% w/v) and BSG (1% w/v) with different volume ratios of 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 and 90:10 were prepared. According to the SEM images, it was found that a volume ratio of 70:30 from PVA/BSG solution produced the best nanofibers to trap lycopene. The Encapsulation efficiency was in the range of 80.04-91.67%. The effect of lycopene concentration (0.4, 0.6 and 0.8% w/w) on the encapsulation efficiency was investigated. The results showed that the effect of lycopene concentration on encapsulation efficiency was statistically significant ($P<0.05$). The physical and chemical properties of the BSG/PVA nanofiber containing lycopene were studied with DSC test. The results of the DSC test showed that lycopene lost its crystalline structure and was present in the nanofiber mainly in amorphous form and produced a homogeneous composition. The FTIR analysis showed that there was only physical interaction between the components and no chemical interaction occurred. Generally, the results showed that the system used (BSG/PVA nanofiber) has a high potential for utilization as an appropriate delivery system for increasing bioaccessibility in bioactive compounds.

Keywords: Basil seed mucilage, Bioaccessibility, Electrospinning, Lycopene, Nanofibers