مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال هجدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحات ۷۹-۶۵

تولید الیاف پروتئین-پلی‌ساکارید حاوی اسید چرب امگا-۳ به روش الکتروریسی و تعیین شرایط بهینه فرایند با استفاده از روش سطح پاسخ

بهناز بنایی‌فر[۱]، هاجر عباسی[۲]

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- نویسنده مسئول: گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. پست الکترونیکی: H.abbasi@Khuisf.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۲۳

چکیده

سابقه و هدف: اسیدهای چرب امگا-۳ اهمیت بسیاری درتغذیه انسان در رابطه با پیشگیری از بیماری‌ها دارند. این پژوهش با هدف پایدارنمودن اسیدهای چرب غیراشباع در الیاف پروتئین-پلی‌ساکارید انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، تأثیر غلظت‌های مختلف کنسانتره پروتئین آب پنیر (۵، ۶/۶۷، ۱۰، ۱۳/۳۳، ۱۵٪) و صمغ گوار (۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵۵، ۰/۸۵، ۱٪) بر ویژگی‌های کیفی امولسیون و الیاف الکتروریسی حاوی روغن ماهی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: با افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و گوار تا محدوده متوسط، راندمان ریزپوشانی و بارگیری الیاف افزایش یافت. همچنین غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و گوار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پروفایل اسیدهای چرب روغن موجود درالیاف داشت. کاهش اندازه ذرات امولسیون در غلظت‌های پایین گوار مشاهده شد و غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و گوار نیز تأثیر چشمگیری بر تغییرات ویسکوزیته امولسیون نشان داد. بررسی پروفایل اسیدهای چرب تحت شرایط حرارت‌دهی، نشان دهنده پایداری حرارتی و حفظ بهتر اسیدهای چرب غیراشباع موجود در الیاف نسبت به نمونه شاهد بود. نتایج FTIR بیانگر عدم برقراری پیوندشیمیایی میان پروتئین-پلی‌ساکارید و اسیدهای چرب و ریزپوشانی موفقیت‌آمیز آنها بود. بررسی مورفولوژی، تشکیل الیاف رشته‌ای نسبتاً یکنواخت را تأیید نمود.

نتیجه‌گیری: با هدف دستیابی به ماکزیمم راندمان ریزپوشانی و بارگیری و بالاترین محتوی کل اسیدهای چرب چندغیراشباعی، غلظت ۱۰/۶۲٪ کنسانتره پروتئین آب پنیر و ۰/۴۵٪ صمغ گوار معرفی می‌گردد. فرایند الکتروریسی با ریزپوشانی مؤثر اسیدهای چرب امگا-۳ درون الیاف کنسانتره پروتئین آب پنیر و گوار، پایداری اسیدهای چرب حساس به اکسایش را افزایش می‌دهد. لذا، از این الیاف می‌توان به عنوان حامل اسیدهای چرب امگا-۳ در غنی‌سازی محصولات غذایی استفاده نمود.

واژگان کلیدی: الکتروریسی، الیاف، اسیدهای چرب امگا-۳، کنسانتره پروتئین آب پنیر، صمغ گوار

• مقدمه

در سال‌های اخیر، توجه به مقدار مصرف روزانه اسیدهای چرب امگا-۳ در رژیم غذایی افزایش یافته است. جامعه بین‌المللی در زمینه مطالعه اسیدهای چرب، مصرف ۵۰۰ میلی‌گرم در روز ایکوزاپنتانوئیک اسید (EPA) و دوکوزاهگزانوئیک اسید (DHA) را پیشنهاد می‌کند (۱). این اسیدهای چرب در رژیم غذایی روزانه کمتر از میزان توصیه شده می‌باشند و همین امر موجب شده است تا تولیدکنندگان مواد غذایی در بسیاری از کشورها به سوی تولید غذاهای فراسودمند و عملگرا حاوی این ترکیبات گام بردارند (۲). فواید سلامتی‌بخش حاصل از مصرف EPA و DHA موجود در روغن ماهی شناخته شده است و به عنوان منبعی برای غنی‌سازی مواد غذایی و مکمل‌های تغذیه‌ای جهت حفظ عملکرد طبیعی مغز، کاهش احتمال ابتلا به سرطان و بیماری‌های قلبی و عروقی شناخته می‌شوند (۳). مهم‌ترین و اصلی‌ترین چالش تکنیکی در جهت افزودن مقادیر مؤثر EPA و DHA به مواد غذایی، اکسیداسیون و ایجاد عطر و بوی نامطبوع ناشی از تجزیه لیپیدها است که سبب کاهش و از بین رفتن کیفیت محصولات خوراکی می‌گردد. استفاده از نانوحامل‌ها برای انتقال و حفاظت از مواد غذایی محلول در چربی و یا به عبارتی ریزپوشانی این ترکیبات، راهکاری مناسب برای غلبه بر این مشکلات است (۱). ریزپوشانی فرایندی است که در آن از انواع ترکیبات طبیعی و یا سنتتیک به عنوان حامل‌هایی با اندازه ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر به منظور

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

غنی‌سازی مواد غذایی و انتقال ترکیبات زیست‌فعال (اسیدهای چرب ضروری، آنتی‌اکسیدان‌ها، کاروتنوئیدها و غیره) به بخش‌های هدف، مورد استفاده قرار می‌گیرد (۴). روش‌های مختلفی در تولید میکرو و نانو کپسول، از جمله خشک کردن پاششی، خشک کردن انجمادی، اکستروژن (*Extrusion*)، پوشش‌دهی بستر سیال، امولسیون‌سازی، کوآسرواسیون (Coacervation) و نانوترسیب برای حفاظت ترکیبات فعال وجود دارند که هر یک از آنها دارای محاسن و معایبی هستند، و یا برخی از این روش‌ها برپایه حرارت‌دهی بوده و منجر به تخریب ترکیبات زیست فعال حساس ریزپوشانی شده می‌شوند (۴).

الکتروریسی (Electrospinning) فرایندی ساده برای ایجاد نانوالیاف به شکل شبکه‌ای یکنواخت و بدون در هم تنیدگی است. الیاف الکتروریسی شده می‌توانند به عنوان حامل‌هایی برای ریزپوشانی ترکیبات فعال حساس عمل کنند. فرایند الکتروریسی شامل کشش یک سیال، به‌صورت پلیمر، مذاب و یا محلول پلیمری، تحت تأثیر یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا است. از مزایای این روش می‌توان به ریزپوشانی باکارایی بالا، رهایی پایدار مواد ریزپوشانی شده و در نتیجه افزایش زمان نگهداری، حفاظت مواد فعال زیستی از تخریب شیمیایی، تک مرحله‌ای بودن فرایند، سادگی، مقرون به صرفه بودن و قابلیت انجام فرایند در دما و فشار محیط و به عبارتی سرد بودن فرایند (Cold Processing) اشاره نمود. برخی از کاربردهای الکتروریسی در صنایع غذایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله آن می‌توان به حامل‌های مواد مغذی و سایر ترکیبات فعال مانند اسانس‌ها و طعم دهنده‌ها جهت بسته‌بندی مواد غذایی و همچنین طراحی سنسورهای حساس به دما و pH اشاره کرد (۵). Kayaci و Uyar (۲۰۱۲) الیاف پلی‌وینیل الکل را تولید و وانیلین را در آن بارگذاری کردند. نتایج آنها حاکی از افزایش پایداری حرارتی، رهایش پیوسته و آرام وانیلین و افزایش عمر نگهداری آن بود. همچنین مورفولوژی الیاف تولید شده توسط پلیمر پلی‌وینیل‌الکل ساختار شبکه‌ای از الیاف میله‌ای فاقد گویچه را نشان داد (۶). در تحقیقی دیگر از پروتئین زئین برای ریزپوشانی گالیک اسید استفاده شد، که نتایج حاکی از افزایش پایداری فیزیکی و حرارتی گالیک اسید بود. به علاوه هیچ نوع واکنشی بین زئین و گالیک اسید رخ نداده بود و پروتئین زئین قابلیت بالایی برای تولید نانوالیاف یکنواخت با شکل یکسان و بدون گره داشت (۷). Garcia-Moreno و همکاران (۲۰۱۶) با تولید نانوالیاف پلی وینیل الکل حاوی روغن ماهی توسط الکتروریسی بیان داشتند که غلظت پلی وینیل الکل تأثیر چشمگیری بر روی مورفولوژی نانوفیبریل‌ها داشته است، و بالاترین راندمان کپسولاسیون امگا-۳ زمانی به‌دست آمد که از محلول حاوی ۱۰/۵٪ وزنی/وزنی پلی وینیل الکل استفاده شده است. به علاوه افزودن ایزوله پروتئین آب پنیر در محلول پلی وینیل الکل به عنوان امولسیفایر باعث افزایش ظرفیت بارگیری اسیدهای چرب امگا-۳ می‌شود (۸).

در ریزپوشانی ترکیبات غذایی از طیف وسیعی از پلیمرهای طبیعی و سنتزی استفاده می‌شود، اما تحقیقات نشان داده است که کمپلکس‌های بیوپلیمری بهتر می‌توانند از ترکیبات حساس در برابر عوامل نامساعد محیطی محافظت کنند. در این خصوص تحقیقات انجام شده توسط Bedie و همکاران (۲۰۰۸) نشان داد که استفاده از ترکیب بیوپلیمرهای پکتین و ایزوله پروتئین آب پنیر بر پایداری و کاهش تخریب تیامین و اندازه ذرات ریزکپسول نهایی مؤثرتر از اثر مستقل هر یک از بیوپلیمرها است (۹). در تحقیقی دیگر، Zimet و همکاران (۲۰۰۹) گزارش نمودند که امگا-۳ ریزپوشانی شده در کمپلکس پکتین-بتالاکتوگلوبولین نسبت به امگا-۳ ریزپوشانی شده در یک لایه بتالاکتوگلوبولین به میزان کمتری تحت تأثیر عوامل مخرب محیطی قرار می‌گیرد (۱۰). بر اساس مطالعه صورت گرفته توسط Duan و همکاران (۲۰۱۱)، از فیلم‌های کامپوزیتی کیتوزان- ایزوله پروتئین آب پنیر برای ریزپوشانی و بهبود پایداری اکسیداتیو روغن ماهی حاوی ۹۳/۷٪ ایکوزاپنتانوئیک اسید استفاده کردند (۱۱).

پروتئین‌های غذایی مانند کازئینات سدیم و پروتئین آب پنیر و ایزوله پروتئین سویا به عنوان ترکیبات دیواره در ریزپوشانی به‌کار می‌روند. پروتئین‌های آب پنیر به عنوان محصول فرعی صنعت پنیرسازی به‌طور وسیعی در صنعت غذا به‌کار گرفته می‌شوند. بتالاکتوگلوبولین، سرم آلبومین گاوی و ایمینوگلوبولین‌ها از اجزای اصلی پروتئین‌های آب پنیر هستند. داشتن گروه‌های عاملی مختلف، خصوصیات دوگانه دوستی، توانایی خود تجمعی و خود ساختارسازی و برهم‌کنش با ترکیبات متفاوت، وزن مولکولی بالا و انعطاف پذیری زنجیره مولکولی پروتئین‌ها سبب شده است تا خصوصیات عملکردی مناسبی همچون حلالیت، گرانروی، امولسیون‌کنندگی و تشکیل لایه را پیدا کنند و از همین روی در فرایند ریزپوشانی مورد توجه قرار گرفته‌اند. پروتئین‌های آب پنیر از خصوصیات عملکردی منحصر به فردی برخوردار هستند. این ویژگی‌ها موجب شده که آنها به عنوان یک ترکیب مناسب برای دیواره کپسول‌ها در نظر گرفته شوند (۱۲).

صمغ گوار یک گالاکتومانان به‌دست آمده از اندوسپرم دانه‌های گوار (*Cyamoposis tetragonolobus*)، پلی‌ساکاریدی است که در دیواره کپسول‌ها در فرایند ریزپوشانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویسکوزیته بالا و عدم داشتن فعالیت امولسیفیه‌کنندگی از محدودیت‌های اصلی برای استفاده از گوار به عنوان یک ماده دیواره برای ریزپوشانی محسوب می‌شود. این

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]
[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

در حالی است که می‌توان از مشتقات هیدرولیز شده صمغ گوار و یا ترکیب آن با سایر بیوپلیمرها به عنوان ماده دیواره در فرایند ریزپوشانی استفاده کرد (۱۳). سهولت استفاده از صمغ گوار در صنایع مختلف به دلیل پخش و هیدراته شدن سریع آن در آب‌های سرد و گرم، رسیدن به غلظت‌های مناسب بدون نیاز به حرارت، ایجاد لایه فیلم مانند و مقاوم در برابر روغن‌ها و حلال‌ها و افزایش قدرت جذب آب در محصولات از مزایای مهم این صمغ می‌باشند (۱۴).

هدف از این پژوهش، بررسی امکان تولید الیاف حامل اسیدهای چرب امگا-۳ با استفاده از کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار به روش الکتروریسی و همچنین بهینه‌یابی متغیرهای مورد بررسی در محدوده ۱۵-۵ درصد غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و ۱-۰/۱ درصد صمغ گوار برای دستیابی به تولید الیافی با حداکثر راندمان ریزپوشانی، ماکزیمم میزان اسیدهای چرب غیراشباع و چند غیراشباعی و حداقل میزان اسیدهای چرب اشباع است.

• مواد و روش‌ها

مواد مورد نیاز

روغن ماهی از شرکت نوش دارو دریا مازندران خریداری گردید. کنسانتره پروتئین آب پنیر (CAS no: 91082-88-1) از شرکت Parchem آمریکا تهیه شد. صمغ گوار و دیگر مواد مصرفی در این تحقیق، دارای خلوص آزمایشگاهی بوده و از شرکت مرک (Merck) آلمان فراهم گردیدند.

آماده‌سازی محلول‌های پلیمری

محلول‌های پلیمری، از طریق حل کردن غلظت‌های مختلف کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار (جدول ۱)، در آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد توسط همزن مغناطیسی با سرعت ۷۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه تهیه گردید. محلول حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد تا حباب‌های موجود در آن خارج و پیوندهای بین مولکولی در محلول پروتئینی تشکیل شود و محلولی یکنواخت و شفاف به دست آید (۱۵). متغیرهای مستقل این پژوهش شامل غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر (۵-۱۵٪) و صمغ گوار (۱-۰/۱٪) درنظر گرفته شدند. برای ارزیابی تأثیر متغیرها و به دست آوردن نقطه‌ی بهینه، ۱۳ ترکیب مختلف از متغیرهای مستقل توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت (Design Expert) نسخه ۱۱ در قالب طرح مرکب مرکزی (Central Composite Designs) با ۵ تکرار در نقطه مرکزی ایجاد گردید. جهت دستیابی به تولید الیاف حامل اسیدهای چرب امگا-۳ با حداکثر راندمان ریزپوشانی، ماکزیمم میزان اسیدهای چرب غیرا شباع و چند غیرا شباعی و حداقل میزان اسیدهای چرب اشباع، فرایند بهینه‌یابی انجام گرفت. سطوح متغیرهای مستقل و مقادیر متغیرهای وابسته اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آورده شده است.

تهیه امولسیون روغن ماهی

برای تهیه امولسیون، روغن ماهی به میزان ۷/۵ درصد وزنی/وزنی به تدریج و در حال همزدن به فاز آبی (محلول پلیمری) اضافه گردید. سپس سوسپانسیون توسط همزن مغناطیسی مدل MR Hei-standard (ساخت شرکت Heldolph، کشور آلمان) با سرعت ۱۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه همگن شد. پس از این مرحله جهت همگن کردن بیشتر، امولسیون به دستگاه اولتراسونیک هموژنایزر مدل Up200H (شرکت Heilscher، کشور آلمان) با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و شدت ۸۵۰ وات به مدت ۳ دقیقه منتقل گردید و بدین‌ترتیب نانوامولسیون مورد نظر تهیه شد (۸).

اندازه‌گیری ویسکوزیته محلول‌های پلیمری

برای اندازه‌گیری ویسکوزیته نمونه‌های امولسیون از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد مدل Brookfield RVDVIII Ultra (ساخت شرکت بروکفیلد، کشور آمریکا) استفاده گردید. اندازه‌گیری در دمای اتاق و با استفاده از اسپیندل SC4-31در محدوده سرعت برش S^{-1} ۱۵۰-۱ انجام شد (۱۶).

اندازه‌گیری اندازه ذرات محلول‌های پلیمری

اندازه ذرات محلول‌های حاصل در دستگاه آنالیز کننده اندازه ذرات (Malvern, zetasizer nano، ساخت کشور انگلستان) بر اساس روش تفرق نور لیزر انجام شد. متوسط اندازه ذرات بر اساس میانگین قطر حجمی آنها تعیین شد. میانگین قطر حجمی (De Broukere Mean Diameter) ۹۰٪ (D 90%)، قطری است که حجم ذرات کوچک‌تر از آن، ۹۰٪ حجم کل ذرات موجود در سیستم را تشکیل می‌دهد (۱۷).

الکتروریسی محلول

برای تولید الیاف از دستگاه الکتروریسی اتوماتیک مدل RN/K (شرکت نانوفناوری ساختار آسیا، کشور ایران) استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا ۳۵-۰کیلو ولت با دقت ۰/۵۰± کیلو ولت است. محلول پلیمری درون یک سرنگ با حجم ۱۰ میلی‌لیتر قرار گرفت و از طریق یک لوله باریک توسط یک پمپ دارای کنترل دیجیتالی به سوزن منتقل شد. الکتروریسی محلول پلیمری حاوی اسید چرب امگا-۳ با نرخ جریان ۰/۵ میلی‌لیتر در ساعت، فاصله نوک سوزن تا صفحه جمع‌کننده ۱۵۰ میلی‌متر و اعمال ولتاژ ۲۵ کیلو ولت صورت گرفت. در نهایت الیاف روی صفحه جمع کننده به ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر مربع تشکیل شدند (۱۸).

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

جدول ۱. نمایش متغیرهای مستقل در تیمارهای مختلف و مقادیر متغیرهای وابسته آنها

تیمار	کنسانتره پروتئین آب پنیر (درصد)	صمغ گوار (درصد)	راندمان ریزپوشانی (درصد)	ظرفیت بارگیری (درصد)	ویسکوزیته (سنتی پوآز)	اندازه ذرات (نانومتر)	مجموع اسیدهای چرب اشباع (درصد)	مجموع اسیدهای چرب غیراشباع (درصد)	مجموع اسیدهای چرب چند غیراشباعی (درصد)
۱	۶/۶۷	۰/۲۵	۸۱/۰۰	۵۵/۰۰	۵۸/۰۰	۷/۰۷	۳۶/۵۰	۶۳/۵۰	۳۰/۲۵
۲	۱۳/۳۳	۰/۲۵	۹۰/۰۰	۸۰/۰۰	۴۹/۶۰	۴/۵۰	۳۶/۲۴	۶۳/۷۶	۲۳/۰۰
۳	۶/۶۷	۰/۸۵	۷۰/۰۰	۵۰/۰۰	۵۵/۰۰	۴/۰۰	۳۶/۰۶	۶۳/۹۴	۲۳/۲۰
۴	۱۳/۳۳	۰/۸۵	۶۹/۰۰	۵۰/۰۰	۴۴/۰۰	۶/۸۳	۳۳/۶۹	۶۶/۳۱	۲۴/۱۰
۵	۵	۰/۵۵	۷۳/۰۰	۵۶/۲۹	۵۳/۰۰	۷/۰۰	۳۶/۸۵	۶۲/۹۷	۲۷/۱۰
۶	۱۵	۰/۵۵	۸۱/۵۰	۷۵/۰۰	۴۶/۴۱	۶/۰۰	۳۶/۰۰	۶۴/۰۰	۲۵/۳۰
۷	۱۰	۰/۱۰	۸۳/۰۰	۷۲/۰۰	۵۱/۲۰	۶/۰۰	۳۵/۳۰	۶۴/۷۰	۲۶/۱۰
۸	۱۰	۱/۰۰	۶۷/۹۴	۴۶/۴۳	۵۲/۰۰	۴/۵۰	۳۳/۳۷	۶۶/۶۳	۲۰/۴۵
۹	۱۰	۰/۵۵	۸۷/۰۰	۷۶/۰۰	۵۲/۶۰	۴/۵۰	۳۳/۹۵	۶۶/۰۵	۲۸/۱۰
۱۰	۱۰	۰/۵۵	۸۵/۰۰	۷۲/۰۰	۵۱/۰۰	۴/۵۰	۳۳/۷۹	۶۶/۲۱	۲۹/۰۱
۱۱	۱۰	۰/۵۵	۸۳/۰۰	۷۳/۹۴	۵۰/۷۵	۴/۵۰	۳۳/۵۶	۶۶/۴۴	۲۷/۸۹
۱۲	۱۰	۰/۵۵	۸۴/۰۰	۷۰/۰۰	۴۸/۰۰	۴/۵۰	۳۳/۳۶	۶۶/۶۴	۲۹/۵۰
۱۳	۱۰	۰/۵۵	۸۵/۱۲	۷۵/۴۰	۵۰/۳۰	۴/۹۰	۳۳/۰۴	۶۶/۹۶	۳۰/۱۲

تعیین راندمان ریزپوشانی و بارگیری الیاف حاوی اسید چرب امگا- ۳

به منظور بررسی درصد امگا-۳ کپسوله شده در کپسول‌های کنسانتره پروتئین آب پنیر- گوار، ابتدا ۰/۲۵ گرم از الیاف حاوی اسید چرب امگا-۳ با ۱۰ میلی‌لیتر حلال هگزان به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط گردید. سپس مخلوط حاصل با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. فاز رویی (حاوی اسید چرب امگا-۳ در هگزان) و جذب آن با ا ستفاده از د ستگاه ا سپکتروفتومتر در طول موج ۲۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. محتوی روغن موجود در فاز محلول با استفاده از منحنی کالیبرا سیون حا صل شده از انحلال مقادیر متفاوت روغن در حلال و بررسی شدت جذب آنها به دست آمد. راندمان ریزپو شانی و بارگیری ا سید چرب امگا- ۳ به‌ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه گردید (۱۹).

رابطه (۱)

$$\text{راندمان ریزپوشانی (٪)} = \frac{A-B}{A} * 100$$

رابطه (۲)

$$\text{راندمان بارگیری (٪)} = \frac{A-B}{C} * 100$$

A: مقدار کل روغن موجود در الیاف، B: محتوی روغن آزاد الیاف، C: وزن الیاف

تعیین پروفایل ا سیدهای چرب الیاف حاوی ا سید چرب امگا-۳

پروفایل اسیدهای چرب ریزپوشانی شده در الیاف با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) تعیین گردید. برای استریفیکاسیون اسیدهای چرب، نمونه‌ها در حلال هگزان با هیدروکسید پتاسیم متانولی مخلوط و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. شناسایی و جداسازی متیل استرهای اسید چرب توسط دستگاه کروماتوگرافی گازی مجهز به ستون CP-FL 88 (۰/۲۵ میکرومتر× ۰/۲۵ میلی‌متر ×۶۰ متر) انجام گرفت. از هلیوم با فشار ۲۵ بار و درجه خلوص ۹۹/۹ درصد به عنوان گاز حامل استفاده شد. پس از تزریق نمونه به دستگاه کروماتوگرافی گازی، منحنی رسم شده و زمان بازداری مربوط به هر اسید چرب با منحنی مربوط به اسید چرب استاندارد و زمان بازداری آن مقایسه و بدین‌ترتیب نوع و میزان اسیدهای چرب موجود در نمونه مورد آزمایش، م شخص گردید (۲۰). بر ا ساس نتایج حاصل از ارزیابی پروفایل اسیدهای چرب، مجموع اسیدهای چرب اشباع، غیراشباع و چند غیراشباعی تعیین گردید.

بررسی خصوصیات الیاف الکتروریسی شده

پس از مدل‌سازی و بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر تغییرات متغیرهای وابسته، سطوح مناسب متغیرهای مستقل تعیین و الیاف الکتروریسی شده با استفاده از سطوح مناسب متغیرها تهیه گردید. الیاف الکتروریسی تولید شده از نظر ویژگی‌های مورد مطالعه از جمله راندمان ریزپوشانی، راندمان بارگیری، مجموع اسیدهای چرب اشباع، مجموع اسیدهای چرب غیراشباع، مجموع اسیدهای چرب چند غیراشباعی پس از حرارت‌دهی در دمای ۱۵۰ و ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه، ریزساختار الیاف و طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز مورد ارزیابی قرار گرفتند.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

آنالیز FTIR به منظور بررسی ساختار شیمیایی و برهم‌کنش‌های بین بیوپلیمرها و اسیدهای چرب امگا-۳ صورت گرفت. این آزمون با استفاده از طیف‌سنجی انتقال فوریه مادون قرمز Thermo Nicolet(Avatar 370FT-IR، ساخت کشور آمریکا)، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، در محدوده عدد موجی ۴۰۰۰-۴۰۰ بر سانتی‌متر انجام شد (۲۱).

بررسی ساختار و مورفولوژی الیاف

مورفولوژی الیاف الکتروریسی شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (Hitachi S-4100، ساخت کشور ژاپن) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها توسط دستگاه پوشش دهنده با یک لایه نازک از جنس طلا پوشیده شدند و تصویربرداری در ولتاژ ۲۰ کیلو ولت و بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ انجام شد (۱۲).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر متغیرهای مستقل شامل غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر (A) و غلظت صمغ گوار (B) بر متغیرهای وابسته (راندمان ریزپوشانی، راندمان بارگیری، ویسکوزیته، اندازه ذرات، مجموع اسیدهای چرب اشباع، غیر اشباع و چند غیر اشباعی) از نرم افزار دیزاین اکسپرت ورژن ۹ و روش سطح پاسخ RSM (Response Surface Methodology) در قالب طرح مرکب مرکزی با ۵ تکرار در نقطه مرکزی استفاده شد. کلیه بررسی‌های آماری و معنی‌داری و یا غیر معنی‌داری داده ها در سطح اطمینان (Confidence level) ۹۵ درصد انجام گردید. جست و جوی شرایط عملیاتی بهینه جهت دستیابی به پاسخ‌های مطلوب مورد نظر با استفاده از تکنیک بهینه سازی عددی انجام گرفت. در روش RSM پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط نرم افزار، برای هر متغیر وابسته مدلی با انحراف استاندارد SD (Standard Deviation) و مجموع مربعات باقی مانده برآورد شده PRESS (Rresidual Sum of Squares) اندک و ضریب تبیین R^2 (Coefficient of Determination) بالا تعریف می‌گردد و آثار اصلی و متقابل متغیرها بر فاکتور مربوطه را بیان می‌کند. همانطور که در رابطه (۳) مشاهده می‌شود، برای پاسخ پیش‌بینی شده Y،ضریب ثابت β_0، اثرات خطی β_a،β_b،β_c، اثرات مجذور β_{aa}، β_{bb}، β_{cc}و اثرات متقابل β_{ab}، β_{ac}،β_{bc}تعریف می‌شوند.

رابطه (۳)

$$Y=\beta_0+\beta_aA+\beta_bB+\beta_cC+\beta_{aa}A^2+\beta_{bb}B^2+\beta_{cc}C^2+\beta_{ab}AB+\beta_{ac}AC+\beta_{bc}BC$$

• یافته‌ها

به منظور به دست آوردن مدل تجربی برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته (اندازه ذرات و ویسکوزیته امولسیون، راندمان ریزپوشانی، راندمان بارگیری، مجموع اسیدهای چرب اشباع، غیر اشباع و چند غیر اشباعی)، ابتدا رابطه‌های چند جمله‌ای‌خطی، دو فاکتوریلی (تعاملی)، درجه دو و درجه سه بر داده‌های به‌دست آمده از این پاسخ برازش داده شدند و سپس این مدل‌ها مورد آنالیز آماری قرار گرفتند. از نظر آماری مدلی مناسب است که آزمون عدم برازش آن معنی‌دار نبوده و دارای بالاترین ضریب تبیین و ضریب تبیین اصلاح شده باشد. نتایج نشان داد مدل درجه دو برای پیش‌بینی تغییرات اندازه ذرات، ویسکوزیته، راندمان ریزپوشانی، راندمان بارگیری و مجموع اسیدهای چرب اشباع، غیر اشباع و چند غیر اشباعی در اثر تغییر کمیت متغیرهای مورد بررسی (غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار) مناسب است. نتایج تجزیه واریانس متغیرهای وابسته در جدول (۲) آورده شده‌اند.

تغییرات ویسکوزیته محلول پلیمری

نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر تا محدوده متوسط غلظت‌های مورد بررسی موجب افزایش ویسکوزیته محلول شد. اثر متقابل غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار بر تغییرات ویسکوزیته نیز نشان دهنده افزایش ویسکوزیته امولسیون با افزایش غلظت پروتئین تا ۱۰٪ و افزایش غلظت صمغ گوار تا ۷/۵٪ بود (شکل (۱- الف)).

تغییرات اندازه ذرات محلول پلیمری

در این تحقیق، بررسی تغییرات اندازه ذرات امولسیون بر مبنای اندازه ذرات با در نظر گرفتن ۹۰٪ ذرات موجود انجام گرفت. نتایج حاصل از جدول ۲ نشان می‌دهد که مدل درجه دوم به‌دست آمده از تغییرات اندازه ذرات در تیمارهای مختلف معنی‌دار است ($P<۰/۰۰۰۱$). نتایج حاصل از جدول ۳ نشان می‌دهد که در سطوح پایین مصرف صمغ گوار، اندازه ذرات امولسیون (D90%) کاهش یافت، درحالی که استفاده از غلظت‌های بالاتر کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار سبب افزایش اندازه ذرات امولسیون گردید. بررسی اثر متقابل متغیرهای مورد بررسی بر تغییرات اندازه ذرات نیز نشان می‌دهد که تأثیر توأم متغیرهای مستقل تا سطوح متوسط هر دو متغیر سبب کاهش اندازه ذرات امولسیون و استفاده از غلظت‌های بالاتر، افزایش اندازه ذرات را به‌همراه دارد (شکل ۱- ب).

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

جدول ۲. تجزیه واریانس اثرات درصد کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار بر ویژگی‌های امولسیون و الیاف الکتروریسی شده

منبع تغییرات	ویژگی‌های امولسیون و الیاف الکتروریسی شده															
	ویسکوزیته (سنتی پویز)		اندازه ذرات (نانومتر)		راندمان ریزپوشانی (درصد)		راندمان بارگیری (درصد)		مجموع اسیدهای چرب اشباع (درصد)		مجموع اسیدهای چرب غیر اشباع (درصد)		مجموع اسیدهای چرب چند غیر اشباعی (درصد)	
	درجه آزادی	مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات
مدل	۵	۸۱/۳۵***	۵	۱۴/۳۲***	۵	۶۲۳/۶۷***	۵	۱۶۴۵/۸***	۵	۱۳/۱۰**	۵	۲۳/۸۱**	۵	۱۰۸/۴۹***
A	۱	۴۲/۷۴***	۱	۰/۱۸ns	۱	۵۰/۶۵*	۱	۳۳۱/۲۸**	۱	۰/۱۶ns	۱	۲/۰۵**	۱	۹/۶۴*
B	۱	۰/۰۱۶ns	۱	۱/۰۵*	۱	۳۵۰/۶۰***	۱	۶۳۳/۰۵***	۱	۲/۲۴*	۱	۴/۰۷***	۱	۲۴/۴۸**
AB	۱	۱۷/۲۷*	۱	۷/۲۹***	۱	۲۵/۰۰*	۱	۱۵۶/۲۵***	۱	۹/۰۰***	۱	۱/۱۱**	۱	۱۶/۶۱**
A^2	-	-	۱	۵/۶۷***	۱	۹۱/۶۹**	۱	۱۶۳/۷۶**	-	-	۱	۱۶/۳۰**	۱	۱۲/۴۰**
B^2	-	-	۱	۰/۶۱*	۱	۱۴۰/۴۸***	۱	۴۴۱/۹۲***	۱	۱/۵۱*	۱	۱/۵۶*	۱	۵۲/۷۶***
باقی مانده	۸	۱۸/۳۱	۷	۰/۷۱	۷	۲۹/۲۲	۷	۷۸/۱۵	۷	۱/۶۳	۷	۱/۱۱	۷	۵/۹۲
عدم برازش	۴	۷/۳۰ns	۳	۰/۵۸ns	۳	۲۰/۳۶ns	۳	۵۳/۶۱ns	۳	۰/۸۰ns	۳	۰/۶۰ns	۳	۲/۴۱ns
خطای کل	۴	۱۱/۰۱	۵	۰/۱۳	۴	۸/۸۶	۴	۲۴/۵۵	۴	۰/۸۳	۴	۰/۵۱	۴	۳/۵۲
کل	۱۱	۹۹/۶۶	۱۲	۱۵/۰۳	۱۲	۶۵۲/۸۹	۱۲	۱۷۲۳/۹۶	۱۲	۱۴/۷۳	۱۲	۲۴/۹۲	۱۲	۱۱۴/۴۱
R^2		۰/۸۱		۰/۹۱		۰/۹۵		۰/۹۵		۰/۸۸		۰/۹۵		۰/۹۴

خطوط تیره در جدول نشان دهنده‌ی بی تأثیر بودن متغیر مربوطه در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده است، ***: اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱ درصد، **: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد، *: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns: عدم وجود اختلاف معنی‌دار؛ A: کنسانتره پروتئین آب پنیر (٪)، B: صمغ گوار (٪)

جدول ۳. ضرایب مدل‌های برازش یافته برای ویژگی‌های مورد مطالعه

ضرایب	صفات مورد مطالعه						
	ویسکوزیته (سنتی پویز)	اندازه ذرات (نانومتر)	راندمان ریزپوشانی (درصد)	راندمان بارگیری (درصد)	مجموع اسیدهای چرب اشباع (درصد)	مجموع اسیدهای چرب غیر اشباع (درصد)	مجموع اسیدهای چرب چند غیر اشباعی (درصد)
β0	+۴۳/۴۷***	+۲۱/۴۴***	+۳۱/۷۵***	-۲۸/۶۲***	+۵۰/۰۹**	+۵۲/۵۲***	+۲۶/۹۴***
β1	+۰/۶۷***	-۲/۲۸ns	+۸/۱۰*	+۱۳/۳۱*	-۰/۸۷ns	+۲/۳۸**	+۰/۷۶*
β2	+۲۶/۲۰ns	-۱۸/۰۰*	+۵۳/۹۲***	+۱۲۳/۰۰*	-۱۸/۶۳*	+۲/۳۳**	+۴/۸۱**
β12	-۲/۶۰*	+۱/۳۵***	-۲/۵۰*	-۶/۲۵*	+۱/۵۰***	+۰/۵۳*	+۲/۰۴**
β11	-	+۰/۰۷***	-۰/۳۰**	-۰/۴۰***	-	-۰/۱۳**	-۰/۱۱**
β22	-	+۳/۰۲*	-۴۵/۷۵***	-۸۱/۱۵***	+۴/۸۵*	-۴/۸۲*	-۲۸/۰۴***
Lack of Fit	۰/۶۴	۰/۰۵۵۹۶۸	۰/۱۵۳۸	۰/۱۶۴۳	۰/۳۹۲۷	۰/۳۳۰۸	۰/۵۱۰۵
R^2	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۹۴

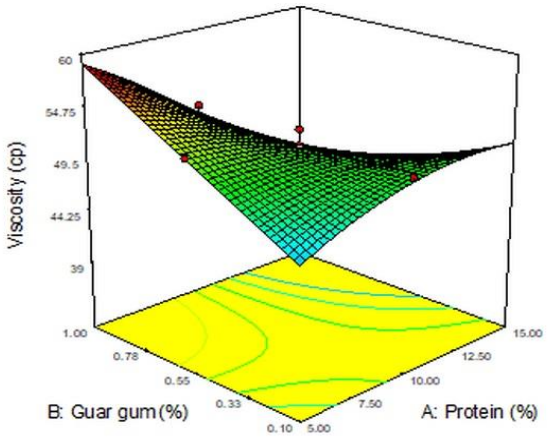
0: عرض از مبدا 1: غلظت ایزوله پروتئین آب پنیر، 2: غلظت گوار

*، **، *** به‌ترتیب، نشان دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵٪، ۹۹٪ و ۹۹/۹٪ و ns عدم معنی‌دار بودن را نشان می‌دهد.

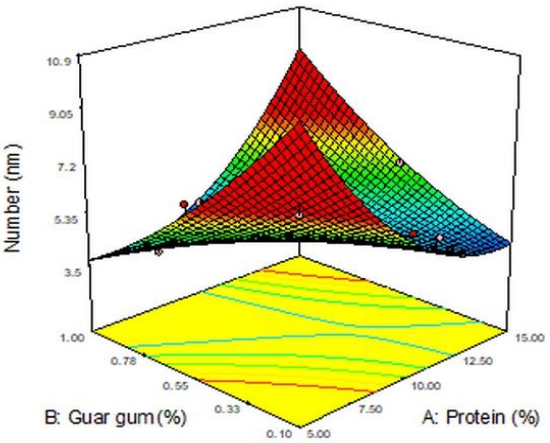
[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

الف)



ب)



شکل ۱. اثر متقابل متغیرهای مستقل بر تغییرات ویسکوزیته (الف) و اندازه ذرات با D90% (ب)

تغییرات راندمان ریزپوشانی و بارگیری الیاف الکتروریسی شده

بر طبق نتایج، افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار تا محدوده متوسط غلظت‌های مورد بررسی بر راندمان ریزپوشانی و بارگیری الیاف‌های الکتروریسی شده مثبت و معنی‌دار ارزیابی شد ($P<۰/۰۵$ و $P<۰/۰۰۰۱$). همان طور که در شکل (۲-الف و ۲-ب) مشاهده می شود اثر متقابل غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار تا سطوح متوسط متغیرها موجب افزایش راندمان ریزپوشانی و بارگیری شد.

تغییرات اسیدهای چرب اشباع و غیر اشباع الیاف الکتروریسی شده

نتایج حاصل از جدول ۲ نشان می‌دهد که مدل درجه دوم به دست آمده از تغییرات مجموع اسیدهای چرب اشباع، غیراشباع و چند غیراشباعی الیاف‌های الکتروریسی شده معنی‌دار ارزیابی گردید ($P<۰/۰۰۰۱$ و $P<۰/۰۰۱$). غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر اثر معنی‌داری بر محتوی کل اسیدهای چرب اشباع الیاف الکتروریسی شده نداشت ($P>۰/۰۵$)؛ با این حال، کاهش محتوی کل اسیدهای چرب اشباع با افزایش غلظت گوار مشاهده شد. با توجه به شکل (۲-ج) اثر متقابل غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار تا سطوح متوسط متغیرها سبب کاهش محتوی کل اسیدهای چرب اشباع گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از جدول ۳، روند افزایشی در محتوی کل اسیدهای چرب غیر اشباع و چند غیر اشباعی الیاف‌های الکتروریسی شده با افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار دیده شد. همانطور که در شکل (۲-د و ۲-ه) مشخص است اثر متقابل غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار تا سطوح متوسط متغیرها منجر به افزایش محتوی اسیدهای چرب غیراشباع و چند غیراشباعی گردید.

بهینه‌یابی و اعتبارسنجی مدل

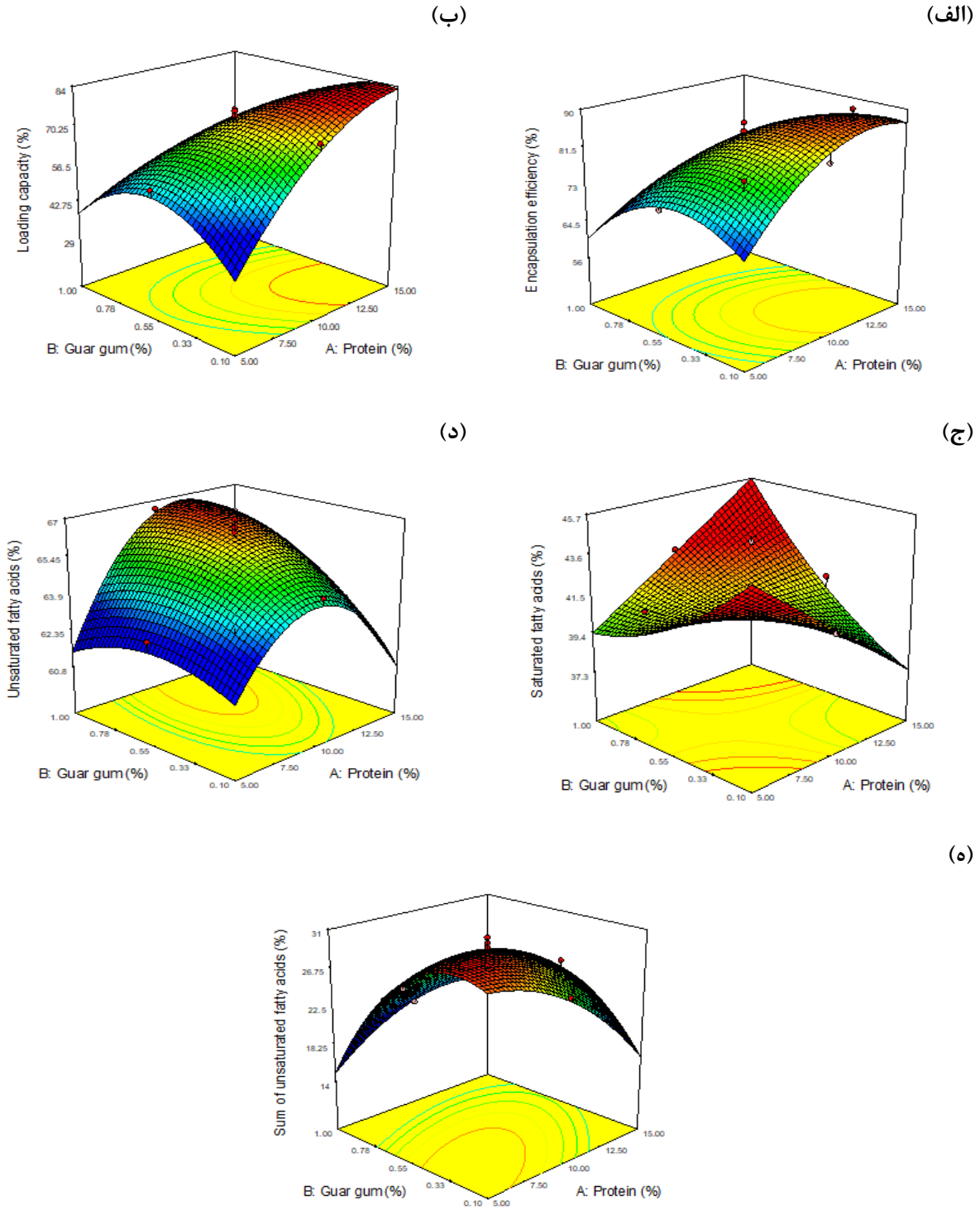
پس از مدل‌سازی متغیرهای کیفی موردنظر، تعیین شرایط بهینه متغیرهای مستقل به منظور دستیابی به ماکزیمم راندمان ریزپوشانی، راندمان بارگیری و همچنین محتوی کل اسیدهای چرب چند غیر اشباعی در الیاف الکتروریسی شده انجام گرفت. شرایط بهینه تولید الیاف الکتروریسی شده حاوی اسید چرب امگا-۳ شامل ۱۰/۶۲٪ کنسانتره پروتئین آب پنیر و ۰/۴۵٪ گوار تعیین گردید. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های حاصل، نمونه الیاف الکتروریسی شده تهیه و درصد خطای هر یک از پارامترهای کیفی مورد نظر با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد. نتایج ویژگی‌های مورد مطالعه نمونه تهیه شده در شرایط آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط مدل و درصد خطای برآورد هر ویژگی در جدول (۴) نشان داده شده است. تفاوت ناچیز میان نتایج ارزیابی شده و پیش‌بینی شده و همچنین در صد خطای محاسبه شده، بیانگر صحت عملکرد مدل‌های به دست آمده می‌باشد.

رابطه (۴)

$$\text{خطا (درصد)} = \frac{\text{پیش بینی شده} - \text{آزمایش شده}}{\text{آزمایش شده}}$$

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]



شکل ۲. اثر متقابل متغیرهای مستقل بر تغییرات راندمان ریزپوشانی (الف)، راندمان بارگیری (ب)، اسیدهای چرب اشباع (ج)، اسیدهای چرب غیراشباع (د)، اسیدهای چرب چند غیراشباعی (ه)

جدول ۴. بررسی صحت پیش‌بینی مدل‌های حاصل شده با استفاده از روش سطح پاسخ در پیش‌بینی فاکتورهای کیفی الیاف الکتروریسی شده حاوی اسید چرب امگا-۳

آزمون	مقدار پیش‌بینی شده	مقدار آزمایش شده	درصد خطا
راندمان کپسول کردن (درصد)	۸۷/۰۰	۸۲/۰۵	۶/۰۳
مجموع اسیدهای چرب اشباع (درصد)	۳۳/۸۳	۳۳/۸۰	۰/۰۸۸
مجموع اسیدهای چرب غیر اشباع (درصد)	۶۶/۱۷	۶۶/۰۰	۰/۲۵
مجموع اسیدهای چرب چند غیراشباعی (درصد)	۲۸/۸۳	۲۸/۰۵	۲/۷۸

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]
[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

بررسی برخی خصوصیات الیاف الکتروریسی شده حاوی اسید چرب امگا-۳

در این پژوهش، پروفایل اسیدهای چرب الیاف حاوی اسید چرب امگا-۳ تولید شده و حرارت داده شده در دماهای ۱۵۰ و ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد با روغن حرارت داده شده در همین دما مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که نتایج آنها در جدول ۵ ارائه شده است. همان طور که نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد بیشترین میزان اسیدهای چرب روغن ماهی حرارت دیده و نمونه الیاف الکتروریسی شده حرارت دیده به‌ترتیب، به اسیدهای چرب نرونیک اسید (C24.1n9)، دوکوزاهگزانوئیک اسید (C22:6-n3)، ایکوزاتری انوئیک اسید (C20:3 n3) و ایکوزانوئیک اسید (C18:3-n3) و لینولئیک اسید (C18:2-n6) اختصاص داشت. کمترین اسیدهای چرب شناسایی شده در هر دو نمونه روغن حرارت دیده و الیاف الکتروریسی شده حرارت دیده مربوط به اسیدهای چرب کاپریک اسید (C8:0) و کاپروئیک اسید (C6:0) بود. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان دهنده حفظ بهتر اسیدهای چرب غیراشباع و چند غیراشباعی نمونه الیاف الکتروریسی شده حرارت داده شده در دماهای ۱۵۰ و ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به روغن ماهی حرارت دیده شده در دماهای مختلف می‌باشد که همین امر نیز بیانگر پایداری حرارتی روغن محبوس در الیاف است. با این حال محتوی کل اسیدهای چرب چند غیراشباعی در نمونه روغن ماهی حرارت داده شده در دماهای مختلف و الیاف الکتروریسی شده حرارت دیده در مقایسه با روغن ماهی تازه به‌طور قابل توجهی کمتر است.

جدول ۵. مقایسه پروفایل اسیدهای چرب الیاف الکتروریسی شده و روغن ماهی

اسید چرب	نوع روغن				
	روغن ماهی تازه	الیاف حرارت دیده (۲۸۰°C)	الیاف حرارت دیده (۱۵۰°C)	روغن حرارت دیده (۲۸۰°C)	روغن حرارت دیده (۱۵۰°C)
آن دکانوئیک(C11:0)	۳/۸۹	۳/۷۴	۳/۷۶	۳/۷۳	۳/۷۵
دکانوئیک(C10:0)	۳/۵۰	۳/۴۸	۳/۵۱	۳/۴۵	۳/۵۰
کاپروئیک اسید (C6:0)	۱/۰۱	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۶
کاپریک اسید (C8:0)	۰/۹۹	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۸۷
پالمتیک اسید (C16:0)	۵/۰۱	۵/۳۲	۵/۳۲	۵/۳۱	۵/۳۴
تری دسیلیک اسید (C13:0)	۲/۲۰	۲/۱۱	۲/۱۲	۲/۰۹	۲/۱۱
میریستیک اسید (C14:0)	۷/۵۹	۷/۸۸	۷/۸۹	۷/۸۷	۷/۹۰
پنتانوئیک اسید (C15:0)	۴/۰۴	۴/۶۹	۴/۷۰	۴/۶۷	۴/۷۰
بوتانوئیک اسید (C4:0)	۲/۰۱	۱/۹۱	۱/۹۱	۱/۸۸	۱/۹۰
لوریک اسید (C12:0)	۳/۰۱	۲/۸۲	۲/۸۸	۲/۷۹	۲/۸۷
لینولنیک اسید (C18:3)	۲/۸۷	۲/۴۶	۲/۵۵	۲/۴۱	۲/۵۷
پالمتولئیک اسید (C16:1)	۱/۱۵	۴/۹۳	۴/۹۶	۴/۹۰	۴/۹۵
لینولئیک اسید (C18:2n6)	۳/۵۱	۳/۰۰	۳/۰۱	۲/۹۸	۳/۰۰
میریستولئیک اسید (C14:1)	۱/۶۸	۱/۲۰	۱/۲۱	۱/۱۸	۱/۲۰
اولئیک اسید (C18:1)	۱/۳۳	۲/۸۸	۲/۹۰	۲/۸۵	۲/۸۹
ایکوزانوئیک اسید (C18:3-n3)	۱۱/۹۰	۱۱/۰۵	۱۱/۰۹	۱۱/۰۲	۱۱/۰۸
ایکوزاتریئونیک اسید (C20-3n3)	۱۲/۵۰	۱۱/۱۴	۱۱/۱۹	۱۱/۰۹	۱۱/۱۶
دوکوزاهگزانوئیک اسید (C22:6-n3)	۱۵/۰۰	۱۴/۰۷	۱۴/۱۰	۱۳/۹۷	۱۴
نرونیک اسید (C24:1n9)	۱۶/۸۰	۱۵/۰۰	۱۵/۰۵	۱۴/۹۲	۱۴/۹۸
مجموع اسیدهای چرب چند غیراشباعی	۴۵/۷۸	۴۱/۷۲	۴۱/۹۷	۴۱/۴۷	۴۱/۸۱
مجموع اسیدهای چرب اشباع	۳۳/۲۵	۳۳/۷۸	۳۳/۹۳	۳۳/۵۹	۳۳/۹۰
مجموعاسیدهای چرب غیراشباع	۶۶/۷۴	۶۵/۷۳	۶۶/۰۶	۶۵/۳۲	۶۵/۸۳

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

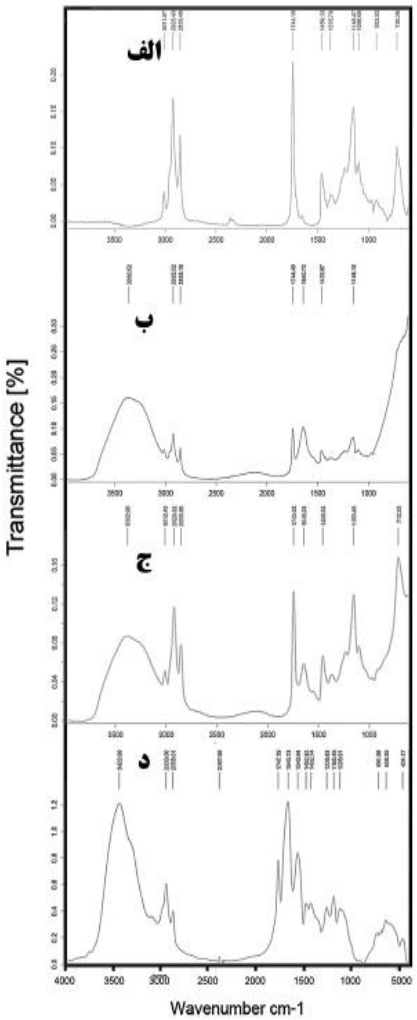
[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

بررسی طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز(FTIR)

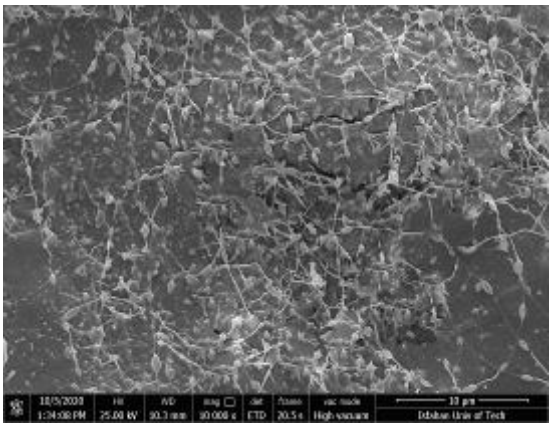
در پژوهش حاضر به منظور شناسایی گروه‌های عاملی و تعیین نوع پیوندهای برقرار شده بین الیافپروتئین- پلی‌ساکارید و اسید چرب امگا-۳، و همچنین اثبات برهم‌کنش میان ترکیبات پلیمری و اسید چرب امگا-۳ از آنالیز FTIR استفاده شد. شکل (۳) طیف‌های ارائه شده از روغن ماهی، محلول حاوی پروتئین-پلی‌ساکارید، امولسیون حاوی روغن و نمونه الکتروریسی شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود، پیک‌های شاخص به‌ترتیب از طول موج‌های زیاد به سمت کم، به صورت نوارهای جذبی کششی(CH_2, CH_3) C–H– در $۲۹۲۳cm^{-1}$ و $۲۸۵۳cm^{-1}$، نوارهای ارتعاشی کششی گروه‌های کربونیل C=O– در $۱۷۴۴cm^{-1}$، ارتعاشات کششی و خمشی گروه‌های C–O, $C–H_2$– در $۱۱۴۸ cm^{-1}$، و ارتعاشات خمشی گروه‌های –HC=CH, C–H– در $۷۲۰cm^{-1}$ ظاهر شده است (شکل ۳- الف). در نمونه حاوی پلیمرهای پروتئین-پلی ساکارید، پیک‌های پهن در محدوده $۲۹۲۳ cm^{-1}$، $۲۸۵۳cm^{-1}$، $۱۷۴۴ cm^{-1}$ و $۱۱۴cm^{-1}$ مشاهده شد (شکل ۳- ب). نمونه امولسیون حاوی روغن، در پیک‌های $۲۹۲۳cm^{-1}$، $۲۸۵۳cm^{-1}$، $۱۷۴۴ cm^{-1}$، $۱۱۴۹cm^{-1}$ و $۷۲۰cm^{-1}$ با دو نمونه روغن ماهی و محلول پلیمری مشابهت داشت، با این تفاوت که پیکی با سطح زیر پیک بزرگ در محدوده $۱۴۵۵ cm^{-1}$ که به ارتعاشات خمشی گروه‌های (CH_2, CH_3) مربوط می‌شود نیز در آن ظاهر شدند (شکل ۳- ج). الیاف الکتروریسی شده از نظر پیک‌های ظاهر شده در محدوده‌های $۲۹۲۶ cm^{-1}$، $۲۸۵۴cm^{-1}$ و $۱۷۴۴ cm^{-1}$ با سایر نمونه‌ها تفاوت نداشتند، اما نوارهای جذبی کششی گروه های O–H، N–O و C=N به‌ترتیب، در $۳۴۳۷cm^{-1}$، $۱۵۴۵ cm^{-1}$ و $۱۶۴۳cm^{-1}$ظاهر شدند (شکل ۳- د)، (۲۲).

بررسی خصوصیات مورفولوژی

شکل (۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه الکتروریسی شده الیاف کنسانتره پروتئین آب پنیر-گوار حاوی اسید چرب امگا-۳ را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، الیافی با یکنواختی نسبی تشکیل شده که از نظر یکنواختی و شبکه‌ای شدن نسبتا مناسب است. به علاوه، ساختار الیاف تولید شده از محلول پلیمری پروتئین و پلی‌ساکارید، ساختار شبکه‌ای از الیاف میله‌ای و یا دوکی شکل بافته نشده را نشان می‌دهد. در حقیقت می‌توان مشاهده کرد که کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار بدون جدا شدن فازی با هم ترکیب شده و ساختاری همگن ایجاد کرده‌اند. لازم به تذکر است که به علت کاربرد فیبریل‌ها در صنعت غذا، از پلیمرهای صنعتی از قبیل پلی وینیل الکل جهت افزایش قطر الیاف و کم شدن گره خوردگی استفاده نشده است. لذا می‌توان تا حدودی وجود گویچه و یا در اصطلاح گره در الیاف تولید شده در این تحقیق را به این موضوع نسبت داد.



شکل ۳. طیف FTIR نمونه‌های مختلف: الف) روغن ماهی، ب) محلول پروتئین-پلی‌ساکارید، ج) امولسیون حاوی روغن، د) الیاف الکتروریسی شده حاوی روغن



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ از الیاف کنسانتره پروتئین آب پنیر- گوار حاوی اسید چرب امگا ۳

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

• بحث

خصوصیات امولسیون

ویژگی محلول‌های مورد استفاده در فرایند الکتروریسی، تأثیر چشمگیری بر کیفیت فیبریل‌های تولید شده از آن خواهند داشت. ویسکوزیته یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین کننده خصوصیات امولسیون‌ها است که تأثیر زیادی بر پایداری امولسیون و ویژگی‌های میکروسکوپی آن می‌گذارد. تغییر ویسکوزیته ناشی از تغییر غلظت پروتئین و گوار در محلول پلیمری با تغییر در تعداد پیوندهای هیدروژنی و پیکربندی زنجیره‌های پلی‌ساکارید-پروتئین مرتبط می‌باشد. شایان ذکر است که با افزایش غلظت پروتئین در محلول پلیمری، پروتئین به عنوان یک ترکیب یونی و قطبی در محلول عمل کرده و رقابت بین پروتئین و صمغ گوار برای رسیدن به مولکول‌های آب اتفاق می‌افتد که همین امر منجر به کاهش پیوندهای هیدروژنی بین زنجیره‌های صمغ گوار و آب می‌شود. بنابراین، هیدراتاسیون پروتئین در غلظت‌های بالا و در حضور صمغ گوار می‌تواند باعث کاهش ویسکوزیته امولسیون گردد. در برخی از مطالعات قبلی گزارش شد که کاهش ویسکوزیته امولسیون با افزایش غلظت پروتئین منجر به بهبود قابلیت الکتروریسی و همچنین مورفولوژی یکنواخت در الیاف حاصله می‌شود (۲۳). Garcia-Moreno و همکاران (۲۰۱۶) با تولید نانوالیاف پلی وینیل الکل حاوی روغن ماهی توسط الکتروریسی بیان داشتند که با افزایش غلظت پلی وینیل الکل ویسکوزیته محلول افزایش می‌یابد (۸). در تحقیقی دیگر که در رابطه با تولید نانوالیاف حامل آنتی اکسیدانت توسط آرد لوبیای خرنوب و پروتئین آب پنیر انجام گرفته بود، نتایج نشان داد که افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر از ۱٪ به ۳٪ باعث افزایش ویسکوزیته محلول می‌گردد (۲۴).

تغییر اندازه و قطر ذرات با تغییر غلظت محلول پلیمری به هدایت الکتریکی و ویسکوزیته محلول پلیمری وابسته است. کاهش اندازه و قطر ذرات با افزایش غلظت محلول پلیمری به‌دلیل افزایش هدایت الکتریکی و کاهش ویسکوزیته آن می‌باشد. از آنجایی که پروتئین هدایت الکتریکی بالاتری نسبت به پلی‌ساکارید دارد، در این تحقیق نیز افزایش غلظت پروتئین و به تبع آن افزایش هدایت الکتریکی محلول پلیمری منجر به کاهش چشمگیر اندازه ذرات امولسیون شده است. به علاوه، نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تأثیر غلظت پلی-ساکارید بر اندازه ذرات امولسیون با وزن مولکولی و ساختار کنفورماسیونی آن در ارتباط است (۲۵). Farshi و همکاران (۲۰۱۹) گزارش نمودند که در تهیه نانوامولسیون روغن سیاه دانه با استفاده از ایزوله پروتئین آب پنیر و صمغ گوار، نانوامولسیون‌های حاوی ایزوله پروتئین آب پنیر در طول ۵ روز نگهداری در دمای اتاق روند افزایشی در اندازه ذرات داشتند و افزایش غلظت صمغ گوار در فاز آبی باعث افزایش اندازه ذرات امولسیون گردید (۲۶). نتایج تحقیق دیگری نیز نشان داده است که با افزایش نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید (پروتئین نخود: صمغ زانتان) از ۱:۴ به ۱:۱۲ اندازه ذرات امولسیون افزایش چشمگیری دارد (۲۷).

خصوصیات الیاف الکتروریسی شده

راندمان ریزپوشانی و بارگیری از مهمترین فاکتورهای کیفی الیاف به حساب می‌آیند. ارتباط مستقیمی بین غلظت محلول پلیمری، اندازه ذرات امولسیون، مساحت سطح ویژه و راندمان ریزپوشانی و بارگیری وجود دارد. به‌طوریکه با افزایش اندازه ذرات و کاهش مساحت سطح ویژه، راندمان ریزپوشانی کاهش می‌یابد (۱۸). در این تحقیق، اندازه ذرات امولسیون با افزایش غلظت صمغ گوار در سطوح پایین مصرف کنسانتره پروتئین آب پنیر کاهش یافت و همانطور که انتظار می‌رفت راندمان ریزپوشانی افزایش پیدا کرد. لازم به ذکر است نتایج این تحقیق بیانگر وجود همبستگی مثبت معنی‌دار (۰/۹۳) میان دو فاکتور راندمان ریزپوشانی و بارگیری بود.

بررسی پروفایل اسیدهای چرب نشان داد که ریزپوشانی روغن ماهی در فیبریل پروتیئن-پلی‌ساکارید به حفظ بهتر اسیدهای چرب غیراشباع به ویژه اسیدهای چرب امگا-۳ کمک می‌کند و موجب پایداری بیشتر اسیدهای چرب غیراشباع و چند غیراشباعی در مقابل حرارت‌های بالا می‌گردد. مطالعات متعدد صورت گرفته در زمینه تأثیر ریزپوشانی اسیدهای چرب به روش‌های مختلف تأیید کننده نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر می‌باشد. در همین راستا، Habib و همکاران (۲۰۱۲) نانوکپسول‌هایی از آلفا لینولنیک اسید توسط روش امولسیون-دیفوژن اصلاح شده با بازده ریزپوشانی ۹۳٪ تهیه و پایداری شیمیایی بالاتر این اسید چرب را مشاهده نمودند (۲۸). در تحقیق صورت گرفته توسط Moomand و Lim (۲۰۱۴) نتایج نشان داد روغن ماهی الکتروریسی شده با زئین نسبت به روغن ماهی پوشش داده نشده پایداری اکسیداتیو بالاتری در دماهای ۴، ۲۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد دارد و در طی ۱۴ روز نگهداری اندیس آنیزیدین کمتری گزارش شد (۲۹). Garcia-Moreno و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند که انکپسولاسیون اسیدهای چرب امگا-۳ روغن ماهی به روش تهیه نانوفیبریل پلولان باعث بهبود پایداری اکسایشی آنها می‌گردد (۳۰).

پس از مدل‌سازی و تعیین شرایط بهینه تولید الیاف، بررسی ویژگی های کیفی آنها انجام شد. نتایج به دست آمده حاکی از

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]
[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

امتزاج پذیری مناسب و عدم جدایی فازی دو ترکیب کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار و همچنین عدم واکنش اسید چرب امگا-۳ با الیاف پروتئین-پلی‌ساکارید می‌باشند. همچنین می‌توان گفت که طی فرایند الکتروریسی تغییر محسوسی در ساختار ترکیبات روغن ماهی و الیاف الکتروریسی شده به وجود نیامده است و فرایند به دام افتادن (Entrapment) ترکیب فعال زیستی درون ساختار الیاف پروتئین آب پنیر-گوار به صورت فیزیکی انجام شده است. Movaffagh و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی طیف FTIR الیاف حاصل از الکتروریسی زئین حامل وانکومایسین گزارش نمودند که با قرار گرفتن وانکومایسین در ساختار پلیمری زئین، پیوند هیدروژنی بین مولکولی در ساختار زئین کمتر شده است. همچنین تغییری در پیک‌های شاخص بستر پلیمر زئین شامل حذف و یا ظاهر شدن پیک جدید مشاهده نشد که همین امر نشان دهنده عدم واکنش بین وانکومایسین و بستر پلیمری زئین است (۳۱). نتایج مطالعات قبلی نشان داده است که در فرایند الکتروریسی کیتوزان و کلاژن به دلیل مشابهت گروه‌های عاملی در هر دو ترکیب، نوارهای جذبی مشابهی دیده می‌شود (۳۲). Aman Mohammadi و همکاران (۲۰۱۹) با تولید نانوالیاف ایزوله پروتئین آب پنیر- صمغ گوار توسط الکتروریسی و بررسی طیف FTIR الیاف، تغییر باندهای آمید نوع اول و دوم را مشاهده کردند و بیان داشتند که تغییر پیک‌های مربوط به آمید نوع اول دوم نشان دهنده تغییرات ساختار ثانویه پروتئین و تشکیل آلفا-هلیکس است که نتیجه‌ی برهم‌کنش میان گروه هیدروکسیل صمغ و گروه آمنیه پروتئین می‌باشد (۲۲). در تحقیقی دیگر Zeren و همکاران (۲۰۲۲) با آنالیز طیف FTIR الیاف حاصل از الکتروریسی آرد لوبیای خرنوب و پروتئین آب پنیر حامل کافئیک اسید، مشابهت پیک‌های مربوط به گروه‌های C=O–، –C –O–Cو C=C، و از طرفی تغییر برخی از پیوندها مانند آمید نوع سوم و خمشی متیلن را گزارش نمودند و علت تغییر این باندها را به برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک گروه باردار آمینه پروتئین و گروه باردار کربوکسیل حلقه فنولی کافئیک اسید نسبت دادند (۲۴).

بررسی خصوصیات مورفولوژی

الیاف کنسانتره پروتئین آب پنیر-گوار حاوی اسید چرب امگا-۳ نشان از وجود الیافی با یکنواختی نسبی و مناسب از نظر یکنواختی و شبکه‌ای شدن دارد. یکی از عوامل مهم و مؤثر در تشکیل الیاف این است که محلول مورد استفاده در فرایند الکتروریسی از پلیمری با وزن مولکولی مناسب و غلظت مطلوب تهیه گردد تا خصوصیات محلول برای انجام فرایند کافی باشد. زمانی که یک جریان باریک و پرشتاب از محلول پلیمری، نوک سوزن را ترک و در طول حرکت به سمت صفحه جمع کننده کشیده می‌شود، در حین کشش محلول پلیمری، در هم تنیدگی (Entanglement) زنجیره‌های مولکولی، از قطع شدن جریان سیال که توسط نیروهای الکتریکی رانده می‌شود، جلوگیری کرده و در نتیجه یک جریان پیوسته از محلول حاصل می‌گردد. نتیجه این فرایند، تشکیل ساختاری بدون نقص و ترجیحا فاقد گره در بستر تولید شده است. یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان در هم تنیدگی زنجیره‌های پلیمری در حلال و متعاقبا افزایش ویسکوزیته محلول، غلظت و وزن مولکولی محلول پلیمر می‌باشد. افزایش غلظت محلول همانند افزایش وزن مولکولی آن باعث افزایش در هم تنیدگی زنجیره‌های پلیمری می‌شود که برای رسیدن به تداوم جریان شتاب‌دار محلول در طول الکتروریسی لازم است. در واقع، الکتروریسی محلول رقیق به علت درگیری ناکافی بین زنجیره‌های مولکولی پلیمر، موجب افزایش تعداد گره‌ها در سطح الیاف می‌گردد. از طرفی، در غلظت‌های بسیار بالای محلول‌های پلیمری به دلیل افزایش ویسکوزیته و تشکیل یک ساختار ژل مانند، تولید الیاف به دلیل عدم کشش مناسب در میدان الکتریکی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. ازاین رو، غلظت محلول پلیمری نمی‌تواند از یک حد معین تجاوز کند زیرا افزایش زیاد ویسکوزیته از الکتروریسی مداوم و یکنواخت ممانعت می‌نماید (۳۳). لازم به ذکر است که علت وجود گره در الیاف را می‌توان به ویسکوزیته و کشش سطحی محلول پلیمری نسبت داد. هنگامی که جریان به سمت صفحه جمع کننده حرکت می‌کند، احتمال می‌رود که کشش سطحی موجب تشکیل مهره‌ها (Beads) در طول مسیر حرکت پرشتاب محلول شود. در یک حرکت پرشتاب محلول، وقتی غلظت مولکول‌های آزاد حلال زیاد باشد (ویسکوزیته کم)، مولکول‌های محلول پلیمری بیشتر تمایل دارند تا دور هم جمع شوند و یک شکل کروی را به وجود آورند. در ویسکوزیته بالا که اثر متقابل بیشتری میان مولکول‌های حلال و زنجیره‌های پلیمری وجود دارد، کشش سطحی مولکول‌های حلال کاهش یافته و در نتیجه تمایل مولکول‌ها برای اینکه تحت تأثیر کشش سطحی تجمع پیدا کنند، کاهش پیدا می‌کند و همین امر موجب تولید الیافی بدون مهره خواهد شد (۳۴). Aceituno-Medina و همکاران (۲۰۱۳) بیان داشتند که استفاده از غلظت‌های مناسب پولولان در تهیه محلول پلیمری ایزوله پروتئین آب پنیر، از طریق افزایش ویسکوزیته و کاهش هدایت الکتریکی محلول منجر به تشکیل الیافی با مورفولوژی یکنواخت می‌شود (۳۵).

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر غلظت‌های مختلف کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار بر ویژگی‌های کیفی امولسیون و الیاف بارگذاری شده با اسیدهای چرب امگا-۳ به روش الکتروریسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و گوار در محدوده مناسب، راندمان ریزپوشانی و بارگیری الیاف افزایش می‌یابد. پروفایل اسیدهای چرب و مجموع اسیدهای چرب اشباع و غیر اشباع نیز به تغییر غلظت کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار وابسته است که نشان از تأثیر ترکیب پلیمری مورد استفاده در حفظ روغن حاوی مقادیر بالای امگا ۳ دارد. بررسی امولسیون نیز نشان داد که تغییر غلظت صمغ گوار و کنسانتره پروتئین آب پنیر، اندازه ذرات امولسیون و ویسکوزیته آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد که این ویژگی‌ها بر کیفیت تولید الیاف مؤثر است. به منظور تولید الیافی با بیشترین راندمان ریزپوشانی و بارگیری و همچنین بالاترین محتوی کل اسیدهای چرب چند غیراشباعی، استفاده از محلول حاوی ۱۰/۶۲٪ کنسانتره پروتئین آب پنیر و ۰/۴۵٪ گوار به عنوان بهترین محلول برای الکتروریسی و تهیه الیاف انتخاب شد. مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده با نتایج حاصل از آزمایشگاه، عملکرد مناسب مدل‌های حاصل شده در این زمینه را نشان می‌دهد. ریزساختار الیاف به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی و شکل‌گیری الیاف رشته‌ای نسبتا یکنواخت مشاهده گردید. نتایج حاصل از FTIR نشان داد که میان بیوپلیمرهای پروتئین و پلی‌ساکارید با اسیدهای چرب امگا-۳ پیوند شیمیایی برقرار نشد، و تمامی اجزای الیاف پروتئین-پلی‌ساکارید حاوی اسیدهای چرب امگا-۳ در طول فرایند الکتروریسی ساختار خود را حفظ نموده و دچار تغییرات شیمیایی نشده است. فرایند الکتروریزپوشانی با استفاده از الیاف الکتروریسی شده کنسانتره پروتئین آب پنیر و صمغ گوار به عنوان یک سیستم تحویل مناسب برای ترکیبات فعال پتانسیل خوبی دارد. از این رو، استفاده از این تکنولوژی نوین به منظور ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال حساس در صنعت غذا و دارو توصیه می‌شود.

• References

1. Lopez-Huertas E. Health effects of oleic acid andlong chain omega-3 fatty acids (EPA and DHA)enriched milks, A review of intervention studies.Pharmacol Res2010; 61(3): 200-207.

2. Innes JK, Calder PC. Marine Omega-3 (N-3) Fatty acids for cardiovascular health: An Update for 2020. Int. J. Mol. Sci 2020;21: 1-21.

3. Molnar J, Pal M. The Effect of omega-3 fatty acids in health preservation. J.Food. Res. Technol 2020; 08(01): 05-07.

4. Eratte D, Wang B, Dowling K, Barrow CJ, Adhikari BP. Complex coacervation with wheyprotein isolate &gum arabic for the microencapsulation of omega-3 rich tuna oil. Food Funct 2014; 5(11): 2743- 2750.

5. CuiW, Zhou Y,Chang J. Electrospun nanofibrous materials for tissueengineering and drug delivery. SciTechnol Adv Mater 2010; 11(1): 1-12.

6. Kayaci F, Uyar T. Solid inclusion complexes of vanillin withcyclodextrins: Formation, characterization and their high temperaturestability. J. Agric. Food. Chem 2011; 59(21): 11772–11778.

7. Neo YP, RayS, Jin J, Gizdavic-Nikolaidis M, Nieuwoudt MK,Liu D, et al. Encapsulation of food grade antioxidant in natural biopolymerby electrospinning technique: A physicochemical study basedon zein–gallic acid system. Food Chem 2013; 136: 1013–1021.

8. Garcia-Moreno PJ,Stephansen K, van der Kruijs J, Guadix A, Guadix EM, Chronakis IS, et al. Encapsulation of fish oil in nanofibers by emulsion electrospinning: Physical characterization and oxidative stability. J. Food Eng 2016; 183: 39-49.

9. Bedie GK, Turgeon SL,MakhloufK. Formation of native whey protein isolate–low methoxyl pectincomplexes as a matrix for hydro-soluble food ingredient entrapment in acidic foods. Food Hydrocoll 2008; 22: 836–44.

10. Zimet P, Livney YD. Beta-lactoglobulin and its nanocomplexes with pectin as vehicles for omega 3polyunsaturated fatty acids. Food Hydrocoll 2009; 23: 1120–1126.

11. Duan J, Jiang Y, Zhao Y. Chitosan–whey protein isolate composite films for encapsulation and stabilization of fish oil containing ultra pure omega-3 fatty acids. J. food sci 2011; 76: 133-141.

12. Razavizadeh BBM, Khan MohammadiF,Azizi SN.Comparative study on properties of rice bran oil microcapsulesprepared by spray drying and freeze drying.Innovative Food Sci. Technol 2014; 3(2): 97-114.[in persian]

13.Theocharidou A, Mourtzinos I, Ritzoulis C. The role of guar gum on sensory perception, on food function, and on the development of dysphagia supplements – A review. Food Hydrocoll 2022; 2: 1-9.

14. Kuck LS, Wesolowski JL, Noreña CPZ. Effect of temperature and relative humidity on stability following simulated gastro-intestinal digestion of microcapsules of Bordo grape skin phenolic extract produced with different carrier agents. Food Chem 2017; 230: 257-264.

15. Ghorani B, Russell SJ, Goswami P. Controlled morphology and mechanical characterisationof electrospun cellulose acetate fibre webs. Int. J. Polym. Sci 2013; 1: 1-12.

16. Zhang L, Yan J, Yin Z, Tang C, Guo Y, Li D, et al. Electrospun vancomycin-loadedcoating on titanium implants for the preventionof implant-associated infections. Int. J. Nanomedicine 2014; 9: 3027-3036.

17. Zhang HY, Arab Tehrany E, Kahn CJF, Ponçot M, Linder M, Cleymand F. Effects ofnanoliposomes based on soya,

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

rapeseed and fish lecithins on chitosan thin films designed for tissueengineering. Carbohydr. Polym 2012; 88(2): 618-627.

18. Rather AH, Wani TU, Khan RS, Pant B, Park M, Sheikh FA. Prospects of polymeric nanofibers loaded with essential oils for biomedical and food- packaging applications. Int. J. Mol. Sci 2021; 22: 1-39.

19. Haghju S, Beigzadeh S, Almasi H, Hamishehkar H. Chitosan films incorporated with nettle(*Urtica dioica* L.) extractloadednanoliposomes: I. Physicochemical characterization and antimicrobial properties. J Microencapsul 2016;33(5): 438-448.

20. Farhoosh R, Hoseini-Yazdi SZ. Evolution ofoxidative values during kinetic studies on olive oiloxidation in the Rancimat test. J Am Oil Chem Soc 2014;91(2): 281-293.

21. Berechet MD, Gaidau C,Miletic A, Pilic B, Râpa M, Stanca M, et al. Bioactive properties of nanofibres based on concentrated collagen hydrolysate loaded with thyme and oregano essential oils. *Materials* 2020:*13*(7): 1-25.

22.Aman mohammadi M, Ramazani S, Rostami M, Raeisi M, Tabibiazar M, Ghorbani m. Fabrication of food-grade nanofibers of whey protein Isolate–Guar gum using the electrospinning method. *Food Hydrocoll* 2019;*90:* 99-104.

23. AmjadiS,Almasi H, Ghadertaj A, Mehryar, L. Whey protein isolate-based films incorporated with nanoemulsions of orange peel (*Citrus sinensis*) essential oil: Preparation and characterization. J food Process Preserv 2021; 45(2): 1-12.

24. Zeren S, Sahin S, Sumnu G. Encapsulation of caffeic acid in carob bean flour and whey protein-based nanofibers via electrospinning.Foods 2022; 11: 1-18.

25. Espinosa-Sandoval L, Ochoa-Martínez C, Ayala-Aponte A, Pastrana L, Gonçalves C, Cerqueira MA. Polysaccharide-based multilayer nano-emulsions loaded with oregano oil: production, characterization, and in vitro digestion assessment. Nanomater 2021; 11(4): 1-16.

26. Farshi P, Tabibiazar M, Ghorbani M, Mohammadifar M, Bannazadeh Amirkhiz M, Hamishehkar H. Whey protein isolate-guar gum stabilized cumin seed oil nanoemulsion. Food Bioscience 2019; 28: 49-56.

27. Velez-Erazo EM, Bosqui K, Rabelo RS, Hubinger MD. Effect of pH and Pea Protein: Xanthan Gum Ratio on Emulsions with High Oil Content and High Internal Phase Emulsion Formation. Molecules 2021; 26: 1-16.

28. Habib SM, Amr AS, Hamadneh IM. Nanoencapsulation of alpha-linolenic acid with modified emulsion diffusion method. J Am Oil Chem Soc 2012; 89*:* 695-703.

29.Moomand K, Lim LT. Oxidative stability of encapsulated fish oil in electrospun zein fibres. Food Res Int 2014; 62: 523-532.

30. Garcia-Moreno PJ, Damberg C, Chronakis LS, Jacobsen C. Oxidative stability of pullulan electrospun fibers containing fish oil: Effect of oil content and natural antioxidants addition. Eur J Lipid Scie Technol 2017; 119(12): 1-29.

31. Movaffagh J, Amiri N, Ebrahimi S, Kalalinia BF, Fazli Bazaz BS, Azizzadeh M, et al. Electrospun zein nanofibers as nanocarrier of vancomycin:Characterization, release and antibacterial properties*J Food Scie Technol*2018; 15(80): 199-212. [in persian]

32. Chen ZG, Wang PW, Wei B, Mo XM, Cui FZ. Electrospun collagen-chitosan nanofibr Abiomimetic extracellular matrix for endothelial cell and smooth muscell cell. Acta Biomater 2010; 6: 372-382.

33. Haider A, Haider S, Kang IK. A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology.Arab J Chem 2018;11(8): 1165-1188.

34. Li Y, Lim LT, Kakuda Y. Electrospun zein fibers as carriers to stabilize epigallocatechin gallate. J*food*sci 2009; 74(3): 233-240.

35. Aceituno-Medina M, Mendoza S, Lagaron JM, López-Rubio A. Development and characterization of food-grade electrospun fibers from amaranth protein and pullulan blends. Food res int 2013; 54(1): 667-674.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]

Production of Protein-Polysaccharide Fibers Containing Omega-3 Fatty Acids Using Electrospinning Method and Determination of Optimal Process Conditions with Response Surface Methodology

Banaeifar B[1], Abbasi H[1]*

1- Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

*2- *Corresponding author: Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. Email: H.abbasi@Khuisf.ac.ir*

Received 6 Sept, 2022 **Accepted 14 Dec, 2022**

Background and Objectives: Omega-3 fatty acids are very important in the human diet for the prevention of diseases.

Materials & Methods: In the present study, the effect of whey protein concentrate (5, 6.67, 10, 13.33, 15%) and guar gum (0.1, 0.25, 0.55, 0.85, 1%) were evaluated on the qualitative properties of fish oil emulsion and electrospun fibers.

Results: Increasing concentration of whey protein and guar up to the intermediate range of the studied concentrations increased the microencapsulation and loading efficiency of nanofibers. The concentration of whey protein and guar had a significant effect on the fatty acids profile of oil in fiber. A reduction in particle size of emulsions was observed with the slight increasing guar gum concentration. The concentration of whey protein and guar had a significant effect on emulsion viscosity changes. Evaluation of fatty acids in fibers and oil indicated the better preservation of unsaturated and polyunsaturated fatty acids, as well as the thermal stability of fibers compared to the control. According to the results of the FTIR, successive microencapsulation of omega-3 fatty acids without the interaction between protein-polysaccharide biopolymers and omega-3 fatty acids was observed. Morphological examination confirmed the formation of relatively uniform filamentary fibers.

Conclusion: The best condition for the preparation of electrospun fibers with the achievement of the maximum microencapsulation and loading efficiency, and also the highest total polyunsaturated fatty acids content was using 10.62% whey protein concentrate and 0.45% guar gum. Microencapsulation of omega-3 fatty acids in whey protein concentrate and guar gum fibers is able to enhancement he stability of fatty acids against heat. Therefore, protein-polysaccharide fibrils can be used as carriers of omega-3 fatty acids in the enrichment of food products.

Keywords: Electrospinning, Fibers, Omega-3 fatty acids, Whey protein concentrate, Guar gum

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2025-08-17]

[DOR: 20.1001.1.17357756.1402.18.1.6.3]