



بهینه‌سازی فرایند الکتروریسی نانوحامل پلی وینیل الکل حاوی روغن دانه کاملینا (*Camelina sativa L.*) برشته‌شده با مایکروویو

ساناز خالدی^۱، نفیسه جهانبخشیان^{۲*}، زهرا امام جمعه^۳، صدیقه سلیمانی فرد^۴، زهرا بیگ محمدی^۱

^۱ - گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ - گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

^۳ - گروه علوم، فناوری و مهندسی صنایع غذایی دانشکده فنی و مهندسی کشاورزی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۴ - گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نانوحامل‌ها به‌عنوان سامانه‌های نوین رهایش ترکیبات زیست‌فعال، نقش مهمی در افزایش پایداری، بهبود کارایی و توسعه کاربردهای نوآورانه در صنایع غذایی و بسته‌بندی ایفا می‌کنند. در این پژوهش، تولید و بهینه‌سازی نانوحامل‌های زیست‌سازگار بر پایه پلی‌وینیل الکل حاوی روغن دانه کاملینا برشته‌شده با مایکروویو، به‌منظور کاربرد در بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی بررسی شد. از روش الکتروریسی و طراحی آزمایش سطح پاسخ بر پایه طرح مرکزی مرکب برای بررسی تأثیر متغیرهایی چون مقدار روغن (۲۵-۵ درصد وزنی)، ولتاژ (۳۰-۱۰ کیلوولت)، فاصله سوزن تا جمع‌کننده (۲۲/۵-۷/۵ سانتی‌متر) و سرعت پمپ (۵-۰/۵ میلی‌لیتر بر ساعت) بر قطر نانوحامل‌ها استفاده شد. مدل رگرسیون برازش‌شده همبستگی بالایی بین متغیرها و پاسخ ($R^2=0/998$) نشان داد. نتایج آنالیز واریانس و نمودار پارتو بیانگر تأثیر معنی‌دار سرعت پمپ و مقدار روغن بر قطر نانوحامل بود. این نانوحامل‌ها با قابلیت انکپسولاسیون ترکیبات زیست‌فعال، می‌توانند در طراحی سیستم‌های بسته‌بندی فعال و حسگرهای هوشمند مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرند.

تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

کلمات کلیدی:

نانوحامل،

الکتروریسی،

روغن کاملینا،

طراحی سطح پاسخ،

برشته‌شده

DOI: 10.48311/fsct.2026.84077.0

* مسئول مکاتبات:

njahanbakhshian@iau.ac.ir

۱-مقدمه

در دهه‌های اخیر، انکپسولاسیون به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در حفاظت از ترکیبات حساس زیستی، از جمله روغن‌های گیاهی، آنتی‌اکسیدان‌ها و اسانس‌ها، در برابر عوامل تخریب‌کننده محیطی مانند نور، اکسیژن، حرارت و رطوبت مطرح شده است [۱]. این فناوری با محصورسازی ماده هدف در یک ماتریس محافظ، نه تنها پایداری آن را افزایش می‌دهد، بلکه امکان رهایش کنترل‌شده و هدفمند آن را در شرایط مطلوب فراهم می‌کند. در این زمینه، توسعه سامانه‌های نانوحامل با اندازه ذره در مقیاس نانومتری، به دلیل سطح ویژه بالا و نفوذپذیری مناسب، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است [۲، ۳].

یکی از روش‌های نوین و مؤثر برای تولید نانوحامل‌ها، فناوری الکترورسی است. این روش با استفاده از میدان الکتریکی قوی، امکان تولید الیاف پلیمری با قطر نانومتری، ساختار متخلخل و قابلیت بارگذاری بالای ترکیبات زیست‌فعال را فراهم می‌کند [۴]. نانوالیاف الکترورسی‌شده به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مورفولوژیکی و فیزیکی، از جمله سطح ویژه بالا، نفوذپذیری کنترل‌شده و سازگاری با ترکیبات مختلف، گزینه‌ای ایده‌آل برای انکپسولاسیون ترکیبات حساس محسوب می‌شوند [۵]. با این حال، موفقیت در تولید نانوالیاف یکنواخت و با کیفیت، مستلزم بهینه‌سازی دقیق پارامترهای فرایندی مانند غلظت پلیمر، نسبت بارگذاری ترکیب فعال، ولتاژ اعمالی، فاصله نازل تا جمع‌کننده و نرخ جریان است، به‌ویژه هنگامی که ترکیب بارگذاری‌شده، ماهیت روغنی و غیرقطبی داشته باشد [۶].

در این پژوهش، روغن دانه کاملینا (*Camelina sativa L.*) به‌عنوان ترکیب زیست‌فعال هدف انتخاب شده است. این روغن به دلیل غنای بالا در اسیدهای چرب امگا-۳ (به‌ویژه اسید آلفا-لینولنیک) و امگا-۶، همراه با ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند توکوفرول‌ها، فلاونوئیدها و ترکیبات فنولیک، از پتانسیل بالایی در کاربردهای تغذیه‌ای و

عملکردی برخوردار است [۹-۷]. با این وجود، حساسیت شدید این روغن به اکسیداسیون — ناشی از ساختار غیراشباع چربی‌های آن — محدودیت عمده‌ای در استفاده مستقیم از آن ایجاد می‌کند [۱۰، ۱۱].

برای غلبه بر این چالش، در این مطالعه از پیش‌پردازش روغن با روش برشته‌سازی میکروویو استفاده شده است. این فرایند با ایجاد گرمادهی حجمی و سریع، زمان پردازش را کاهش می‌دهد و به آزادسازی بیشتر ترکیبات زیست‌فعال به‌ویژه ترکیبات فنولیک و آنتی‌اکسیدان‌ها، منجر می‌شود. هرچند توزیع حرارت در میکروویو می‌تواند ناهمگن باشد، اما ماهیت گرمادهی حجمی آن در مقایسه با روش‌های حرارتی مرسوم، مزیت محسوب می‌شود [۱۲، ۱۳]. همچنین، برشته‌کردن میکروویویی موجب تعدیل ویسکوزیته، بهبود پایداری حرارتی و کاهش تمایل به اکسیداسیون روغن می‌گردد، ویژگی‌هایی که شرایط مناسب‌تری را برای انکپسولاسیون و الکترورسی موفق فراهم می‌کند. بنابراین، استفاده از روغن برشته‌شده کاملینا در مقایسه با روغن خام، می‌تواند بازده بارگذاری، پایداری فرایند و کیفیت نهایی نانوالیاف را بهبود بخشد [۱].

به‌عنوان ماتریس پلیمری، پلی وینیل الکل (PVA)^۱ انتخاب شده است. این پلیمر به دلیل زیست‌سازگاری، سمیت‌پذیری پایین، قابلیت تشکیل فیلم و انحلال در آب، یکی از پلیمرهای رایج در فرمولاسیون نانوحامل‌های الکترورسی‌شده محسوب می‌شود [۱۴، ۱۵]. ترکیب PVA با روغن برشته‌شده کاملینا، سامانه‌ای مناسب برای حفاظت از ترکیبات حساس و رهایش کنترل‌شده آن‌ها ایجاد می‌کند، اما پیش از هر کاربردی، نیاز به بهینه‌سازی دقیق فرایند الکترورسی برای این سامانه خاص امری اجتناب‌ناپذیر است [۱۴].

برای دستیابی به این هدف، روش سطح پاسخ (RSM)^۲ به‌عنوان یک ابزار آماری قدرتمند، امکان بررسی همزمان چندین متغیر فرایندی و تعاملات آن‌ها را با حداقل تعداد

2-Response Surface Methodology (RSM)

1-Poly(vinyl alcohol) (PVA)

شدند. تمامی مواد شیمیایی بدون انجام خالص سازی اضافی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲-۲- روش‌ها

۲-۲-۲-۱- برشته کردن دانه‌ها با مایکروویو

برای انجام فرآیند حرارتی و استخراج روغن دانه کاملینا، مقدار ۴/۵۵ گرم از دانه‌ها با استفاده از مایکروویو خانگی (بوتان، ایران) با فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز برشته شدند. دانه‌ها درون یک پتری‌دیش شیشه‌ای با قطر تقریبی ۱۰ سانتی‌متر قرار گرفتند و در توان شامل ۴۵۰ وات تحت تابش امواج مایکروویو به مدت ۹۲۶ ثانیه قرار گرفتند. پس از اتمام تیمار مایکروویو، دانه‌ها تا دمای محیط سرد شدند. کلیه آزمون‌های شیمیایی شامل تعیین میزان روغن، مقدار اسید چرب آزاد، عدد پراکسید و شاخص پایداری اکسیداتیو مطابق با روش‌های رسمی انجمن شیمی دانان روغن آمریکا (AOCS) انجام شد [۱].

۲-۲-۲-۲- استخراج روغن

استخراج روغن به روش سوکسله انجام پذیرفت. برای این اساس بدین منظور، ۱۰ گرم پودر دانه کاملینا در کاغذ صافی بسته‌بندی و در محفظه استخراج دستگاه قرار داده شد. سپس ۷۵ میلی‌لیتر هگزان به دستگاه اضافه گردید تا یک چرخه کامل سیفون انجام شود. پس از راه‌اندازی مبرد و تنظیم جریان آب خنک‌کننده، استخراج به مدت ۳ ساعت در دمای جوش حلال ادامه یافت. پس از پایان فرایند، محتویات کاغذ صافی خشک و مجدداً وزن شدند تا میزان روغن استخراج شده محاسبه گردد [۱۸].

۲-۲-۲-۳- الکتروریسی نانوحامل

PVA با غلظت ۱۰ درصد وزنی/حجمی در آب مقطر ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت حل شد و به مدت ۲۴

آزمایش فراهم می‌کند [۱۶]. استفاده از طرح‌های آماری نه تنها هزینه و زمان آزمایش را کاهش می‌دهد، بلکه امکان پیش‌بینی رفتار سیستم در شرایط مختلف و شناسایی نقطه بهینه عملیاتی را نیز میسر می‌سازد [۱۷].

در این مطالعه، هدف اصلی، بهینه‌سازی فرایند الکتروریسی نانوحامل‌های PVA حاوی روغن دانه کاملینا برشته شده با مایکروویو است. با استفاده از طراحی آزمایش RSM و ارزیابی ویژگی‌های مورفولوژیکی و ساختاری نانوالیاف تولیدشده، تأثیر متغیرهای کلیدی فرایند بر کیفیت محصول نهایی بررسی و شرایط بهینه تولید شناسایی خواهد شد. اگرچه این نانوحامل‌ها در آینده می‌توانند در کاربردهایی مانند بسته‌بندی فعال مورد استفاده قرار گیرند، اما محتوای این مقاله محدود به بهینه‌سازی فرایند تولید و ویژگی‌های فیزیکی-ساختاری نانوالیاف است. براین اساس نوآوری این پژوهش در تلفیق روغن گیاهی پیش‌پردازش شده (با برشته‌سازی مایکروویو جهت افزایش ترکیبات بیواکتیو) با پلیمر PVA در فرایند الکتروریسی و بهینه‌سازی سیستماتیک آن با رویکرد آماری RSM نهفته است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای توسعه آینده سامانه‌های رهایش کنترل‌شده در صنایع غذایی و دارویی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

دانه‌های کاملینا از یک فروشگاه خرده‌فروشی در استان کرمانشاه، ایران تهیه شدند. این دانه‌ها پس از طی فرایند خالص‌سازی دستی، در کیسه‌های پلی‌پروپیلنی نگهداری شده و برای مراحل بعدی پردازش و آنالیز آماده‌سازی شدند. پلی‌وینیل الکل (PVA) با وزن مولکولی ۱۱۵۰۰۰ از شرکت سیگما-آلدریج^۳ (آمریکا) تهیه گردید. سایر مواد مورد نیاز در آزمایشات از شرکت مرک^۴ (آلمان) خریداری

⁴ Merck

³ Sigma Aldrich

۴-۲-۴- بهینه‌سازی شرایط الکترورسی

برای تولید نانوحامل پلی وینیل الکل حاوی روغن دانه کاملینا برشته‌شده با مایکروویو چهار متغیر مستق (مقدار روغن، سرعت پمپ، فاصله بین نوک سوزن و جمع‌کننده و ولتاژ اعمال شده) برای تعیین بهترین قطر نانوحامل با استفاده از تحلیل RSM مبتنی بر رویکرد CCRD استفاده شد. برای تعیین شرایط بهینه، یک تابع چند جمله‌ای مرتبه دوم جهت بیان رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته و یافتن همبستگی آن‌ها برازش داده شد. جدول ۱ سطوح کدگذاری شده ی پارامترهای الکترورسی نانوحامل را نشان می‌دهد. میانگین قطر نانوحامل (برحسب نانومتر) به عنوان پاسخ انتخاب شد.

ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس جهت تکمیل آب پوشانی تحت همزنی مداوم قرار داده شد [۱۹]. روغن دانه کاملینا به محلول PVA اضافه شد و با استفاده از دستگاه اولتراسونیک پروب (هیلشر^۵، آلمان) به مدت ۵ دقیقه یکنواخت شد. یک دستگاه الکترورسی افقی در دمای $1 \pm$ ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۳۰ تا ۳۵ درصد استفاده شد. این سیستم شامل یک پمپ (ترومو^۶، ژاپن) با نرخ تغذیه ۱۰-۰/۰۱ میلی‌لیتر بر ساعت مجهز به یک سرنگ ۱ میلی‌لیتری با سر سوزن گیج ۲۱ و منبع ولتاژ بالا (ورودی ۲۲۰ ولت AC - خروجی ۳۰ کیلوولت DC) بود. الکتروود مثبت به نوک سوزن وصل شد و یک فویل آلومینیومی متصل به جمع‌کننده چرخان استوانه‌ای به عنوان الکتروود منفی در نظر گرفته شد.

Table 1. Actual and coded values of variables based on central composite design of PVA-CSO nanocarrier

Variable/Level	- α	-1	0	+1	+ α
CSO concentration (%wt.)	5	10	15	20	25
Pump rate (mL/h)	0.5	1.625	2.75	3.875	5
Distance between needle tip and collector (cm)	7.5	11.25	15	18.75	22.5
Applied voltage (kV)	10	15	20	25	30

تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای Design-Expert v11، Microsoft Excel 2016 و OriginPro 2024 انجام شدند. به منظور بهینه‌سازی فرایند و بررسی اثر متغیرهای مستقل، از طرح مرکب مرکزی چرخشی (CCRD)^۱ مبتنی بر روش سطح پاسخ (RSM) استفاده گردید. معنی‌داری مدل‌ها و اثرات فردی عوامل با آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) ارزیابی شد. سطح معنی‌داری آماری $p < 0.05$ در نظر گرفته شد و تمام مقادیر p مربوط به پارامترهای مدل و مقایسه‌ها در نتایج گزارش شده‌اند.

۴-۲-۵- ریزساختار

به منظور مطالعه ریزساختار (مورفولوژی)، تصاویر از نانوحامل بهینه توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه شد. قبل از تصویربرداری، نمونه‌ها با لایه‌ای از طلا پوشانده شدند و سپس از سیستم تحلیل تصویری با شتاب ولتاژ ۱۵ تا ۳۰ کیلوولت استفاده و تصویربرداری از نمونه‌ها در بزرگنمایی‌های مختلفی انجام گرفت. به منظور تعیین قطر نانوحامل، تصاویر SEM نمونه‌ها توسط نرم‌افزار Image J مورد تحلیل قرار گرفتند. بدین منظور قطر میانگین ۱۰ نانوحامل در هر تصویر به صورت تصادفی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت [۲۰].

۴-۳- آنالیز آماری

۳- نتایج و بحث

1-Central composite rotatable design (CCRD)

5-Hielscher

6-Terumo

جدول ۲، طراحی آزمایش و پاسخ اندازه‌گیری شده در هر آزمایش را نمایش می‌دهد.

Table 2. RSM design of actual/coded factors and experimental response of PVA-CSO nanocarrier

Run	CSO concentration (%wt)	Pump rate (mL/h)	Distance (cm)	Applied voltage (kV)	Diameter (nm)
1	15	2.75	15	20	426.1
2	15	0.5	15	20	557.4
3	20	1.625	11.25	15	505.8
4	10	1.625	18.75	25	454.8
5	10	3.875	18.75	15	563.2
6	15	2.75	15	20	422.9
7	15	2.75	15	20	424.8
8	15	2.75	7.5	20	473.3
9	10	1.625	11.25	15	475.7
10	20	1.625	11.25	25	492.9
11	20	1.625	18.75	15	491.3
12	10	1.625	11.25	25	468.1
13	20	3.875	11.25	25	557.4
14	20	3.875	18.75	25	546.5
15	10	1.625	18.75	15	452.6
16	15	2.75	22.5	20	445
17	15	5	15	20	726.2
18	15	2.75	15	20	427.7
19	10	3.875	11.25	15	591.6
20	20	3.875	18.75	15	608.2
21	15	2.75	15	20	435.9
22	20	1.625	18.75	25	495.4
23	25	2.75	15	20	510.1
24	15	2.75	15	20	428.2
25	15	2.75	15	10	534.3
26	5	2.75	15	20	447.6
27	10	3.875	11.25	25	545.4
28	20	3.875	11.25	15	618.3
29	15	2.75	15	30	481.6
30	10	3.875	18.75	25	508.3

متغیرها نقش غالب و کدام یک نقش کمتری در تغییرات پاسخ مورد نظر داشته‌اند. استفاده از خط مرجع در نمودار پارتو نیز معیاری برای تعیین معنی‌داری آماری اثرات (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) فراهم کرده و تشخیص عوامل مؤثر را تسهیل می‌نماید.

نمودار پارتو به عنوان ابزاری آماری برای رتبه‌بندی و مقایسه شدت تأثیر عوامل مستقل بر متغیر پاسخ، در شکل ۱ ارائه شده است. این نمودار با نمایش مقدار مطلق اثرات استاندارد شده هر فاکتور و برهم‌کنش‌ها، امکان تحلیل بصری میزان تأثیرگذاری هر متغیر بر پاسخ هدف را فراهم می‌سازد. از طریق این نمودار می‌توان به وضوح تشخیص داد که کدام

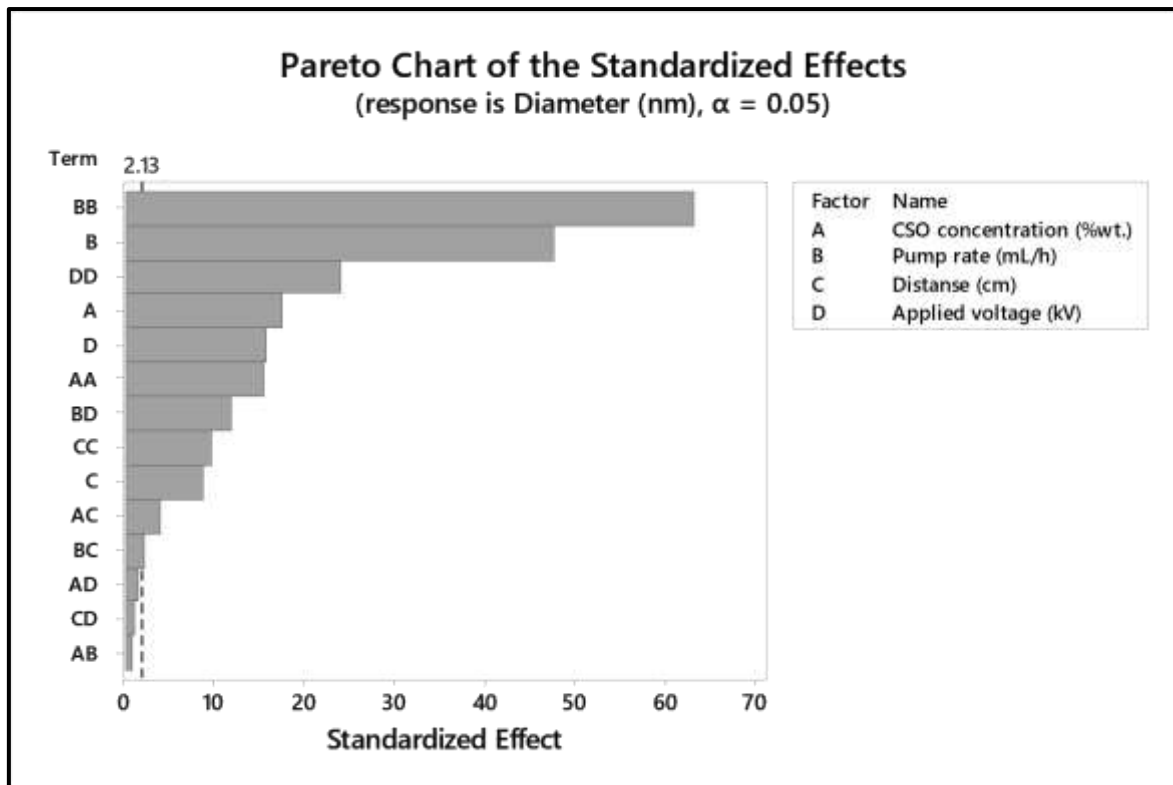


Fig 1. Pareto chart evaluating the effects of process variables on the diameter (nm) of PVA-CSO nanocarriers

افزایشی یا کاهش‌ی پارامترها مشخص شوند. علاوه بر این، بر مبنای مقایسه ضرایب با خط مرجع تعیین شده در نمودار پارتو و نتایج آزمون آنالیز واریانس (ANOVA)، مشخص گردید که به استثنای سه برهم‌کنش، شامل مقدار روغن کاملینا و ولتاژ اعمالی (AD)، فاصله سوزن تا جمع‌کننده ولتاژ (CD) و همچنین مقدار روغن کاملینا و سرعت پمپ (AB)، سایر عوامل شامل اثرات اصلی و ترکیبی در سطح اطمینان ۹۵ درصد از نظر آماری معنادار بوده‌اند. این نتایج نشان‌دهنده‌ی نقش مؤثر متغیرهای فرآیندی به ویژه در سطوح غیرخطی و ترکیبی در کنترل دقیق مورفولوژی و ابعاد نهایی نانوالیاف است. اهمیت این یافته‌ها در طراحی نانوحامل‌های هدفمند با رهایش کنترل‌شده ترکیبات زیست‌فعال، نظیر روغن‌های گیاهی با خواص آنتی‌اکسیدانی بالا، قابل توجه است و می‌تواند به بهبود عملکرد سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند و زیست‌فعال در صنایع غذایی منجر شود.

اثر پارامترهای فرآیند (مقدار روغن، ولتاژ اعمال شده، سرعت پمپ و فاصله بین نوک سوزن و جمع‌کننده) بر قطر نانوحامل در شکل ۲ آورده شده است.

بررسی نتایج حاصل از نمودار پارتو (شکل ۱)، که به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تعیین میزان اهمیت فاکتورهای مؤثر در مدل‌های آماری به کار می‌رود، نشان داد که مدل درجه دوم مربوط به سرعت پمپ (B^2) بیشترین سهم را در تغییرات قطر نانوحامل‌ها دارا بوده است. این یافته نشان‌دهنده‌ی نقش غیرخطی و قابل توجه سرعت پمپ بر فرآیند شکل‌گیری و ابعاد الیاف الکتروریسی شده است. از سوی دیگر، برهم‌کنش بین سرعت پمپ و فاصله سوزن تا جمع‌کننده (BC) کمترین اثر را در میان عوامل مورد بررسی نشان داد، که می‌تواند به همپوشانی محدود تأثیر این دو عامل و کاهش سینرژی آن‌ها در شرایط اعمال شده مرتبط باشد. نکته‌ی مهم آن است که نمودار پارتو، بر مبنای قدر مطلق ضرایب استاندارد شده در مدل، صرفاً شدت تأثیر هر عامل یا برهم‌کنش را نمایش می‌دهد و از آن نمی‌توان جهت اثر (مثبت یا منفی بودن تأثیر هر فاکتور بر پاسخ مورد نظر) را استنباط کرد [۲۱]. بنابراین، برای تحلیل کامل‌تر، نیاز به بررسی ضرایب رگرسیون و نمودارهای پاسخ سطح (RSM) وجود دارد تا الگوهای

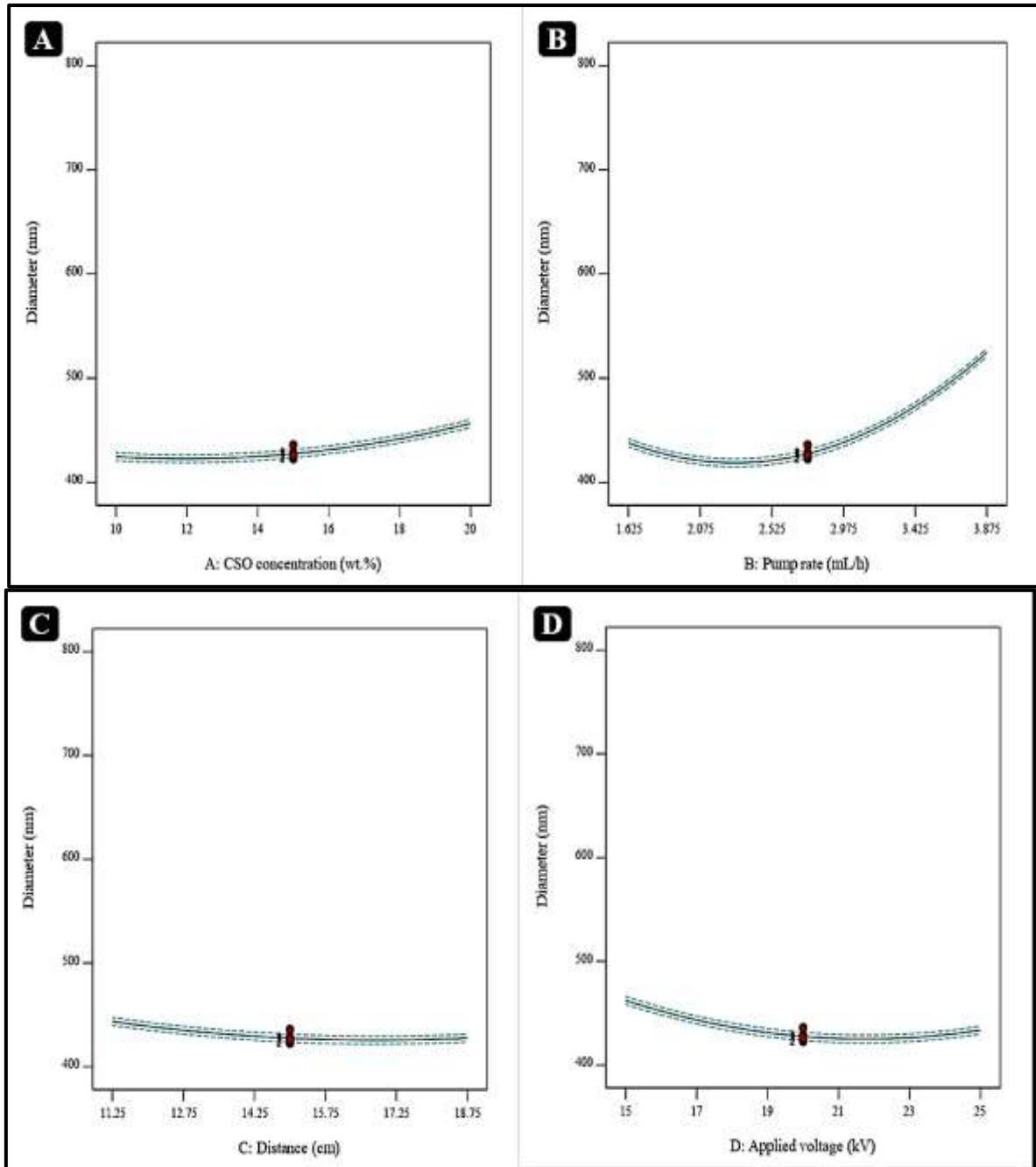


Fig 2. Independent effect of (A) CSO concentration (%wt.), (B) pump speed (mL/h), (C) distance (cm) and (D) applied voltage (kV) on the diameter (nm) of the PVA-CSO nanocarrier

کاهش هدایت به معنای کاهش تعداد یون‌های آزاد در محلول است که مستقیماً بر میزان چگالی بار الکتریکی قابل حمل توسط جت تأثیر می‌گذارد [۲۳]. در شرایطی که چگالی بار کاهش می‌یابد، نیروی کششی ناشی از میدان الکتریکی که در طول جت اعمال می‌شود، به‌طور مؤثری ضعیف می‌گردد. این موضوع باعث می‌شود که کشیدگی زنجیره‌های پلیمری در طول مسیر حرکت جت از سوزن تا جمع‌کننده محدود شده و فرصت کافی برای نازک‌سازی جریان فراهم نشود [۲۴]. در

افزایش قطر نانوحامل‌ها با افزودن CSO به محلول پلیمری، یکی از پدیده‌های مهم و چندعاملی در فرآیند الکترورسی به شمار می‌آید. در این فرآیند، ترکیب ساختاری محلول اولیه نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه کشیدگی جت الکتریکی و در نهایت شکل و اندازه نانوساختارهای حاصل دارد [۲۲]. افزودن CSO، که حاوی ترکیبات لیپوفیل و عمدتاً غیر یونی است، منجر به کاهش هدایت الکتریکی محلول می‌شود. این

فرایند الکتروریسی، تبخیر سریع حلال در طول پرواز جت به ایجاد ساختارهای پایدار و نازک کمک می‌کند [۲۷]. اما حضور فاز لیپیدی می‌تواند سرعت تبخیر را کاهش دهد، که این مسئله زمان بیشتری برای تجمع مولکول‌ها و تشکیل ساختارهای متراکم و قطور فراهم می‌آورد [۲۸]. در مجموع، می‌توان گفت که افزودن CSO نه تنها با تغییر خواص فیزیکی و الکتریکی محلول، بلکه با تأثیر بر رفتار دینامیکی جت در میدان الکتریکی، به‌طور معناداری ابعاد و مورفولوژی نانوحامل‌های حاصل از الکتروریسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

به‌منظور ارزیابی معنی‌داری مدل رگرسیونی و تأثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ (میانگین قطر نانوالیاف)، تحلیل واریانس (ANOVA) انجام شد. نتایج این تحلیل که در جدول ۳ ارائه شده است، نشان‌دهنده کیفیت برازش مدل و سهم هر متغیر و تعاملات آن‌ها در تغییرات پاسخ است.

نتیجه، ساختار نهایی نانوحامل‌ها با قطر بزرگ‌تری نسبت به حالت فاقد روغن تولید می‌شود. همچنین، افزایش ویسکوزیته محلول در حضور CSO از دیگر دلایل مؤثر در این افزایش قطر است، چراکه سیالات ویسکوزتر مقاومت بیشتری در برابر کشش و نازک شدن دارند. بررسی‌های مختلف نشان داده‌اند که ترکیب محلول با ترکیبات روغنی یا عصاره‌های گیاهی بر پایه روغن، تأثیر مستقیمی بر خواص فیزیکی محلول‌های الکتروریسی دارد [۲۵]. این ترکیبات نه تنها هدایت الکتریکی را کاهش می‌دهند، بلکه اغلب به افزایش کشش سطحی و ویسکوزیته نیز منجر می‌شوند، که هر دو عامل با کاهش توانایی میدان الکتریکی در اعمال کشش مؤثر بر محلول همراه هستند [۲۶]. در چنین شرایطی، الیاف حاصل یا ساختاری ضخیم‌تر خواهند داشت یا به‌جای الیاف پیوسته، ذرات یا مهره‌هایی با اندازه بزرگ‌تر شکل می‌گیرند. افزون بر این، حضور ترکیبات آب‌گریز در محلول ممکن است بر رفتار تبخیری حلال نیز اثرگذار باشد. در

Table 3. ANOVA for PVA-CSO nanocarrier Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1.451E+05	14	10365.43	522.64	< 0.0001	significant
A-CSO concentration (wt.%)	6051.55	1	6051.55	305.13	< 0.0001	
B-Pump rate (mL/h)	45058.00	1	45058.00	2271.88	< 0.0001	
C-Distance (cm)	1528.01	1	1528.01	77.04	< 0.0001	
D-Applied voltage (kV)	4910.62	1	4910.62	247.60	< 0.0001	
AB	9.46	1	9.46	0.4768	0.5004	
AC	296.70	1	296.70	14.96	0.0015	
AD	38.75	1	38.75	1.95	0.1825	
BC	90.73	1	90.73	4.57	0.0493	
BD	2743.14	1	2743.14	138.31	< 0.0001	
CD	18.71	1	18.71	0.9432	0.3469	
A ²	4683.84	1	4683.84	236.16	< 0.0001	
B ²	79405.73	1	79405.73	4003.73	< 0.0001	
C ²	1818.62	1	1818.62	91.70	< 0.0001	
D ²	11350.65	1	11350.65	572.31	< 0.0001	
Residual	297.49	15	19.83			
Lack of Fit	196.05	10	19.61	0.9664	0.5518	not significant
Pure Error	101.44	5	20.29			
Cor Total	1.454E+05	29				

داد که مدل از نظر آماری معنی‌دار است ($F\text{-value}=522/64$)
 $(p < 0/0001)$ به‌طوری که تنها ۰/۰۱ درصد احتمال دارد که

نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای مدل درجه دوم
 پیش‌بینی‌کننده میانگین قطر نانوحامل‌های PVA-CSO نشان

سطوح مختلف عوامل مستقل محسوب می‌شود. در این روش، مقادیر واقعی عوامل به مقادیر استاندارد کدگذاری شده (از -۱ تا +۱) تبدیل می‌شوند تا تحلیل و مقایسه تأثیرات تسهیل گردد؛ به طوری که سطح پایین با -۱، سطح میانی با ۰ و سطح بالا با +۱ نمایش داده می‌شود. مزیت اصلی این کدگذاری، امکان مقایسه مستقیم ضرایب فاکتورهاست؛ چرا که بزرگی ضریب هر فاکتور، پس از حذف واحدها و یکسان‌سازی مقیاس، نشان‌دهنده تأثیر نسبی آن بر پاسخ است: هرچه ضریب بزرگ‌تر باشد، نقش آن فاکتور مهم‌تر است. همچنین، جملات تعاملی در معادله، برهم‌کنش بین عوامل را آشکار می‌کنند و ضرایب آن‌ها میزان تأثیر ترکیبی عوامل را نشان می‌دهند. بنابراین، این معادله نه تنها برای پیش‌بینی پاسخ کاربرد دارد، بلکه ابزاری برای درک عمیق‌تر رفتار سیستم و شناسایی عوامل کلیدی و نحوه تعامل آن‌ها در فرایند نیز به شمار می‌آید [۲۹].

$$\text{Final Equation of Diameter (nm) in Terms of Coded Factors} = +427.60 + 15.88A + 43.33B - 7.98C - 14.30D + 4.31AC - 2.38BC - 13.09BD + 13.07A^2 + 53.81B^2 + 8.14C^2 + 20.34D^2$$

معادله بر حسب عوامل واقعی، ابزاری کاربردی برای پیش‌بینی پاسخ سیستم در شرایط فیزیکی و واقعی متغیرهاست و امکان استفاده از آن در طراحی و کنترل دقیق فرایند را فراهم می‌کند. در این مدل، مقادیر عوامل با واحدهای اصلی خود مانند میلی‌لیتر بر ساعت، کیلوولت یا سانتی‌متر، وارد شده و خروجی نیز در مقیاس واقعی محاسبه می‌شود. با این حال، به دلیل وابستگی ضرایب معادله به واحدها و دامنه تغییرات هر عامل، نمی‌توان از این مدل برای مقایسه مستقیم اثر نسبی عوامل استفاده کرد؛ زیرا ضریب بزرگ‌تر ممکن است صرفاً ناشی از واحد بزرگ‌تر یا محدوده گسترده‌تر آن متغیر باشد، نه اهمیت واقعی آن در سیستم. بنابراین، این معادله بیشتر برای شبیه‌سازی شرایط تجربی، پیش‌بینی رفتار سیستم در نقاط عملیاتی و کاربردهای مهندسی مناسب است، در حالی که برای تفسیر آماری و مقایسه تأثیر نسبی عوامل، باید به معادله بر حسب فاکتورهای

چنین مقدار F -value بزرگی ناشی از نویز یا عوامل تصادفی باشد. تمامی متغیرهای مستقل شامل مقدار روغن کاملینا (A)، سرعت پمپ (B)، فاصله نازل تا جمع‌کننده (C) و ولتاژ اعمالی (D) در سطح $p < 0.0001$ معنی‌دار شناخته شدند که نشان‌دهنده تأثیر مستقل و قابل توجه هر یک از این پارامترها بر قطر نهایی نانوالیاف است. در میان این متغیرها، سرعت پمپ (B) با $F\text{-value} = 2271/88$ بیشترین تأثیر خطی و فاصله نازل تا جمع‌کننده (C) با $F\text{-value} = 77/04$ کمترین تأثیر خطی را داشت. از میان اثرات متقابل دوگانه، تنها تعاملات AC، BC و BD معنی‌دار بودند در حالی که سایر تعاملات از نظر آماری معنی‌دار نبودند و نشان دادند که این متغیرها عمدتاً به صورت مستقل عمل می‌کنند. همچنین، تمامی اثرات درجه دوم (A^2 ، B^2 ، C^2 و D^2) در سطح $p < 0.0001$ معنی‌دار بودند که بیانگر رفتار غیرخطی قوی متغیرها در تأثیر بر قطر نانوالیاف است، به ویژه برای B^2 با $F\text{-value} = 403/33$ که بیشترین اثر غیرخطی را نشان داد. بررسی Lack of Fit نیز نشان داد که با مقدار $F\text{-value} = 0/97$ با $p = 0/5518$ معنی‌دار نیست، که تأیید می‌کند مدل ارائه‌شده به خوبی داده‌ها را توصیف می‌کند و نیازی به افزودن اثرات پیچیده‌تر نیست و قادر است به عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی قطر نانوحامل در فرایند الکتروروسی نانوحامل‌های PVA-CSO مورد استفاده قرار گیرد. مدل رگرسیونی برازش شده نشان داد که بین متغیرها و پاسخ رابطه‌ای بسیار قوی برقرار است ($R^2 = 0/998$ ، $R^2 = 0/996$) تعدیل شده و $R^2 = 0/991$ پیش‌بینی شده بود) که اختلاف آن با R^2 تعدیل شده کمتر از ۰/۲ بوده و نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل است. مقدار $\text{Adeq Precision} = 95/864$ بیانگر نسبت سیگنال به نویز بسیار مطلوب (بیش از حداقل مقدار ۴) و کفایت مدل برای پیمایش فضای طراحی است. علاوه بر این، نتایج آنالیز واریانس نشان داد که سرعت پمپ و مقدار روغن بیشترین اثر معنی‌دار را بر قطر نانوحامل‌ها دارند. دو مدل می‌توان برای این چهار متغیر بر پایه روش سطح پاسخ پیشنهاد داد. معادله به دست آمده بر حسب فاکتورهای کدگذاری شده، ابزاری کاربردی برای پیش‌بینی پاسخ در

درباره ی اعتبار، دقت و مفروضات اساسی مدل فراهم آورد. یکی از مفروضات مهم در رگرسیون، نرمال بودن توزیع باقیمانده‌هاست، چرا که نرمالیتی، صحت آزمون‌های آماری مانند تحلیل واریانس (ANOVA) و فاصله‌های اطمینان را تضمین می‌کند. برای بررسی این فرض، پلات احتمال نرمال (Normal probability plot) به‌عنوان یک ابزار گرافیکی رایج و مؤثر به‌کار می‌رود. در این نمودار، چنانچه باقیمانده‌ها به‌طور تقریبی روی یک خط مستقیم قرار گیرند، نشان‌دهنده ی توزیع نرمال آن‌هاست و در نتیجه اعتبار مدل تأیید می‌شود. علاوه بر این، بررسی پلات‌های دیگر از جمله پلات باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده و پلات باقیمانده‌ها در برابر ترتیب مشاهدات (Residuals vs. run order) می‌تواند به شناسایی رفتارهای غیرتصادفی، هتروسکداستیسیته یا الگوهای غیرمنتظره در داده‌ها کمک کند. این تحلیل‌ها مکملی برای ارزیابی آماری مدل هستند و می‌توانند نقشی تعیین‌کننده در تشخیص نقص‌های احتمالی مدل و بهبود آن ایفا کنند [۳۱]. شکل ۳ پلات احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها را نشان می‌دهد و بیانگر این است که باقی‌مانده‌ها به‌طور منطقی بر خط مستقیم برازش شده‌اند که نشان‌دهنده توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها می‌باشد.

کدگذاری شده مراجعه کرد. این تمایز، نقشی کلیدی در تحلیل صحیح نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های طراحی آزمایش مانند RSM دارد [۳۰].

Final Equation of Diameter (nm) in Terms of Actual Factors = +1151.41025 -14.32958 CSO -138.23313 Pump rate -22.54500 Distance -28.93903 Voltage +0.229667 CSO * Distance -0.564444 Pump rate * Distance -2.32778 Pump rate * Voltage +0.522708 CSO² +42.51276 Pump rate² +0.579037 Distance² +0.813708 Voltage²

مدل رگرسیون بر اساس فاکتورهای کدگذاری شده تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی نشان داد ($R^2 \approx 0.99$)، که بیانگر تأثیر معنادار متغیرهای مورد مطالعه بر قطر نانوحامل‌های بارگذاری شده با CSO است. همچنین، مقدار پایین ضریب تغییرات (CV) حاکی از قابلیت تکرارپذیری بالای نتایج و دقت مناسب مدل می‌باشد.

علاوه بر تحلیل ضرایب مدل رگرسیون و بررسی معناداری آن‌ها، ارزیابی کفایت و دقت مدل آماری از طریق تحلیل باقیمانده‌ها (Residuals analysis) نیز نقش کلیدی دارد. باقیمانده‌ها تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل هستند و نشان‌دهنده ی بخشی از واریانس داده‌ها هستند که مدل قادر به توضیح آن نیست. از این رو، تحلیل دقیق آن‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی

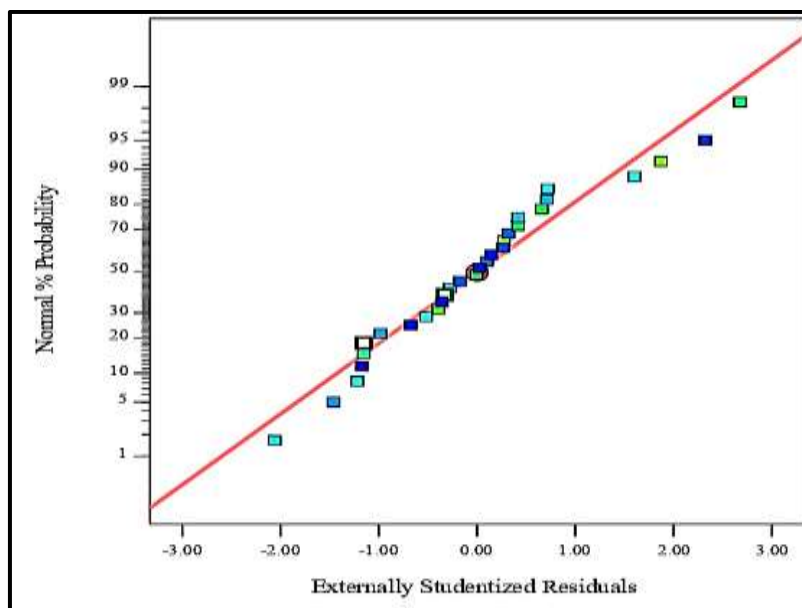
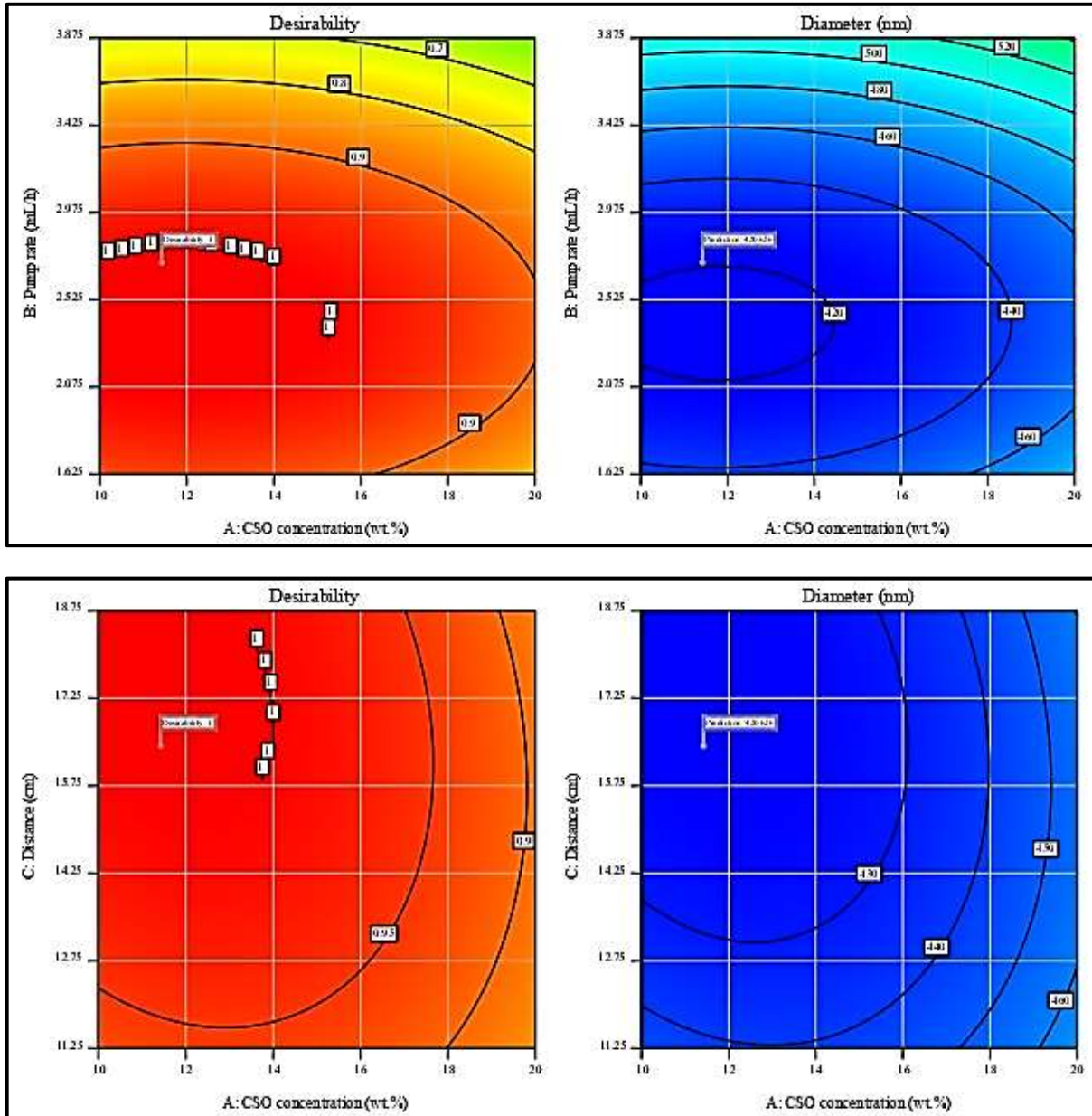
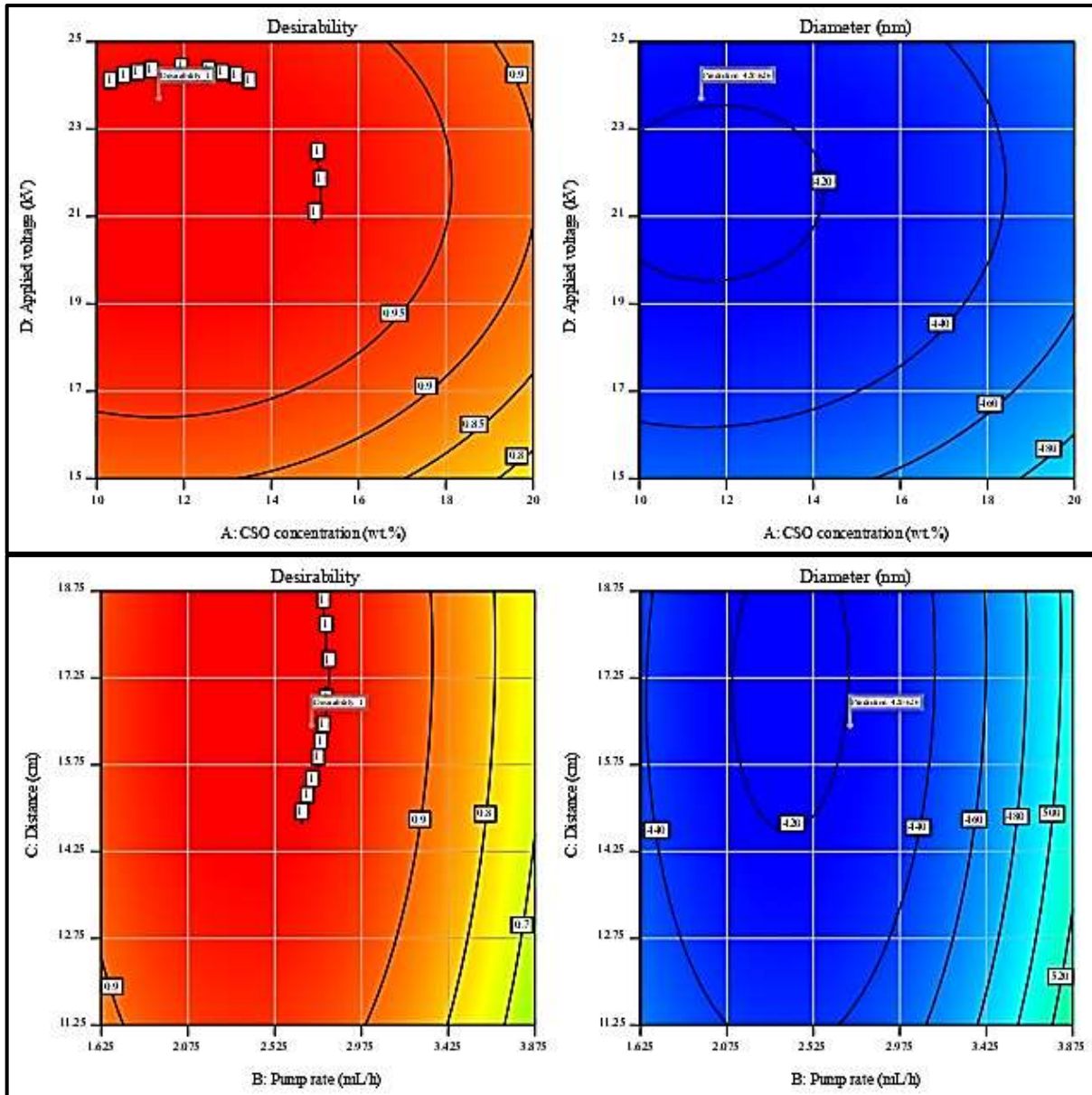


Fig 3. Normality plot of residuals

مشاهده می‌شود، قطر نانوحامل‌ها و مطلوبیت مدل تحت تأثیر مستقیم و قابل توجه کلیه متغیرهای بررسی شده قرار دارد و در محدوده‌های مختلف تنظیم متغیرها دچار نوسان می‌شود. به‌ویژه، افزایش یا کاهش شدید در سطوح پارامترهای اعمال شده منجر به افزایش قابل ملاحظه در قطر نانوحامل‌ها شده است.

شکل ۴ نمایانگر نمودارهای کانتور سطح پاسخ برای میانگین قطر نانوحامل‌ها و مطلوبیت مدل به عنوان تابعی از تعامل بین متغیرهای مستقل فرآیند هستند. این نمودارها تصویری جامع از تأثیر هم‌زمان فاکتورها بر ویژگی‌های مورفولوژیکی الیاف فراهم می‌کنند. همان‌گونه که از نمودارهای سطح پاسخ





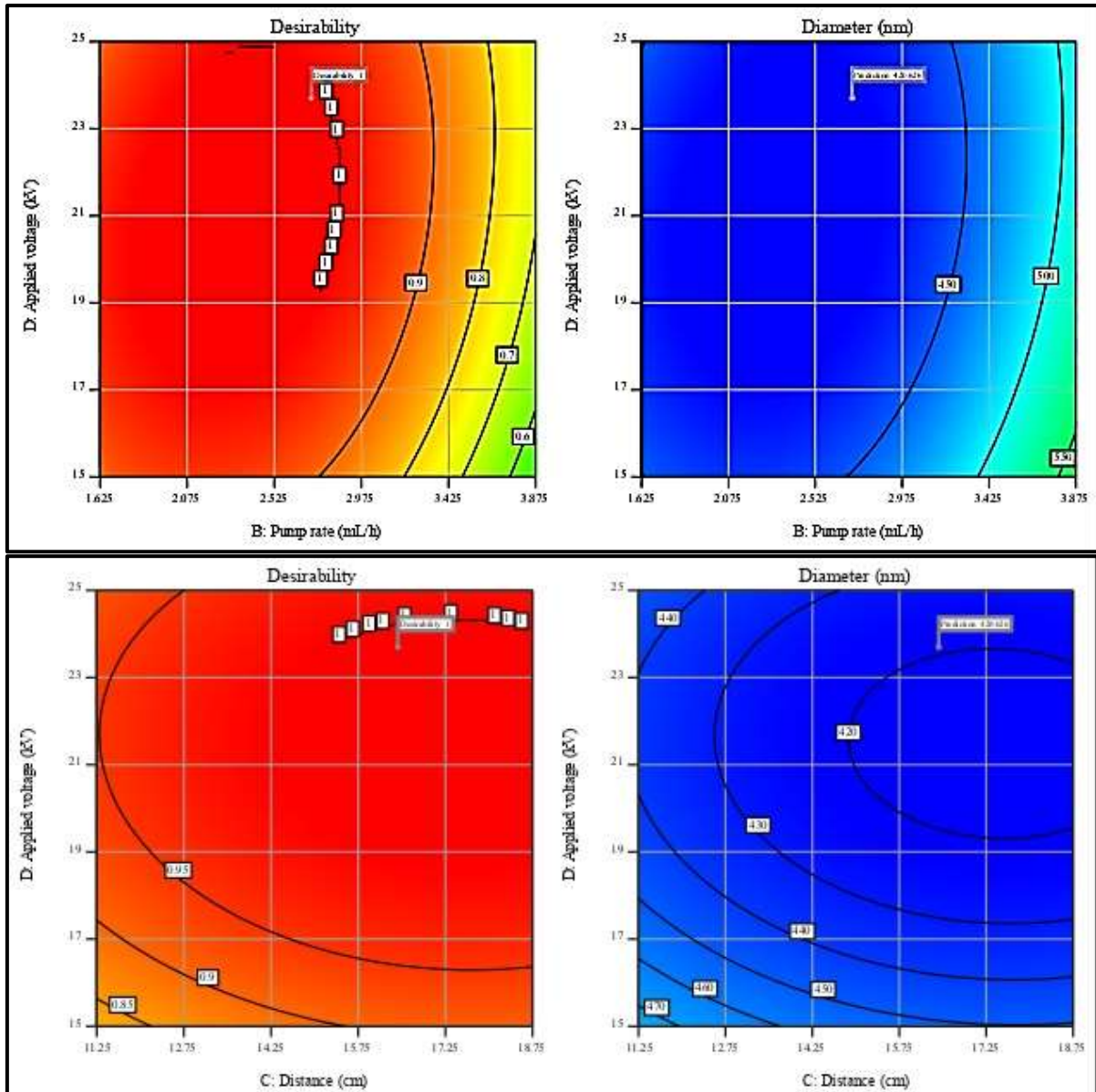


Fig 4. Contour plots of the interaction effect of variables on the diameter and desirability of the PVA-CSO nanocarrier

نانوالیاف ایجاد می‌کند. این رفتار را می‌توان به کاهش ویسکوزیته مؤثر محلول پلیمری در حضور روغن و تغییر در رئولوژی سیستم نسبت داد [۳۲]. همچنین، افزایش غلظت CSO در تمامی سطوح سرعت پمپ، منجر به افزایش یکنواخت قطر نانوالیاف می‌شود که نشان‌دهنده نقش مستقل و مثبت این متغیر در افزایش ضخامت لیاف است. در تعامل با فاصله نازل تا جمع‌کننده، رفتار سیستم در سطوح پایین CSO حساس‌تر است. به عبارت دیگر، در غلظت‌های کم روغن، تغییر در فاصله تأثیر بیشتری بر قطر نانوالیاف دارد که احتمالاً به دلیل کاهش نیروی کشش الکتریکی مؤثر بر

در فرایند الکترورسی نانوحامل‌های PVA-CSO، رفتار سیستم تحت تأثیر تعاملات پیچیده بین متغیرهای فرایندی قرار دارد که تحلیل آن‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) امکان‌پذیر شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که مقدار روغن کاملینا (CSO) به‌عنوان یک مؤلفه بارگذاری شده در ماتریس پلیمری، رفتار غیرخطی قابل‌توجهی در تعامل با سایر پارامترها دارد. به‌طور خاص، در سطوح بالای CSO، حساسیت سیستم به تغییرات سرعت پمپ افزایش می‌یابد، یعنی هر تغییر در نرخ جریان، تغییرات بیشتری در قطر

که گزارش کردند افزایش همزمان نرخ جریان و ولتاژ می‌تواند منجر به افزایش قطر نانوالیاف شود چه به دلیل افزایش حجم پلیمر تزریقی و چه به دلیل کاهش زمان خشک‌شدن [۳۸، ۳۹]. در این مطالعه نیز، بیشترین تأثیر تعاملی در سرعت‌های بالا و ولتاژهای پایین مشاهده شد که نشان می‌دهد در این شرایط، کشش الکتریکی کافی برای جبران افزایش جرم جت وجود ندارد.

در نهایت، تعامل فاصله و ولتاژ نشان داد که در فواصل بلند، تغییرات ولتاژ تأثیر بیشتری بر قطر دارد که با مکانیسم تشکیل مخروط تیلور و کشش جت توسط میدان الکتریکی قابل تبیین است [۴۰]. در فواصل کوتاه و ولتاژهای پایین، تأثیر تعاملی در بیشترین مقدار است که نشان می‌دهد در این شرایط، سیستم در حاشیه پایداری قرار دارد و کوچک‌ترین تغییر در پارامترها منجر به تغییرات قابل توجه در مورفولوژی می‌شود.

با توجه به تک‌پاسخ بودن بهینه‌سازی (فقط قطر نانوالیاف)، تابع مطلوبیت (Desirability) به صورت نرمال شده در بازه ۰ تا ۱ محاسبه شد. روند تغییرات مطلوبیت کاملاً هم‌سو با روند تغییرات قطر بود به گونه‌ای که مقادیر نزدیک به هدف (قطر بهینه)، مطلوبیت نزدیک به ۱ و مقادیر دور از هدف، مطلوبیت نزدیک به ۰ داشتند. این هم‌خوانی نشان می‌دهد که در مسائل تک‌پاسخه، تابع مطلوبیت صرفاً یک ابزار کمی برای شناسایی ناحیه بهینه است و رفتار سیستم را تغییر نمی‌دهد.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که بهینه‌سازی فرایند الکتروریسی نانوحامل‌های PVA-CSO مستلزم در نظر گرفتن تعاملات غیرخطی بین متغیرهاست. به‌ویژه در حضور ترکیبات روغنی که رفتار رئولوژیکی و الکتریکی سیستم را تغییر می‌دهند. این نتایج با مطالعات Topuz و همکاران (۲۰۲۱) در مورد نقش غلظت پلیمر [۳۲]، و مطالعات Theron و همکاران (۲۰۰۴) در مورد نقش چگالی بار سطحی و نرخ جریان [۳۶] هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که طراحی سیستم‌های الکتروریسی حاوی ترکیبات زیستی نیازمند مدل‌سازی دقیق تعاملات چندمتغیره است نه

جت در فواصل طولانی‌تر و عدم جبران آن توسط ویسکوزیته کافی محلول می‌باشد. در مقابل، در فواصل بلندتر، افزایش غلظت CSO تأثیر قابل توجه‌تری بر قطر دارد، که نشان می‌دهد در این شرایط، تأثیر رئولوژیکی روغن بر رفتار جت غالب می‌شود. کمترین تأثیر تعاملی در سطوح پایین CSO و فواصل بلند مشاهده شد که می‌تواند ناشی از عدم تعادل بین نیروهای الکتریکی و ویسکوزیته باشد [۲۴].

در مورد ولتاژ اعمالی، سیستم در سطوح پایین CSO به تغییرات ولتاژ حساس‌تر است. این یافته با مطالعات Ziyadi و همکاران (۲۰۲۱) و Hosseini و همکاران (۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد که نشان دادند در غیاب بارگذاری روغنی، افزایش ولتاژ منجر به کاهش قطر جت در ابتدا و سپس تشکیل ساختارهای نامنظم (مهره‌ای) می‌شود [۳۳، ۳۴]. در این پژوهش نیز، در ولتاژهای پایین و غلظت‌های کم CSO، تغییرات قطر نانوالیاف بیشتر است در حالی که در ولتاژهای بالا، این حساسیت کاهش می‌یابد، احتمالاً به دلیل غلبه نیروهای الکتریکی بر تأثیرات رئولوژیکی. کمترین تأثیر تعاملی در سطوح پایین CSO و ولتاژهای بالا مشاهده شد که نشان‌دهنده اشباع شدن سیستم از نظر پاسخ به میدان الکتریکی است [۳۵].

در مورد تعامل سرعت پمپ و فاصله، نتایج نشان می‌دهند که در فواصل بلندتر، تغییرات سرعت پمپ تأثیر بیشتری بر قطر دارد که با مطالعات Theron و همکاران (۲۰۰۴) هم‌خوانی دارد؛ آن‌ها نشان دادند که در فواصل طولانی، زمان پرواز جت بیشتر بوده و فرصت خشک‌شدن کامل کاهش می‌یابد، بنابراین افزایش نرخ جریان منجر به تشکیل قطرات یا مهره‌ها می‌شود [۳۶]. در این پژوهش نیز، بیشترین تأثیر تعاملی در فواصل کوتاه و سرعت‌های بالای پمپ مشاهده شد که نشان می‌دهد در این شرایط، عدم تعادل بین نرخ تغذیه و زمان خشک‌شدن، منجر به افزایش قطر و ناهمگنی ساختاری می‌شود [۳۷].

در تعامل سرعت پمپ و ولتاژ، سیستم در سرعت‌های بالا به تغییرات ولتاژ حساس‌تر است. این رفتار با یافته‌های Rieger و همکاران (۲۰۱۶) و Li and Wang (۲۰۱۳) هم‌خوانی دارد

صرفاً بهینه‌سازی تک‌متغیره. بهینه‌سازی متغیرهای مستقل و اعتبارسنجی پیش‌بینی‌های به عمل آمده مطابق با اطلاعات جدول ۴ آورده شده است.

Table 4. Predicted optimal response conditions for PVA-CSO nanocarrier

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Predicted	Validated
A:CSO concentration (wt.%)	is in range	10	20	11.422	12
B:Pump rate (mL/h)	is in range	1.625	3.875	2.716	2.75
C:Distance (cm)	is in range	11.25	18.75	16.431	15
D:Applied voltage (kV)	is in range	15	25	23.702	25
Diameter (nm)	minimize	422.9	726.2	420.626	422.8

به منظور بررسی ریزساختار نانوحامل PVA-CSO، شکل ۵ تصویر SEM نمونه الکترورسی شده در شرایط بهینه را نشان می‌دهد.

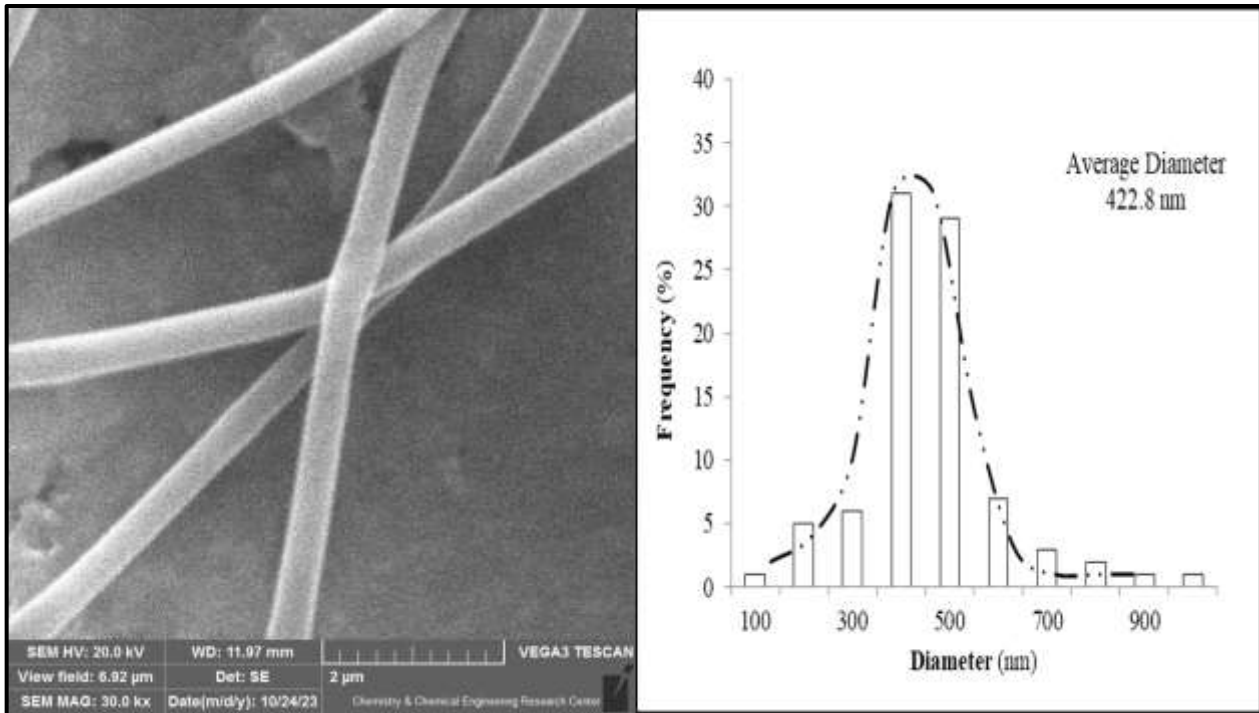


Fig 5. SEM image and diameter distribution histogram of PVA-CSO nanocarrier in optimal electrospinning condition

متغیرهای الکترورسی را تأیید می‌نماید. پراکندگی قطر نانوحامل به صورت نرمال می‌باشد. همچنین سایز حدود ۶۰ درصد نانوالیاف، در محدوده ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر قرار دارد که مطلوب می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج SEM می‌توان نتیجه گرفت که نانوحامل PVA-CSO حاصل شده با قطری در محدوده ۴۲۰ نانومتر از نظر یکنواختی قابل قبول می‌باشند. نرمال بودن پراکنش نانوحامل تشکیل شده یکی از عوامل مهم تأیید این فرایند می‌باشد [۴۱]. با توجه به نتایج تصویر SEM، نانوحامل یکنواخت و بدون مهره تشکیل شده‌اند. همچنین تجمع خاصی در تصویر مشاهده نمی‌شود که بهینه بودن شرایط

این تحقیق با هدف بهینه‌سازی شرایط الکترووریسی نانوحامل‌های PVA حاوی روغن دانه کاملینا (CSO) انجام شد. با استفاده از طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) و تحلیل آماری نتایج، تأثیر متغیرهای فرآیندی بر قطر نانوحامل‌ها و مورفولوژی آن‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که پلیمر PVA سازگاری بالایی با شرایط الکترووریسی دارد و می‌تواند به‌عنوان ماتریکس مناسبی برای انکپسوله کردن اسانس‌ها و عصاره‌های گیاهی از جمله CSO مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، نانوحامل‌های تولیدشده با قابلیت ره‌ایش کنترل‌شده ترکیبات زیست‌فعال، پتانسیل قابل توجهی برای بهبود عملکرد بسته‌بندی فعال و حسگرهای هوشمند در صنعت غذا دارند. این یافته‌ها نشان‌دهنده اثربخشی روش بهینه‌سازی ارائه‌شده برای توسعه سامانه‌های کاربردی در صنایع غذایی است.

تأمین مالی

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ بودجه‌ای دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمام فعالیت‌ها توسط نویسنده انجام شده است.

منافع رقابتی

نویسنده تأیید می‌کند که هیچ گونه تضاد منافع مالی یا منافع رقابتی در این مطالعه ندارد.

۶- منابع

- [1] Khaledi, S., et al., *An innovative anti-radical electrospun nanofiber patch infused with microwave-roasted polyphenol-rich Camelina (Camelina sativa L.) seed oil as controlled release food packaging: S. Khaledi et. al. Journal of Food Measurement and Characterization*, 2025: p. 1-17.
- [2] Emam-Djomeh, Z., M. Ekrami, and A. Ekrami, *Design and use of hydrogels for food component encapsulation. Materials Science and Engineering in Food Product Development*, 2023: p. 211-226.
- [3] Ekrami, M., et al., *Next-Generation Smart and Safe Foods: Artificial Intelligence-Driven Strategies for 4D Food Pre-Printing Challenges. Trends in Food Science & Technology*, 2025: p. 105317.
- [4] Farahmand, E., et al., *Polymethacrylate coated electrospun chitosan/PEO nanofibers loaded with thyme essential oil: a newfound potential for antimicrobial food packaging. Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 2023. **6**(2): p. 8-16.
- [5] Ekrami, M., et al., *Nanotechnology-based formulation for alternative medicines and natural products: an introduction with clinical studies. 2022.*
- [6] Pires, J.B., et al., *Essential oil encapsulation by electrospinning and electrospraying using food proteins: A review. Food Research International*, 2023. **170**: p. 112970.
- [7] Mondor, M. and A.J. Hernández-Álvarez, *Camelina sativa composition, attributes, and applications: A review. European Journal of Lipid Science and Technology*, 2022. **124**(3): p. 2100035.
- [8] Zanetti, F., et al., *Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. Agronomy for Sustainable Development*, 2021. **41**(1): p. 2.
- [9] Ghobadi, R., et al., *Nutritional properties and benefits of camelina oil and meal. Agrotechniques in Industrial Crops*, 2021. **1**(2): p. 71-76.
- [10] Sheybani, F., et al., *Application of nanostructured lipid carriers containing α -tocopherol for oxidative stability enhancement of camelina oil. Industrial Crops and Products*, 2023. **202**: p. 117007.
- [11] Ekrami, M., et al., *Food-based polymers for encapsulation and delivery of bioactive compounds. 2022.*
- [12] Taheri-Shakib, J. and A. Kantzas, *A comprehensive review of microwave application on the oil shale: Prospects for shale oil production. Fuel*, 2021. **305**: p. 121519.
- [13] Walayat, N., et al., *Oxidative stability, quality, and bioactive compounds of oils obtained by ultrasound and microwave-assisted oil extraction. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024. **64**(27): p. 9974-9991.
- [14] Asadzadeh, R., et al., *Optimization of the electrospinning process of hybrid nanocarrier based on mung bean (Vigna radiate L.) protein/poly (vinyl alcohol). Food Engineering Research*, 2024. **23**(1): p. 165-182.
- [15] Tehrani, E. and S. Amiri, *Synthesis and characterization PVA electro-spun nanofibers containing encapsulated vitamin C in chitosan microspheres. The Journal of the Textile Institute*, 2022. **113**(2): p. 212-223.

- [16] de Jesus Silva, J., et al., *Encapsulation of açai (Euterpe oleracea) pulp with whey protein isolate by spray-drying: An optimization study using response surface methodology (RSM)*. Food and Humanity, 2023. **1**: p. 1539-1546.
- [17] Mahdavi, Z., et al., *Application of RSM-CCD methodology and image J. for modeling and optimization of orchid protocorm encapsulation*. Heliyon, 2025. **11**.(۴)
- [18] Rezaei, S., et al., *Qualitative and quantitative assessment of extracted oil from Camelina sativa seed treated by dielectric-barrier discharge cold plasma*. Contributions to Plasma Physics, 2020. **60**(9): p. e202000032.
- [19] Zeinali, T., et al., *Fabrication and characterization of jujube extract-loaded electrospun polyvinyl alcohol nanofiber for strawberry preservation*. Food science & nutrition, 2021. **9**(11): p. 6353-6361.
- [20] Ekrami, M., et al., *pH-Responsive Color Indicator of Saffron (Crocus sativus L.) Anthocyanin-Activated Salep Mucilage Edible Film for Real-Time Monitoring of Fish Fillet Freshness*. Chemistry, 2022. **4**(4): p. 1360-1381.
- [21] Senthilkumar, T., S. Chattopadhyay, and L.R. Miranda, *Optimization of activated carbon preparation from pomegranate peel (Punica granatum peel) using RSM*. Chemical engineering communications, 2017. **204**(2): p. 238-248.
- [22] Chinnappan, B.A., et al., *Electrospinning of biomedical nanofibers/nanomembranes: Effects of process parameters*. Polymers, 2022. **14**(18): p. 3719.
- [23] Ahmadi Bonakdar, M. and D. Rodrigue, *Electrospinning :Processes, structures, and materials*. Macromol, 2024. **4**(1): p. 58-103.
- [24] Ji, D., et al., *Electrospinning of nanofibres*. Nature Reviews Methods Primers, 2024. **4**(1): p. 1.
- [25] Keirouz, A., et al., *The history of electrospinning: past, present, and future developments*. Advanced Materials Technologies, 2023. **8**(11): p. 2201723.
- [26] Yang, J. and L. Xu, *Electrospun nanofiber membranes with various structures for wound dressing*. Materials, 2023. **16**(17): p. 6021.
- [27] Li, L., et al., *Electrospun fibers control drug delivery for tissue regeneration and cancer therapy*. Advanced Fiber Materials, 2022. **4**(6): p. 1375-1413.
- [28] Han, W., et al., *A review: Current status and emerging developments on natural polymer-based electrospun fibers*. Macromolecular Rapid Communications, 2022. **43**(21): p. 2200456.
- [29] Lenth, R.V., *Response-surface methods in R, using rsm*. Journal of statistical Software, 2010. **32**: p. 1-17.
- [30] Baş, D. and İ.H. Boyacı, *Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology*. Journal of food engineering, 2007. **78**(3): p. 836-845.
- [31] Khuri, A.I. and S. Mukhopadhyay, *Response surface methodology*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010. **2**(2): p. 128-149.
- [32] Topuz, F., et al., *Nanofiber engineering of microporous polyimides through electrospinning: Influence of electrospinning parameters and salt addition*. Materials & Design, 2021. **198**: p. 109280.
- [33] Hosseini, F., et al., *Encapsulation of rosemary essential oil in zein by electrospinning technique*. Journal of Food Science, 2021. **86**(9): p. 4070-4086.
- [34] Ziyadi, H., et al., *An investigation of factors affecting the electrospinning of poly (vinyl alcohol)/kefiran composite nanofibers*. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2021. **4**: p. 768-779.
- [35] Cho, Y., et al., *Electrospinning and nanofiber technology: fundamentals, innovations, and applications*. Advanced Materials, 2025. **37**(28): p. 2500162.
- [35] Theron, S., E. Zussman, and A. Yarin, *Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions*. Polymer, 2004. **45**(6): p. 2017-2030.
- [36] Lian, S., D. Lamprou, and M. Zhao, *Electrospinning technologies for the delivery of Biopharmaceuticals: Current status and future trends*. International Journal of Pharmaceutics, 2024. **651**: p. 1.۲۳۶۴۱
- [37] Li, Z., et al., *Effects of working parameters on electrospinning. One-dimensional nanostructures: Electrospinning technique and unique nanofibers*, 2013: p. 15-28.
- [38] Rieger, K.A., N.P. Birch, and J.D. Schiffman, *Electrospinning chitosan/poly (ethylene oxide) solutions with essential oils: Correlating solution rheology to nanofiber formation*. Carbohydrate polymers, 2016. **139**: p. 131-138.
- [39] Shabani, A., et al., *Electrospinning Technology, Machine Learning, and Control Approaches: A Review*. Advanced Engineering Materials, 2025. **27**(7): p. 2401353.
- [40] Sencadas, V., et al., *Determination of the parameters affecting electrospun chitosan fiber size distribution and morphology*. Carbohydrate Polymers, 2012. **87**(2): p. 1295-1301.



Scientific Research

Optimizing the Electrospinning Process of Poly vinyl alcohol-Based Nanocarriers Containing Microwave-Roasted Camelina (*Camelina sativa* L.) Seed Oil

Sanaz Khaledi¹, Nafiseh Jahanbakhshian^{2*}, Zahra Emam-Djomeh³, Sediqeh Soleimanifard⁴, Zahra Beigmohammadi¹

1-Department of Food Science and Technology, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2-Department of Food Science and Technology, ShK.C., Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

3-Transfer Phenomena Laboratory (TPL), Department of Food Science, Technology and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

4-Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2025/07/28

Review: 2025/09/30

Accepted: 2025/10/07

Keywords:

Nanocarrier,
Electrospinning,
Camelina oil,
Response surface methodology,
Roasted

DOI: 10.48311/fsct.2026.84077.0

*Corresponding Author E-

njahanbakhshian@iau.ac.ir

Nanocarriers, as advanced delivery systems for bioactive compounds, play a pivotal role in enhancing stability, improving functionality, and enabling innovative applications in food and packaging industries. This study focuses on the fabrication and optimization of biocompatible nanocarriers based on poly(vinyl alcohol) (PVA) loaded with microwave-roasted *Camelina sativa* seed oil (CSO), aimed at applications in smart food packaging. Electrospinning combined with Response Surface Methodology (RSM) using a Central Composite Rotatable Design (CCRD) was employed to investigate the effects of key processing variables, including oil concentration (5–25% w/w), applied voltage (10–30 kV), tip-to-collector distance (7.5–22.5 cm), and pump rate (0.5–5 mL/h), on the nanocarrier diameter. The developed regression model showed a high degree of fit, confirming strong correlations between the factors and response ($R^2=0.998$). Analysis of variance and Pareto chart indicated that pump rate and CSO concentration significantly influenced fiber diameter. Increasing CSO concentration led to thicker and more uniform fibers, attributed to higher viscosity and reduced charge density. These nanocarriers offer controlled release of bioactive compounds and are promising candidates for use in active and intelligent food packaging systems.