

بهینه‌سازی پارامترهای الکتروریسی برای ساخت نانوالیاف پلی‌وینیل الکل حاوی عصاره جینسنگ قرمز (*Panax ginseng* C.A. Meyer) با استفاده از روش سطح پاسخ

بهداد شکرالهی^{۱*}، یانچشمه^{۲*}، محمد اکرامی^۳، ملیحه سالاری شورابی^۳

۱ گروه پژوهشی مهندسی تولید مواد غذایی، مؤسسه ملی مواد غذایی، دانشگاه فنی دانمارک، دانمارک

۲ گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳ گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

چکیده

الکتروریسی روشی کارآمد برای تولید نانوحامل‌های پلیمری یکتواخت به‌منظور ریزپوشانی ترکیبات زیست‌فعال است. در این پژوهش، پارامترهای فرآیندی الکتروریسی نانوالیاف پلی‌وینیل الکل (بارگذاری شده با عصاره جینسنگ قرمز *Panax ginseng* C.A. Meyer) با استفاده از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی بهینه‌سازی شد. متغیرهای مستقل شامل غلظت عصاره (۲ تا ۶ درصد حجمی)، ولتاژ اعمالی (۱۲/۵ تا ۲۲/۵ کیلوولت)، دبی پمپ (۰/۴ تا ۱/۲ میلی‌لیتر بر ساعت) و فاصله نوک تا جمع‌کننده (۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر) بودند. ویژگی‌های فیزیکی محلول‌ها و ریخت‌شناسی (مورفولوژی) الیاف با دقت ارزیابی گردید. تحلیل آماری حاکی از آن است که مدل درجه دوم توسعه‌یافته از برازش بسیار مطلوبی با داده‌های تجربی برخوردار است ($R^2=0/9977$). شرایط بهینه برای تولید نانوحامل یکتواخت با قطر ۲۶۰ نانومتر عبارت بود از: غلظت عصاره ۵/۳ درصد، فاصله ۱۵ سانتی‌متر، ولتاژ ۵/۲۱ کیلوولت و دبی ۷۵/۰ میلی‌لیتر بر ساعت؛ این شرایط پیش‌بینی شد. در این شرایط بهینه، بازده ریزپوشانی عصاره ۷۸/۴ درصد به‌دست آمد که کارایی بالای این سامانه را نشان می‌دهد. بررسی‌ها تأیید کرد که تغییرات ویسکوزیته و هدایت الکتریکی محلول ناشی از عصاره، عامل اصلی تعدیل قطر الیاف است. این یافته‌ها پتانسیل نانوالیاف پلی‌وینیل الکل را برای رهاسازی کنترل‌شده ترکیبات حساس جینسنگ قرمز تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الکتروریسی، جینسنگ قرمز، نانوالیاف پلی‌وینیل الکل، ریزپوشانی، روش سطح پاسخ

مقدمه

هدفمند، مهندسی‌بافت، فیلتراسیون پیشرفته و حسگرهای هوشمند کاربرد گسترده‌ای دارند. در فرآیند الکتروریسی، اعمال ولتاژ بالا بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده، میدان الکتریکی لازم را ایجاد می‌کند. با خروج قطره محلول پلیمری از سوزن، نیروهای الکترواستاتیک بر کشش سطحی غلبه می‌کنند و قطره به ساختار مخروطی تیلاور تبدیل می‌شود (Shabani et al., 2025). پس از آن، جت مایع تحت تأثیر تنش‌های الکتریکی کشیده خواهد شد و در مسیر خود دچار ناپایداری‌های خمشی می‌شود. هم‌زمان با تبخیر سریع حلال،

نانوساختارهای غذایی و دارویی را می‌توان با روش‌های الکترویهیدرودینامیکی مانند الکتروریسی و الکترواسپری تولید کرد. هنگامی که این روش برای ریزپوشانی ترکیبات زیست‌فعال به کار می‌رود، افزایش چشمگیر سطح ویژه باعث می‌شود تا بخش بیشتری از مولکول‌های هدف در معرض محیط قرار گیرند که این ویژگی، کارایی آنها را در کاربردهای متنوع دارویی و غذایی بالا می‌برد (Emam-Djomeh et al., 2024). نانوالیاف پلیمری در حوزه‌هایی مانند دارورسانی

مرطوب و فاصله طولانی باعث اتلاف انرژی می شود. سرعت پمپ نیز با تعیین حجم مواد ورودی، بر قطر الیاف و راندمان تولید تأثیر مستقیم دارد. شرایط محیطی مانند دما و رطوبت نسبی نیز بر سینتیک تبخیر حلال و مورفولوژی سطح الیاف اثرگذارند. بنابراین، دستیابی به نانوالیاف یکنواخت و بدون عیب نیازمند تنظیم دقیق و همزمان تمامی این متغیرهاست که پیچیدگی فرآیند و ضرورت استفاده از روش های بهینه سازی چندمتغیره را نشان می دهد (Huang et al., 2025).

در میان پلیمرهای زیست سازگار، پلی (وینیل الکل) (PVA) به دلیل زیست تخریب پذیری، سازگاری زیستی عالی، خواص مکانیکی مطلوب و سینتیک رهاسازی رهاسازیرها سازی قابل کنترل، به عنوان حاملی ایده آل در سیستم های دارورسانی مورد توجه است (Rêgo et al., 2025). توانایی پلی (وینیل الکل) در تشکیل فیلم های شفاف، قابلیت پردازش با درجه های هیدرولیز مختلف (که بر میزان تخریب و برهمکنش با ترکیبات فعال تأثیر می گذارد) و سازگاری آن با روش الکتروریسی، این پلیمر را به گزینه ای برتر برای کپسوله سازی ترکیبات حساس تبدیل کرده است (Ekrami et al., 2026). مطالعات اخیر کارایی نانوالیاف الکتروریسی شده پلی (وینیل الکل) را به عنوان حاملی کارآمد برای ریزپوشانی طیف وسیعی از عصاره های گیاهی از جمله شاهی (*Lepidium sativum*) (Amer et al., 2022)، سرخارگل (*Echinacea purpurea*) (Fahimirad et al., 2023a)، مازو (*Quercus infectoria*) (Fahimirad et al., 2023b)، بومادران (*Glycyrrhiza glabra*) (Shahid and Khan, 2022)، عناب (*Ziziphus jujuba*) (Fahimirad et al., 2024) و کنگر فرنگی (*Cynara scolymus*) (Al Horani et al., 2024) تأیید کرده اند. این نانوحامل ها با بهبود پایداری ترکیبات فنولی و زیست فعال، تسهیل رهاسازی کنترل شده و ایجاد ساختار متخلخل تنفس پذیر، کاربردهای موفقی در تسریع

جت به تدریج خشک می شود و به صورت نانوالیاف جامد با قطر کنترل شده روی جمع کننده رسوب می کند (Sree et al., 2025). راندمان و ریخت شناسی نهایی نانوالیاف به شدت تحت تأثیر سه دسته پارامتر قرار دارد: ویژگی های محلول (ویسکوزیته، هدایت الکتریکی، غلظت پلیمر و عصاره)، شرایط محیطی (دما و رطوبت نسبی) و پارامترهای فرآیندی (ولتاژ، فاصله نوک تا جمع کننده، قطر سوزن و سرعت پمپ). دستیابی به نانوالیافی یکنواخت، بدون قطره زدگی^۱ و با توزیع قطر باریک، مستلزم تنظیم دقیق این متغیرهاست (Rahbari et al., 2024).

مکانیسم تشکیل نانوالیاف در فرآیند الکتروریسی بر پایه برهم کنش پیچیده میان نیروهای الکترواستاتیک، کشش سطحی، ویسکوز و گرانشی استوار است (Huang et al., 2025). با اعمال ولتاژ بالا، بارهای الکتریکی در سطح قطره محلول تجمع می یابد و با غلبه بر کشش سطحی، مخروط تیلور تشکیل می شود. جت خروجی از نوک مخروط تحت ناپایداری های خمشی قرار می گیرد و همزمان با تبخیر حلال، از مقیاس میکرومتری به نانومتری کشیده می شود. ویژگی های فیزیکی محلول نقش تعیین کننده ای در ریخت شناسی (مورفولوژی) نهایی دارد. ویسکوزیته پایین منجر به تشکیل قطره های مجزا و ویسکوزیته بالا باعث انسداد سوزن می گردد (Ahmadi Bonakdar and Rodrigue, 2024). هدایت الکتریکی بالاتر با افزایش تراکم بارهای سطحی، کشش جت را تشدید می کند و قطر الیاف را کاهش می دهد، اما مقادیر بیش از حد آن ناپایداری جت را به همراه دارد. کشش سطحی نیز به عنوان نیروی مقاوم در برابر تغییر شکل قطره، بر آستانه تشکیل جت اثرگذار است و کاهش آن معمولاً فرآیند را تسهیل می کند. در میان پارامترهای فرآیندی، ولتاژ اعمالی نیروی محرکه اصلی را تأمین می کند و افزایش آن تا حد بهینه قطر الیاف را کاهش می دهد (Ji et al., 2024). فاصله نوک سوزن تا جمع کننده، بر زمان پرواز و تبخیر حلال مؤثر است؛ فاصله کوتاه منجر به الیاف

¹ Bead-free

گیاهی مختلف توسعه یافته‌اند، اما مطالعه سیستماتیک روی بهینه‌سازی فرآیند الکتروریسی نانوالیاف پلی‌(وینیل الکل) حاوی عصاره جینسنگ قرمز با هدف کنترل دقیق مورفولوژی و بهبود عملکرد رهاسازی گزارش نشده است. از آنجا که دستیابی به نانوالیافی با قطر یکنواخت و بدون نقص ساختاری، وابستگی شدیدی به تعامل پیچیده میان پارامترهای فرآیندی دارد و کنترل تجربی تک‌متغیره قادر به کشف برهمکنش‌های غیرخطی نیست، در پژوهش حاضر از روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM) برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرهای مؤثر استفاده شد. هدف نهایی این مطالعه، تولید نانوحامل‌های پلی‌(وینیل الکل) بارگذاری‌شده با عصاره جینسنگ قرمز با مورفولوژی بهینه، بهبود پایداری فیزیکوشیمیایی ترکیبات فعال، افزایش انحلال‌پذیری ظاهری و ارائه سیستمی کارآمد برای رهاسازی کنترل‌شده این عصاره ارزشمند است.

مواد و روش‌ها

مواد

ریشه جینسنگ قرمز از بازار محلی کرج - ایران تهیه گردید. پلی وینیل الکل (PVA) با وزن مولکولی متوسط ۷۲۰۰۰ گرم بر مول و درجه هیدرولیز ۸۹-۸۸ درصد، به همراه اتانول با خلوص ۹۸ درصد از شرکت مرک^۱ آلمان خریداری و بدون خالص‌سازی اضافی استفاده شد. کلیه حلال‌ها و معرف‌های مورد استفاده از نوع آنالیتیکال گرید بودند. آب دیونیزه سه بار تقطیر (زالال طب شیمی، ایران) برای تهیه محلول‌های آبی به کار رفت.

روش‌ها

استخراج عصاره جینسنگ قرمز

عصاره جینسنگ قرمز (RGE) بر اساس پروتکل بهینه‌شده پیشنهادی توسط لی و همکاران (Lee *et al.*, 2024) با اندکی اصلاحات به منظور سازگاری با فرآیند الکتروریسی استخراج شد. در ابتدا پودر ریشه جینسنگ قرمز با اندازه ذرات کمتر از ۵۰۰ میکرومتر (الک مش ۳۵

ترمیم زخم، فعالیت ضد میکروبی علیه پاتوژن‌های پوستی، و توسعه بسته‌بندی‌های هوشمند غذایی نشان داده‌اند. این پیشینه‌ها نشان می‌دهند که ماتریس پلی‌(وینیل الکل) نه تنها ساختار فیزیکی مناسبی برای محافظت از ترکیبات فعال فراهم می‌کند، بلکه امکان تنظیم تخلخل و معماری سطحی را برای کاربردهای هدفمند میسر می‌سازد.

بسیاری از ترکیبات زیست‌فعال گیاهی به دلیل ماهیت آب‌گریزی، حساسیت به عوامل محیطی (نور، اکسیژن، دما و تغییرات pH) و فراهمی زیستی پایین، استفاده مستقیم در فرمولاسیون‌های غذایی و دارویی را با چالش مواجه می‌سازند (Emam-Djomeh *et al.*, 2023b, Mirzakhani *et al.*, 2018). جینسنگ قرمز (*Panax ginseng* C.A. Meyer) یکی از ارزشمندترین گیاهان دارویی در طب سنتی آسیای شرقی است که عصاره آن طی فرآیند بخاردهی و خشک‌کردن کنترل‌شده از ریشه این گیاه تهیه می‌شود (Ji *et al.*, 2022). این فرآوری نه تنها پروفایل فیتوشیمیایی را تغییر می‌دهد، بلکه باعث تبدیل جینسنوسیدهای اولیه به فرم‌های فعال‌تر و کم‌یاب‌تری مانند Rh1، Rh2 و Rg3 می‌شود که مسئول عمده خواص آنتی‌اکسیدانی، تعدیل‌کنندگی ایمنی، ضدالتهابی و ترمیم بافتی این گیاه هستند (Feng *et al.*, 2024). علاوه بر جینسنوسیدها، وجود پلی‌ساکاریدهای فعال، پپتیدها و ترکیبات فنولی، اثرهای هم‌افزایی قابل توجهی به عصاره جینسنگ قرمز بخشیده است (Xu *et al.*, 2024). با این حال، ناپایداری این ترکیبات در برابر حرارت و اکسیداسیون، طعم تلخ و گس، و انحلال‌پذیری محدود در محیط‌های آبی، فراهمی زیستی و اثربخشی بالینی آنها را محدود کرده است (Kong *et al.*, 2023).

ریزپوشانی در ماتریس‌های پلیمری می‌تواند با ایجاد سدی فیزیکی و کنترل شرایط رهاسازی، از تخریب زودهنگام ترکیبات حساس جلوگیری کند و دسترسی آنها را به بافت هدف افزایش دهد (Emam-Djomeh *et al.*, 2023a). تاکنون، اگرچه نانوحامل‌های متعددی برای عصاره‌های

^۱ Merck

گردد. الکتروریسی با استفاده از دستگاه افقی دست‌ساز در شرایط کنترل‌شده دمایی (1 ± 25 درجه سلسیوس) و رطوبت نسبی (1 ± 30 درصد) انجام پذیرفت. سیستم الکتروریسی شامل پمپ سرنگی دقیق (ترومو^۵، ژاپن) با محدوده دبی ۰/۱ تا ۱۰ میلی‌لیتر بر ساعت، سرنگ ۱ میلی‌لیتری مجهز به سوزن استیل گیج ۱۸، و منبع ولتاژ بالا (گلاسمن^۶، آمریکا) با ورودی ۲۲۰ ولت AC، خروجی قابل تنظیم تا ۳۰ کیلوولت DC بود. الکتروود مثبت به نوک سوزن و الکتروود منفی به جمع‌کننده چرخان استوانه‌ای پوشش‌دهی‌شده با فویل آلومینیم متصل گردید. محلول الکتروریسی در سرنگ بارگذاری‌شده و تحت پارامترهای فرآیندی تعیین‌شده (مطابق جدول طراحی آزمایش) الکتروریسی شد. نانوالیاف تولیدشده بلافاصله پس از جمع‌آوری، در دسیکاتور حاوی سیلیکاژل و دور از نور نگهداری شدند تا از جذب رطوبت و تخریب اکسیداتیو ترکیبات فعال جلوگیری شود.

ارزیابی محلول الکتروریسی کشش سطحی

کشش سطحی محلول‌های الکتروریسی حاوی عصاره جینسنگ قرمز با استفاده از دستگاه کشش‌سنج دیجیتال ساخت شرکت کرویس^۷ آلمان و بر اساس روش استاندارد صفحه ویلهلمی^۸ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. در این روش، یک صفحه پلاتینی به‌طور عمودی در سطح مایع فرو برده می‌شود و نیروی ناشی از کشش سطحی با دقت بالا توسط سنسور دستگاه ثبت می‌گردد. تمامی اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار دنبال شد و نتایج به‌صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش گردید.

ویسکوزیته دینامیکی

آماده‌سازی گردید. به‌منظور استخراج، نسبت ۱:۲۰ (وزن به حجم) پودر جینسنگ قرمز به آب دیونیزه در ارلن مایر در دار مخلوط و در حمام آب (ممرت^۱، آلمان) تحت شرایط دمایی ۹۰ درجه سلسیوس و زمان ۶۰ دقیقه با هم‌زدن ملایم (۱۰۰ دور بر دقیقه) قرار گرفت. پس از اتمام زمان استخراج، مخلوط بلافاصله از حمام حرارتی خارج و سریعاً با استفاده از حمام آب-یخ به دمای زیر ۳۰ درجه سلسیوس خنک‌سازی شد. عصاره حاصل ابتدا از صافی پارچه‌ای نخی و پس از آن از کاغذ صافی واتمن شماره ۱ عبور داده شد تا ذرات جامد معلق کاملاً حذف گردند. محلول شفاف حاصل با استفاده از روتاری اواپراتور (هایدولف^۲، آلمان) در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و تحت خلأ جزئی تا حدود یک‌دهم حجم اولیه غلیظ‌سازی شد. کنسانتره نهایی با روش انجماد-خشک‌کردن (کریست^۳، آلمان) به پودر خشک تبدیل گردید. بازده استخراج عصاره بر اساس وزن خشک اولیه محاسبه ($20/1 \pm 8/3$ درصد وزن خشک) و پودر عصاره تا زمان استفاده در دمای ۲۰- درجه سلسیوس، در ظروف شیشه‌ای تیره دربسته و دور از نور نگهداری شد.

تولید نانوحامل حاوی عصاره جینسنگ قرمز

محلول پایه پلی(وینیل الکل) با غلظت ۱۰ درصد وزنی/حجمی در آب دیونیزه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت تحت هم‌زدن مداوم حل شد و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای تکمیل‌شدن فرآیند هیدراتاسیون و حذف حباب‌های هوا، تحت هم‌زدن آرام قرار گرفت (Ekrami et al., 2025). عصاره جینسنگ قرمز (RGE) با درصدهای حجمی مشخص (مطابق طرح آزمایش) به محلول پلی(وینیل الکل) اضافه گردید و مخلوط حاصل به مدت ۵ دقیقه با دستگاه اولتراسونیک پروب‌دار (هیلشر^۴، آلمان؛ پروب ۰/۱۲۵ اینچ، توان ۷۵ درصد، پالس‌دهی ۵۰ درصد) هم‌گن‌سازی شد تا توزیع یکنواخت ترکیبات فعال در ماتریس پلیمری تضمین

⁵ Terumo

⁶ Glassman

⁷ Krüss

⁸ Wilhelmy plate method

¹ Memmert

² Heidolph

³ Christ

⁴ Hielscher

چهار متغیر مستقل شامل: غلظت عصاره جینسنگ قرمز (۱ تا ۵ درصد حجمی)، ولتاژ اعمالی (۱۲/۵ تا ۲۲/۵ کیلوولت)، دبی پمپ (۰/۴ تا ۱/۲ میلی‌لیتر بر ساعت) و فاصله نوک سوزن تا جمع کننده (۷/۵ تا ۲۵ سانتی‌متر) به عنوان فاکتورهای مؤثر انتخاب گردیدند. میانگین قطر نانوالیاف (بر حسب نانومتر) به عنوان پاسخ اصلی در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی ریاضی و برازش داده‌های تجربی، از معادله چندجمله‌ای درجه دوم زیر استفاده شد:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن: Y پاسخ پیش‌بینی شده، β_0 عرض از مبدأ، β_i ضرایب خطی، β_{ii} ضرایب درجه دوم، β_{ij} ضرایب برهمکنش، X_i و X_j متغیرهای مستقل کدگذاری شده و ε خطای تصادفی است. تحلیل واریانس (ANOVA)، بررسی معنی‌داری مدل، ضریب تعیین (R^2) و بهینه‌سازی چندپاسخ با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert نسخه ۱۱ انجام پذیرفت. جدول ۱ سطوح کدگذاری شده پارامترهای الکتروریسی نانوحامل پلی‌وینیل الکل حاوی عصاره جینسنگ قرمز را نشان می‌دهد

جدول ۱- مقادیر واقعی و کدگذاری شده متغیرها بر اساس طراحی مرکب مرکزی برای قطر نانوحامل

Table 1. Actual and coded values of variables based on central composite design of nanocarrier diameter				
متغیر/سطح Variable/Level	+1	0	-1	-آلفا -α
غلظت (درصد حجمی/حجمی) RGE concentration (%v/v)	7.4	4	2	0.6
ولتاژ اعمالی (کیلوولت) Applied voltage (kV)	26.1	17.5	12.5	8.9
فاصله بین نوک سوزن و جمع کننده (سانتی متر) Distance between needle tip and collector (cm)	35.4	22.5	15	9.6
سرعت پمپ (میلی لیتر بر ساعت) Pump rate (mL/h)	1.4	0.8	0.4	0.1

ویسکوزیته دینامیکی محلول‌های الکتروریسی با استفاده از رئومتر لوله‌ای برشی ساخت شرکت بروکفیلد^۱ آمریکا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در محدوده سرعت برشی ۱ تا ۱۰۰۰ بر ثانیه با ثبت ۱۰ نقطه قرائت در هر دهه لگاریتمی تعیین گردید.

هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی محلول‌های الکتروریسی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج قابل حمل ساخت شرکت دبلویتی دبلو^۲ آلمان اندازه‌گیری شد. پیش از هر اندازه‌گیری، دستگاه با استفاده از محلول‌های استاندارد کالیبره گردید و الکتروده دستگاه با آب دیونیزه شست‌وشو داده شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار اجرا شد و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند.

بهینه‌سازی شرایط الکتروریسی نانوحامل

به منظور تعیین شرایط بهینه تولید نانوحامل‌های بارگذاری شده با عصاره جینسنگ قرمز (PVA_{NF}-RGE) با حداقل قطر و مورفولوژی یکنواخت، از روش سطح پاسخ (RSM) مبتنی بر طرح مرکب مرکزی (CCD) استفاده شد.

مشخصه‌یابی ریخت‌شناسی و آنالیز قطر نانوالیاف

(تی اسکن^۳، جمهوری چک) برای تصویربرداری استفاده شد. پیش از آنالیز، نمونه‌های نانوالیاف روی پایه‌های رسانا نصب گردیدند و به منظور جلوگیری از تجمع بار الکتریکی و بهبود کنتراست تصویر، با لایه‌ای نازک از طلا توسط دستگاه اسپاتر

به منظور بررسی ریزساختار و ارزیابی ریخت‌شناسی (مورفولوژی) سطحی نانوحامل‌های بارگذاری شده با عصاره جینسنگ قرمز، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

³ TESCAN

¹ Brookfield
² WTW

ذرات ۵ میکرومتر صورت گرفت. فاز متحرک شامل مخلوط گرادانی آب مقطر حاوی ۰/۱ درصد اسید فرمیک (A) و استونیتریل حاوی ۰/۱ درصد اسید فرمیک (B) بود که با دبی ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه پمپاژ شد. برنامه گرادانی به این صورت تنظیم گردید: ۳۰ درصد B در دقیقه صفر تا ۵، افزایش خطی به ۵۰ درصد B در دقیقه ۵ تا ۲۵، افزایش به ۷۰ درصد B در دقیقه ۲۵ تا ۳۵، و بازگشت به شرایط اولیه در دقیقه ۳۵ تا ۴۰. حجم تزریق نمونه ۲۰ میکرولیتر و دمای ستون ۳۰ درجه سلسیوس تنظیم شد. شناسایی و کمی‌سازی جینسنوسیدها در طول موج ۲۰۳ نانومتر و با مقایسه زمان بازداری نمونه‌ها با استانداردهای خارجی جینسنوسیدهای مرجع صورت گرفت. منحنی استاندارد هر جینسنوسید در محدوده غلظتی ۱۰ تا ۱۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر ترسیم و ضریب همبستگی (R^2) بالای ۰/۹۹ برای تمامی ترکیبات به دست آمد. بازده ریزپوشانی بر اساس معادله ۲ محاسبه گردید:

$$\text{Encapsulation efficiency (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

که در آن: C_i مقدار تئوری کل عصاره جینسنگ قرمز وارد شده به نانوحامل و C_f مقدار عصاره آزاد در محلول استخراج کننده است. تمامی اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار اجرا شدند.

نتایج و بحث

ارزیابی محلول الکترورسی

تحلیل محلول‌های الکترورسی (جدول ۲) نشان می‌دهد که افزودن عصاره جینسنگ قرمز به ماتریس پلی‌وینیل الکل، اگرچه در نگاه نخست تغییراتی در جهت تسهیل فرآیند ایجاد می‌کند، اما در عمل با برهم زدن تعادل ظریف میان نیروهای حاکم بر دینامیک جت، منجر به افزایش قطر نانوالیاف و کاهش کیفیت مورفولوژی شده است. این پدیده را باید از طریق بازتعریف نقش هر یک از سه پارامتر فیزیکی در شرایط خاص این سیستم تفسیر کرد. در بخش ویسکوزیته، افزایش تدریجی و معنی دار ($p < 0/05$) این پارامتر با افزودن عصاره

کوثر پوشش‌دهی شدند. تصویربرداری در حالت خلأ بالا و با استفاده از پرتو الکترونی با ولتاژ شتاب‌دهنده در محدوده ۱۵ تا ۳۰ کیلوولت اجرا و تصاویر در بزرگنمایی‌های مختلف ثبت گردید تا هم نمای کلی از یکنواختی شبکه الیاف و هم جزئیات سطحی و وجود احتمالی ناهمگنی‌ها یا قطره‌زدگی به دقت ارزیابی شود. به منظور تعیین کمی قطر نانوالیاف، تصاویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی با کیفیت مناسب توسط نرم‌افزار تحلیل تصویر (ایمیج جی^۱، آمریکا) پردازش شدند. در این تحلیل برای هر نمونه حداقل ۱۰۰ الیاف به صورت تصادفی از تصاویر مختلف انتخاب شد و قطر الیاف در سه نقطه متفاوت اندازه‌گیری و میانگین آن محاسبه گردید (Emam-Djomeh *et al.*, 2025). داده‌های نهایی به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند. توزیع فراوانی قطر‌ها با استفاده از هیستوگرام و برازش منحنی گاوسی تحلیل شد تا یکنواختی فرآیند الکترورسی تحت شرایط بهینه ارزیابی گردد.

کارایی ریزپوشانی

کارایی ریزپوشانی نانوحامل‌های بارگذاری شده با عصاره جینسنگ قرمز بر اساس روش اصلاح‌شده لی و همکاران (۲۰۲۴) (Lee *et al.*, 2024) ارزیابی شد. بدین منظور ۵ میلی‌گرم از نانوالیاف الکترورسی شده در ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ریخته شد و به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه تحت هم‌زدن ملایم قرار گرفت تا ضمن حل شدن عصاره آزاد روی سطح نانوالیاف، از حل شدن پوشش پلیمری پلی‌وینیل الکل و آزاد شدن کاذب عصاره ریزپوشانی شده جلوگیری گردد. پس از آن محلول حاصل سانتریفیوژ گردید.

آنالیز کمی جینسنوسیدها به عنوان شاخص عصاره با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) ساخت شرکت شیمادزو^۲ ژاپن مجهز به آشکارساز فرابنفش- مرئی (SPD-20AV) اجرا گردید. جداسازی ترکیبات روی ستون فاز معکوس C18 با ابعاد $250 \times 4/6$ میلی‌متر و اندازه

² Shimadzu

¹ ImageJ

شود که این پدیده ناپایداری‌های جانبی ایجاد می‌کند و به جای کشش محوری یکنواخت، منجر به پراکندگی جت و تشکیل الیاف با قطر نامنظم و بزرگ‌تر می‌گردد (da Cruz *et al.*, 2023).

در بخش کشش سطحی، کاهش این پارامتر ناشی از حضور ساپونین‌ها و جینسنوسیدها در عصاره، اگرچه تشکیل مخروط تیلور را تسهیل می‌کند، اما کاهش بیش از حد آن می‌تواند اثرهای معکوس داشته باشد. کشش سطحی پایین‌تر به معنای کاهش نیروی بازدارنده در برابر تغییر شکل قطره است، اما این امر باعث می‌شود تا جت در برابر ناپایداری‌های سطحی آسیب‌پذیرتر شود. کاهش کشش سطحی می‌تواند منجر به ناپایداری ریلی-پلاتو^۱ زودرس در جت شود که در آن جت به جای حفظ پیوستگی، تمایل به تجزیه شدن به قطره‌ها دارد. برای مقابله با این ناپایداری، جت ممکن است به صورت موضعی ضخیم‌تر شود تا پایداری خود را حفظ کند که این امر مستقیماً به افزایش قطر الیاف منجر می‌گردد (Huang *et al.*, 2025). ترکیب این سه پدیده (ویسکوزیته بیش از حد که مانع کشش مؤثر جت می‌شود، جریان الکتریکی بالاتر که حجم مواد خروجی را افزایش می‌دهد، و کشش سطحی کاهش‌یافته که ناپایداری‌های سطحی را تشدید می‌کند) همگی در یک جهت همسو می‌شوند و به تولید نانوالیاف با قطر بزرگ‌تر می‌انجامد. این تحلیل نشان می‌دهد که در این سیستم خاص، افزایش غلظت عصاره جینسنگ قرمز از محدوده بهینه فراتر رفته و تعادل نیروهای حاکم بر الکتروریسی را به نفع نیروهای مقاوم در برابر نازک‌شدگی جت برهم زده است. بنابراین، برای دستیابی به الیاف با قطر ظریف‌تر لازم است غلظت عصاره در محدوده‌ای کنترل شود که این پارامترهای فیزیکی در مقادیر بهینه خود باقی بمانند و از بروز اثرهای معکوس جلوگیری شود.

جینسنگ قرمز، اگرچه گزارش شده است که افزایش ویسکوزیته در محدوده‌های مشخص پایداری جت را بهبود می‌بخشد (Kočí *et al.*, 2024)، اما در این سیستم خاص از آستانه بهینه فراتر رفته است. افزایش چسبندگی داخلی محلول ناشی از برهم‌کنش‌های گسترده پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌های عصاره با زنجیره‌های پلی‌وینیل الکل، مقاومت مکانیکی جت را در برابر نیروهای کششی میدان الکتریکی به شدت بالا برده است. در نتیجه، نیروی کولنی اعمال شده دیگر نمی‌تواند با غلبه‌کردن بر این مقاومت داخلی جت را به اندازه کافی نازک کند (Mouro and Gouveia, 2024). علاوه بر این، ویسکوزیته بیش از حد باعث کاهش میزان کشش جت و افزایش زمان ماند آن در مسیر پرواز می‌شود که اگرچه فرصت بیشتری برای تبخیر حلال فراهم می‌کند، اما همزمان از نازک‌شدگی مؤثر جت جلوگیری می‌کند و منجر به تولید الیاف با قطر بزرگ‌تر می‌شود (Stoyanova *et al.*, 2023).

در بخش هدایت الکتریکی، افزایش تراکم حامل‌های بار الکتریکی ناشی از یون‌های معدنی عصاره جینسنگ قرمز، اگرچه انتقال بار به سطح جت را تسهیل می‌کند، اما پیامدهای پیچیده‌ای دارد که در نهایت به افزایش قطر الیاف می‌انجامد. افزایش هدایت الکتریکی مستقیماً باعث افزایش جریان الکتریکی عبوری از جت می‌شود (Ahmadi, Bonakdar and Rodrigue, 2024). جریان بالاتر به معنای آن است که حجم بیشتری از محلول در واحد زمان از نوک سوزن خارج می‌گردد و وارد فرآیند الکتروریسی می‌شود. اگر سرعت تبخیر حلال و سرعت جمع‌آوری الیاف ثابت باشد، این افزایش میزان جریان منجر به تجمع مواد بیشتر روی الیاف و در نتیجه ضخیم‌تر شدن آنها خواهد شد (Martins *et al.*, 2023). علاوه بر این، تراکم بیش از حد بارهای سطحی می‌تواند باعث دفع متقابل شدید بارها در طول جت

^۱ Plateau-Rayleigh instability

جدول ۲. مشخصه‌یابی فیزیکی محلول‌های پلی‌وینیل الکل-عصاره جینسنگ قرمز مورد استفاده در فرآیند الکتروریسی

Table 1. Physical characterization of poly(vinyl alcohol) and poly(vinyl alcohol)-red ginseng extract solutions used for electrospinning

محلول Solution	ویسکوزیته (سانتی پواز) Viscosity (cP)	هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی متر) Electrical conductivity (μ S/cm)	کشش سطحی (میلی نیوتن بر متر) Surface tension (mN/m)
پلی وینیل الکل (۱۰ درصد وزنی) PVA (%10 w/v)	720.8 $\pm$ 4.1e	3322.9 $\pm$ 10.8a	63.8 $\pm$ 0.4a
عصاره جینسنگ قرمز RGE	1170.2 $\pm$ 7.6a	4038.2 $\pm$ 8.2e	40.3 $\pm$ 0.6e
پلی وینیل الکل (۱۰ درصد وزنی) + عصاره جینسنگ قرمز (۲ درصد حجمی) PVA (%10 w/v) + RGE (%2 v/v)	730.9 $\pm$ 5.3de	3379.6 $\pm$ 13.3b	62.9 $\pm$ 0.2b
پلی وینیل الکل (۱۰ درصد وزنی) + عصاره جینسنگ قرمز (۴ درصد حجمی) PVA (%10 w/v) + RGE (%4 v/v)	754.1 $\pm$ 4.9c	3452.7 $\pm$ 9.7c	61.7 $\pm$ 0.2c
پلی وینیل الکل (۱۰ درصد وزنی) + عصاره جینسنگ قرمز (۶ درصد حجمی) PVA (%10 w/v) + RGE (%6 v/v)	783.7 $\pm$ 13.4b	3494.9 $\pm$ 11.4d	59.9 $\pm$ 0.5d

اعداد داخل هر ستون که با حروف متفاوت مشخص شده‌اند، تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد دارند

بهینه‌سازی شرایط الکتروریسی نانوحامل

استاندارد شده هستند که نشان‌دهنده رفتار غیرخطی شدید فرآیند و وجود نقاط بهینه داخلی در محدوده پارامترهای مورد بررسی است. اثر غالب AA بیانگر آن است که تغییرات غلظت عصاره نه تنها به صورت خطی بلکه از طریق برهمکنش‌های مولکولی با زنجیره‌های پلیمری پلی(وینیل الکل)، ویسکوزیته، کشش سطحی و هدایت الکتریکی محلول را به طور نمایی تعدیل می‌کند (Refate *et al.*, 2023). حضور جینسنوسیدها، پلی‌ساکاریدها و ترکیبات فنولی در عصاره تعادل نیروهای الکترویهیدرودینامیکی وارد بر جت مایع را تغییر می‌دهد و در غلظت‌های میانی، کمینه قطر را ایجاد می‌کند (Chinnappan *et al.*, 2022). به طور مشابه، اثر درجه دوم قوی DD تأکید می‌کند که میزان تزریق محلول، پارامتر کلیدی کنترل حجم پلیمر عبوری از میدان است؛ دبی‌های پایین‌تر از حد بهینه منجر به ایجاد نوسان‌های جت و ناپایداری فرآیند می‌شود، در حالی که دبی‌های بالاتر، زمان کافی برای تبخیر حلال و کشیدگی کامل جت را فراهم نمی‌کند و قطر نانوحامل‌ها را به طور غیرخطی افزایش می‌دهند (Sukowati *et al.*, 2025).

جدول ۳ طرح آزمایش مبتنی بر روش سطح پاسخ را با استفاده از طرح مرکب مرکزی و مقادیر پاسخ اندازه‌گیری شده (میانگین قطر نانوالیاف) برای هر یک از آزمایش‌های الکتروریسی نانوحامل‌های پلی وینیل الکل بارگذاری شده با عصاره جینسنگ قرمز نمایش می‌دهد. در این جدول، سطوح کدگذاری شده و واقعی چهار متغیر مستقل شامل غلظت عصاره، ولتاژ اعمالی، فاصله نوک تا جمع کننده و دبی پمپ به همراه پاسخ تجربی متناظر با هر ترکیب آزمایشی درج شده است.

نمودار پارتو اثرهای استاندارد شده (شکل ۱)، اهمیت نسبی هر یک از جملات خطی، درجه دوم و برهمکنشی مدل رگرسیونی را بر پاسخ میانگین قطر نانوحامل‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد (خط مرجع $t=2.13$) ارزیابی می‌کند. عبور میله‌های افقی از این آستانه، معنی‌داری آماری آن پارامتر یا برهمکنش را تأیید می‌کند. بر اساس این نمودار، جملات درجه دوم غلظت عصاره جینسنگ قرمز (AA) و سرعت پمپ (DD) به ترتیب دارای بزرگ‌ترین اثر

جدول ۳- طراحی RSM عوامل واقعی/کد شده و پاسخ تجربی قطر نانوحامل

Table 2. RSM design of actual/coded factors and experimental response of nanocarrier diameter

آزمایش Run	A	B	C	D	غلظت RGE (درصد حجمی) RGE concentration (%v/v)	ولتاژ اعمالی (کیلوولت) Applied voltage (kV)	فاصله (سانتی‌متر) Distance (cm)	سرعت پمپ (میلی لیتر بر ساعت) Pump rate (mL/h)	قطر (نانومتر) Diameter (nm)
1	0	0	0	0	4	17.5	22.5	0.8	284.8
2	0	0	-2	0	4	17.5	9.6	0.8	260.6
3	-1	-1	-1	+1	2	12.5	15	1.2	332.4
4	0	0	0	-2	4	17.5	22.5	0.1	337.1
5	+1	-1	-1	+1	6	12.5	15	1.2	366.2
6	-1	-1	+1	+1	2	12.5	30	1.2	364.2
7	0	0	0	+2	4	17.5	22.5	1.4	359
8	+2	0	0	0	7.4	17.5	22.5	0.8	380.8
9	0	0	0	0	4	17.5	22.5	0.8	282.3
10	-2	0	0	0	0.6	17.5	22.5	0.8	332.1
11	0	0	0	0	4	17.5	22.5	0.8	283.9
12	+1	+1	-1	+1	6	22.5	15	1.2	328
13	+1	+1	-1	-1	6	22.5	15	0.4	315.4
14	+1	-1	+1	+1	6	12.5	30	1.2	403.3
15	0	0	0	0	4	17.5	22.5	0.8	286.1
16	+1	-1	+1	-1	6	12.5	30	0.4	370.4
17	-1	+1	+1	-1	2	22.5	30	0.4	316.8
18	+1	-1	-1	-1	6	12.5	15	0.4	347.2
19	-1	+1	-1	+1	2	22.5	15	1.2	296.8
20	+1	+1	+1	-1	6	22.5	30	0.4	344.9
21	-1	-1	-1	+1	2	12.5	30	0.4	338.2
22	-1	-1	-1	-1	2	12.5	15	0.4	319.1
23	0	+2	0	0	4	26.1	22.5	0.8	286.8
24	-1	+1	+1	+1	2	22.5	30	1.2	338
25	0	0	0	0	4	17.5	22.5	0.8	285.1
26	0	0	0	0	4	17.5	22.5	0.8	286.8
27	+1	+1	+1	+1	6	22.5	30	1.2	365.5
28	-1	+1	-1	-1	2	22.5	15	0.4	291.4
29	0	0	+2	0	4	17.5	35.4	0.8	308.1
30	0	-2	0	0	4	8.9	22.5	0.8	338.2

نمودار پارتو اثرهای استاندارد شده (شکل ۱)، اهمیت اطمینان ۹۵ درصد (خط مرجع $t=2.13$) ارزیابی می‌کند. نسبی هر یک از جملات خطی، درجه دوم و برهمکنشی مدل عبور میله‌های افقی از این آستانه، معنی‌داری آماری آن رگرسیونی را بر پاسخ میانگین قطر نانوحامل‌ها در سطح پارامتر یا برهمکنش را تأیید می‌کند. بر اساس این نمودار،

جملات درجه دوم غلظت عصاره جینسنگ قرمز (AA) و سرعت پمپ (DD) به ترتیب دارای بزرگترین اثر استاندارد شده هستند که نشان دهنده رفتار غیر خطی شدید فرآیند و وجود نقاط بهینه داخلی در محدوده پارامترهای مورد بررسی است. اثر غالب AA بیانگر آن است که تغییرات غلظت عصاره نه تنها به صورت خطی بلکه از طریق برهمکنش‌های مولکولی با زنجیره‌های پلیمری پلی(وینیل الکل)، ویسکوزیته، کشش سطحی و هدایت الکتریکی محلول را به طور نمایی تعدیل می‌کند (Refate et al., 2023). حضور جینسنوسیدها، پلی‌ساکاریدها و ترکیبات فنولی در عصاره تعادل نیروهای الکترواستاتیکی وارد بر جت مایع را تغییر می‌دهد و در غلظت‌های میانی، کمینه قطر را ایجاد می‌کند (Chinnappan et al., 2022). به طور مشابه، اثر درجه دوم قوی DD تأکید می‌کند که میزان تزریق محلول، پارامتر کلیدی کنترل حجم پلیمر عبوری از میدان است؛ دبی‌های پایین‌تر از حد بهینه منجر به ایجاد نوسان‌های جت و ناپایداری فرآیند می‌شود، در حالی که دبی‌های بالاتر، زمان کافی برای تبخیر حلال و کشیدگی کامل جت را فراهم نمی‌کند و قطر نانوحامل‌ها را به طور غیر خطی افزایش می‌دهند (Sukowati et al., 2025).

در بخش اثرهای خطی، هر چهار متغیر اصلی شامل غلظت عصاره (A)، ولتاژ اعمالی (B)، فاصله نوک تا جمع کننده (C) و سرعت پمپ (D) معنی‌دار هستند. نکته مهم معنی‌داری هم‌زمان اثر خطی (B) و درجه دوم ولتاژ (BB) است که نشان می‌دهد افزایش میدان الکتریکی تا آستانه مشخص، نیروی کششی الکترواستاتیکی را تقویت می‌کند و قطر را کاهش می‌دهد، اما فراتر از آن افزایش چگالی بار ممکن است باعث ناپایداری‌های خمشی ثانویه یا تخلیه جزئی بار گردد که روند کاهش قطر را متوقف یا معکوس می‌سازد (Chinnappan et al., 2022). از میان برهمکنش‌ها، جفت‌های CD (فاصله $\times$ سرعت پمپ)، BD (ولتاژ $\times$ سرعت پمپ)، AB (غلظت $\times$ ولتاژ) و BC (ولتاژ $\times$ فاصله) معنی‌دار ارزیابی شدند که بازتاب دهنده وابستگی متقابل پارامترهای

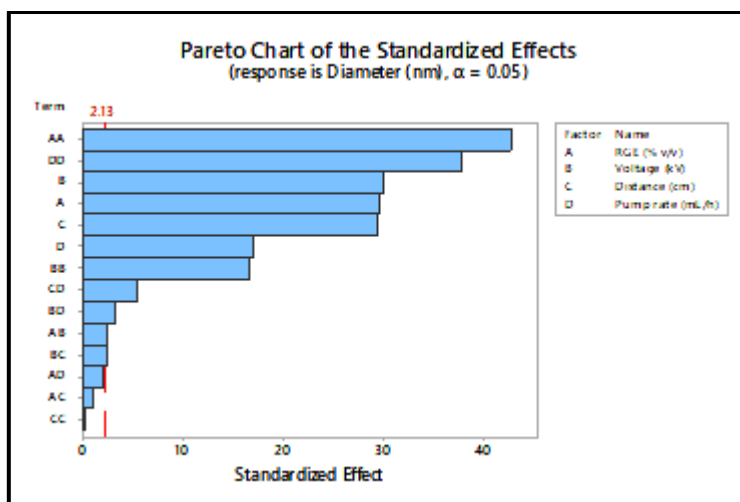
فرآیندی در دینامیک تشکیل جت است. برهمکنش CD، به ویژه، تأیید می‌کند که تعادل میان تأمین جرم محلول و زمان پرواز جت نقش تعیین‌کننده‌ای در مورفولوژی نهایی دارد (Nazemi et al., 2022). در مقابل، معنی‌دار نبودن ترم CC نشان می‌دهد که اثر فاصله در بازه ۱ تا ۲۰ سانتی‌متر فاقد انحنای قابل توجه است و رفتار آن در این محدوده تقریباً خطی است. برهمکنش‌های AC و AD غیر معنی‌دار هستند که نشان می‌دهد تأثیر غلظت عصاره و سرعت پمپ تا حد زیادی مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند.

علاوه بر ولتاژ، سرعت جریان پمپ نیز از پارامترهای کلیدی مؤثر بر قطر و یکنواختی نانوحامل‌هاست. لی و همکاران (Li et al., 2013) نشان دادند که افزایش سرعت تزریق، حجم پلیمر ورودی به میدان را افزایش می‌دهد و در صورت تطابق نداشتن با نیروی کششی الکتریکی و زمان تبخیر حلال، منجر به تشکیل الیاف ضخیم‌تر یا ساختارهای نیمه خشک می‌گردد. عامل پنهان اما مؤثر دیگر چگالی بار سطحی جت مایع است که مستقیماً تحت تأثیر سرعت جریان و ویژگی‌های الکتریکی محلول قرار دارد. ترون و همکاران (Theron et al., 2004) با مطالعه سیستم‌های پلیمری متنوع از جمله پلی(وینیل الکل)، نشان دادند که افزایش سرعت جریان هم‌زمان باعث افزایش جریان الکتریکی کل و کاهش چگالی بار سطحی می‌شود؛ کاهش چگالی بار، نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین بخش‌های جت را تضعیف می‌کند و امکان ادغام جانبی الیاف را در مسیر پرواز فراهم می‌سازد که این پدیده سرانجام به تشکیل ساختارهای نابافته با تخلخل کنترل شده منجر می‌گردد (Theron et al., 2004). در سیستم پلی(وینیل الکل)/جینسنگ قرمز، حضور ترکیبات فنولی و املاح معدنی عصاره می‌تواند این تعادل ظریف را تعدیل کند و ضرورت بهینه‌سازی هم‌زمان سرعت جریان و ولتاژ را برجسته می‌سازد.

در مجموع، تحلیل پارتو تأیید می‌کند که مورفولوژی نانوحامل‌های پلی(وینیل الکل) بارگذاری شده با عصاره

جینسنگ قرمز، تابعی پیچیده و عمدتاً درجه دوم از غلظت عصاره و دبی تزریق است. این یافته‌ها ضرورت کنترل دقیق و همزمان این دو پارامتر را در کنار تنظیم بهینه ولتاژ و فاصله برجسته می‌کند و پایه‌ای فیزیکی-آماري مستحکم

برای بهینه‌سازی چندپاسخه فرآیند الکتروریسی در تولید نانوحامل‌های زیست‌فعال با قطر نانومتری هدف فراهم می‌آورد.



شکل ۱- نمودار پارتو اثرهای استانداردشده پارامترهای مستقل بر میانگین قطر نانوحامل‌ها

Fig 1. Pareto chart of the standardized effects of independent variables on the mean diameter of nanocarriers

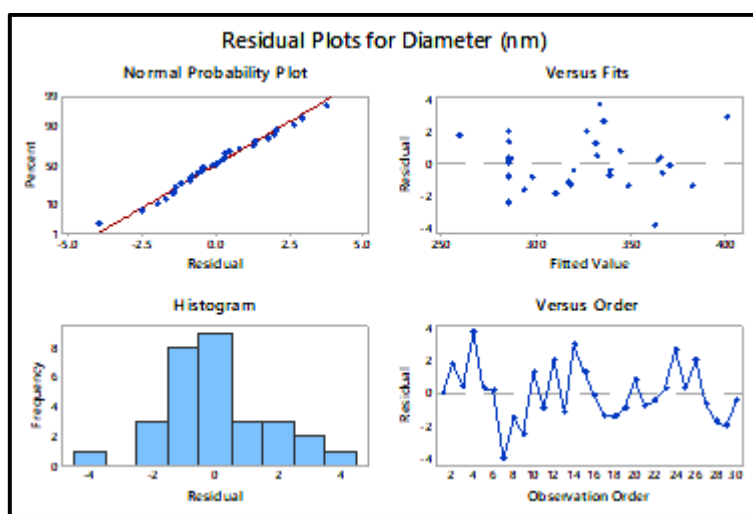
کیفی (نشان‌دهنده ناهمسانی واریانس) یا انحنای سیستماتیک (نشان‌دهنده حذف جمله‌های غیرخطی یا برهمکنش‌های مهم)، تأیید می‌کند که مدل توسعه‌یافته از نظر ریاضی کامل است و واریانس خطاها در سراسر دامنه پاسخ ثابت است (Hoseini *et al.*, 2024). هیستوگرام توزیع فراوانی باقیمانده‌ها نیز منحنی زنگوله‌ای متقارن حول صفر را با بیشینه فراوانی در بازه ۲- تا ۰+ نمایش می‌دهد که یافته‌های نمودار نرمال را همگرا می‌سازد و سوگیری نکردن جهت‌دار در پیش‌بینی‌های مدل را گواهی می‌دهد.

نمودار باقیمانده‌ها بر حسب ترتیب اجرای آزمایش‌ها، نوسان‌های نامنظم حول خط میانگین را بدون هیچ‌گونه روند صعودی، نزولی یا چرخه‌ای در ۳ آزمایش آشکار می‌سازد. این الگوی تصادفی، استقلال آماری خطاها را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که عوامل محیطی متغیر یا خطاهای تجمعی در فرآیند الکتروریسی (مانند تغییرات تدریجی رطوبت، دما یا پایداری محلول‌های پلیمری-عصاره) تأثیر معنی‌داری بر

تحلیل نمودارهای باقیمانده (شکل ۲) گامی ضروری در اعتبارسنجی مدل‌های آماری روش سطح پاسخ محسوب می‌شود زیرا صحت فرضیات بنیادین رگرسیون چندجمله‌ای را پیش از تفسیر پارامترها و بهینه‌سازی فرآیند بررسی می‌کند. در شکل ارائه‌شده، چهار نمودار تشخیصی استاندارد برای پاسخ قطر نانوحامل‌ها ارزیابی شده است. در نمودار احتمال نرمال، توزیع نقاط به‌طور پیوسته و نزدیک روی خط راست مرجع قرار گرفته است که نشان‌دهنده پیروی باقیمانده‌ها از توزیع نرمال گاوسی و نبود داده‌های پرت یا خطای سیستماتیک در اندازه‌گیری‌هاست. این ویژگی، پیش‌شرط حیاتی برای اعمال آزمون‌های استنباطی مانند آنالیز واریانس و آزمون‌های معنی‌داری ضریب‌هاست (Rezaei and Zebarjad, 2024). نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده، پراکندگی کاملاً تصادفی و متقارن حول محور صفر را در بازه قطری ۲۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر نشان می‌دهد؛ فقدان هرگونه الگوی ساختاریافته مانند شکل

چندپاسخه و کنترل دقیق فرآیند الکتروریسی نانوحامل‌های حامل عصاره جینسنگ قرمز در مقیاس آزمایشگاهی مورد استناد قرار گیرد. بدین ترتیب اطمینان حاصل می‌شود که پیش‌بینی‌های مدل برای تعیین شرایط بهینه تولید نانوحامل‌هایی با قطر هدف و ریخت‌شناسی (مورفولوژی) یکنواخت، پشتوانه آماری کافی دارد و خطای سیستماتیک در برآورد پاسخ‌ها وجود ندارد.

نتایج نداشته‌اند. در مجموع، انطباق دقیق هر چهار نمودار با معیارهای تشخیصی استاندارد، کفایت مدل رگرسیونی درجه دوم را برای توصیف رفتار قطر نانوحامل‌های تولیدشده تأیید می‌کند. این یافته‌های آماری تضمین می‌کند مدل نه تنها برازش مناسبی بر داده‌های تجربی دارد، بلکه از نظر پیش‌بینی‌پذیری و تعمیم‌پذیری نیز قابل‌اعتماد است و می‌تواند به‌عنوان مبنای ریاضی مستحکم برای بهینه‌سازی



شکل ۲- نمودارهای تشخیصی باقیمانده مدل رگرسیونی پیش‌بینی قطر نانوحامل‌ها

Fig 2. Diagnostic residual plots of the regression model for predicting nanocarrier's diameter

مقدار مینیمم خود را دقیقاً در محدوده $\lambda \approx 0.5$ نشان می‌دهد که با خط عمودی سبز مشخص شده‌است و بیانگر بهینه‌ترین تبدیل ریاضی از نظر کاهش واریانس خطاهاست. با این حال، خطوط افقی قرمز رنگ بازه اطمینان ۹۵ درصد را برای λ ترسیم می‌کنند که طبق محاسبات نرم‌افزار، در محدوده -0.16 تا $+1.35$ قرار دارد. نکته آماری مهم آن است که مقدار $\lambda = 1$ (نماینده مقیاس اصلی و تبدیل نشده داده‌ها) کاملاً درون این بازه اطمینان قرار گرفته است. این یافته نشان می‌دهد اگرچه تبدیل جذر یا لگاریتمی می‌تواند از نظر ریاضی واریانس را کمی همگن‌تر سازد، اما از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با استفاده از داده‌های اصلی ندارد. بنابراین، به منظور حفظ تفسیرپذیری فیزیکی پارامترها، سادگی مدل

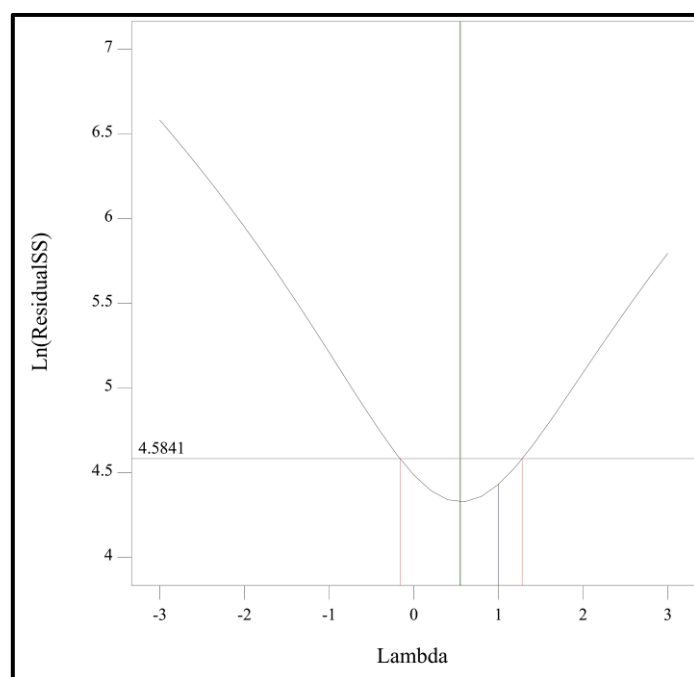
نمودار باکس-کاکس (شکل ۳) برای تبدیل‌های توانی، ابزار تشخیصی استاندارد در چارچوب روش سطح پاسخ است که به منظور ارزیابی نیاز به تبدیل ریاضی داده‌های پاسخ، همگن‌سازی واریانس خطاها، نرمال‌سازی باقیمانده‌ها و ارتقای قابلیت پیش‌بینی مدل رگرسیونی به کار می‌رود (Rezaei and Zebarjad, 2024). در این نمودار، لگاریتم طبیعی مجموع مجذورات باقیمانده^۱ بر حسب پارامتر تبدیل توانی (لامبدا، λ) ترسیم شده است. مقادیر خاص λ نمایانگر تبدیل‌های ریاضی متداول هستند $\lambda = 1$: نشان‌دهنده داده‌های خام (بدون تبدیل)، $\lambda = 0$: معادل تبدیل لگاریتمی، $\lambda = 0.5$: تبدیل جذر و $\lambda = -1$: تبدیل معکوس است (Alotaibi and El-Bindary, 2026). منحنی سهموی مشاهده‌شده،

^۱ $\text{Ln}(\text{Residual SS})$

و پرهیز از پیچیدگی‌های غیرضروری محاسباتی، استفاده از مقیاس اصلی داده‌های قطر نانوحامل‌ها (بدون اعمال هیچ‌گونه تبدیل توانی) کاملاً موجه است و توصیه می‌شود (Alotaibi *et al.*, 2025).

از دیدگاه فیزیک فرآیند الکتروریسی و شیمی کلونیدی محلول‌های حامل عصاره گیاهی، این نتیجه با ماهیت سیستم سازگار است. نانوحامل‌های پلی‌(وینیل الکل) بارگذاری شده با عصاره جینسنگ قرمز، اگرچه دارای برهمکنش‌های پیچیده مولکولی (بین زنجیره‌های پلیمری، جینسنوسیدها و ترکیبات فنولی) هستند، اما در محدوده پارامترهای طراحی شده، رفتار رئولوژیکی و الکتروهیدرودینامیکی جت مایع از پایداری کافی برخوردار است. نیازن بودن به تبدیل داده‌ها نشان می‌دهد که واریانس خطاهای اندازه‌گیری قطر

(حاصل از آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و توزیع ذاتی الیاف) در سراسر دامنه پاسخ نسبتاً یکنواخت است و مدل درجه دوم توسعه یافته می‌تواند بدون واسطه ریاضی، رابطه غیرخطی میان متغیرهای مستقل و پاسخ را به خوبی توصیف کند (Sharma *et al.*, 2021). این ویژگی، اعتبار نتایج ANOVA و نمودارهای سطح پاسخ را تقویت می‌کند و اطمینان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل برای نقطه بهینه مستقیماً بر اساس مقادیر فیزیکی قابل اندازه‌گیری در آزمایشگاه استوار است. در مجموع، نمودار باکس-کاکس تأیید می‌کند که ساختار مدل نهایی از نظر آماری پایدار، از نظر فیزیکی تفسیرپذیر و برای مراحل بهینه‌سازی چندپاسخ و اعتبارسنجی تجربی کاملاً آماده است (Hamadi *et al.*, 2025).



شکل ۳- نمودار باکس-کاکس به منظور تعیین تبدیل توان بهینه برای استقرار واریانس و بهبود برازش مدل رگرسیونی

Fig 3. Box-Cox plot for determining the optimal power transformation to stabilize variance and improve regression model fit

نمودارهای اثرهای اصلی (شکل ۴)، رفتار پاسخ میانگین قطر نانوحامل‌ها را در برابر تغییرات تک تک متغیرهای مستقل با میانگین‌گیری از سطوح سایر پارامترهای فرآیند به تصویر می‌کشند و الگوی تأثیر هر فاکتور را به صورت مجزا و مستقل آشکار می‌سازند. برای غلظت عصاره جینسنگ قرمز، منحنی به شکل U ملایم مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وجود یک ناحیه بهینه در محدوده میانی (حدود ۰/۳ تا ۴ درصد حجمی) است. در غلظت‌های

پایین‌تر، افزایش جزئی ویسکوزیته و تغییرات هدایت الکتریکی محلول باعث ناپایداری اولیه جت و توزیع ناهمگن قطر می‌شود، در حالی که در غلظت‌های بالاتر، حضور ترکیبات پلی‌فنولی، جینسنوسیدها و پلی‌ساکاریدهای عصاره، ویسکوزیته محلول پایه پلی‌(وینیل الکل) را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. این افزایش ویسکوزیته بر نیروهای کششی الکتریکی غلبه می‌کند و مقاومت جت را در برابر باریک‌شدگی افزایش می‌دهد که در نهایت منجر به تشکیل نانوحامل‌های ضخیم‌تر می‌گردد (Shaban et al., 2026).

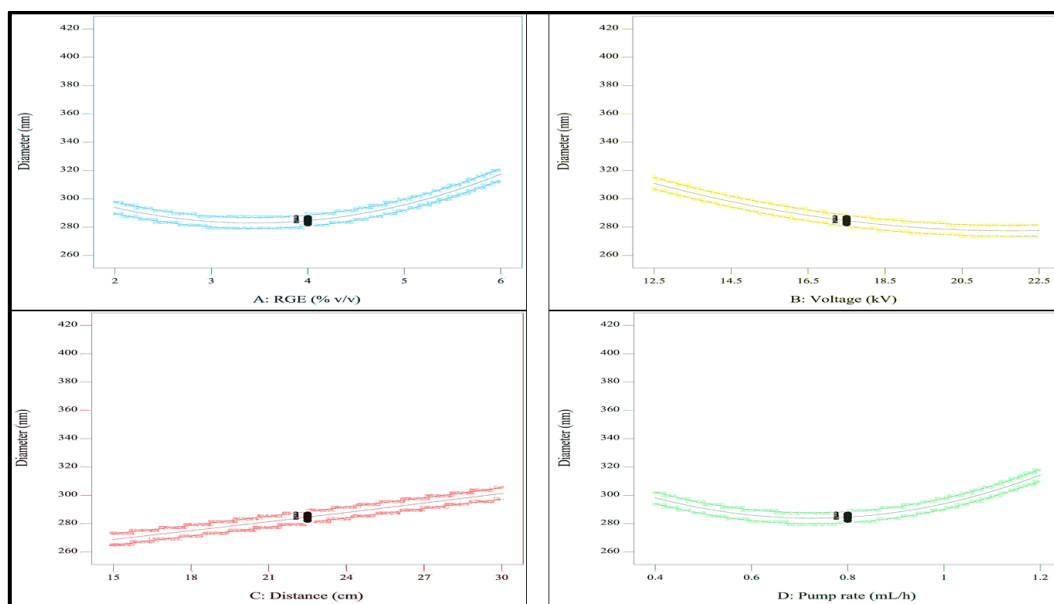
در خصوص ولتاژ اعمالی، روند کاهش خطی کاملاً مشهود است؛ افزایش میدان الکتریکی، چگالی بار سطحی جت مایع را تشدید و نیروی الکترواستاتیکی کشنده را تقویت می‌کند. این امر باعث کشیدگی بیشتر جت در فاز مایع و کاهش قطر نهایی نانوحامل‌ها پیش از انجماد می‌شود که کاملاً با تئوری‌های کلاسیک الکتروریسی همخوان است (Abdulhussain et al., 2023). برای فاصله نوک سوزن تا جمع‌کننده، افزایش ملایم و تقریباً خطی قطر مشاهده می‌گردد. افزایش فاصله معمولاً زمان پرواز و فرصت تبخیر حلال را افزایش می‌دهد، اما در این سیستم خاص کاهش تدریجی شدت میدان الکتریکی در فاصله‌های دورتر کارایی کشش جت را کاهش و احتمال بی‌ثباتی‌های خمشی ثانویه یا رسوب ناقص حلال را افزایش می‌دهد که در نهایت به تشکیل نانوحامل‌های کمی قطورتر منجر می‌گردد (Khajavi and Abbasipour, 2026). نمودار سرعت پمپ نیز الگوی U شکل واضحی را نشان می‌دهد که کمینه قطر را در حدود ۰/۸ میلی‌لیتر بر ساعت پیش‌بینی می‌کند. در دبی‌های پایین‌تر، تغذیه ناکافی محلول باعث ایجاد نوسان‌های جت، قطع و وصل جریان و ناپایداری فرآیند می‌شود، در حالی که دبی‌های بالاتر، حجم پلیمر ورودی به میدان را به‌طور ناگهانی افزایش می‌دهند و زمان کافی را برای تبخیر کامل حلال و باریک‌شدن تدریجی جت فراهم نمی‌کنند (Sukpancharoen et al., 2024)؛ لذا قطر نانوحامل‌ها افزایش می‌یابد. مربع سیاه مرکزی در هر چهار نمودار،

نشان‌دهنده نقطه مرکزی طرح آزمایش است که به‌طور معنی‌داری با ناحیه بهینه پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیونی همپوشانی دارد.

مکانیسم تشکیل نانوالیاف در الکتروریسی با اعمال میدان الکتریکی بالا آغاز می‌شود؛ زیادی و همکاران (Ziyadi et al., 2021) تأیید کردند عبور جریان از محلول پلیمری از طریق سوزن فلزی در یک ولتاژ بحرانی باعث غلبه نیروهای الکترواستاتیکی بر کشش سطحی، تغییر شکل قطره به مخروط تیلور و در نهایت پرتاب جت مایع و تشکیل نانوالیاف بسیار ریز می‌گردد. با این حال، افزایش ولتاژ فراتر از حد بهینه می‌تواند پیامدهای نامطلوبی داشته باشد. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2021) گزارش کردند که در سیستم ژئین/اسانس رزماری، افزایش ولتاژ منجر به تشکیل مهره‌های ساختاری و ناهمگنی مورفولوژی می‌شود. رگر و همکاران (Rieger et al., 2016) نیز مشاهده کردند که در نانوالیاف کیتوزان/پلی‌اتیلن‌اکساید، افزایش ولتاژ با افزایش طول جت و زمان پرواز فرصت بیشتری برای ادغام جزئی الیاف پیش از انجماد فراهم می‌کند و در نهایت قطر نهایی را افزایش می‌دهد. این پدیده در سیستم‌های حاوی عصاره‌های گیاهی پیچیده مانند جینسنگ قرمز می‌تواند تشدید شود، زیرا ترکیبات یونی عصاره هدایت الکتریکی را افزایش می‌دهد و پاسخ جت به میدان الکتریکی را غیرخطی می‌کند.

در مجموع، این نمودارها تأیید می‌کنند که قطر نانوحامل‌های پلی‌(وینیل الکل) حاوی عصاره جینسنگ قرمز تابعی درجه دوم از غلظت عصاره و سرعت پمپ، و تابعی خطی از ولتاژ و فاصله است. این الگوها ضرورت استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ را برای کشف برهمکنش‌های پنهان و تعیین پنجره عملیاتی دقیق برجسته می‌سازند و نشان می‌دهند که کنترل هم‌زمان و متعادل این پارامترها، کلید دستیابی به نانوحامل‌هایی با مورفولوژی یکنواخت، قطر نانومتری هدف و کارایی رهاسازی بهینه ترکیبات زیست‌فعال جینسنگ قرمز است.

بهینه‌سازی پارامترهای الکترورسی برای ساخت نانوالیاف پلی‌وینیل الکل حاوی عصاره جینسنگ قرمز.



شکل ۴- نمودارهای اثر اصلی پارامترهای فرآیند الکترورسی بر میانگین قطر نانوحامل‌ها

Fig 4. Main effects plots of electrospinning process parameters on the mean diameter of nanocarriers

است که حساسیت بالا به تغییرات هم‌زمان این دو عامل را نشان می‌دهد؛ دبی پایین‌تر از حد بهینه باعث نوسان جت و دبی بالاتر افزایش ناگهانی حجم پلیمر و قطر می‌شود، در حالی که غلظت عصاره با تعدیل رئولوژی محلول، پنجره پایداری دبی را گسترش می‌دهد (Sukpancharoen *et al.*, 2024). در نمودار برهمکنش ولتاژ و فاصله (B-C)، شیب یکنواخت و خطوط کانتور تقریباً موازی بیانگر برهمکنش ضعیف و تأثیر غالب خطی هر دو پارامتر است؛ افزایش ولتاژ و تنظیم دقیق فاصله هم‌راستا عمل می‌کنند و قطر را بدون تداخل ساختاری به حداقل می‌رسانند. برهمکنش ولتاژ و سرعت پمپ (B-D) الگوی لگامی مشخصی دارد؛ افزایش هم‌زمان ولتاژ و دبی، اثرهای یکدیگر را تا حدی خنثی می‌کند زیرا ولتاژ بالا جت را می‌کشد اما دبی زیاد جرم ورودی را افزایش می‌دهد و نقطه بهینه در تقاطع میانی این دو عامل قرار دارد که تعادل دینامیکی بین نیروی کششی و تأمین جرم برقرار است (Sharma and James, 2022). نمودار برهمکنش فاصله و سرعت پمپ (C-D) نیز سطح پاسخ سهموی واضحی را نشان می‌دهد؛ فاصله زیاد نیاز به زمان پرواز بیشتر دارد، اما اگر دبی پمپ نیز بالا باشد حلال

نمودارهای سطح پاسخ سه‌بعدی و خطوط کانتور شش‌گانه (شکل ۵)، برهمکنش‌های دومتغیره پارامترهای الکترورسی را بر پاسخ «قطر نانوحامل‌های پلی‌وینیل الکل) حاوی عصاره جینسنگ قرمز» به تصویر می‌کشند و الگوی هم‌افزایی یا تقابل عوامل فرآیندی را در محدوده طراحی آزمایش آشکار می‌سازند. در برهمکنش غلظت عصاره (A) و ولتاژ (B)، خطوط کانتور بیضی‌شکل با شیب ملایم، نشان‌دهنده برهمکنش متوسط است؛ افزایش ولتاژ با تقویت نیروی الکترواستاتیکی قطر را کاهش می‌دهد، اما این اثر در غلظت‌های بالای عصاره به دلیل افزایش ویسکوزیته و تغییر هدایت الکتریکی ناشی از جینسنوسیدها و ترکیبات فنولی تعدیل می‌شود. نمودار برهمکنش غلظت عصاره و فاصله (A-C) نیز منحنی‌های سهموی واضحی را نشان می‌دهد؛ در فاصله‌های کوتاه میدان قوی‌تر است اما زمان تبخیر ناکافی است و در فاصله‌های دور، کاهش شدت میدان بر کشش جت غلبه می‌کند، به‌طوری‌که غلظت بهینه عصاره در میانه بازه، پایداری جت را در طیف وسیعی از فاصله‌ها حفظ می‌کند (Malara, 2024). برهمکنش غلظت عصاره و سرعت پمپ (A-D) دارای الگوی کاسه‌ای عمیق و کانتورهای متحدالمرکز

هستند، جایی که ترکیبات زیست فعال با تغییر کشش سطحی، هدایت و گرانروی، پنجره عملیاتی پایداری جت را محدودتر می سازند. شناسایی ناحیه بهینه مشترک در تمامی نمودارها تضمین می کند که با کنترل همزمان این چهار عامل می توان نانوحامل هایی با قطر نانومتری هدف، مورفولوژی یکنواخت و بدون قطره زدگی تولید کرد. این یافته ها مبنای ریاضی و فیزیکی مستحکمی برای بهینه سازی چندپاسخ و مقیاس پذیری فرآیند الکترورسی نانوحامل های زیست فعال فراهم می سازد.

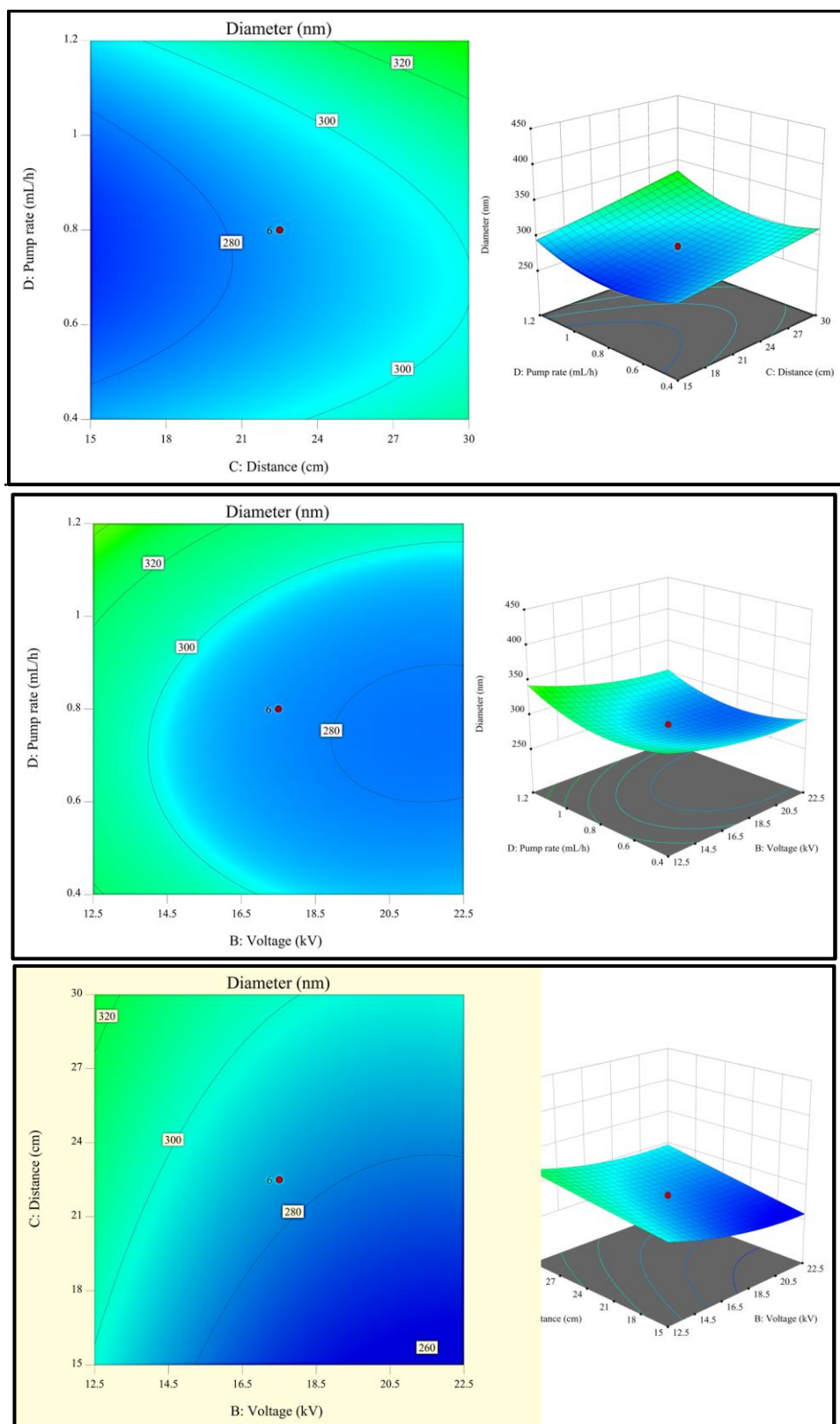
آنالیز واریانس (ANOVA) (جدول ۴) مدل درجه دوم نهایی برای پاسخ قطر نانوحامل ها حاکی از اعتبار آماری استثنایی مدل توسعه یافته است. مقدار بسیار بالای F مدل نشان می دهد که بیش از ۹۹ درصد از تغییرات مشاهده شده در قطر نانوحامل ها توسط متغیرهای مستقل و جملات مدل توضیح داده می شود و احتمال تأثیر نویز تصادفی بر این نتایج عملاً ناچیز است. بررسی معنی داری ضرایب در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p\text{-value} < 0.05$) نشان می دهد که هر چهار متغیر خطی اصلی، غلظت عصاره جینسنگ قرمز (A)، ولتاژ اعمالی (B)، فاصله نوک تا جمع کننده (C) و سرعت پمپ (D)، اثرهای فوق العاده معنی داری بر پاسخ دارند. در میان این عوامل، ولتاژ و غلظت عصاره بالاترین مقادیر F را دارند که بیانگر نقش غالب میدان الکتریکی در کشش جت و تأثیر ترکیبات فعال عصاره (جینسنوسیدها، پلی فنول ها، پلی ساکاریدها) در تعدیل رئولوژی و هدایت الکتریکی محلول پلی (وینیل الکل) است. از میان جملات برهمکنش، چهار مورد شامل AB، BC، BD و CD معنی دار ($p < 0.05$) شناسایی شدند در حالی که برهمکنش های AC و AD فاقد اثر آماری معنی دار بودند (به ترتیب $p = 0.317$ و $p = 0.061$). معنی داری برهمکنش AB تأیید می کند که اثر ولتاژ بر قطر نانوحامل ها وابسته به غلظت عصاره است؛

فرصت تبخیر کامل ندارد (Mhetre *et al.*, 2023) و ناحیه آبی مرکزی (فاصله $\sim 22-1$ سانتی متر و دبی $\sim 0.8 - 0.7$ میلی لیتر بر ساعت) کمینه قطر را پیش بینی می کند.

بر اساس یافته های آنجل و همکاران (Angel *et al.*, 2020)، فرآیند بهینه سازی الکترورسی باید در پنجره ای از پارامترها طی شود که در آن محلول پلیمری-عصاره از پایداری رئولوژیکی و الکتریکی لازم برای تشکیل جت پیوسته برخوردار باشد و محصول نهایی به صورت الیاف یکنواخت یا ترکیبی از الیاف و ذرات با توزیع قطر کنترل شده حاصل گردد. در همین راستا، توپوز و همکاران (Topuz *et al.*, 2021) نشان دادند که غلظت محلول پلیمری تازه تهیه شده تعیین کننده ترین عامل در مورفولوژی نانوحامل های الکترورسی است: در غلظت های بسیار پایین، به دلیل درهم تنیدگی ناکافی زنجیره های پلیمری، ساختارهای قطره ای یا ذرات میکرو/نانو تشکیل می شود؛ با افزایش تدریجی غلظت، ترکیبی از الیاف و مهره های نامنظم مشاهده می گردد؛ در غلظت بهینه الیافی صاف، پیوسته و فاقد نقص ساختاری تولید می شود؛ و در غلظت های بسیار بالا ویسکوزیته بیش از حد مانع کشیدگی کامل جت می شود و به تشکیل الیاف مارپیچ، روبان شکل یا ساختارهای ناهمگن می انجامد. این الگو در سیستم پلی (وینیل الکل)/عصاره جینسنگ قرمز نیز صدق می کند زیرا ترکیبات فعال عصاره (جینسنوسیدها، پلی ساکاریدها و فنول ها) با تغییر ویسکوزیته، هدایت الکتریکی و کشش سطحی محلول پنجره غلظت بهینه را نسبت به پلی وینیل الکل خالص تعدیل می کنند.

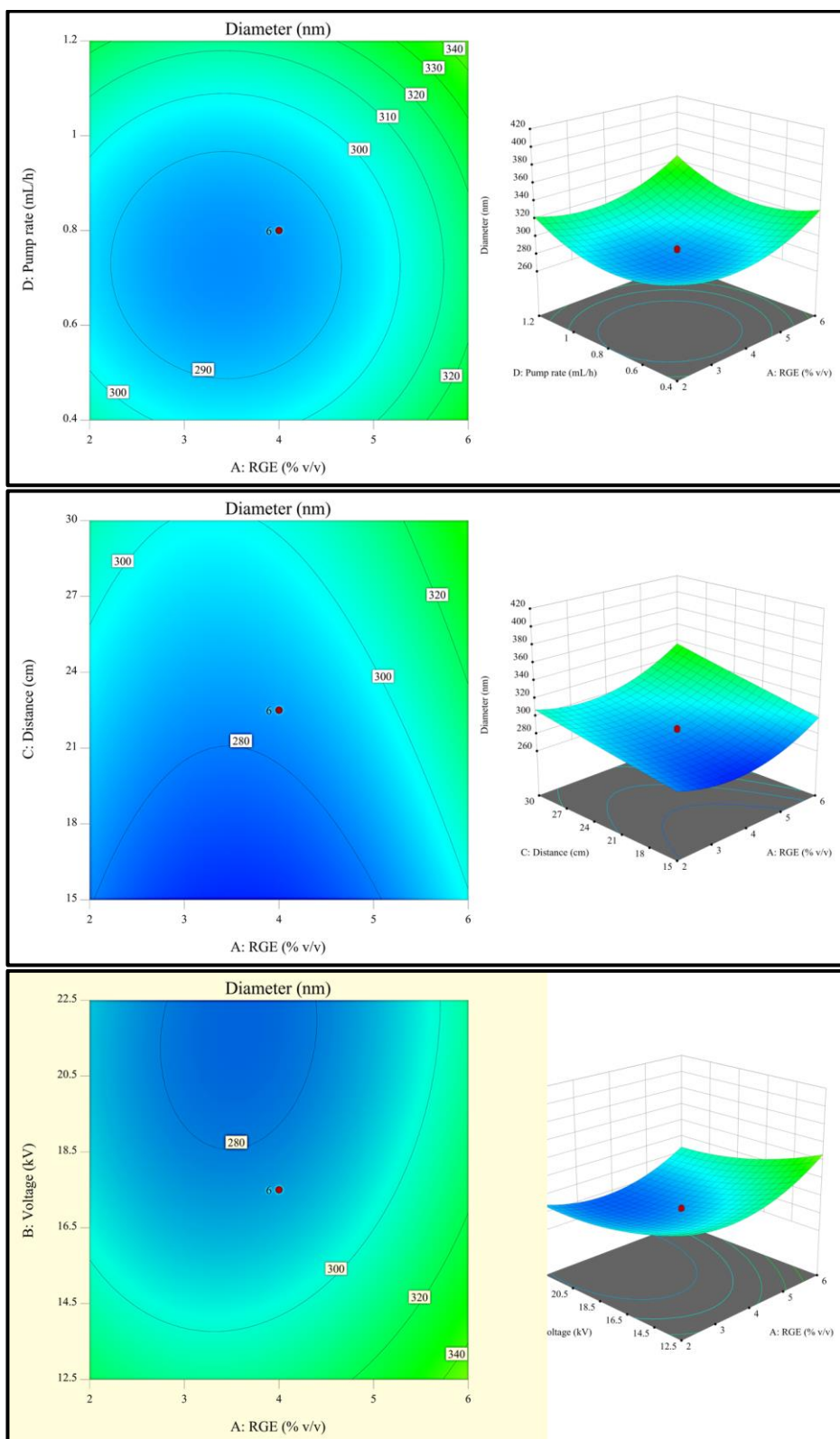
در مجموع، شش نمودار تأیید می کنند که پاسخ قطر تابعی درجه دوم از غلظت عصاره و سرعت پمپ، و تابعی خطی تر از ولتاژ و فاصله است. کانتورهای بیضی شکل در برهمکنش های شامل عصاره یا دبی، نشان دهنده وجود نقطه بهینه پایدار و حساسیت فرآیند به انحراف از شرایط مرکزی است. این الگوها بازتاب دهنده پیچیدگی رئولوژیکی محلول پلی (وینیل الکل) بارگذاری شده با عصاره جینسنگ قرمز

بهینه‌سازی پارامترهای الکتروریسی برای ساخت نانوالیاف پلی‌وینیل الکل حاوی عصاره جینسنگ قرمز..



شکل ۵- نمودارهای سطح پاسخ و کانتور اثر متقابل سرعت پمپ و فاصله نوک تا جمع کننده بر میانگین قطر نانوحامل‌ها

Fig 5. Response surface and contour plots of the interactive effects of pump rate and tip-to-collector distance on the mean diameter of nanocarriers



ادامه شکل ۵- نمودارهای سطح پاسخ و کانتور اثر متقابل سرعت پمپ و فاصله نوک تا جمع کننده بر میانگین قطر نانوحامل‌ها

نشان می‌دهد ۹۹/۷۷ درصد از تغییرات پاسخ توسط مدل توضیح داده می‌شود. نزدیکی بسیار زیاد ضریب تعیین تعدیل‌شده^۲ (۰/۹۹۵۶) و ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده^۴ (۰/۹۸۸۸) و قرار گرفتن اختلاف منطقی آنها در محدوده مجاز گواهی بر قدرت پیش‌بینی بالای مدل برای داده‌های جدید و نبوذ برازش بیش از حد است. از سوی دیگر، مقدار بسیار پایین ضریب تغییرات^۵ (۰/۷۲۸ درصد) بیانگر دقت بالا، تکرارپذیری مطلوب و قابلیت اطمینان تجربیات است. نسبت سیگنال به نویز^۶ با مقدار ۸۴/۵۴۶ محاسبه گردید. از آنجا که مقادیر بزرگ‌تر از ۴ برای این شاخص مطلوب است، این عدد استثنایی نشان‌دهنده سیگنال بسیار قوی مدل برای هدایت و پیمایش فضای طراحی^۷ و یافتن دقیق نقاط بهینه است.

در مجموع، نتایج ANOVA تأیید می‌کند که قطر نانوحامل‌های پلی‌وینیل الکل (حاوی عصاره جینسنگ قرمز) تابعی پیچیده و عمدتاً درجه دوم از پارامترهای فرآیند است. کنترل همزمان غلظت عصاره، ولتاژ و سرعت پمپ با در نظر گرفتن برهمکنش‌های معنی‌دار، کلید دستیابی به مورفولوژی یکنواخت و قطر نانومتری هدف است. معنی‌دارنبودن Lack of Fit و مقادیر بسیار بالای F برای جملات اصلی، پایه‌ای ریاضی و مستحکم برای اعتبارسنجی مدل و اجرای بهینه‌سازی چندپاسخ فراهم می‌کند. بدین ترتیب، می‌توان با اطمینان از پیش‌بینی‌های مدل برای تعیین شرایط بهینه تولید نانوحامل‌هایی با قطر پایین و مورفولوژی بدون نقص استفاده کرد که این امر برای کاربردهای رهاسازی کنترل‌شده ترکیبات زیست‌فعال جینسنگ قرمز در صنایع غذایی و دارویی ضروری است.

به عبارت دیگر، افزایش غلظت عصاره با تغییر ویسکوزیته و چگالی بار محلول، پاسخ سیستم به تغییرات میدان الکتریکی را تعدیل می‌کند. برهمکنش معنی‌دار CD (فاصله × سرعت پمپ) نیز قوی‌ترین برهمکنش دومتغیره مدل است که اهمیت تعادل میان تأمین جرم محلول و زمان پرواز جت را در کنترل نهایی مورفولوژی برجسته می‌سازد. در بخش جملات درجه دوم، اثرهای A^2 ، B^2 و D^2 به‌طور بسیار قوی معنی‌دار هستند، که وجود نقاط بهینه داخلی (مینیمم قطر) در محدوده پارامترهای مورد بررسی را برای غلظت عصاره، ولتاژ و سرعت پمپ تأیید می‌کند. معنی‌دارنبودن ترم C^2 (۰/۸۴) نشان می‌دهد که اثر فاصله در بازه ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر تقریباً خطی است و نقطه بهینه شدیدی در میانه این بازه وجود ندارد. نکته مهم و بسیار مطلوب در این مدل، معنی‌دارنبودن آماری Lack of Fit است (F ۲/۷۸، p ۰/۱۳۶). این یافته نشان می‌دهد که باقیمانده‌های مدل عمدتاً ناشی از خطای تصادفی خالص^۱ هستند و مدل توسعه‌یافته قادر به توصیف کامل ساختار داده‌های تجربی در محدوده پارامترهای طراحی‌شده است (Sukowati *et al.*, 2024). به عبارت دیگر، مدل نه تنها از نظر آماری معنی‌دار است، بلکه از نظر برازش بر داده‌های واقعی نیز کفایت لازم را دارد و می‌توان با اطمینان بالا از آن برای پیش‌بینی قطر نانوحامل‌ها و بهینه‌سازی فرآیند استفاده کرد (Hoseini *et al.*, 2024). این ویژگی، مدل حاضر را از بسیاری از مدل‌های سطح پاسخ گزارش‌شده در ادبیات الکتروریسی عصاره‌های گیاهی متمایز می‌کند.

علاوه بر نتایج ANOVA، بررسی شاخص‌های برازش مدل^۲ نیز اعتبار و کارایی استثنایی این مدل را تأیید می‌کند. مقدار ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۹۷۷ به دست آمد که

^۵ C.V.

^۶ Adeq Precision

^۷ Navigate the design space

^۱ Pure Error

^۲ Fit Statistics

^۳ Adjusted R^2

^۴ Predicted R^2

جدول ۴- جدول آنالیز واریانس (ANOVA) مدل درجه دوم بهینه‌شده برای پیش‌بینی قطر نانوحامل‌ها
Table 3. Analysis of Variance (ANOVA) table for the optimized quadratic model predicting the diameter of nanocarriers

منشأ تغییرات Source	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square	آماره F F-value	آماره p p-value
مدل Model	36622.44	14	2615.89	466.58	< 0.0001
A: غلظت RGE (درصد حجمی)	4901.78	1	4901.78	874.31	< 0.0001
A: PVA ratio (%v/v)					
B: سرعت پمپ (میلی لیتر بر ساعت)	5047.67	1	5047.67	900.33	< 0.0001
B: Pump rate (mL/h)					
C: فاصله (سانتی‌متر)	4864.08	1	4864.08	867.58	< 0.0001
C: Distance (cm)					
D: ولتاژ اعمالی (کیلوولت)	1624.28	1	1624.28	289.71	< 0.0001
D: Applied voltage (kV)					
AB	31.36	1	31.36	5.59	< 0.0001
AC	6.00	1	6.00	1.07	0.0319
AD	23.04	1	23.04	4.11	0.3172
BC	31.36	1	31.36	5.59	0.0608
BD	61.62	1	61.62	10.99	0.0319
CD	158.76	1	158.76	28.32	0.0047
A ²	10297.89	1	10297.89	1836.79	< 0.0001
B ²	1546.36	1	1546.36	275.82	< 0.0001
C ²	0.2365	1	0.2365	0.0422	< 0.0001
D ²	8028.01	1	8028.01	1431.92	0.8400
باقی مانده Residual	84.10	15	5.61		< 0.0001
عدم برازش Lack of Fit	71.26	10	7.13	2.78	0.1356
خطا Pure Error	12.83	5	2.57		
ضریب Cor	36706.54	29			
Cor Total					

معادلات رگرسیونی نهایی، چارچوب ریاضی کمی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی پاسخ قطر نانوحامل‌های پلی(وینیل الکل) حاوی عصاره جینسنگ قرمز بر اساس پارامترهای فرآیند الکتروریسی فراهم می‌کند. معادله بر حسب فاکتورهای کدگذاری‌شده، با مقیاس‌بندی متغیرها در بازه +۱ -۱ (سطح بالا) و -۱ (سطح پایین)، امکان مقایسه مستقیم تأثیر نسبی هر عامل را از طریق بزرگی و علامت ضرایب فراهم می‌کند (Rezaei and Zebarjad, 2024). در این معادله، عرض از مبدأ ۲۸۴/۸۰ نانومتر، مقدار پیش‌بینی‌شده قطر در نقطه مرکزی طرح آزمایش است. ضرایب خطی مثبت برای

شوند. به‌طور مشابه، ضریب بزرگ و مثبت D^2 (۱۳۴/۰۲۷) در معادله واقعی، حساسیت شدید فرآیند را به تغییرات سرعت پمپ برجسته می‌کند و ضرورت کنترل دقیق دبی تزریق را در محدوده ۰/۷ تا ۰/۸ میلی‌لیتر بر ساعت برای جلوگیری از افزایش نامایی قطر توجیه می‌کند. در مجموع، این دو معادله مکمل یکدیگرند: معادله کدگذاری شده برای تحلیل آماری، شناسایی عوامل کلیدی و تفسیر فیزیک فرآیند، و معادله واقعی برای پیش‌بینی کمی، بهینه‌سازی عملیاتی و مقیاس‌پذیری تولید کاربرد دارد. تطابق ضرایب معنی‌دار در هر دو معادله با نتایج ANOVA و نمودارهای سطح پاسخ، اعتبار مدل نهایی را تأیید می‌کند. بدین ترتیب، پژوهشگران و مهندسان می‌توانند با اطمینان از این معادلات برای طراحی نانوحامل‌های پلی‌(وینیل الکل) حاوی عصاره جینسنگ قرمز با قطر هدف، مورفولوژی یکنواخت و کارایی رهاسازی بهینه ترکیبات زیست‌فعال در کاربردهای غذایی و دارویی استفاده کنند.

Final Equation of Diameter (nm) in Terms of Coded Factors
 $= +284.80 + 14.96 A - 15.18 B + 14.90 C + 8.61 D - 1.40 AB + 0.6125 AC + 1.20 AD + 1.40 BC - 1.96 BD + 3.15 CD + 24.29 A^2 + 9.41 B^2 - 0.1164 C^2 + 21.44 D^2$

Final Equation of Diameter (nm) in Terms of Actual Factors
 $= +561.79571 - 40.76482 \text{ RGE} - 15.70700 \text{ Voltage} + 0.423122 \text{ Distance} - 205.37037 \text{ Pump rate} - 0.140000 \text{ RGE} * \text{Voltage} + 0.040833 \text{ RGE} * \text{Distance} + 1.50000 \text{ RGE} * \text{Pump rate} + 0.037333 \text{ Voltage} * \text{Distance} - 0.981250 \text{ Voltage} * \text{Pump rate} + 1.05000 \text{ Distance} * \text{Pump rate} + 6.07187 \text{ RGE}^2 + 0.376465 \text{ Voltage}^2 - 0.002069 \text{ Distance}^2 + 134.02692 \text{ Pump rate}^2$

به‌منظور تعیین شرایط عملیاتی بهینه برای تولید نانوحامل‌های پلی‌(وینیل الکل) حاوی عصاره جینسنگ قرمز با حداقل قطر و یکنواختی مورفولوژی، از تابع مطلوبیت^۱ چندپاسخ در چارچوب روش سطح پاسخ استفاده شد. در این بهینه‌سازی، چهار متغیر مستقل (غلظت عصاره، ولتاژ اعمالی، فاصله نوک تا جمع‌کننده و سرعت پمپ) در محدوده‌های تعیین‌شده توسط طرح مرکب مرکزی جستجو شدند، در حالی که پاسخ قطر نانوحامل‌ها با هدف

غلظت عصاره ($A = 14/96$) و فاصله ($C = 14/90$) و سرعت پمپ ($D = 8/61$) نشان می‌دهد که افزایش این پارامترها با ثابت‌نگه‌داشتن سایر عوامل، به‌طور میانگین منجر به افزایش قطر نانوحامل‌ها می‌شود. در مقابل، ضریب منفی ولتاژ ($B = -15/18$) بیانگر اثر کاهشی میدان الکتریکی بر قطر است که با مکانیسم کشش الکترواستاتیکی جت مایع کاملاً همخوانی دارد. در بخش جملات درجه دوم، ضرایب بزرگ و مثبت A^2 (۲۴/۲۹)، B^2 (۹/۴۱) و D^2 (۲۱/۴۴) وجود نقاط مینیمم داخلی در محدوده پارامترهای مورد بررسی را برای غلظت عصاره، ولتاژ و سرعت پمپ تأیید می‌کند؛ یعنی افزایش این عوامل تا یک آستانه بهینه قطر را کاهش می‌دهد، اما فراتر از آن، اثرهای غیرخطی (افزایش ویسکوزیته، ناپایداری جت یا کاهش شدت میدان) منجر به افزایش مجدد قطر می‌گردد. ضرایب برهمکنش‌های معنی‌دار مانند CD (۳/۱۵+) و BD (۱/۹۶-) نیز نشان می‌دهند که اثر فاصله یا ولتاژ بر قطر، وابسته به سطح سرعت پمپ است و کنترل هم‌زمان این عوامل برای دستیابی به مورفولوژی یکنواخت ضروری است.

از سوی دیگر، معادله بر حسب فاکتورهای واقعی ابزاری است کاربردی برای پیش‌بینی مستقیم قطر نانوحامل‌ها با واردکردن مقادیر آزمایشگاهی پارامترها (غلظت عصاره بر حسب درصد حجمی، ولتاژ بر حسب کیلوولت، فاصله بر حسب سانتی‌متر و سرعت پمپ بر حسب میلی‌لیتر بر ساعت). در این معادله، ضرایب به‌دلیل تفاوت واحدهای اندازه‌گیری، برای مقایسه تأثیر نسبی عوامل مناسب نیستند، اما برای محاسبات مهندسی و تعیین شرایط عملیاتی بهینه کاملاً کارآمدند (Abdelhady et al., 2022). نکته مهم، علامت منفی ضریب خطی ولتاژ (۱۵/۷۰۷-) و علامت مثبت ضریب درجه دوم آن (۳۷۶+) است که وجود یک نقطه بهینه ولتاژ را در محدوده ۲۰ تا ۲۳ کیلوولت تأیید می‌کند؛ ولتاژهای پایین‌تر نیروی کششی ناکافی و ولتاژهای بالاتر ممکن است باعث ناپایداری‌های خمشی یا تخلیه جزئی بار

¹ Desirability Function

یافته‌های حاضر با مطالعات مشابه روی نانوحامل‌های پلی(وینیل الکل) حاوی عصاره‌های گیاهی دیگر هم‌راستا است. برای نمونه، زینلی و همکاران (Zeinali et al., 2021) با الکتروریسی نانوالیاف پلی(وینیل الکل) بارگذاری شده با عصاره عناب نه تنها مورفولوژی یکنواخت و قطر نانومتری مطلوبی گزارش کردند بلکه افزایش قابل توجه ماندگاری میوه تازه (توت‌فرنگی) را تا ۱۲ روز به واسطه رهاسازی رهاسازیرهاسازیرهاسازی کنترل شده ترکیبات ضد میکروبی عصاره نشان دادند. پارین و همکاران (Parin et al., 2021) نیز نانوساختارهای زیست‌سازگار پلی(وینیل الکل) حاوی فولیک اسید را توسعه دادند که فاقد سمیت سلولی بود و پتانسیل بالایی برای رهاسازی رهاسازیرهاسازیرهاسازی ترانس‌درمال دارو از خود نشان دادند. در پژوهشی دیگر، بایکارا و تایلان (Baykara and Taylan, 2021) با بهینه‌سازی پارامترهای الکتروریسی هم‌محور (میزان جریان، ولتاژ و غلظت)، موفق به تولید الیاف پلی(وینیل الکل) حاوی روغن هسته سیاه‌دانه با مورفولوژی هسته-پوسته یکنواخت و کارایی رهاسازی رهاسازیرهاسازیرهاسازی کنترل شده شدند. این پیشینه‌ها تأیید می‌کنند که ماتریس پلی(وینیل الکل) با قابلیت تنظیم رئولوژی و سازگاری با طیف وسیعی از عصاره‌های گیاهی، بستری ایده‌آل برای توسعه نانوحامل‌های الکتروریسی شده با کاربردهای دارویی، غذایی و زیست‌پزشکی فراهم می‌سازد و نتایج بهینه‌سازی حاضر برای سیستم جینسنگ قرمز/ پلی(وینیل الکل) را در چارچوبی مستحکم و قابل تعمیم قرار می‌دهد. دستیابی به قطر میانگین ~ 260 نانومتر برای نانوحامل‌های پلی(وینیل الکل) بارگذاری شده با عصاره جینسنگ قرمز در این پژوهش، در مقایسه با سایر مطالعات الکتروریسی مبتنی بر ماتریس پلی(وینیل الکل) حاوی عصاره‌های گیاهی، در محدوده‌ای مطلوب و کاربردی قرار دارد. در مطالعه‌ای مشابه روی نانوحامل‌های پلی(وینیل الکل) حاوی عصاره ترش‌واش (*Oxalis corniculata*)، قطر بهینه در محدوده ۳۱۱ تا ۳۲۰ نانومتر گزارش شد که اندکی بزرگ‌تر از یافته حاضر است و

کمینه‌سازی تنظیم گردید. نتایج بهینه‌سازی در جدول ۵ نشان می‌دهد که نقطه بهینه پیش‌بینی شده شامل غلظت عصاره جینسنگ قرمز ۳/۴۷۵ درصد حجمی، ولتاژ ۲۱/۷۲۴ کیلوولت، فاصله ۱۵/۰۰۸ سانتی‌متر و سرعت پمپ ۰/۷۷۳ میلی‌لیتر بر ساعت است که قطر پیش‌بینی شده در این شرایط، ۲۶۰/۵۸۹ نانومتر است. برای اعتبارسنجی مدل رگرسیونی و حصول اطمینان از کارایی پیش‌بینی آن، آزمایش تأییدی تحت شرایط بهینه شناسایی شده اجرا گردید. مقادیر واقعی پارامترها در آزمایش تأییدی با اندکی گردسازی مقادیر پیش‌بینی شده تنظیم شدند (غلظت عصاره ۳/۵ درصد، ولتاژ ۲۱/۵ کیلوولت، فاصله ۱۵ سانتی‌متر و سرعت پمپ ۰/۷۵ میلی‌لیتر بر ساعت). قطر اندازه‌گیری شده نانوحامل‌های تولیدشده در این شرایط، ۲۶۰/۵ نانومتر به دست آمد که اختلاف مطلق کمتر از ۰/۱ نانومتر با مقدار پیش‌بینی شده مدل دارد. این همخوانی میان پیش‌بینی آماری و داده تجربی نه تنها کفایت مدل درجه دوم توسعه‌یافته را تأیید می‌کند بلکه نشان می‌دهد فرآیند الکتروریسی نانوحامل‌های پلی(وینیل الکل) حاوی عصاره جینسنگ قرمز در محدوده پارامترهای بهینه پایداری و تکرارپذیری بالایی دارد.

از دیدگاه فیزیک الکتروریسی و فیتوشیمی عصاره، شرایط بهینه شناسایی شده توجیه علمی روشنی دارد. غلظت میانی عصاره (۳/۵ درصد) تعادل بهینه‌ای میان افزایش ویسکوزیته (ناشی از پلی‌ساکاریدها و جینسنوسیدها) و افزایش هدایت الکتریکی (ناشی از ترکیبات فنولی و املاح) ایجاد می‌کند که منجر به کشیدگی کارآمد جت بدون ناپایداری‌های ساختاری می‌شود. ولتاژ نسبتاً بالای بهینه (۲۱/۵ کیلوولت) نیروی الکترواستاتیکی کافی برای باریک کردن جت پیش از انجماد فراهم می‌سازد، در حالی که فاصله کوتاه‌تر از حد بالای بازه (۱۵ سانتی‌متر) از کاهش شدت میدان و ناپایداری‌های ثانویه جلوگیری می‌کند. سرعت پمپ بهینه (۰/۷۵ میلی‌لیتر بر ساعت) نیز حجم پلیمر ورودی را با زمان تبخیر حلال و کشش جت هم‌تراز می‌کند.

احتمالاً ناشی از تفاوت در ترکیبات فنولی، ویسکوزیته و هدایت الکتریکی عصاره ترش‌واش نسبت به جینسنگ قرمز است (Alimohammadifard *et al.*). در پژوهشی دیگر روی نانوحامل‌های هیبریدی پروتئین ماش/ پلی‌(وینیل الکل)، قطر بهینه ۳۳۳ تا ۳۴۶ نانومتر به دست آمد که بزرگ‌تر بودن آن را می‌توان به حضور پروتئین گیاهی با وزن مولکولی بالا و برهمکنش‌های پیچیده‌تر زنجیره‌ای نسبت به عصاره‌های فنولی نسبت داد (Asadzadeh *et al.*, 2024). در مقابل، تکین و همکاران (Tekin *et al.*, 2023) (۲۰۲۳) با استفاده از موسیلاژ دانه ارگولا/ پلی‌(وینیل الکل) به قطر میانگین ۱۰۲ نانومتر دست یافتند که کوچک‌تر بودن آن احتمالاً مرتبط با غلظت پایین‌تر پلیمر و ویژگی‌های رئولوژیکی متفاوت موسیلاژهای پلی‌ساکاریدی است. رحما و همکاران (Rahma *et al.*, 2026) (۲۰۲۴) با به‌کارگیری مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی قطر نانوالیاف پلی‌(وینیل الکل) حاوی عصاره *Averrhoa bilimbi*، دقت پیش‌بینی بالاتری را برای شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به روش سطح پاسخ گزارش کردند، اگرچه در مطالعه حاضر، خطای ناچیز بین پیش‌بینی و تأیید آزمایشگاهی نشان‌دهنده کفایت مدل

سطح پاسخ برای سیستم جینسنگ قرمز/ پلی‌(وینیل الکل) است. از دیدگاه کاربردی، قطر ~۲۶۰ نانومتر در محدوده ایده‌آل برای نفوذ به لایه‌های اپیدرمی پوست، جذب سلولی و رهاسازی‌های رهاسازی‌های رهاسازی کنترل‌شده ترکیبات زیست‌فعال قرار دارد و با گزارش‌های پیشین در زمینه پانسمان‌های زخم و بسته‌بندی‌های فعال غذایی همخوانی کامل دارد (Cho *et al.*, 2025). علاوه بر این، همگرایی مطلوب قطر بهینه این مطالعه با سایر نانوحامل‌های گیاهی مبتنی بر پلی‌(وینیل الکل) (محدوده ۱۰۰ تا ۳۵۰ نانومتر) نشان می‌دهد که ماتریس پلی‌(وینیل الکل) انعطاف‌پذیری کافی برای تنظیم مورفولوژی نهایی بر اساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی عصاره هدف را دارا است. در مجموع، مقایسه حاضر نه تنها اعتبار نتایج بهینه‌سازی پژوهش حاضر را تأیید می‌کند، بلکه جایگاه نانوحامل‌های جینسنگ قرمز/ پلی‌(وینیل الکل) را به عنوان سیستمی رقابتی و کارآمد در خانواده نانوحامل‌های الکتروریسی‌شده حامل عصاره‌های گیاهی تثبیت می‌کند.

جدول ۵- جدول شرایط بهینه فرآیند الکتروریسی و مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده و تأیید آزمایشگاهی برای حداقل‌سازی قطر

نانوحامل‌ها

Table 4. Table of Optimal Electrospinning Process Conditions and Comparison of Predicted versus Experimentally Validated Values for Minimizing Nanocarrier Diameter

متغیر/سطح Variable/Level	هدف Target	حد پایین Lower limit	حد بالا Upper limit	پیش‌بینی شده Predicted	صحت سنجی شده Validated
غلظت RGE (درصد حجمی) RGE concentration (%v/v)	در محدوده In range	2	6	3.475	3.5
ولتاژ اعمالی (کیلوولت) Applied voltage (kV)	در محدوده In range	12.5	22.5	21.724	21.5
فاصله بین سوزن تا جمع‌کننده (سانتی‌متر) Distance between needle tip and collector (cm)	در محدوده In range	15	30	15.008	15
سرعت پمپ (میلی لیتر بر ساعت) Pump rate (mL/h)	در محدوده In range	0.4	1.2	0.773	0.75
قطر (نانومتر) Diameter (nm)	حداقل Min	260.6	403.3	260.589	260.5

مشخصه‌یابی ریخت‌شناسی

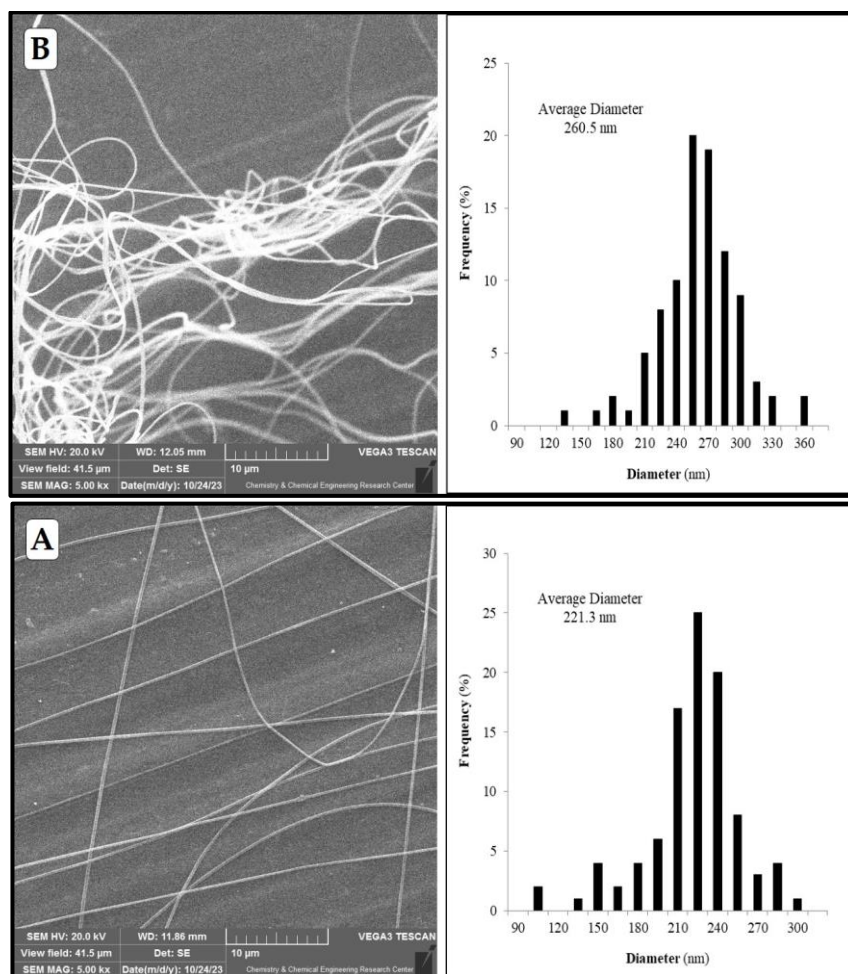
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و هیستوگرام‌های توزیع قطر الیاف برای نانوالیاف پلی(وینیل الکل) خالص و نانوالیاف حاوی عصاره جینسنگ قرمز در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در تصویر میکروسکوپی نمونه شاهد (پلی وینیل الکل خالص) مشاهده می‌شود، الیاف تولید شده دارای ساختاری کاملاً صاف، یکنواخت، پیوسته و فاقد هرگونه عیب ساختاری مانند تشکیل مهره هستند. این ویژگی بیانگر پایداری عالی فرایند الکترورسی و تعادل مناسب میان ویسکوزیته، کشش سطحی و هدایت الکتریکی محلول پایه است (Sharma *et al.*, 2021). بر اساس آنالیز تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، میانگین قطر الیاف برای نمونه خالص ۲۲۱/۳ نانومتر محاسبه گردید و هیستوگرام توزیع قطر نیز نشان‌دهنده پراکندگی نسبتاً باریک و یکنواخت الیاف در محدوده ۱۵۰ تا ۳۰۰ نانومتر است.

کارایی ریزپوشانی بازده ریزپوشانی عصاره جینسنگ قرمز در نانوالیاف پلی وینیل الکل در شرایط بهینه، برابر با ۷۸/۴ درصد به دست آمد. این مقدار نشان‌دهنده کارایی قابل توجه فرایند الکترورسی در به دام انداختن ترکیبات زیست‌فعال جینسنگ درون ساختار نانوالیاف است و در مقایسه با دیگر سیستم‌های رهاسازی عصاره جینسنگ گزارش شده در مطالعات پیشین، در جایگاه مطلوبی قرار دارد. کومار و همکاران (Kumar *et al.*, 2021) (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای روی سیستم میکروسفرهای بارگذاری شده با فیتوزوم عصاره جینسنگ، بازده به دام اندازی برابر با ۵۰/۶۰ درصد را گزارش کردند که پایین‌تر از مقدار به دست آمده در پژوهش حاضر است. این تفاوت را می‌توان به ماهیت ساختار پیوسته و بدون حفره نانوالیاف‌های الکترورسی شده نسبت داد که در مقایسه با ساختار متخلخل میکروسفرها، از نشت ترکیبات فعال در حین فرآیند تهیه و شست‌وشو جلوگیری می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر، مین و همکاران (Min *et al.*, 2018) کپسول‌های عصاره جینسنگ قرمز را با استفاده از روش امولسیون آب/روغن/آب و خشک کردن انجمادی تهیه و بازده فرآیند ریزپوشانی را بین ۸۶/۷ تا ۹۷/۳ درصد گزارش کردند. این اعداد بالاتر از مقدار گزارش شده در پژوهش حاضر به نظر می‌رسند، اما باید توجه داشت که مفهوم بازده فرآیند

با درون‌نشانی ۳/۵ درصد عصاره جینسنگ قرمز در ماتریس پلیمری، مورفولوژی الیاف تغییرات مشخصی را نشان می‌دهد. در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاوی عصاره، الیاف همچنان ساختاری پیوسته و بدون مهره دارند که این امر حاکی از سازگاری مطلوب عصاره با محلول پلیمری و تشکیل محلولی همگن پیش از فرایند الکترورسی است. با این حال، الیاف حاوی عصاره نسبت به نمونه خالص، حالتی کمی در هم تنیده‌تر و موج‌دارتر به خود گرفته‌اند. این افزایش قطر را می‌توان به تأثیر ترکیبات زیست‌فعال موجود در عصاره جینسنگ قرمز (مانند پلی ساکاریدها، پلی فنول‌ها و جینسنوسیدها) بر خواص فیزیکوشیمیایی محلول نسبت داد. افزودن عصاره منجر به افزایش غلظت جامدات و ویسکوزیته محلول الکترورسی می‌شود (Mouro and Gouveia, 2024). افزایش ویسکوزیته باعث ایجاد مقاومت بیشتر در برابر کشش جت پلیمری توسط نیروی دافعه الکترواستاتیک در میدان الکتریکی می‌گردد و در نتیجه، جت پلیمری پیش از رسیدن به کلکتور به میزان کمتری کشیده

جینسنگ قرمز در ماتریس‌های پلیمری، راهکاری مؤثر برای حفاظت از ترکیبات فعال آن است و نتایج پژوهش حاضر نیز این رویکرد را با استفاده از ماتریس پلی‌وینیل الکل و فرآیند الکترووریسی تأیید می‌کند. در مجموع، بازده ریزپوشانی به‌دست‌آمده در این پژوهش نه تنها نسبت به سیستم‌های مبتنی بر فیتوزوم و میکروسفر برتری چشمگیری نشان می‌دهد بلکه در مقایسه با دیگر سامانه‌های نانوریزپوشانی عصاره جینسنگ نیز در محدوده قابل قبول و رقابتی قرار دارد. این یافته‌ها پتانسیل بالای نانوالیاف پلی‌وینیل الکل الکترووریسی‌شده را به‌عنوان سامانه ریزپوشانی کارآمد برای ترکیبات زیست‌فعال حساس مانند جینسنوسیدها تأیید می‌کند.

(Yield) با بازده ریزپوشانی (Efficiency) تفاوت ماهوی دارد. بازده فرآیند بیانگر درصد پودر نهایی بازیابی‌شده نسبت به مواد اولیه است و تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی خشک‌کن قرار دارد، در حالی که بازده ریزپوشانی نشان‌دهنده درصد واقعی ماده مؤثر به‌دام افتاده درون نانوحامل است. از این منظر، مقدار به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، بیانگر کارایی واقعی و قابل‌رقابت فرآیند الکترووریسی در به‌دام انداختن جینسنوسیدها است. هان و همکاران (۲۰۲۳) (Han et al., 2023) نیز نانوذرات کیتوزان-ژلاتین بارگذاری‌شده با عصاره جینسنگ قرمز را تهیه کردند و پایداری حرارتی و اسیدی جینسنوسیدها را به‌ترتیب ۶ و ۸ برابر بالاتر از عصاره آزاد نشان دادند. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که ریزپوشانی عصاره



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و هیستوگرام‌های توزیع فراوانی قطر الیاف نانوحامل‌های الکترووریسی شده: (A) نانوالیاف پلی‌وینیل الکل خالص و (B) نانوالیاف پلی‌وینیل الکل حاوی ۳/۵ درصد عصاره جینسنگ قرمز

Fig 6. Scanning Electron Microscopy (SEM) images and fiber diameter distribution histograms of the electrospun nanocarriers: (A) pure PVA nanofibers and (B) PVA nanofibers containing 3.5 %v/v RGE

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی فرآیند الکتروریسی نانوحامل‌های پلی(وینیل الکل) حاوی عصاره جینسنگ قرمز (*Panax ginseng C.A. Meyer) و با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ مبتنی بر طرح مرکب مرکزی به اجرا در آمد. نتایج آنالیز واریانس، معنی‌داری آماری بسیار بالای مدل درجه دوم توسعه‌یافته را تأیید کرد و عدم معنی‌داری Lack of Fit، کفایت مدل در توصیف کامل تغییرات پاسخ قطر نانوحامل‌ها را اثبات کرد. یافته‌ها نشان داد که قطر نانوحامل‌ها تابعی پیچیده و عمدتاً درجه دوم از غلظت عصاره و سرعت پمپ، و تابعی خطی تر از ولتاژ و فاصله است. شرایط بهینه شناسایی شده برای دستیابی به حداقل قطر شامل غلظت عصاره ۳/۵ درصد حجمی، ولتاژ ۲۱/۵ کیلوولت، فاصله ۱۵ سانتی متر و سرعت پمپ ۰/۷۵ میلی‌لیتر بر ساعت بود. در این شرایط، قطر تأیید آزمایشگاهی ۲۶۰/۵ نانومتر به دست آمد که همخوانی قابل قبول میان پیش‌بینی مدل و داده تجربی، اعتبار و قدرت پیش‌بینی مدل را برای مقیاس‌پذیری فرآیند تضمین می‌کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تلفیق روش سطح پاسخ با تکنیک الکتروریسی، راهکاری کارآمد و قابل تکرار برای تولید نانوحامل‌های زیست‌فعال با ویژگی‌های مورفولوژیکی کنترل شده فراهم می‌آورد و پایه‌ای مستحکم برای توسعه سیستم‌های رهاسازی هوشمند عصاره‌های گیاهی ارزشمند ایجاد می‌کند.

منابع

- Abdelhady, S. S., Atta, M., Megahed, A., Abu-Hasel, K., Alquraish, M., Ali, A. A. & Zoalfakar, S. H. 2022. Modeling electrospun PLGA nanofibers' diameter using response surface methodology and artificial neural networks. *Journal of Industrial Textiles*, 52, 15280837221142641
- Abdulhussain, R., Adebisi, A., Conway, B. R. & Asare-Addo, K. 2023. Electrospun nanofibers: Exploring process parameters, polymer selection, and recent applications in pharmaceuticals and drug delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 90, 105156.
- Ahmadi Bonakdar, M. & Rodrigue, D. 2024. Electrospinning: processes, structures, and materials. *Macromol*, 4, 58–103.
- Al Horani, R. Z., Kepekçi, R. A. & İçoğlu, H. İ. 2024. Bioactive PVA nanofiber mat loaded with artichoke bracts extract as a promising wound dressing biomaterial. *Materials Today Communications*, 38, 108249.
- Alimohammadifard, E., Emam-Djomeh, Z. & Ekrami, M. Optimizing the electrospinning process of poly (vinyl alcohol) nanocarrier containing Oxalis corniculata Linn.
- Alotaibi, F. T., Alamri, M. A., Alneghery, L. M., Alaseem, A. M., El-Desouky, M. G. & El-Bindary, A. A. 2025. Doxorubicin drug delivery using an electrospun nanofiber membrane of chitosan–polycaprolactone with metal–organic framework: Box–Behnken optimization, anticancer treatment, and antimicrobial activity. *RSC advances*, 15, 49243–49268.
- Alotaibi, F. T. & El-Bindary, A. A. 2026. Efficient Removal Of The Ciprofloxacin Drug Using An Electrospun Co/Al-Layered Double Hydroxide-Embedded Chitosan/Polyvinylidene Fluoride Nanofiber Membrane. *Rsc Advances*, 16, 10451–10478.
- Amer, A. A., Mohammed, R. S., Hussein, Y., Ali, A. S. & Khalil, A. A. 2022. Development Of Lepidium Sativum Extracts/Pva Electrospun Nanofibers As Wound Healing Dressing. *Acs Omega*, 7, 2.20695-0683.
- Angel, N., Guo, L., Yan, F., Wang, H. & Kong, L. 2020. Effect Of Processing Parameters On The Electrospinning Of Cellulose Acetate Studied By Response Surface Methodology. *Journal Of Agriculture And Food Research*, 2, 100015.
- Asadzadeh, R., Askari, G., Emam-Djomeh, Z. & Ekrami, M. 2024. Optimization Of The Electrospinning Process Of Hybrid Nanocarrier Based On Mung Bean (Vigna Radiate L.) Protein/Poly (Vinyl Alcohol). *Food Engineering Research*, 23, 165–182.
- Baykara, T. & Taylan, G. 2021. Coaxial Electrospinning Of Pva/Nigella Seed Oil Nanofibers: Processing And Morphological Characterization. *Materials Science And Engineering: B*, 265, 115012.
- Chinnappan, B. A., Krishnaswamy, M., Xu, H. & Hoque, M. E. 2022. Electrospinning Of Biomedical Nanofibers/Nanomembranes: Effects Of Process Parameters. *Polymers*, 14, 3719.

- Cho, Y., Baek, J. W., Sagong, M., Ahn, S., Nam, J. S. & Kim, I. D. 2025. Electrospinning And Nanofiber Technology: Fundamentals, Innovations, And Applications. *Advanced Materials*, 37, 25.00162.
- Da Cruz, E. P., Jansen, E. T., Fonseca, L. M., Dos Santos Hackbart, H. C., Siebeneichler, T. J., Pires, J. B., Gandra, E. A., Rombaldi, C. V., Da Rosa Zavareze, E. & Dias, A. R. G. 2023. Red Onion Skin Extract Rich In Flavonoids Encapsulated In Ultrafine Fibers Of Sweet Potato Starch By Electrospinning. *Food Chemistry*, 406, 134954.
- Ekrami, M., Ekrami, A., Roshani-Dehlaghi, N., Mobahi, N., Emam-Djomeh, Z., Salehi, M., Ovissipour, R. & Kalbasi-Ashtari, A. 2025. Anti-Biofilm Efficacy Of A Salep Mucilage-Based Pad Containing Nanoethosomal Allium Jesdianum Essential Oil Boiss. For Controlling Healthcare-Associated Infections. *Bionanoscience*, 15, 1–23.
- Ekrami, M., Yancheshmeh, B. S., Mobahi, N., Roshani-Dehlaghi, N., Ekrami, A., Emam-Djomeh, Z., Salehi, M. & Mohammadifar, M. 2026. Nanophytosomal Encapsulation Of Nepeta Pogonosperma L. Essential Oils For Sustained Release In Electrospun Nanofibers. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 104–120.
- Emam-Djomeh, Z., Ekrami, M., Mobahi, N. & Roshani-Dehlaghi, N. 2025. Surface Characterization Of Bionanocomposites. *Characterization Techniques In Bionanocomposites*, 85–107.
- Emam-Djomeh, Z., Mobahi, N., Ekrami, M. & Pourmohammad, E. 2024. Role Of Nanotechnology In Food Industries. *Nanotechnology In The Food Industry*, 93–110.
- Emam-Djomeh, Z., Ekrami, M., Ekrami & Ali 2023a. Overview Of Types Of Materials Used For Food Component Encapsulation. *Materials Science And Engineering In Food Product Development*, 1, 73–92.
- Emam-Djomeh, Z., Ekrami, M. & Ekrami, A. 2023. B. Design And Use Of Hydrogels For Food Component Encapsulation. *Materials Science And Engineering In Food Product Development*, 211–226.
- Fahimirad, S., Satei, P., Ganji, A. & Abtahi, H. 2023a. Wound Healing Capability Of The Double-Layer Polycaprolactone/Polyvinyl Alcohol-Chitosan Lactate Electrospun Nanofiber Incorporating Echinacea Purpurea Extract. *Journal Of Drug Delivery Science And Technology*, 87, 104734.
- Fahimirad, S., Satei, P., Ganji, A. & Abtahi, H. 2023b. Wound Healing Performance Of Pva/Pcl Based Electrospun Nanofiber Incorporated Green Synthetized Cunps And Quercus Infectoria Extracts. *Journal Of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 34, 277–301.
- Fahimirad, S., Satei, P., Latifi, A., Changizi-Ashtiyani, S., Bahrami, M. & Abtahi, H. 2024. Electrospun Pcl/Pva/Phmb Nanofibers Incorporating Ziziphus Jujuba Fruit Extract As Promising Wound Dressings With Potent Antibacterial And Antidiabetic Properties. *Journal Of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 35, 2484–2505.
- Feng, L., Shi, P., Zhao, L., Shang, M., Han, Y., Han, N., Liu, Z., Li, S., Zhai, J. & Yin, J. 2024. Structural Characterization Of Polysaccharides From Panax Ginseng Ca Meyer Root And Their Triggered Potential Immunoregulatory And Radioprotective Activities. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 280, 135993.
- Hamadi, N. B., Guesmi, A., Abd El-Fattah, W., El-Bindary, M. A., El-Desouky, M. G. & El-Bindary, A. A. 2025. Eco-Engineered Electrospun La/Rb-Mof/Chitosan-Pcl Nanofibrous Membrane For High-Performance, Recyclable, And Sustainable Cr (Vi) Removal From Water. *Rsc Advances*, 15, 44766–44796.
- Han, E. J., Elbegbayar, E., Baek, Y., Lee, J.-S. & Lee, H. G. 2023. Taste Masking And Stability Improvement Of Korean Red Ginseng (Panax Ginseng) By Nanoencapsulation Using Chitosan And Gelatin. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 250, 126259.
- Hoseini, M., Hamidi, S., Salehi, E., Mohammadi, A., Mirhoseini, F. & Ravaghi, M. 2024. Multi-Variate Multi-Objective Optimization Of Production Conditions For Electro-Spun Skin Scaffold Using Rsm And Investigation Of Gamma Irradiation Effects On The Properties Of The Optimized Sample. *Heliyon*, 10.
- Hosseini, F., Miri, M. A., Najafi, M., Soleimanifard, S. & Aran, M. 2021. Encapsulation Of Rosemary Essential Oil In Zein By Electrospinning Technique. *Journal Of Food Science*, 86, 4070–4086.
- Huang, Y., Li, X. & Tan, Z. 2025. Continuous Long-Distance Liquid Transport Along Fibers Arising From Plateau-Rayleigh Instability. *Chemical Engineering Science*, 312, 121711.
- Ji, D., Lin, Y., Guo, X., Ramasubramanian, B., Wang, R., Radacsi, N., Jose, R., Qin, X. & Ramakrishna, S. 2024. Electrospinning Of Nanofibres. *Nature Reviews Methods Primers*, 4, 1.
- Ji, X., Hou, C., Shi, M., Yan, Y. & Liu, Y. 2022. An Insight Into The Research Concerning Panax Ginseng Ca Meyer Polysaccharides: A Review. *Food Reviews International*, 38, 1149–1165.

- Khajavi, R. & Abbasipour, M. 2026. Controlling Nanofibre Morphology By The Electrospinning Process. *Electrospun Nanofibers*. Elsevier.
- Kočí, J., Míka Havlík, M., Procházka, V., Klusoňová, N. & Sedláčková, E. 2024. The Effect Of Solution Viscosity On The Quality Of Electroactive Nanofibers Produced By Electrospinning. *Monatshefte Für Chemie-Chemical Monthly*, 155, 349–352.
- Kong, L., Chen, P. & Chang, C. 2023. Drought Resistance And Ginsenosides Biosynthesis In Response To Abscissic Acid In Panax Ginseng Ca Meyer. *International Journal Of Molecular Sciences*, 24, 9194.
- Kumar, N., Goel, R., Gaur, P. K., Saxena, P. K., Puri, D., Chaudhary, R. & Yasir, M. 2021. Development And Evaluation Of Phytosome-Loaded Microsphere System For Delivery Of Ginseng Extract. *Journal Of Microencapsulation*, 38, 496–506.
- Lee, K.-Y., Shim, S.-L., Jang, E.-S. & Choi, S.-G. 2024. Ginsenoside Stability And Antioxidant Activity Of Korean Red Ginseng (Panax Ginseng Ca Meyer) Extract As Affected By Temperature And Time. *Lwt*, 200, 116205.
- Li, Z., Wang, C., Li, Z. & Wang, C. 2013. Effects Of Working Parameters On Electrospinning. *One-Dimensional Nanostructures: Electrospinning Technique And Unique Nanofibers*, 15–28.
- Malara, A. 2024. Environmental Concerns On The Use Of The Electrospinning Technique For The Production Of Polymeric Micro/Nanofibers. *Scientific Reports*, 14, 8293.
- Martins, R., Mouro, C., Pontes, R., Nunes, J. & Gouveia, I. 2023. Natural Deep Eutectic Solvent Extraction Of Bioactive Pigments From Spirulina Platensis And Electrospinning Ability Assessment. *Polymers*, 15, 1574.
- Mhetre, H., Kanse, Y. & Chendake, Y. 2023. Influence Of Electrospinning Voltage On The Diameter And Properties Of 1-Dimensional Zinc Oxide Nanofiber. *Es Materials And Manufacturing*, 20, 838.
- Min, J.-Y., Lee, Y.-K., Chang, Y. H. & Kwak, H.-S. 2018. Red Ginseng Extract Capsule Fabricated Using W/O/W Emulsion Techniques. *International Journal Of Food Properties*, 21, 1888. ۱۸۹۵–
- Mirzakhani, M., Ekrami, M. & Moini, S. 2018. Chemical Composition, Total Phenolic Content And Antimicrobial Activities Of Zhumeria Majdae. *Journal Of Food And Bioprocess Engineering*, 1, 47–52.
- Mouro, C. & Gouveia, I. C. 2024. Electrospun Wound Dressings With Antibacterial Function: A Critical Review Of Plant Extract And Essential Oil Incorporation. *Critical Reviews In Biotechnology*, 44, 641–659.
- Nazemi, M. M., Khodabandeh, A. & Hadjizadeh, A. 2022. Near-Field Electrospinning: Crucial Parameters, Challenges, And Applications. *Acs Applied Bio Materials*, 5, 394–412.
- Parin, F. N., Aydemir, Ç. İ., Taner, G. & Yıldırım, K. 2021. Co-Electrospun-Electrosprayed Pva/Folic Acid Nanofibers For Transdermal Drug Delivery: Preparation, Characterization, And In Vitro Cytocompatibility. *Journal Of Industrial Textiles*, 1528083721997185.
- Rahbari, S., Tavakolipour, H. & Kalbasi-Ashtari, A. 2024. Application Of Electro-Spraying Technique And Mathematical Modelling For Nanoencapsulation Of Curcumin. *Heliyon*, 10.
- Rahma, E., Hernawati, R. M., Dewi, S. A., Achmad, F., Abdullah, F., Mohamad, J. N. & Vidia Putra, V. G. 2026. Analyzing Data Using Artificial Intelligence For Optimization Of Electrospun Polyvinyl Alcohol-Averrhoa Bilimbi Nanofiber Diameters. *Journal Of Macromolecular Science, Part B*, 65, 432–440.
- Refate, A., Mohamed, Y., Mohamed, M., Sobhy, M., Samhy, K., Khaled, O., Eidaroos, K., Batikh, H., El-Kashif, E. & El-Khatib, S. 2023. Influence Of Electrospinning Parameters On Biopolymers Nanofibers, With Emphasis On Cellulose & Chitosan. *Heliyon*, 9.
- Rêgo, T. R. S., Toledo, A. L. M. M. & Dias, M. L. 2025. Effect Of Processing On The Morphology And Structure Of Plga/Pva Fibers Produced By Coaxial Electrospinning. *Processes*, 13, 1837.
- Rezaei, A. & Zebarjad, S. M. 2024. Evaluation Of The Effective Parameters On The Electrospinning Of Polyvinyl Alcohol–Chitosan Nanofibers Using Response Surface Methodology (Rsm). *Macromolecular Research*, 32, 1005–1027.
- Rieger, K. A., Birch, N. P. & Schiffman, J. D. 2016. Electrospinning Chitosan/Poly (Ethylene Oxide) Solutions With Essential Oils: Correlating Solution Rheology To Nanofiber Formation. *Carbohydrate Polymers*, 139, 131–138.
- Shaban, M., Mosa, T. M., Abdel-Hamid, H., Abdalfarg, N. & Hashim, G. 2026. Advancements In Electrospinning: A Comprehensive Review Of Historical Development, Key Parameters, Applications, And Challenges. *Discover Chemistry*, 3, 82.

- Shabani, A., Al, G. A., Berri, N., Castro-Dominguez, B., Leese, H. S. & Martinez-Hernandez, U. 2025. Electrospinning Technology ,Machine Learning, And Control Approaches: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 27, 2401353.
- Shahid, M. A. & Khan, M. S. 2022. Preparation And Characterization Of Electrospun Nanofiber Membrane From Polyvinyl Alcohol Loaded With Glycyrrhiza Glabra Extract. *Polymers And Polymer Composites*, 30, 09673911221109422.
- Sharma, D., Saha, D. & Satapathy, B. K. 2021. Structurally Optimized Suture Resistant Polylactic Acid (Pla)/Poly (C-Caprolactone)(Pcl) Blend Based Engineered Nanofibrous Mats. *Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials*, 116, 104331.
- Sharma, G. K. & James, N. R. 2022. Electrospinning: The Technique And Applications. *Recent Developments In Nanofibers Research*. Intechopen.
- Sree, S., Patra, A., Prasath, V. A., Kambhampati, V. & Xiao, H.-W. 2025. Innovations In Electrospinning Techniques For Nanomaterial Synthesis And Its Applications In The Field Of Active Food Packaging. *Journal Of Future Foods*.
- Stoyanova, N., Nachev, N. & Spasova, M. 2023. Innovative Bioactive Nanofibrous Materials Combining Medicinal And Aromatic Plant Extracts And Electrospinning Method. *Membranes*, 13, 840.
- Sukowati, R., Agung, B. H., Rohman, Y. M., Sabandar, M. G., Waresindo, W. X., Hapidin, D. A., Edikresnha, D. & Khairurrijal, K. 2024. Optimization Of Electrospinning Process Parameters Using Box-Behnken Design For Nylon-6 Nanofibers Fabrication. *Materials Today: Proceedings*.
- Sukowati, R., Waresindo, W. X. & Hapidin, D. A. Optimization Of Electrospinning Parameters Using Box-Behnken-Based Design Of Experiments (Doe) For The Fabrication Of Ninjaflex/Cacl2 Nanofibers As Potential Application In Flexible Sensors. *Journal Of Physics: Conference Series*, 2025. Iop Publishing, 012004.
- Sukpancharoen, S., Wijakmatee, T., Katongtung, T., Ponhan, K., Rattanachoung, N & .Khojitmate, S. 2024. Data-Driven Prediction Of Electrospun Nanofiber Diameter Using Machine Learning: A Comprehensive Study And Web-Based Tool Development. *Results In Engineering*, 24, 102826.
- Tekin, M. D., Çelikoğlu, S. & Aydin, H. 2023. Electrospun Rocket Seed (Eruca Sativa Mill) Mucilage/Polyvinyl Alcohol Nanofibers: Fabrication And Characterization. *Iranian Polymer Journal*, 32, 203–211.
- Theron, S., Zussman, E. & Yarin, A. 2004. Experimental Investigation Of The Governing Parameters In The Electrospinning Of Polymer Solutions. *Polymer*, 45, 2017–2030.
- Topuz, F., Abdulhamid, M. A., Holtzl, T. & Szekely, G. 2021. Nanofiber Engineering Of Microporous Polyimides Through Electrospinning: Influence Of Electrospinning Parameters And Salt Addition. *Materials & Design*, 198, 109280.
- Xu, W., Zhou, W., Sun, J., Chen, W., Wu, X., Guan, T., Zhao, Y., Yang, P., Hu, Z. & Li, G. 2024. Isolation, Structural Characterization, And Hypoglycemic Activity Of Polysaccharides From The Stems Of Panax Ginseng Ca Meyer. *Frontiers In Sustainable Food Systems*, 8, 1500278.
- Zeinali, T., Alemzadeh, E., Zarban, A., Khorashadizadeh, M. & Ansarifard, E. 2021. Fabrication And Characterization Of Jujube Extract-Loaded Electrospun Polyvinyl Alcohol Nanofiber For Strawberry Preservation. *Food Science & Nutrition*, 9, 6353–6361.
- Ziyadi, H., Baghali, M., Bagherianfar, M., Mehrali, F. & Faridi-Majidi, R. 2021. An Investigation Of Factors Affecting The Electrospinning Of Poly (Vinyl Alcohol)/Kefiran Composite Nanofibers. *Advanced Composites And Hybrid Materials*, 4, 768–779.

Optimization of Electrospinning Parameters of Nanofibers Loaded with Red Ginseng Extract (*Panax ginseng* C.A. Meyer) Using RSM

Behdad Shokrollahi Yancheshmeh^{1*}, Mohammad Ekrami², Malihe Salari Shorabi³

***Corresponding Author:** Research Group for Food Production Engineering, National Food Institute, Technical University of Denmark, Søtofts Plads 227, 2800, Kongens Lyngby, Denmark

Email: beshyan@food.dtu.

Received: 21 May 2026 **Accepted:** 6 June 2026

http://doi: [10.22092/fooder.2026.372884.1457](https://doi.org/10.22092/fooder.2026.372884.1457)

Abstract

Electrospinning is one of the most suitable techniques to produce uniform polymeric nanocarriers for encapsulating bioactive compounds. In this study, the electrospinning process parameters of poly (vinyl alcohol) nanofibers loaded with red ginseng extract (*Panax ginseng* C.A. Meyer) were optimized using response surface methodology based on a central composite design. The independent variables comprised extract concentration (2 to 6% v/v), applied voltage (12.5 to 22.5 kV), feed flow rate (0.4 to 1.2 mL/h), and tip-to-collector distance (15 to 30 cm). The physical properties of the electrospinning solutions and fiber morphology were examined. The developed quadratic model showed an excellent fit with the experimental data, as confirmed by statistical analysis ($R^2 = 0.9977$). The predicted best condition for the preparation of uniform nanocarriers with a diameter of 260 nm was 3.5% extract concentration, 15 cm tip-to-collector distance, 21.5 kV applied voltage, and 0.75 mL/h feed flow rate. At these conditions, the encapsulation efficiency of the extract in nanofibers reached 78.4%, suggesting that this system could be very promising. In addition, it was found that the extract altered the viscosity and electrical conductivity of the electrospinning solutions, thus affecting the fiber diameter. These results confirmed that polyvinyl alcohol nanofibers could be used as a platform for the controlled release of red ginseng bioactive compounds sensitive to various processing conditions.

Keywords: Electrospinning, Red ginseng, Poly (vinyl alcohol) nanofibers, Encapsulation, Response surface methodology