



## تأثیر پارامترهای مختلف بر روی قطر و ساختار الیاف نانو الکتروریسی شده استات سلولز/ پلی اتیلن اکساید

پانته آ صالحی زاده<sup>۱</sup>، مسعود تقی زاده<sup>۲\*</sup>، زهرا امام جمعه<sup>۳\*</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران، کرج، ایران.  
 ۲- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.  
 ۳- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

## اطلاعات مقاله

## چکیده

## تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

## کلمات کلیدی:

الکتروریسی،

نانوالیاف،

استات سلولز،

پلی اتیلن اکساید،

سورفکتانت.

DOI: 10.52547/fsct.19.124.371

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.124.3.0

\* مسئول مکاتبات:

mtaghizadeh@um.ac.ir

emamj@ut.ac.ir

هدف از این پژوهش، تولید الیاف نانو الکتروریسی شده از پلیمرهای استات سلولز (CA) / پلی اتیلن اکساید (PEO) با استفاده از محلول اسید استیک غلیظ به عنوان یک حلال غیر سمی می باشد. در این محلول، CA/PEO با نسبتهای ۱-۱/۵-۲، اگزالات آمونیوم ۳٪ (w/w) و سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات (SDS) ۱-۰/۵-۳ (w/w) بکاررفته است. غلظت نهایی پلیمرها در محلول ۷٪ (w/v) می باشد. تأثیر نسبتهای مختلف پلیمر و سورفکتانت بر روی قطر، استحکام کششی، طول درنقطه تسلیم و پاره گی و تخلخل توسط روش سطح پاسخ طرح مرکب مرکزی (RSM-CCRD) به منظور بهینه سازی الیاف نانو الکتروریسی شده (ENFs) بررسی گردیده. نتایج تحلیل رگرسیون مرکب نشان دادند که خصوصیات محلول و مورفولوژی ENFs به شدت تحت تأثیر نسبتهای CA/PEO و SDS قرار گرفته اند. افزایش مقدار کمک پلیمر PEO باعث افزایش ویسکوزیته می شود، که تابعی از وزن مولکولی است و در نتیجه با درهم آمیختگی محلول پلیمر، قطر الیاف افزایش می یابد. افزایش میزان SDS با کاهش کشش سطحی باعث کاهش اندازه قطر الیاف نانو و افزودن اگزالات آمونیوم باعث بهبود هدایت الکتریکی (EC) می گردد. قطر ENFs تشکیل شده ۱۶۳-۹۶ نانومتر می باشد. بهینه کلی در سطح ترکیبی CA/PEO ۲ و SDS ۱/۵ (w/w) می باشد. مدلهای چند جمله ای مرتبه دوم با  $R^2 = 0.86-0.97$  با استفاده از تجزیه و تحلیل مکعبی توسعه داده شدند. قطر و مورفولوژی ENFs به طور قابل توجهی تحت تأثیر قطر، تخلخل، استحکام کششی و طول درنقطه تسلیم و پاره گی ( $P < 0.0001$ ) قرار دارد و به ترتیب در نقطه بهینه ۹۹۹nm، ۵۴/۱۷،  $0.017N/mm^2$  و ۵ mm می باشند. بیشتر ENFs یکنواخت و بدون مهره با مکان های فعال و مقاومت مکانیکی بالا قادرند در زمینه های مختلف بکار روند.

## ۱- مقدمه

الکتروریسی به عنوان یک تکنیک جدید برای تولید الیاف پلیمری در محدوده چند میکرون تا نانومتر می باشد. این تکنیک بسیار آسان، کارآمد، سریع، اقتصادی و قابل انعطاف است. بسیاری از عوامل در فرآیند الکتروریسی از جمله وزن مولکولی پلیمر، حلال، کشش سطحی، میدان الکتریکی، غلظت محلول، هدایت الکتریکی، نقش مهمی دارند [۲۱ و ۲]. نانوالیافهای الکتروریسی شده (ENFs) با خصوصیات بی نظیر مانند نسبت سطح به حجم بسیار زیاد، اتصال آسان با مواد فعال مانند ویتامینها، آنتی اکسیدانها، عملکرد مکانیکی عالی، تخلخل بالا با اندازه منافذ بسیار کم و انعطاف پذیری نسبت به سایر مواد یکپارچه مهندسی شده ارجحیت دارند. این الیافها میتوانند در زمینه های مختلفی از جمله تثبیت آنزیم [۳]، بسته بندی مواد غذایی [۴]، اندام مصنوعی، پانسمان زخم، انتقال دارو [۵] و سیستم تصفیه هوا و آب کاربرد داشته باشند [۶].

برای تهیه ENFs از پلیمرهای زیستی و مصنوعی استفاده می شود ولی به علت اینکه پلیمرهای زیستی از لحاظ سازگاری زیستی با محیط، قابلیت بازیافت مجدد، فراوان و غیرسمی بودن و قابل خوردن و گوارش پذیر بر پلیمرهای غیر ارگانیک و صنعتی برتری دارند، کاربرد آنها در زمینه های مختلف وابسته افزایش پیدا کرده است.

در این تحقیق هدف بر این است که با تولید نانو الیاف از پلیمر زیستی مانند استات سلولز با دارا بودن گروه های فعال OH- بتوان بستر مناسبی تهیه نمود. البته الکتروریسی کردن با این پلیمرها به علت خصوصیات پلی کاتیونی، حلالیت کم در حلال های ارگانیک و انعطاف پذیری کم زنجیره ها دشوار می باشد [۷]. در نتیجه این پلیمرها نیازمند بهینه کردن با اصلاح ساختار با بکار بردن حلال و کمک پلیمرهای مناسب به منظور تشکیل نانو الیاف با قطر کم و استحکام بالا می باشد [۱ و ۸]. یکی از روش های مقابله با این مشکل، اضافه کردن عوامل کمک رسی مانند نمک ها، کمک پلیمرها و سورفکتانت ها می باشد. کمک پلیمرها به طویل شدن زنجیره، تشکیل الیاف، کاهش تعاملات الکترواستاتیکی و افزایش قدرت اسپینینگ در پلیمر کمک می کنند. افزودن PEO به عنوان کمک پلیمر، با دارا بودن خواص مکانیکی بسیار مناسب، از جمله قابلیت جهت یابی، کشیدگی بالا و قابلیت سازگاری زیستی، در بین سایر مواد مصنوعی برتری دارد [۹ و ۱۰]. همچنین نمکها با افزایش

رسانش الکتریکی می توانند یکی از عوامل مهمی باشند که بر روی مورفولوژی نانو الیافها تاثیر می گذارد. ضعیف بودن رسانش الکتریکی محلول پلیمر منجر به تشکیل ساختار های دانه ای و همچنین کاهش استحکام نانو الیافها می گردد [۱۱]. افزودن مقدار کمی از نمک های یونی لیتیم کلراید و اگزالات آمونیوم ( $C_2H_8N_2O$ ) می تواند در کنترل اندازه و بهبود مورفولوژی الیاف الکتروریسی کمک کنند [۱۲]. اگرچه برخی معتقدند که افزودن نمک به محلول پلیمری باعث افزایش فشار و چسبندگی شده و قطر الیافها افزایش می یابد [۱۳ و ۱۴]. Kriegel و همکاران دلالت بر این داشتند که EC بالاتر می تواند قطر الیاف را کاهش دهد، به دلیل چگالی بار بیشتر در طول جت و در نتیجه نیروهای کششی قوی که باعث کشیدگی جت و کاهش قطر الیاف می گردد [۱۵].

از حلال های مختلفی برای ساختن نانو الیافهای استات سورفکتانت ها نیز می تواند با کاهش کشش سطحی جزو عوامل تاثیرگذار در تشکیل نانو الیافها باشند. اضافه نمودن مقدار کمی سورفکتانت به پلیمر باعث کاهش ولتاژ مورد استفاده و افزایش و بهبود ریسیدن فرآیند الکتروریسی می گردد [۱۵]. نتایج نشان دادند که متوسط قطر الیاف نانو تشکیل شده از PVA/آنیونی و PVA/سورفکتانت غیر یونی از ۴۰۵ به ۱۰۰ نانومتر کاهش یافته است زیرا این سورفکتانتها منجر به هدایت بیشتر و کشش سطح پایین تر می شود [۱۶]. اضافه کردن سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات در بالاترین غلظت سورفکتانت یونی ۱۰ mM در محلول کیتوزان باعث کاهش غلظت کیتوزان به ۵۳/۵٪ در محلول اسید استیک ۵۰٪ و ۳۹٪ در محلول کیتوزان اسید استیک ۹۰٪ شده است [۱۵].

سلولز مانند اسید استیک؛ آب، آب؛ استون، DMF، دیوکسان، (Trifluoroethylene) TFE، N DMF، N دی متیل اتیلن فرمامید) و ۱:۲ استون؛ دی متیل استامید (DMAc) استفاده می شود. نانوالیافهای استات سلولز که از ۵ و ۸ درصد وزنی از محلول استون تولید گردیده، کوتاه و در حدود ۱Mm می باشند. حلال استون دارای نقطه جوش کم است که منجر به تبخیر سریع می شود و بنابراین غلظت محلول پلیمر افزایش می یابد [۱۷]. برومند و همکاران، تولید ENFs شده از ترکیب دو پلیمر استات سلولز و پلی اتیلن اکساید (۱/۵-۱/۵) و نمک CA/PEO با استفاده از حلال DMF/DOX ۱:۱ و نمک

استات سلولز (CA) ۳۰ کیلو دالتون (۳۹/۸٪) درجه استیلته شده، (Mn=۳۰) و پلی اتیلن اکساید (PEO) ۲۰۰ کیلو دالتون از شرکت Sigma Chemical Co خریداری و در طول مطالعه استفاده شده است. اسید استیک ۹۰٪، اگزالات آمونیوم C<sub>2</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>O و سدیم دودسیل سولفات از شرکت Merck (Germany, Darmstadt) خریداری شده است.

## ۲-۲- ساخت نانوالیاف استات سلولز/ پلی

### اتیلن اکساید

#### ۲-۲-۱- تهیه حلال الکترورسی

با توجه به CCRD، نسبت ثابت هر پلیمر و همچنین مقدار مشخصی از آمونیوم اگزالات و سدیم دودسیل سولفات (جدول ۱) در اسید استیک ۹۰٪ تهیه شد. این مخلوط ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط تحت یک سرعت همزن ثابت (۳۰۰ دور در دقیقه) به منظور به دست آوردن محلولهای همگن و روشن مخلوط شده اند. نسبت کل پلیمرها در حلالها ۷٪ (w/v) میباشد. سپس محلولها به بطری های قهوه ای منتقل و در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) ذخیره شده تا برای فرآیند الکترورسی و تجزیه و تحلیل های بعدی مورد استفاده قرار گیرند.

LiCl (۳/۷-۰/۰) پرداخته اند. نتایج بدست آمده نشان دادند که ساختار و قطر الیاف با تغییر نسبت CA/PEO و مقدار LiCl تغییر می کند [۱۲ و ۱۸].

در این پژوهش نانوالیاف الکترورسی شده از ترکیب دو پلیمر استات سلولز و پلی اتیلن اکساید، نمک اگزالات آمونیوم و سدیم دودسیل سولفات با استفاده از حلال استیک اسید یک حلال غیر سمی تولید گردید و خصوصیات مکانیکی و مورفولوژی الیاف الکترورسی شده مورد آزمون قرار گرفته اند. خصوصیات مکانیکی الیاف نانو استات سلولز، به خصوص مقاومت و کشیدگی و ساختار مورفولوژیکی الیاف نانو با میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، تأثیرنسبت CA/PEO و SDS بر قطر، کشش سطحی، طول در نقطه پاره گی و تخلخل ENFs مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از طرح فاکتوریل CCRD برای تخمین سطح پاسخ آزمایشات با تعداد محدود پارامتر استفاده شده است.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- مواد اولیه مورد استفاده

**Table 1** The central composite rotatable design (CCRD) matrix and experimental data obtained for the response variables (mean  $\pm$  SD). FD: Fiber Diameter, PO: Porosity

Run	CA/PEO	SDS	FD	PO	Tensile strength	Elongation at Break (EB)
	w/w	wt. %				
1	1.5	3	124	55.73	0.010	2.40
2	1.5	1.5	147	91.73	0.019	3.13
3	1	3	132	68.25	0.007	2.70
4	1	1.5	163	116.78	0.008	2.50
5	1.5	1.5	147	91.73	0.019	3.13
6	1.5	1.5	147	91.73	0.019	3.13
7	2	1.5	99	54.17	0.017	5.00
8	1.5	1.5	147	91.73	0.019	3.13
9	2	3	96	43.21	0.014	5.33
10	1.5	1.5	147	91.73	0.019	3.13
11	1	0	154	102.69	0.022	4.69
12	2	0	116	47.9	0.030	8.93
13	51.5	0	128	61.99	0.021	3.85

## ۲-۳-۲- آزمونهای مورد بررسی بر روی خصوصیات نانوالیاف

### ۲-۳-۱- اندازه گیری مورفولوژی الیاف نانو

مورفولوژی و قطر الیاف نانو توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM, KYKY-EM 3200 SN;0056,Chain) بررسی گردید. در این روش پیش از عکسبرداری نمونه ها با یک لایه نازک طلا (BAL-TEC SCD 005) توسط دستگاه پاششی (BAL-TEC AG, Balzers, Liechtenstein) پوشانده شده اند. سپس نمونه ها در محفظه SEM قرار گرفته و تحلیل های SEM بر روی تصاویر بدست آمده، انجام گردید.

### ۲-۳-۲- اندازه گیری قطر الیاف

برای اطمینان از عدم وجود گره از میکروسکوپ نوری X OMAX0.5 (Auxiliary Objective Lens) استفاده شده و برای اندازه گیری قطر الیاف نرم افزار ImageJ بکار گرفته شده است. ۳۰ تا از تصاویر اسکن شده توسط SEM به طور تصادفی انتخاب و میانگین حاصل از قطر ۱۰۰ نانو الیاف اندازه گیری گردید.

### ۲-۳-۳- اندازه گیری خصوصیات مکانیکی نانوالیاف

خصوصیات مکانیکی نانوالیاف با استفاده از دستگاه Instron Brookfield CT3 اندازه گیری شده است. سرعت کششی ۰/۵ میلی متر بر ثانیه و فاصله گیره ها ۲ سانتی متر انتخاب شده اند. طول، عرض و ضخامت هر نمونه الیاف به ترتیب ۵، ۱/۵ و ۰/۱ سانتی متر می باشند. هر نمونه ۳ مرتبه تست و پس از آن میانگین و انحراف معیار محاسبه شده است [19]. (USA, TexturePro CT V1.8 Build 31)

### ۲-۳-۴- آنالیز میزان تخلخل

در این روش تصاویر بدست آمده از SEM توسط اسکنر (hpscanjet 3670) با وضوح dpi ۶۰۰ و در مقیاس خاکستری ۲۵۶ اسکن شده اند [20]. با استفاده از این روش امکان اندازه گیری ۹۰٪ تخلخل تمام لایه های نانوالیاف صورت می گیرد. درحالیکه در روش اندازه گیری تخلخل توسط روشهای غیر مستقیم Mercury porsimetry و توسط اندازه گیری دانسیته حداکثر ۸۰٪ بازدهی دارد و قادر به نشان دادن تخلخل لایه های مختلف نمی باشند [20].

### ۲-۳-۵- الکترورسی محلول های CA/PEO

الکترورسی در ولتاژ ۲۳-۱۷ کیلو ولت با استفاده از یک سرنگ ۱ میلی لیتر مجهز به سوزن فلزی (Gauge ۲۷) و محلول پلیمر در یک پمپ سرنگ قرار داده شده، که با میزان

توزیع محلول پلیمر ۰/۰۳۳/۰۶۶-۰/۰ میلی لیتر در دقیقه و با قراردادن نوک سوزن در فاصله ۲۳-۱۰ میلی متر با جمع کننده کار می کند. الیاف روی فویل آلومینیومی که روی درام پوشانده شده، جمع آوری شدند. سپس، فویل آلومینیومی از جمع کننده جدا و برای آنالیز با میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. خلاصه ای از مخلوط های پلیمری و شرایط الکترورسی در جدول ۱ آورده شده است.

### ۲-۳-۶- طرح آزمایشها و آنالیز آماری

طرح CCRD برای ارزیابی اثر متغیرهای مستقل ۲-۱/۵-۱ CA/PEO:۱ و SDS ۱-۰/۳-۵٪ (w/w) بر متغیرهای پاسخ اندازه قطر، کشش سطحی، استحکام مکانیکی، میزان تخلخل به کار برده شد. بر پایه طرح مرکب مرکزی ۲-فاکتور ۲-سطح، ۱۳ محلول پلیمری سه جزئی برای هر یک از نمونه ها تهیه گردید. برای تحلیل داده های خام به دست آمده در بخش های مختلف آزمایش بنا به نیاز از نرم افزارهای (SPSS16, Design expert8(trail version 8.0.7.1 atat-Ease MinneapolisMN, USA, Microsoft excel, Inc, Response Surface 2010 استفاده شد. از RSM) Methodology برای بهینه سازی شرایط فرآیند الکترورسی استفاده گردید. موثرترین متغیرها بر ویژگی محلول الکتریکی و نانو الیاف های که ساخته می شود از آنها بهینه سازی می گردد. به منظور برآورد تکرارپذیری روش نقاط مرکزی ۶ بار تکرار گردید. برای به کمینه رساندن اثر متغیرهای ناشناخته که به دلیل فاکتورهای ناخواسته بر پاسخ ها مشاهده می گردد آزمایش های تصادفی انجام شده است. تابع های پاسخ (y) به وسیله مدلهای چند جمله ای درجه اول و دوم با استفاده از مدل (۱) به متغیرهای کد شده (مستقل) مرتبط گردید [21].

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \epsilon \quad (1)$$

ضرایب این معادلات به صورت زیر بیان می شود، ثابت معادل  $\beta_0$ ، اثر های خطی  $\beta_1$  و  $\beta_2$ ، اثر های درجه دوم  $\beta_{11}$  و  $\beta_{22}$  و اثرهای متقابل  $\beta_{12}$ ،  $\beta_{13}$  و  $\beta_{23}$  برازش مدل های چند جمله ارائه شده با استفاده از ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب تعیین تعدیل شده ( $adj-R^2$ )، ضریب تعیین پیش بینی شده ( $Pred-R^2$ )، ضریب پراکندگی (CV) و دقت لازم (ADP) بررسی می گردد. برای تجزیه تحلیل داده ها در بخش های مختلف آزمایش به طور عمده از نرم افزار Microsoft Excel 2010 استفاده شد. همه داده ها در

میانگین سه تکرار به همراه انحراف استاندارد گزارش شده اند.

### ۳- یافته‌ها

#### ۳-۱- خصوصیات محلول‌های ترکیبی

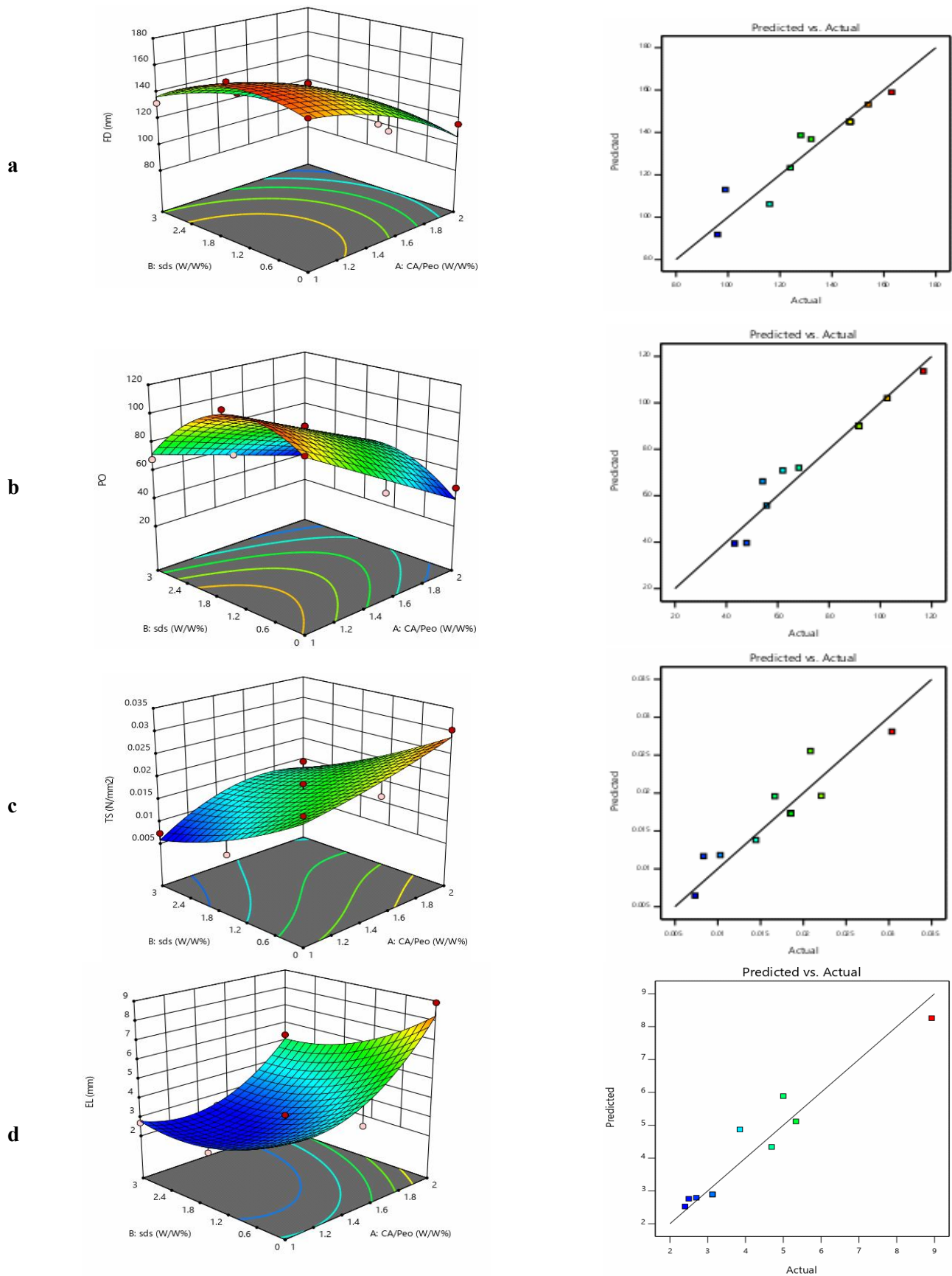
##### CA/PEO

مجموعه ای از آزمایشات برای تهیه الیاف نانو الکترورسی شده با کیفیت بالا (داده‌ها نشان داده نشده است) انجام شد. نتایج نشان داد که غلظت پلیمر ۷٪ (w/v) مقدار مناسبی در سیستم حلال شامل ۹۰٪ اسید استیک است. برخی از آزمایشات اولیه برای ارزیابی تأثیر ترکیب CA/PEO و SDS بر قطر ENFs و مورفولوژی انجام شد. تأثیر سرعت جریان، فاصله و ولتاژ به عنوان پارامترهای پردازش برای دستیابی به بهترین شرایط مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ولتاژ ۱۸ کیلوولت، سرعت جریان

۰/۰۰۶۶ میلی لیتر در ساعت و فاصله ۲۳۰ میلی متر منجر به تولید الیاف مناسب (بدون گره) می‌گردد (داده‌ها نشان داده نشده است). تأثیر دو متغیر مستقل نسبت CA/PEO ( $X_1$ ) و SDS ( $X_2$ ) و روابط متقابل آنها بر متغیرهای پاسخ بررسی شد. تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) جهت بررسی مدلها و همچنین شناخت عوامل تأثیرگذار بکار گرفته شده. متغیرهای مستقل وابسته مناسب با معادله چند جمله‌ای مرتبه دوم جای داده شدند. در جدول ۲ اهمیت آماری، معادلات خطی و درجه دوم و اثرات متقابل برای هر پاسخ محاسبه شد. شکل ۱ تصاویر سه بعدی اثر ترکیبی محتوای CA/PEO و SDS بر قطر، استحکام کششی، کشیدگی و تخلخل ENFs را نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان دادند که مورفولوژی و ساختار ENFs به شدت از نظر میزان CA/PEO و SDS تحت تأثیر قرار گرفته اند.

**Table 2** ANOVA analysis of experimental variables as a linear, quadratic and interaction terms of each response variable and corresponding coefficients for the predictive models

Source	Fibers diameter (nm)		Porosity		Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )		Elongation at Break (mm)		
	df	Sum of Squares	p-value	Sum of Squares	p-value	Sum of Squares	p-value	Sum of Squares	p-value
<b>Model Linear</b>	5	4732.74	0.0017	6238.71	0.0002	0.0004	0.0071	34.99	0.0008
A-CA/Peo	1	3174	0.0003	3308.77	<0.00001	0.0001	0.0152	14.62	0.0005
B-sds	1	6352.67	0.05	343.34	0.0336	0.0003	0.0009	8.24	0.0027
<b>Quadratic</b>									
A <sup>2</sup>	1	223.71	115	0.002	0.9951	7.793	0.3877	5.63	0.0071
B <sup>2</sup>	1	541.33	0.0266	1959.17	0.0004	5.258	0.474	1.78	0.0728
<b>Interaction</b>									
AB	1	1000		221.07	0.0722	3.257		0.64	0.4261
<b>Residual</b>	7	484.33		345.65		0.0001		2.80	
Lack of Fit	3	48.334		345.65		0.0001		2.80	
Pure Error	4	0.000		0.000		0.0000		0.000	
<b>Cor Total</b>	12	5217.08		6584.36		0.0005		37.79	
<b>R<sup>2</sup></b>		0.9027		0.9475		0.8575		0.9260	
<b>Adjusted R<sup>2</sup></b>		0.8409		0.9100		0.7557		0.8731	
<b>Predicted R<sup>2</sup></b>		0.1483		0.5423		0.0295		.4163	
<b>Adeq Precision</b>		11.8885		15.5511		10.5127		13.3511	
<b>C/V/ %</b>		6.19		9.05		17.66		16.10	



**Fig 1** 3D graphs and predicted vs. actual plots illustrating the combined impact of CA / PEO ratio, SDS on the diameter (a), porosity (b), tensile strength (c), and elongation (d)

## ۳-۲- اندازه گیری تخلخل

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شد، مدل پیشنهادی برای تخلخل معنی دار بود ( $P < 0.001$ )، نقص برازش  $345/65$  و  $ADP 15/55$  می باشد.

نتایج نشان دادند که اثرات خطی  $CA/PEO$  و  $SDS$  به ترتیب  $P < 0.0001$  و  $P < 0.05$  و همچنین اثر درجه دوم  $SDS$   $P < 0.0005$  بر تخلخل معنی دار می باشد (جدول ۲). در نتیجه، نسبت متفاوتی از مقدار  $CA/PEO$  و  $SDS$  بر تخلخل تأثیر می گذارد. از  $R^2$  آنجاییکه در جدول ۱ نشان داده شده است، بیشترین و کمترین تخلخل به ترتیب  $Run 4$  با قطر  $163$  نانومتر با تخلخل  $116/78$ ،  $Run 12$  با قطر  $96$  نانومتر با تخلخل  $43/21$  می باشد. در نتیجه همانطور که نتایج نشان دادند، الیاف قطورتر تخلخل بیشتری دارند. تخلخل با تعداد لایه ها مرتبط است و با افزایش تعداد لایه ها به دلیل همپوشانی بیشتر الیافها به حداقل مقدار نزدیک می شود. در شکل ۱b مشخص شده است که با افزایش  $CA/PEO$  و  $SDS$  تخلخل و قطر الیاف کاهش پیدا کرده است. با افزایش  $PEO$  قطر الیاف افزایش در نتیجه تخلخل افزایش پیدا می کند. مقادیر  $ADP$  و  $CV$  نیز برای مدل مناسب  $15/55$  و  $9/05$  بود. مقادیر  $adj-R^2$  و  $pred-R^2$  به ترتیب  $0.94$ ،  $0.91$ ،  $0.52$  نیز تأیید کردند که این مدل بسیار معنی دار است.

$$PO = 89/94 - 23/73 X_1 - 7/56 X_2 - 26/63 X_2^2$$

## ۳-۳- مقاومت کششی

یک چالش مهم در کاربرد الیافهای نانو، مقاومت و استحکام مکانیکی (از لحاظ کشسانی و انعطاف پذیری) می باشد. استحکام الیافهای نانو به چندین نکته مانند قطر، طول، جهت گیری الیاف در ساختار، استحکام، مورفولوژی سطح و نیروهای اصطکاک انسجام در بین الیاف بستگی دارد [۲۲ و ۲۳]. همانطور که در جدول ۲ در نظر گرفته شده است، مدل پیشنهادی برای مقاومت کششی (TS) کاملاً معنی دار ( $P < 0.05$ ) و مقدار  $ADP 10/51$  می باشد.  $ADP$  دامنه مقادیر پیش بینی شده در نقاط طراحی مدل را با میانگین خطای پیش بینی مقایسه می کند. نسبت بیشتر از ۴ مطلوب است. جدول ۲ نشان می دهد که استحکام کششی به شدت تحت تأثیر اثر خطی  $CA/PEO$  ( $P < 0.05$ ;  $X_1$ ) و  $SDS$  ( $P < 0.001$ ;  $X_2$ ) قرار گرفته است. در حالیکه نتایج نشان دادند که درجه دوم  $CA/PEO$  و غلظت  $SDS$  آنها معنی دار

نبودند ( $P > 0.05$ ). همانطور که در شکل ۱c مشاهده می شود، مقاومت کششی با افزایش غلظت نسبت  $CA/PEO$  افزایش یافته و با افزایش غلظت  $SDS$  کاهش می یابد.  $SDS$  کشش سطحی را کاهش داده و منجر به الیاف صاف می شود، بنابراین استحکام کششی کاهش می یابد. افزایش نسبت غلظت  $CA/PEO$  به دلیل داشتن قطر الیاف باریکتر و انعطاف پذیری بیشتر باعث افزایش مقاومت کششی می گردد.

مقدار  $R^2$  برای معادله استحکام کششی  $0.86$  بود. این نشان می دهد که تنها  $14\%$  از کل تغییرات را نمی توان با مدل ارزیابی کرد. مقادیر  $adj-R^2$  و  $pred-R^2$  برای این پاسخ به ترتیب  $0.75$  و  $0.29$  بود که نشان از کفایت مدل ساختاری دارد. معادله مناسب برای پیش بینی رفتار مقاومت کششی در معادله زیر آورده شده است:

$$TS (N/mm^2) = 0.17 + 0.04 X_1 - 0.07 X_2$$

## ۳-۴- آزمون کشسانی

آزمون کششی یکی از آزمونهای موثر در کنترل کیفیت الیاف و بررسی چگونگی واکنش یک ماده تحت تاثیر نیروی کششی می باشد. در این آزمون نمونه تحت نیروی کششی تک بعدی تا نقطه پاره گی قرار می گیرد و این درحالیست که ازدیاد طول نیز به صورت همزمان با نیروی اعمالی (بار اعمالی) ثبت می شود. نتیجه این آزمون منحنی تنش- کرنش مهندسی بر اساس مقادیر نیرو اعمالی- ازدیاد طول رسم می گردد لذا خروجی آزمون یک منحنی تنش/کرنش می باشد که نشان دهنده رفتار ماده تحت کشش است. داده های بدست آمده در این آزمون برای تعیین خواص مکانیکی ماده استفاده می شود. همانطور که در جدول ۲ آورده شده است، مدل پیشنهادی برای مقدار کشش بسیار معنی دار بود ( $P < 0.005$ ). مقادیر  $adj-R^2$  و  $R^2$  به ترتیب  $0.95$ ،  $0.88$ ،  $0.86$  نیز تأیید کردند که این مدل بسیار معنی دار است. کشیدگی مستقیماً تحت تأثیر اثر خطی غلظت  $CA/PEO$  و  $SDS$  ( $P < 0.005$ ) قرار گرفت. اثر درجه دوم نسبت  $CA/PEO$  ( $P < 0.005$ )، نیز معنی دار بود در حالیکه اثر درجه دوم  $SDS$   $P > 0.05$  معنی دار نمی باشد. مقدار  $ADP 12/85$ ، نقص برازش  $1/91$  می باشد. معادله مناسب برای پیش بینی رفتار طول در معادله زیر آورده شده است:

$$EL (mm) = 2/89 + 1/56 X_1 - 1/17 X_2 - 1/43 X_1^2$$

همانطور که در شکل ۱d نشان داده شده است، با افزایش  $CA$

را بهبود بخشد [۱۸].

نتایج بدست آمده از محلول پلیمری با ویسکوزیته و وزن مولکولی بالا، درهم آمیختگی بالا را به منظور ساختن ساختار نانوالیاف یکنواخت و یکدست به جای ساختار مهره ای نشان می دهد. قطر ENFs به طور قابل توجهی به اثر خطی غلظت  $CA/PEO$  ( $P < 0.001$ ) و  $SDS$  ( $P < 0.05$ ) بستگی دارد. حتی اگر اثر درجه دوم غلظت  $CA/PEO$  معنی دار نبود، اما اثر درجه دوم غلظت  $SDS$  ( $P < 0.05$ ) معنی دار می باشد. مقادیر  $ADP$  و  $CV$  نیز برای مدل مناسب  $11/89$  و  $6/19$  بود. مقادیر  $adj-R^2$ ،  $pred-R^2$  و به ترتیب  $0.15$ ،  $0.184$ ،  $0.91$  نیز تأیید کردند که این مدل بسیار معنی دار است. برای ساخت مدل معیبی از آنالیز رگرسیون چندگانه استفاده شد و معادله حاصل از میزان تبدیل به مقادیر متغیرهای کد گذاری شده بدست آمد:

$$FD (nm) = 145 - 23 X_1 - 7.66 X_2^2$$

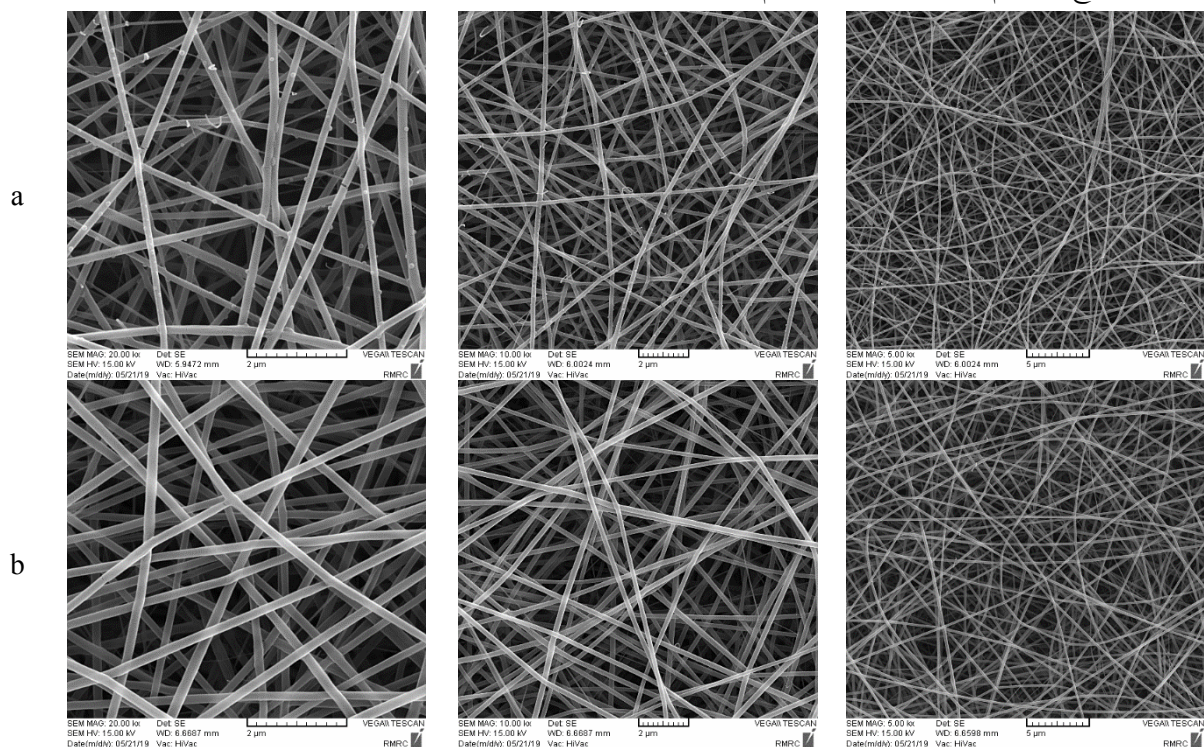
افزایش نسبت  $CA/PEO$  باعث ایجاد محلول ویسکوز برای تولید الیاف با قطر کم می شود. درحالیکه، افزایش غلظت  $PEO$  محلولها می تواند به دلیل افزایش وزن مولکولی، قطر الیاف را افزایش دهد (جدول ۱). اگزالات آمونیوم نیز با افزایش قدرت رسانایی که یک عامل مؤثر برای ساختن الیاف صاف و یکنواخت است. کمترین، متوسط و بیشترین قطر برای الیاف یکنواخت در جدول ۱ آورده شده است.

الیاف باریکتر و با انعطاف پذیری بیشتر تشکیل شده است که در نتیجه طول الیاف در نقطه پاره گی بیشتر و قدرت کشسانی بهتری را نشان دادند.

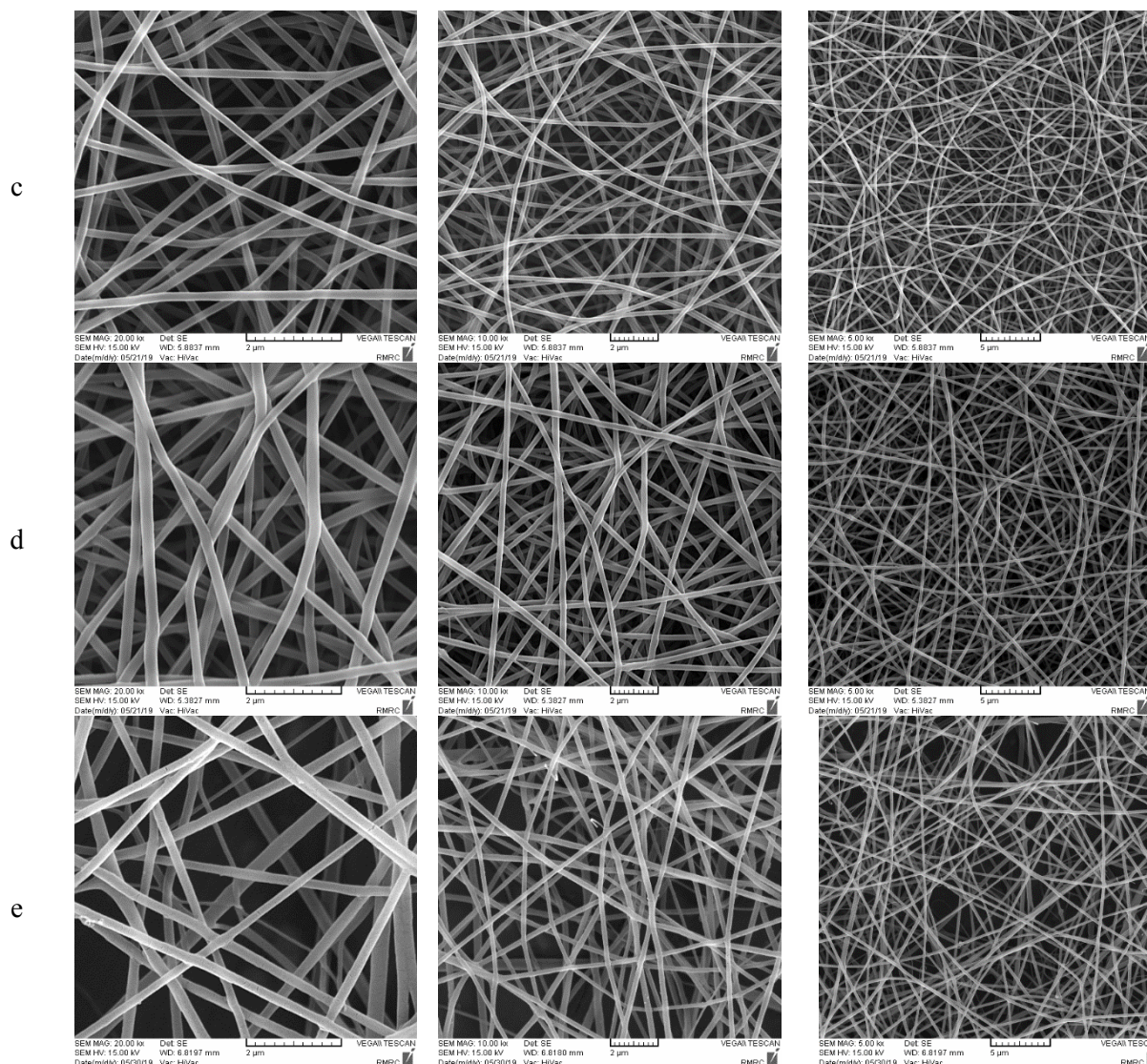
### ۳-۵- مورفولوژی ساختارهای الیاف

#### الکترورسی شده

در مطالعه حاضر، کاهش نسبت  $CA/PEO$  و  $SDS$  قطر الیاف را بطور معنی داری ( $P < 0.001$ ) افزایش می دهد. در این حالت با افزایش  $PEO$  ۲۰۰ (کیلو دالتون) قطر الیاف افزایش می یابد. مورفولوژی الیافها توسط تصاویر  $SEM$  در شکل ۲ نشان داده شده است. می توان دریافت که الیاف نانو الکترورسی شده تقریباً یکنواخت و بدون مهره با توزیع قطر بین ۹۶ تا ۱۶۶ نانومتر بدست آمده است. همانطور که تصاویر سه بعدی نشان می دهند (شکل ۱a)، با افزایش میزان استات سلولز و  $SDS$  قطر الیاف کاهش می یابد. همچنین در شکل ۲a مشاهده شده است که با افزایش میزان  $PEO$  قطر الیاف افزایش پیدا کرده است و با افزایش میزان  $SDS$  کاهش یافته است. کمترین قطر الیاف با بیشترین نسبت  $CA/PEO$  ۲ و بالاترین مقدار ۳٪  $SDS$  در ۹۶ نانومتر می باشد. مناطق اتصال را می توان در  $ENFs$  در شکل ۲a مشاهده کرد که امکان دارد به دلیل  $CA$  بالاتر و  $SDS$  پایین تر باشد. در این حالت اتصال الیاف می تواند به علت تولید الیاف با قطر کم و نسبت سطح به حجم بالا ممکن است استحکام مکانیکی







**Fig 2** SEM micrographs of nanofibers with various contents of CA /PEO ratio and SDS%, (a) (run 9), (b) (run 7), (c) (run 10), (d) (run 13), (e) (run 2).

و SDS ۱/۵ (٪ w/w) بعنوان مقادیر بهینه برای متغیر مستقل تعیین شد. در نقطه بهینه، قطر، کشش سطحی، کشش و تخلخل غشاء نانوالیافهای الکترورسی شده (ENFs) به ترتیب نانو ذرات ۱۱۳/۶۱ nm، ۰/۰۲۳N/mm<sup>2</sup>، ۶/۶۵۰mm و ۶۱/۸۹۲ می باشد (جدول ۳). نمودارهای سه بعدی برای چهار پاسخ مورد مطالعه به عنوان تابعی از CA/PEO و محتوای SDS آورده شده (شکل ۱).

#### ۴- بهینه سازی RSM

قطر و استحکام مکانیکی ENFs پارامترهای مهمی هستند که برای بهینه سازی فرایند استفاده شده اند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، توزیع کلی بیشتر ENFs یکدست هستند و بنابراین انتظار می رود توزیع اندازه منافذ همگن داشته باشند. بهینه سازی متغیرهای مستقل مطابق با اطلاعات ارائه شده در جدول ۳ آورده شده است. نسبت CA/PEO ۲

**Table 3** Predicted optimum conditions and responses for the formed ENFs

Properties	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Predicted value	Actual value
A:CA/CHI	is in range	1	2	2	2
C: SDS	is in range	0	3	0.894	1.5
FD	minimize	96	163	113.61	99
PO	maximize	43.21	116.77	61.892	54.17
TS	maximize	0.0073	0.03	0.023	0.017
EL	maximize	2.4	8.925	6.65	5

## ۵- اعتبارسنجی مدل های پیش بینی

اعتبارسنجی روشی عالی برای بررسی کارایی مدل است. در شرایط مطلوب دقت پیش بینی معادلات رگرسیون چند جمله ای به منظور پیش بینی پاسخهای بهینه (CA/PEO ۲ و SDS ۱/۵) بررسی شده است. با سه بار تکرار، نتایج بهینه برای پاسخهای خروجی یعنی قطر، کشش سطحی، کشیدگی و تخلخل با استفاده از نرم افزار Design-Expert (جدول ۳) مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج نشان می دهد که قطر، تخلخل، استحکام کششی و طول در نقطه پاره گی الیاف به ترتیب به ترتیب ۹۹ nm، ۵۴/۱۷، ۰/۰۱۷ N/mm<sup>2</sup>، ۵ mm می باشد. در نتیجه آزمایش ها حاکی از توافق بین داده های واقعی و پیش بینی شده می باشد. از این رو، سطح پاسخ طرح مرکب مرکزی (RSM-CCRD) روش مناسبی برای بهینه سازی ENFs می باشد. معادلات حاکی از آن است که مدل پتانسیل بالایی را برای تعیین ساختار نانوالیافی الکتروروسی دارد.

## ۶- بحث

در این تحقیق تاثیر دو پارامتر CA/PEO و سورفکتانت SDS بر روی ENFs بهینه شده بررسی گردیده و همچنین نانوالیافهای صاف با قطر ۹۶-۱۶۳ نانومتر و بدون دانه از محلول CA/PEO به غلظت ثابت ۷٪ وزنی با استفاده از روش الکتروروسی تشکیل شده اند. نتایج نشان دادند که افزایش CA باعث افزایش استحکام کششی و انعطاف پذیری و تولید الیاف با قطر کم و یکنواخت می گردد و براساس تصاویر SEM و داده های بدست آمده مشخص شد، الیاف نازکتر تخلخل کمتری دارند. تخلخل با تعداد لایه ها مرتبط است و با افزایش تعداد لایه ها به دلیل همپوشانی بیشتر الیافها به حداقل مقدار نزدیک می شود [۲۴]. استحکام مکانیکی (از لحاظ کشسانی و انعطاف پذیری) کافی برای بسیاری از کاربردهای نانوالیاف مورد نیاز است. همانطور که نتایج نشان دادند با افزایش نسبت CA/PEO استحکام الیاف بیشتر می شود. Fadel و همکاران نیز گزارش کردند که ترکیب (پلی (وینیل کلرید) با استات سلولز منجر به تشکیل الیاف های نانو با استحکام و مقاومت مکانیکی بالاتری می شود که به درصد استات سلولز بستگی دارد [۲۲].

نانو الیاف استات سلولز دارای خاصیت مکانیکی بی نظیر نوری و رئولوژیکی می باشد و حتی در غلظت کم می تواند الیاف محکمتری در ماتریس های پلیمری تشکیل دهد [۵۳]. بنابراین به عنوان یک تقویت کننده عالی در کامپوزیت های پلیمر محسوب می گردد. Helbert و همکاران گزارش دادند که استحکام خمش و مدول نانوالیاف سلولزی به ترتیب ۱۰ GPa و ۱۵۰ GPa است [۲۵]، بنابراین ترکیب آن در ماتریس با پلیمرهای دیگر مانند کیتوزان، پلی اتیلن اکساید می تواند باعث تقویت خواص مکانیکی مواد نانو کامپوزیت گردد [۲۶]. با آزمایشاتی که در این تحقیق صورت گرفت مشخص شد، با افزایش غلظت محلول CA/PEO، قطر نانوالیاف کاهش، استحکام کششی و طول در نقطه پارگی افزایش می یابد. تغییرات در مورفولوژی نانوالیاف به تأثیر خواص محلول در فرآیند الکتروروسی نسبت داده شده. الیاف در غلظت بالاتر محلول، یکنواخت تر و از خواص مکانیکی بهتری برخوردار است [۲۲]. همچنین مطالعه صورت گرفته توسط ElMessiry و همکاران حاکی از آن است که قطر الیاف ترکیب Cellulose / (PVC) Poly Vinyl Chloride / CA Acetate (CA) با افزایش نسبت CA کاهش یافته است [۲۲].

قطر الیاف نانو بسته به وزن مولکولی، غلظت پلیمر و درصدهای مختلف سورفکتانت تغییر می کند [۱۸]. غلظت بالاتر PEO نسبت به CA در محلول منجر به تشکیل محلول ویسکوز (به دلیل درگیری زنجیره پلیمر) و الیاف قطورتر می گردد [۱۸، ۱۱، ۱۲، ۱۴]. مخلوط کردن این الیاف با SDS، PEO و اگزالات آمونیوم به عنوان یک عامل یونیزه کننده باعث ایجاد نانوالیاف باراندمان بالا می شود که نقاط ضعف نانوالیاف استات سلولز را سرکوب می کند. اگزالات آمونیوم نیز با افزایش قدرت رسانایی که یک عامل مؤثر برای ساختن الیاف صاف و یکنواخت است که به محلول پلیمر اضافه شده است. میزان بالای EC منجر به نیروهای کششی قوی و کاهش قطر الیاف می شود، بنابراین در این آزمایش نسبت اگزالات آمونیوم (۳٪ ماده جامد) ثابت اضافه می شود [۱۵ و ۱۲]. برومند و همکاران نیز با استفاده از ۰/۷۵٪ LiCl (w/v) منجر بهبود خصوصیات مکانیکی، کاهش نسبت سطح به حجم به منظور استفاده در زمینه های فیلتراسیون و بسته بندی گردیده اند [۱۸ و ۱۲].

- polysaccharides for regenerative medicine. *Advanced drug delivery reviews*. 5; 61(12):1020-32.
- [6] Sundarrajan S, Tan KL, Lim SH, Ramakrishna S. 2014. Electrospun nanofibers for air filtration applications. *Procedia Eng*. 1; 75:159-63. Kim CW, Kim DS, Kang SY, Marquez M, Joo YL. 2006. Structural studies of electrospun cellulose nanofibers. *Polymer*. 28;47(14):5097-107.
- [7] Demirkan E, Avci T, Aykut Y. 2018. Protease immobilization on cellulose monoacetate/chitosan-blended nanofibers. *Journal of Industrial Textiles*. 47(8):2092-111. <https://doi.org/10.1177/152808>
- [8] Kim SJ, Lee CK, Kim SI. 2005. Effect of ionic salts on the processing of poly (2- acrylamido- 2- methyl- 1- propane sulfonic acid) nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 15;96(4):1388-93.
- [9] Fakirov S, editor. 2002. *Handbook of thermoplastic polyesters*. Wiley-Vch.
- [10] Zhang L, Hsieh YL. 2008. Ultra-fine cellulose acetate/poly (ethylene oxide) bicomponent fibers. *Carbohydrate Polymers*. 24; 71(2):196-207.
- [11] Arayanarakul K, Choktaweasap N, Ahtong D, Meechaisue C, Supaphol P. 2006. Effects of poly (ethylene glycol), inorganic salt, sodium dodecyl sulfate, and solvent system on electrospinning of poly (ethylene oxide). *Macromolecular Materials and Engineering*. 16; 291(6):581-91.
- [12] Broumand A, Emam-Djomeh Z, Khodaiyan F, Davoodi D, Mirzakhanelouei S. 2014. Optimal fabrication of nanofiber membranes from ionized-bicomponent cellulose/polyethyleneoxide solutions. *International journal of biological macromolecules*. 1; 66:221-8.
- [13] Broumand A, Emam-Djomeh Z, Khodaiyan F, Mirzakhanelouei S, Davoodi D, Moosavi-Movahedi AA. 2015. Nano-web structures constructed with a cellulose acetate/lithium chloride/polyethylene oxide hybrid: Modeling, fabrication and characterization. *Carbohydrate polymers*. 22; 115:760-7.
- [14] Wongsasulak S, Patapeejumruswong M, Weiss J, Supaphol P, Yoovidhya T. 2010. Electrospinning of food-grade nanofibers from cellulose acetate and egg albumen blends. *Journal of Food Engineering*. 1; 98(3):370-6.
- [15] Kriegel C, Arrechi A, Kit K, McClements افزایش غلظت SDS از ۰ تا ۳٪ (w/w) باعث کاهش کشش سطحی و در نتیجه کاهش قطر الیاف می گردد، Jia و همکاران نیز به نتیجه مشابهی دست یافتند [۲۴]. اثر متقابل قدرت سورفاکتانت- پلیمر به خواص شیمیایی سورفاکتانت و پلیمر بستگی دارد. سورفاکتانت های آنیونی و کاتیونی به شدت با گروه های آبگریز پلیمر (گروه های آلکیل) ارتباط برقرار می کنند و باعث ایجاد ارتباط بین زنجیره های پلیمری می شوند و در نتیجه ویسکوزیته افزایش می یابد. در این آزمایش از SDS به عنوان یک سورفاکتانت یونی برای ایجاد تعامل قوی در زنجیره های پلیمری و کاهش کشش سطحی، هدایت الکتریکی بیشتر استفاده شده است [۲۴]. در مجموع نتایج بررسی حاکی از این است که الیاف تهیه شده از CA/PEO، سورفاکتانت SDS و نمک اگزالات امونیوم با ساختار یکنواخت، صاف و بدون گره قابلیت استفاده در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی و دارویی را دارد.

## ۷- سپاسگزاری

از خانم دکتر زهرا امام جمعه به خاطر در اختیار گذاشتن آزمایشگاه بسیار مجهز و دانشگاه تهران به علت همکاری با اینجانب کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## ۸- منابع

- [1] Kim SJ, Lee CK, Kim SI. 2005. Effect of ionic salts on the processing of poly (2-acrylamido- 2- methyl- 1- propane sulfonic acid) nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 15;96(4):1388-93.
- [2] Reneker DH, Yarin AL, Fong H, Koombhongse S. 2000. Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning. *Journal of Applied physics*. 1;87(9):4531-47.
- [3] Liu Y, Chen JY. 2016. Enzyme immobilization on cellulose matrixes. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*. 31(6):553-67.
- [4] Huang W, Xu H, Xue Y, Huang R, Deng H, Pan S. 2012. Layer-by-layer immobilization of lysozyme-chitosan-organic rectorite composites on electrospun nanofibrous mats for pork preservation. *Food Research International*. 1;48(2):784-91.
- [5] Lee KY, Jeong L, Kang YO, Lee SJ, Park WH. 2009. Electrospinning of

- 106(4):2536-42.
- [21] Gharibzahedi SM, Mousavi SM, Khodaiyan F, Hamed M. 2012. Optimization and characterization of walnut beverage emulsions in relation to their composition and structure. *International journal of biological macromolecules*. 1; 50(2):376-84.
- [22] ElMessiry M, Fadel N. 2019. The tensile properties of electrospun Poly Vinyl Chloride and Cellulose Acetate (PVC/CA) bi-component polymers nanofibers. *Alexandria Engineering Journal*. 1;58(3):885-90.
- [23] Huan S, Bai L, Liu G, Cheng W, Han G. 2015. Electrospun nanofibrous composites of polystyrene and cellulose nanocrystals: manufacture and characterization. *RSC Advances*. 5(63):50756-66.
- [24] Helbert W, Cavaille JY, Dufresne A. 1996. Thermoplastic nanocomposites filled with wheat straw cellulose whiskers. Part I: processing and mechanical behavior. *Polymer composites*. 17(4):604-11.
- [25] Jia L, Qin XH. 2013. The effect of different surfactants on the electrospinning poly (vinyl alcohol) (PVA) nanofibers. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 1;112(2):595-605.
- [26] Fernandes SC, Freire CS, Silvestre AJ, Pascoal Neto C, Gandini A. 2011. Novel materials based on chitosan and cellulose. *Polymer International*. 60(6):875-82.
- DJ, Weiss J. 2008. Fabrication, functionalization, and application of electrospun biopolymer nanofibers. *Critical reviews in food science and nutrition*. 25; 48(8):775-97.
- [16] Tarus B, Fadel N, Al-Oufy A, El-Messiry M. 2016. Effect of polymer concentration on the morphology and mechanical characteristics of electrospun cellulose acetate and poly (vinyl chloride) nanofiber mats. *Alexandria Engineering Journal*. 1; 55(3):2975-84.
- [17] Du J, Hsieh YL. 2009. Cellulose/chitosan hybrid nanofibers from electrospinning of their ester derivatives. *Cellulose*. 1; 16(2):247-60.
- [18] Baek WI, Pant HR, Nam KT, Nirmala R, Oh HJ, Kim I, Kim HY. 2011. Effect of adhesive on the morphology and mechanical properties of electrospun fibrous mat of cellulose acetate. *Carbohydrate research*. 27; 346(13):1956-61. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2011.05.025>
- [19] Tan EP, Ng SY, Lim CT. 2005. Tensile testing of a single ultrafine polymeric fiber. *Biomaterials*. 1; 26(13):1453-6.
- [20] Ghasemi-Mobarakeh L, Semnani D, Morshed M. 2007. A novel method for porosity measurement of various surface layers of nanofibers mat using image analysis for tissue engineering applications. *Journal of applied polymer science*. 15;



## Effect of parameters on fiber diameters and the morphology of hybrid electrospun cellulose acetate/ poly (ethylene oxide) nanofibers

Salehizadeh, P.<sup>1</sup>, Taghizadeh, M.<sup>2\*</sup>, Emam-Djomeh, Z.<sup>1\*</sup>

1. Transfer Phenomena Laboratory (TPL), Department of Food Science, Technology and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.

### ABSTRACT

The mixture of cellulose acetate (CA), and poly (ethylene oxide) was electrospun into Nanofibrous webs using an acetic acid solution. The impact of cellulose acetate (CA)/ polyethylene oxide (PEO) ratio (1, 1.5, 2), sodium dodecyl sulfate (SDS) (0, 1.5, 3%, w/w) and ammonium oxalate (3%, w/w) on the diameter, tensile strength, elongation and porosity (PO) of the Electrospun Nano-fibers (ENFs) were enhanced applying response surface methodology-central composite rotatable design (RSM-CCRD). The ENFs were formed of non-woven fibers with a maximum diameter of 163 nm. Second-order polynomial models with high  $R^2$  values (0.86–0.97) were developed using Cubic analysis. The outcome revealed that the ENFs morphology and diameter were noticeably affected by CA, PEO, and SDS. The overall optimum condition was identified to be at the compounded level of CA to PEO ratio of 2 and SDS content of 3% (w/v). At the best point, diameter, surface tension, elongation, and porosity of the fabricated electrospun nanofibers (ENFs) were 99 nm, 0.017 N/mm<sup>2</sup>, 5 mm and 17.54 respectively. The most fabricated ENFs were uniform and bead-free with high active sites and mechanical strength, which could be used in different fields.

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2020/ 10/18  
Accepted 2021/ 02/ 13

#### Keywords:

Electrospinning,  
Cellulose acetate,  
Fiber diameter,  
Morphology.

**DOI:** 10.52547/fsct.19.124.371

**DOR:** 20.1001.1.20088787.1401.19.124.3.0

\*Corresponding Author E-Mail:  
mtaghizadeh@um.ac.ir  
emamj@ut.ac.ir