

## Production and Characterization of PVDF/MWCNT Core-Shell Hybrid Nanofiber Yarns via Nozzle-less Disc Electrospinning Method

Mohadeseh Ramezanpour Nashrodkoli <sup>1</sup>, Mostafa Jamshidi Avanaki <sup>1\*</sup>, Kamran Mahfouzi <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Article Information	Abstract
<p><b>Article history:</b></p> <p>Received: 2025-09-15 Accepted: 2025-12-07</p>	<p>In this study, the fabrication and characterization of hybrid core-shell nanofiber yarn using nozzle-less disk electrospinning method, were investigated. To identify the most suitable core structure, four types of yarns -including cotton, silk, polyester-coated Lycra, and textured polyester-were employed as the core, while the shell layer consisted of polyvinylidene fluoride (PVDF) containing 0.5, 1, and 1.5 wt% multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs). The nanofiber yarn samples were characterized using SEM, FESEM, FTIR, and axial tensile test. Microscopy results indicated that increasing the electrospinning time from 1 to 3 minutes enlarged the yarn diameter from 18.78 to 502.45 <math>\mu\text{m}</math>, primarily due to multilayer deposition of nanofibers on the core surface. Morphological observations confirmed that increasing the MWCNT content from 0.5% to 1.5%, leads to increase in the mean nanofiber diameter from 0.152 <math>\mu\text{m}</math> to 0.210 <math>\mu\text{m}</math>; this phenomenon is due to simultaneous increases in electrical conductivity, solution viscosity, as well as nanotube aggregation at higher concentrations. Mechanical analyses showed that nanofiber coating improved the uniformity of tensile behavior, with this effect being more pronounced in textured polyester yarns because of their favorable surface structure. FTIR analysis verified the presence of the <math>\beta</math>-phase in all samples, and demonstrated that the <math>\beta</math>-phase content increases with improved dispersion of MWCNTs. Overall, the results indicate that the hybrid nanofiber yarns produced in this work—with stable structure, controlled morphology, and desirable mechanical response—are promising candidates for use in smart textiles and wearable sensing systems.</p>
<p><b>Keywords:</b></p> <p>Nanofiber Yarn, Nozzle-Less Electrospinning, PVDF/MWCNT Composite, Core-Shell Structure, SEM/FTIR Characterization.</p>	

\* Corresponding Author: [m.jamshidi@guilan.ac.ir](mailto:m.jamshidi@guilan.ac.ir)

## تولید و مشخصه‌یابی نخ نانولیفی هیبریدی PVDF/MWCNT با ساختار هسته-پوسته به روش الکتروریسی بدون نازل دیسکی

محدثه رمضان پور نشرودکلی<sup>۱</sup>، مصطفی جمشیدی اوانکی<sup>۱\*</sup>، کامران محفوظی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶	در این پژوهش، تولید و مشخصه‌یابی نخ نانولیفی هیبریدی با ساختار هسته-پوسته به روش الکتروریسی بدون نازل دیسکی مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور تعیین بهترین نخ مغزی، چهار نوع نخ شامل نخ پنبه‌ای، ابریشمی، لایکرا با روکش پلی‌استری و پلی‌استر تکسچره شده به عنوان هسته استفاده گردید و لایه پوسته از پلی‌وینیلیدن فلوراید (PVDF) حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره (MWCNT) تهیه شد. مشخصه‌یابی نمونه‌ها توسط آزمون‌های SEM، FESEM، FTIR و آزمون کشش انجام گرفت. نتایج آزمون‌های میکروسکوپی نشان داد که افزایش زمان الکتروریسی از ۱ به ۳ دقیقه، موجب افزایش قطر نخ از ۱۸/۷۸ به ۵۰۲/۴۵ میکرومتر می‌شود که ناشی از تجمع چند لایه‌ای نانوالیاف بر سطح نخ مغزی است. همچنین مشاهدات ریخت‌شناسی نشان می‌دهد که افزایش درصد MWCNT از ۰/۵٪ به ۱/۵٪، به افزایش میانگین قطر نانوالیاف از ۰/۱۵۲ به ۰/۲۱۰ میکرومتر منجر می‌شود؛ این پدیده ناشی از افزایش همزمان رسانایی الکتریکی و گران‌روی محلول و نیز تجمع نانولوله‌ها در غلظت‌های بالاتر است. بررسی‌های خواص مکانیکی نشان می‌دهد که پوشش‌دهی نانولیفی موجب یکنواختی رفتار کششی نخ می‌شود، و این اثر در نخ پلی‌استر تکسچره‌شده به دلیل ساختار سطحی مناسب، بارزتر است. آزمون FTIR، وجود فاز بتا (β) را در کلیه نمونه‌ها تأیید نموده و مشخص شد که درصد فاز β با پراکندگی MWCNT ارتباط مستقیم دارد. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد نخ‌های نانولیفی هیبریدی تولیدشده به دلیل ساختار پایدار، ریخت‌شناسی کنترل‌شده و رفتار مکانیکی مناسب، گزینه‌ای کارآمد برای کاربرد در منسوجات هوشمند و سامانه‌های حسگری قابل پوشیدن به‌شمار می‌آیند.
واژه‌های کلیدی: نخ نانولیفی، الکتروریسی بدون نازل، کامپوزیت PVDF/MWCNT، ساختار هسته/پوسته، مشخصه‌یابی SEM/FTIR	

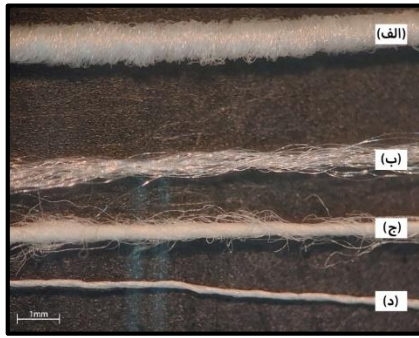
### ۱ مقدمه

به‌عنوان مثال، در پژوهش صورت گرفته توسط کو و همکاران [5]، مشخص گردید که حضور CNT در نخ‌های نانولیفی، خواص مکانیکی و الکتریکی را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. همچنین بازب و استیلیوس [6] سازوکار تاباندن نانوالیاف و پیچش کنترل‌شده نانوالیاف را معرفی کرده‌اند که از طریق ایجاد انسجام جانبی، استحکام نخ را افزایش می‌دهد. به منظور بهبود خواص مکانیکی نخ‌های نانولیفی با ساختار هسته-پوسته، دبیریان و همکاران [7]، روش‌های بهینه الکتروریسی پیوسته را ارائه نموده‌اند که در آن تولید نخ نانولیفی بصورت پیوسته با هدایت میدان الکتریکی انجام می‌شود؛ صفحات کمکی مسیر جت را متمرکز کرده و الیاف را هم‌راستا می‌کنند و با جمع‌کننده چرخان، نخ پیوسته شکل می‌گیرد. این محققین در پژوهش دیگری نشان داده‌اند که با استفاده از دو نازل با بارهای مخالف، جت‌ها به‌طور طبیعی یکدیگر را جذب و پیچیده کرده و بدون نیاز به کنترل پیچیده میدان، یک نخ نانولیفی پیوسته، پایدار و خودجمع‌شونده تشکیل می‌شود [8]. عقیفی و همکاران [9] نیز با بهره‌گیری از جمع‌کننده‌ی قیفی شکل چرخان، نخ‌های

به کارگیری نانوالیاف در توسعه منسوجات هوشمند، یکی از مهم‌ترین روندهای پیشرفت فناوری‌های پوشیدنی محسوب می‌شود، زیرا نانوالیاف ضمن داشتن انعطاف‌پذیری مناسب، امکان ادغام عملکرد حسگری و تولید انرژی را فراهم می‌کنند. پلی‌وینیلیدن فلوراید (PVDF) به دلیل خواص پیزوالکتریکی قوی، پایداری مکانیکی و قابلیت الکتروریسی بالا، از اساسی‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در حسگرهای پوشیدنی به‌شمار می‌رود [1]. ترکیب PVDF با نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNT) سبب افزایش رسانایی الکتریکی، بهبود جهت‌گیری زنجیره‌ها و تحریک تشکیل فاز بتا می‌شود که تأثیر قابل توجهی بر افزایش حساسیت حسگرها دارد [2].

در سال‌های اخیر، روش‌های پیشرفته الکتروریسی، به‌ویژه الکتروریسی بدون نازل دیسکی، امکان تولید یکنواخت و مقیاس‌پذیر نخ‌های نانولیفی را فراهم کرده‌اند [3,4]. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که استفاده از CNT می‌تواند موجب افزایش استحکام و رسانایی نخ‌های الکتروریسی‌شده شود؛

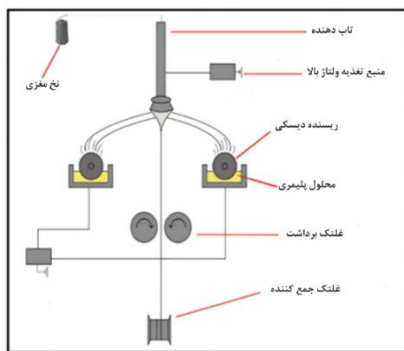
\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: [m.jamshidi@guilan.ac.ir](mailto:m.jamshidi@guilan.ac.ir)



شکل ۱ نخ‌های مغزی به کار رفته در ساختار نخ نانولیفی (الف) نخ لاکرا با روکش پلی‌استر (ب) نخ پلی‌استر تسکچره‌شده (ج) نخ پنبه‌ای (د) نخ ابریشم

## ۲-۲ روش کار

در این پژوهش، برای تولید نخ نانولیفی از دستگاه الکتروریسی بدون نازل مجهز به دو حمام حاوی محلول الکتروریسی استفاده شده است. به طوری که، تغذیه‌ی محلول در فرایند فوق توسط دو دیسک دوار صورت می‌گیرد. شمایبی از این دستگاه که به طور خاص و با ساختار منحصر بفرد خود در دانشکده فنی دانشگاه گیلان ساخته شده است، در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. به دلیل اهمیت کاربرد نخ نانولیفی حاصل از پلیمر PVDF همراه با نانولوله‌های کربنی که مورد هدف این پژوهش است، بهینه‌سازی متغیرهای فرایند با هدف اثرگذاری مطلوب‌تر بر خواص الکتریکی محصول نهایی، نکته‌ی بسیار حائز اهمیت این موضوع می‌باشد. همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، دستگاه الکتروریسی مورد استفاده، شامل دو منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا با قابلیت تنظیم بر روی مقادیر ولتاژ مثبت و منفی، دو حمام حاوی محلول الکتروریسی، تاب‌دهنده با سرعت دورانی قابل کنترل و یک غلتک برداشت با سرعت قابل کنترل است. برای تهیه نخ نانولیفی ابتدا محلول پلیمری PVDF:DMSO بوسیله همزن مغناطیسی در مدت ۱۲ ساعت در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  در دو غلظت ۱۲٪ و ۱۰٪ wt تهیه شد و در شرایط محیطی (دمای  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی  $50 \pm 4\%$ ) الکتروریسی گردید.



شکل ۲ تصویر شماتیک دستگاه الکتروریسی بدون نازل [۱۴]

مشاهدات تجربی ناشی از فرآیند مذکور، حاکی از آن بود که استفاده از محلول پلیمری PVDF:DMSO با غلظت ۱۲٪ wt، تعداد بیده‌های کمتری را در ساختار نخ نانولیفی موجب می‌گردد؛ از این رو، غلظت ۱۲٪ به عنوان غلظت مطلوب برای ادامه کار تجربی در نظر گرفته شد. با استناد به نتایج تحقیقات ژانگ و همکاران [11]، به منظور بهبود خاصیت الکتریکی نخ نانولیفی، MWCNT wt/wt ۵٪ به محلول PVDF:DMSO ۱۲٪ wt

نانولیفی هم‌راستا و مناسب برای کاربردهای پوشیدنی تولید کرده‌اند. افزون بر این، در پژوهش ژو و همکاران [10]، توسعه ساختارهای چندلایه و سلسله‌مراتبی برای بهبود خروجی انرژی و دوام مکانیکی گزارش شده است. با وجود این پیشرفت‌ها، مطالعات نشان می‌دهند که بسیاری از پژوهش‌ها بر تولید الیاف منفرد، افزایش فاز  $\beta$ ، یا بهبود رسانایی الکتریکی متمرکز بوده‌اند و مطالعات جامع درباره تولید نخ‌های هیبریدی PVDF/MWCNT با ساختار هسته-پوسته، آن هم با روش الکتروریسی بدون نازل دیسکی، بسیار محدود است. تاکنون بررسی منسجم اثر درصد وزنی MWCNT، زمان الکتروریسی، نوع نخ مغزی، رفتار جت، ریخت‌شناسی الیاف، خواص مکانیکی نخ و میزان فاز  $\beta$  در یک سامانه‌ی واقعی تولید نخ، کمتر گزارش شده است. بنابراین، تولید نخ‌های نانولیفی با ساختار هسته-پوسته و بکارگیری درصد بهینه‌ی آن از PVDF/MWCNT با بهره‌گیری از روش الکتروریسی بدون نازل دیسکی، نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های پیشین محسوب می‌شود. همچنین بررسی جامع و طراحی بهینه پارامترهای فرایندی تولید و نیز بررسی و مطالعه تاثیر بکارگیری درصدهای مختلف MWCNT، نوع نخ مغزی، ساختار ریخت‌شناسی نخ نانولیفی تولیدشده، رفتار مکانیکی نخ و فراوانی فاز  $\beta$  از جمله تفاوت‌های طرح حاضر با پژوهش‌های پیشین محسوب می‌شود. هدف این پژوهش ارائه یک رویکرد جدید در طراحی، تولید و تحلیل نخ‌های هیبریدی با هدف بکارگیری در منسوجات هوشمند نسل جدید در پژوهش‌های آینده است.

## ۲ تجربیات

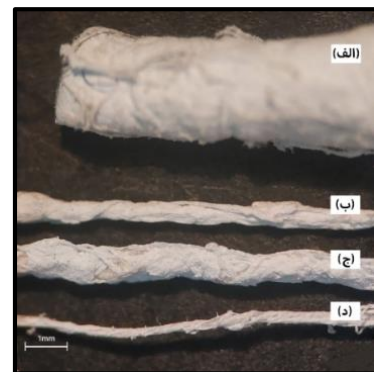
### ۱-۲ مواد و تجهیزات

به منظور انجام آزمایشات تجربی، پلی‌وینیلیدین فلوراید با چگالی  $1.78 \text{ g/cm}^3$  (از شرکت GEHR 1932 GEHR Plastics) و نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل‌دارشده (MWCNT-COOH) با اندازه ذرات ۳۰-۲۰ nm و خلوص ۹۵٪ از شرکت US-NANO (آمریکا، 2010، US Nano, LLC) تهیه گردید. همچنین شایان ذکر است به منظور تهیه محلول الکتروریسی، از حلال دی‌متیل‌سولفوکسید خشک (DMSO) با خلوص ۹۵٪ و برای نخ مغزی از نخ‌های پنبه‌ای، ابریشمی، لایکرا با روکش پلی‌استر و پلی‌استر تکسچره شده استفاده گردید (شکل ۱). لازم به توضیح است که به منظور تولید نخ از دستگاه الکتروریسی بدون نازل دیسکی بهره‌برداری شد که به صورت نمادین در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. برای تعیین مشخصات نخ از تصویربرداری میکروسکوپ نوری (ساخت شرکت نیکون، مدل XN، ژاپن)، SEM (ساخت شرکت فیلیپس، مدل 30XL، هلند)، FESEM (ساخت شرکت TESCAN، مدل MIRA 3، جمهوری چک) و FTIR (ساخت شرکت جکسون، مدل JASCO 470، ژاپن) استفاده شده است. ضمناً در انجام فرآیند آزمون کشش نیز از دستگاه استحکام‌سنج (ساخت شرکت شرلی، مدل MICRO 250، انگلستان) استفاده گردید.

شکل ۴، تصاویر SEM از سطح مقطع نخ‌های نانولیفی تولید شده با مغزی از نوع لاکرا با روکش پلی‌استر را نشان می‌دهد که بعد از گذشت مدت زمان ۱ و ۳ دقیقه از فرایند الکترورسی، جمع‌آوری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مدت زمان الکترورسی، تعداد الیاف جمع‌شده بر روی نخ به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که این جمع شدن، به صورت پیچیدن نانو الیاف به دور نخ مغزی اتفاق می‌افتد و منجر به تشکیل ساختار چندلایه از نانوالیاف می‌شود. در مدت زمان ۱ دقیقه الکترورسی، تنها یک لایه نازک از الیاف بر روی نخ مغزی جمع می‌شود. نکته قابل تامل در این آزمایش این است که با افزایش مدت زمان الکترورسی به ۳ دقیقه، تعداد لایه‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابد که این موضوع به دلیل چسبندگی میان لایه‌ها، استحکام آن‌ها را نیز افزایش می‌دهد. همچنین از تصاویر SEM می‌توان دریافت افزایش زمان الکترورسی از ۱ دقیقه به ۳ دقیقه موجب رشد قابل توجه قطر نخ از  $18/78 \mu m$  به  $502/45 \mu m$  شد. ( $p\text{-value} < 0.05$ ). این تغییر محصول انباشته شدن تدریجی و لایه‌به‌لایه نانوالیاف بر روی نخ مغزی است؛ پدیده‌ای که در فرایند الکترورسی دیسکی بدون نازل و به دلیل نرخ بالای تولید و رسوب الیاف، رفتاری طبیعی و کاملاً موردانتظار محسوب می‌شود. این روند با نتایج گزارش شده توسط فن و همکاران در تولید نخ‌های سه‌بعدی مبتنی بر PVDF نیز همخوانی دارد [4]. با توجه به نتایج آزمون استحکام سنجی در جدول ۲ (بدون در نظر گرفتن نتایج حاصل از کشش)، الیاف ریسیده شده با محلول ۲۰ درصد و روزنه ۰/۲ میلی‌متری و محلول ۳۰ درصد و روزنه ۱ میلی‌متری دارای خواص مکانیکی مناسب‌تری هستند اما لیف تشکیل شده با روزنه ۱ میلی‌متری قطر بالایی دارد که مناسب نیست. روزنه ۰/۲ میلی‌متری امکان تولید الیاف ظریف‌تری را فراهم می‌نماید اما به دلیل کوچک بودن روزنه و گرفتگی سر روزنه به علت انعقاد سریع محلول، استفاده از آن مشکل می‌باشد. الیاف تولید شده با محلول ۳۰٪ از خواص مکانیکی خوبی برخوردار هستند اما استفاده از روزنه ۱ میلی‌متری قطر نهایی الیاف را زیاد کرده و استفاده از روزنه ۰/۲ میلی‌متری به خصوص با محلول ۲۰٪ گرفتگی سر روزنه را تشدید می‌کند. به همین دلیل محلول ۲۰ درصد و روزنه ۰/۴ میلی‌متری (نمونه (20/0/0)(0)(0.4)) برای ادامه کار انتخاب شدند. داده‌های حاصل از آزمایشات در نرم‌افزار مینی تب ۲۱ به منظور بررسی تأثیر هرکدام از متغیرها بر روی ویژگی‌های فیزیکی الیاف خروجی مورد تحلیل قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ درج شده است. در شکل ۲ نمودار تنش-کرنش الیاف TPU خالص با شرایط ریسندگی مختلف قابل مشاهده است.

اضافه گردید و ۲ ساعت در دمای  $70^{\circ}C$  هم زده شد تا محلول نهایی برای الکترورسی آماده گردد. این فرآیند برای مواد با غلظت های ۱٪ و ۱/۵ wt/wt نانولوله MWCN نیز تکرار شد.

به منظور انتخاب نوع مغزی مناسب از بین نمونه نخ‌های پیشنهادی (نخ پنبه‌ای، نخ ابریشمی، نخ پلی‌استر تکسچره شده و نخ لاکرا با روکش پلی‌استر)، محلول پلیمری PVDF:DMS با غلظت ۱۲٪ حاوی ۰/۵٪ MWCN مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب نوع نخ مناسب برای مغزی، بر اساس معیارهایی نظیر تجمع خوب نانوالیاف بر روی نخ، مدت زمان پایداری نانوالیاف بر سطح نخ، و عدم سهولت در جدایش نانوالیاف از سطح نخ، صورت گرفت. بر این اساس، نخ پلی‌استر تکسچره شده به دلیل داشتن خواص سطحی مطلوب و قدرت بالا در پایداری نانوالیاف الکترورسی شده، به عنوان گزینه‌ی مناسب برای نخ مغزی انتخاب گردید. تصاویر سطح جانبی نخ‌های تولید شده با استفاده از مغزی‌های مختلف بعد از الکترورسی در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد. جدول ۱، نمایانگر داده‌های مربوط به قطر و نمره نخ در قبل و بعد از فرایند الکترورسی است.



شکل ۳ تصاویر سطح جانبی نخ‌های تولید شده بعد از الکترورسی (الف) نخ لاکرا با روکش پلی‌استر (ب) نخ پلی‌استر (ج) نخ پنبه‌ای (د) نخ ابریشم

گروه‌های عاملی و فاز بتای موجود در پوسته نخ نانولیفی تولیدشده، با استفاده از آزمون طیف‌سنجی FTIR مورد بررسی واقع شد. همچنین تصاویر دقیق آزمون فوق با استفاده از SEM و FESEM از سطح جانبی و سطح مقطع لیف جمع‌آوری گردید.

### ۳ بحث و بررسی نتایج

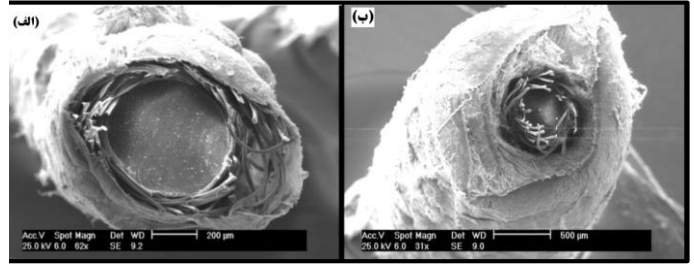
#### ۱-۳ تحلیل ریخت‌شناسی نخ‌های نانولیفی با استفاده از تصاویر SEM و FE-SEM

جدول ۱ ظرافت و قطر نخ‌ها به طور میانگین قبل و بعد از الکترورسی

نوع نخ	قطر نخ (d) قبل از الکترورسی (mm)	قطر نخ (d) بعد از الکترورسی (mm)	نمره نخ قبل از الکترورسی (Tex)	نمره نخ بعد از الکترورسی (Tex)
پلی‌استر	۰/۴۵	۰/۵۴	۱۵/۵	۷۸/۵
پنبه‌ای	۰/۳۶	۰/۸۶	۴۶/۶	۱۱۹/۶
ابریشم	۰/۱۶	۰/۲۵	۱۴/۶	۵۳
لاکرا روکش‌دار	۰/۸۴	۲/۶۵	۳۸۲	۵۴۴/۳

برای اعمال خواص عملکردی مطلوب ضروری است، اما این فرآیند، یک چالش ذاتی در کنترل ریخت‌شناسی در مقیاس کوچک‌تر و دستیابی به الیاف نازک‌تر، را به همراه دارد.

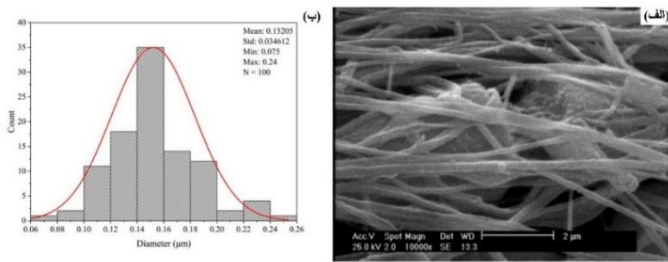
همچنین شکل ۸ (الف) تصویر FESEM و ۸ (ب) نمودار توزیع قطر الیاف نمونه حاوی ۰/۵ wt/wt نانولوله کربنی را با بزرگنمایی  $2 \mu\text{m}$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌ها نشان می‌دهد که الیاف تولیدشده از یکنواختی قطری مناسبی برخوردار هستند. به طوری که توزیع قطر نانوالیاف در محدوده باریک ۱۲۳ تا ۱۶۹ nm قرار دارد. میانگین قطر محاسبه شده برای این نمونه  $138/7 \pm 19/3 \text{ nm}$  است. فرآیند الکتروریسی در شرایطی نظیر نخ مغزی پلی‌استر تکسچره شده، ولتاژ ۷ v، سرعت برداشت ۲ rpm، سرعت جمع‌کننده ۲۰۰ rpm، در دمای محیط  $25 \pm 2^\circ \text{C}$  و رطوبت نسبی  $40 \pm 5\%$  است. همچنین با توجه به نرمال بودن توزیع قطر نانو الیاف (مطابق با نمودارهای توزیع قطر)، می‌توان ادعا کرد کنترل فرآیند الکتروریسی از نقطه نظر گرانروی و غلظت محلول پلیمری، ولتاژ اعمال شده و سرعت جریان محلول در فرآیند الکتروریسی، به طور مناسب انجام شده است و کیفیت نانوالیاف از نظر قطر و پراکندگی قطری، در حد قابل قبول ارزیابی می‌شود.



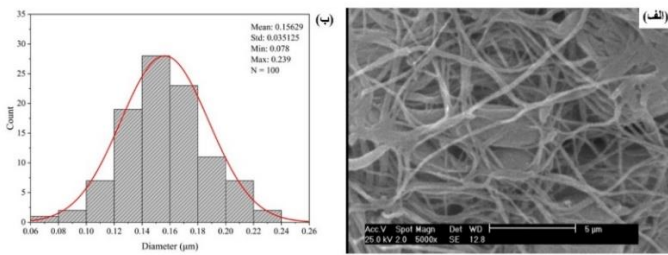
شکل ۴ تصویر SEM سطح مقطع نمونه با مغزی لاکرا با روکش پلی‌استر (الف) پس از ۱ دقیقه الکتروریسی میانگین با قطر  $17.78 \mu\text{m}$  (ب) پس از ۳ دقیقه الکتروریسی میانگین با قطر  $502.45 \mu\text{m}$

از سوی دیگر، افزایش درصد وزنی MWCNT از ۰/۵ تا ۱/۵٪ سبب شد میانگین قطر نانوالیاف از  $1152/0 \mu\text{m}$  به  $210/0 \mu\text{m}$  افزایش یابد. این تغییرات ناشی از اثر هم‌زمان دو مکانیسم متضاد است: از یک‌سو، افزایش رسانایی الکتریکی محلول موجب افزایش نیروی الکترواستاتیکی اعمال‌شده بر جت شده است و تمایل به نازک‌تر شدن الیاف را ایجاد می‌کند؛ اما از سوی دیگر، افزایش ویسکوزیته و احتمال تجمع نانولوله‌ها حرکت جت پلیمری را محدود کرده و مقاومت آن را در برابر کشش افزایش می‌دهد. در غلظت‌های بالاتر MWCNT، مکانیسم دوم بر رفتار جت غالب می‌شود و به افزایش قطر نهایی نانوالیاف منجر می‌گردد.

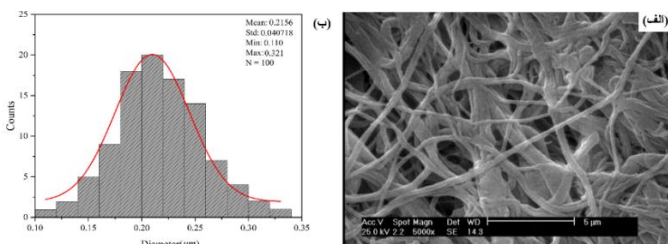
تصاویر SEM مربوط به نخ‌های نانولیفی تولید شده با استفاده از درصدهای وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی می‌باشد که در شکل‌های ۵ (الف) تا ۷ (الف) قابل مشاهده است. با استفاده از نرم‌افزار Image J و به منظور پردازش تصاویر SEM و همچنین با بهره‌گیری از قابلیت رسم نمودار با استفاده از نرم‌افزار Origin 2024، نمودار توزیع قطر نانوالیاف برای هر سه نمونه نخ نانولیفی حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ wt/wt نانولوله‌ی کربنی تهیه و ترسیم شد که به ترتیب در شکل‌های ۵ (ب) تا ۷ (ب) نتایج آن ارائه شده و قابل مشاهده است. بر اساس داده‌های ارائه شده بر روی نمودارهای توزیع قطر نانوالیاف، می‌توان دریافت که با افزایش درصد نانولوله کربنی، میانگین قطر نانوالیاف کامپوزیتی PVDF/MWCNT به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ که این امر ناشی از اثر ویسکوزیته و تجمع MWCNT است. افزودن MWCNT اثر دوگانه‌ای بر رفتار جت پلیمری دارد. از یک‌سو، رسانایی محلول افزایش یافته و نیروی الکترواستاتیکی بیشتری به جت اعمال می‌شود که می‌تواند نازک‌شدن الیاف را تسریع کند. اما هم‌زمان از سوی دیگر، حضور نانولوله‌ها باعث افزایش ویسکوزیته و ایجاد نقاط تجمع می‌شود که حرکت زنجیره‌های PVDF را محدود کرده و زمان کشش مؤثر جت را کاهش می‌دهد. در درصدهای بالاتر، اثر دوم غالب شده و در نتیجه قطر الیاف افزایش می‌یابد. این رفتار کاملاً مطابق با مطالعات پیشین بر روی ترکیب PVDF/MWCNT گزارش شده است [2]. نتایج آماری حاکی از آن است که افزایش وزن درصد MWCNT اثر معنی‌داری ( $p\text{-value} < 0.01$ ) بر قطر نانوالیاف دارد؛ مضاف بر این که نتایج به دست آمده، هم‌سو با مطالعات اریگو و مالوسلی می‌باشد [2]. علاوه بر این، در صورت استفاده از درصدهای بالاتر نانولوله‌های کربنی (به ویژه ۱/۵ wt/wt)، تجمع نانولوله‌ها می‌تواند به عنوان نقاط تمرکز تنش، یکنواختی جت را مختل کند و به تشکیل الیاف ضخیم‌تر با پراکندگی بیش‌تر بی‌انجامد. بنابراین، اگر چه افزودن MWCNT



شکل ۵ (الف) تصویر SEM و (ب) نمودار توزیع قطر الیاف PVDF:DMSO/MWCNT با ۱۲٪ پلیمر و ۰.۵ wt/wt نانولوله MWCNT با بزرگنمایی  $2 \mu\text{m}$



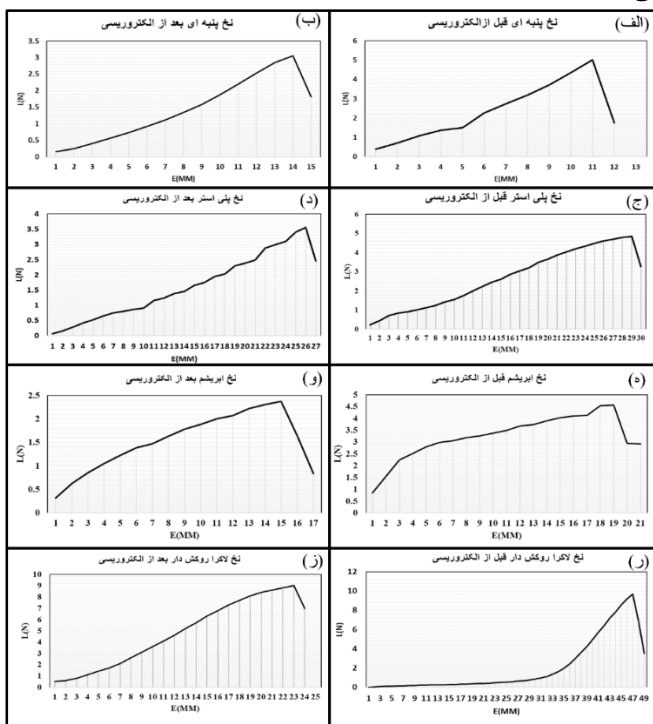
شکل ۶ - (الف) تصویر SEM و (ب) نمودار توزیع قطر الیاف PVDF:DMSO/MWCNT با ۱۲٪ پلیمر و ۱ wt/wt نانولوله MWCNT با بزرگنمایی  $5 \mu\text{m}$



شکل ۷ (الف) تصویر SEM و (ب) نمودار توزیع قطر الیاف PVDF:DMSO/MWCNT با ۱۲٪ پلیمر و ۱/۵ wt/wt نانولوله MWCNT با بزرگنمایی  $5 \mu\text{m}$

اولیه افزایش یافته و مدول اولیه نیز بیش تر شده است. این موضوع بیانگر آن است که نانوالیاف PVDF/MWCNT در نمونه‌ی پلی‌استر توانسته‌اند بخشی از تنش را انتقال دهند و ساختار هسته-پوسته تا حدودی در تقویت نخ مؤثر بوده است.

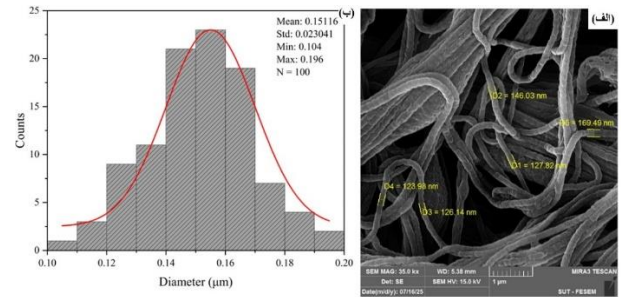
با این حال، در نخ پنبه‌ای این روند معکوس است. داده‌های آزمون کشش نشان می‌دهد که پوشش نانوالیاف موجب کاهش استحکام کششی و کاهش یکنواختی رفتار تنش-کرنش در نمونه‌ی پنبه‌ای شده است. دلیل این تفاوت رفتاری به ماهیت ساختاری نخ پنبه بازمی‌گردد؛ زیرا لایه‌ی نانولیفی روی سطح این نخ به صورت کامل با مغزی درگیر نشده و لغزش نسبی میان پوسته‌ی نانولیفی و الیاف داخلی پنبه سبب می‌شود بخشی از تنش اعمال‌شده منتقل نشود. در نتیجه، ازدیاد طول نمونه‌ی پنبه‌ای پس از الکتروروسی کاهش یافته و رفتار مکانیکی آن نسبت به حالت اولیه افت می‌کند.



شکل ۹ تصویر آزمون کشش نمونه‌ها قبل و بعد از کشش نخ مغزی (الف-ب) نخ پنبه‌ای (ج-د) پلی‌استر (ه-و) نخ ابریشم (ز) نخ لاکرا روکش دار

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی نمونه‌های نخ مغزی قبل و بعد از الکتروروسی

نمونه نخ	ازدیاد طول تا پارگی (mm)	استحکام تا پارگی (N)	مدول الاستیک (MPa)
نخ پنبه‌ای قبل از الکتروروسی (الف)	12 ± 0.8	5/5 ± 0.3	100 ± 7
نخ پنبه‌ای بعد از الکتروروسی (ب)	14 ± 0.9	3/2 ± 0.2	65 ± 5
نخ پلی‌استر قبل از الکتروروسی (ج)	28 ± 1.6	5/0 ± 0.4	120 ± 9
نخ پلی‌استر بعد از الکتروروسی (د)	26 ± 1.4	3/4 ± 0.2	80 ± 6
نخ ابریشم قبل از الکتروروسی (ه)	18 ± 1.2	4/5 ± 0.3	95 ± 8
نخ ابریشم بعد از الکتروروسی (و)	16 ± 1	2/3 ± 0.1	60 ± 5
نخ لاکرا قبل از الکتروروسی (ز)	44 ± 1.3	10/0 ± 0.7	150 ± 10
نخ لاکرا بعد از الکتروروسی (ز)	22 ± 1.5	8/3 ± 0.5	115 ± 9



شکل ۸ (الف) تصویر FESEM (ب) نمودار توزیع قطر نمونه الیاف PVDF:DMSO/MWCNT با ۱۲٪ پلیمر و ۵٪ wt/wt نانولوله MWCNT با بزرگنمایی ۱ μm

به منظور بررسی خواص استحکامی نخ‌های نانولیفی تولیدشده، از آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D2256 با استفاده از دستگاه آزمون کشش اینسترون (دستگاه شرلی) بهره گرفته شد. آزمایش‌ها در شرایط محیطی ۲۵±۲°C و رطوبت نسبی ۶۰±۵٪ صورت پذیرفت. همچنین نمونه‌ها با طول ۱۵ سانتی متر و سرعت فک ۱۰۰ mm/min با ۳ بار تکرار آزمایش شدند تا اثر وجود نانوالیاف بر روی نخ مغزی مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار، ابتدا آزمون کشش بر روی نخ مغزی به تنهایی صورت گرفت که در آن، طول نمونه‌ها ۱۵ سانتی متر و سرعت فکها ۱۰۰ mm/min ملاک عمل قرار گرفت. مشابه همین شرایط آزمون، برای نمونه نخ‌های مغزی بعد از الکتروروسی نیز اعمال گردید. شایان ذکر است به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج و تحلیل آماری قابل قبول بر روی داده‌های به دست آمده است. آزمون‌های کشش برای هر نمونه نخ مغزی، قبل و بعد از فرایند الکتروروسی، سه مرتبه تکرار گردید که نتایج آزمون کشش به صورت نمودارهای نیرو-ازدیاد طول بر روی هر چهار نوع نخ مغزی، قبل و بعد از الکتروروسی در شکل ۹، قابل مشاهده می‌باشد.

بررسی نمودارهای نیرو-ازدیاد طول و داده‌های جدول (۲) نشان می‌دهد که پوشش‌دهی نانولیفی اثر مشابهی بر نخ پنبه و پلی‌استر نداشته است. نتایج نشان می‌دهد که نخ پلی‌استر تکسچره شده پس از الکتروروسی رفتار مکانیکی بهتری از خود نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که استحکام نهایی آن نسبت به حالت

است که در صورت باقی ماندن در ساختار، در محدوده ۲۹۶۰-۲۹۲۰  $\text{cm}^{-1}$  و  $1415 \text{ cm}^{-1}$  پیک‌هایی را ایجاد خواهند کرد که به ترتیب مربوط به نوسانات پیوندهای کشش قوی  $\text{S}=\text{O}$ ، کشش  $\text{C}-\text{H}$  و  $\text{CH}_3$  است [15، 18]. نتایج طیف سنجی به طور مشهود بیانگر پیک‌های مربوط به DMSO نیست؛ لذا می‌توان دریافت که این حلال از ساختار نخ نانولیفی حذف شده است. مقدار جذب در طول موج‌های مختلف مربوط به همه نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه و قابل مشاهده است؛ ردیف‌های سوم، پنجم و هشتم از جدول اشاره شده، مربوط به فاز بتا هستند.

برای محاسبه درصد فاز بتا در PVDF بر اساس داده‌های به دست آمده از آزمون FTIR، از نسبت شدت جذب پیک شاخص بتا (در حدود  $840 \text{ cm}^{-1}$ ) به مجموع شدت جذب پیک‌های شاخص فاز آلفا و بتا مطابق رابطه‌ی (۱) استفاده می‌شود [16]:

$$F(\beta) = \frac{A_{\beta}}{(K_{\beta}/K_{\alpha})A_{\beta} + A_{\alpha}} \quad (1)$$

که در آن  $A_{\beta}$ : شدت جذب در پیک  $840 \text{ cm}^{-1}$  (پیک شاخص فاز بتا)

$A_{\alpha}$ : شدت جذب در  $763 \text{ cm}^{-1}$  (پیک شاخص فاز آلفا)

برای  $K_{\beta}$  و  $K_{\alpha}$  ضرایب جذب مولی پیک‌ها هستند. مقادیر محاسبه‌شده‌ی فاز بتا برای نمونه‌ها محاسبه گردید و نتایج مربوطه در جدول ۴ نشان داده شده است.

طیف‌سنجی FTIR حضور فاز  $\beta$  را در همه نمونه‌ها تأیید کرد. تحلیل مقادیر جدول ۴ نشان داد که افزودن مقدار کم (۰/۵٪) MWCNT ابتدا موجب کاهش فاز  $\beta$  به دلیل تجمع موضعی و محدود شدن حرکت زنجیره‌ای می‌شود؛ اما با افزایش بیشتر CNT (۱٪ و ۱،۵٪)، پراکندگی بهبود یافته و فاز  $\beta$  به‌طور قابل توجهی رشد می‌کند. این روند (کاهش اولیه و افزایش ثانویه) پیش‌تر نیز در پژوهش‌های PVDF/MWCNT گزارش شده و ناشی از تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی پایدار CNT و افزایش برهم‌کنش فاز فعال بتا با PVDF است [19].

این ناهمگونی رفتاری میان نخ‌ها با نتایج گزارش‌شده توسط ژانگ و همکاران نیز هم‌خوان است؛ آن‌ها نشان داده‌اند که کارایی تقویت‌کنندگی لایه‌های نانولیفی به ویژگی‌های نخ مغزی از جمله ماهیت، زبری سطح و میزان درگیری مکانیکی الیاف با پوسته وابسته است [3]. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تقویت مکانیکی در نمونه‌ی پلی‌استر قابل قبول است، اما در نمونه‌ی پنبه‌ای پوشش نانولیفی نقش تقویتی مؤثری ایجاد نکرده و حتی افت مکانیکی نیز مشاهده شده است.

به طور کلی نتایج آزمون کشش نشان داد که نوع نخ مغزی نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی مکانیکی ساختار هسته-پوسته دارد. نخ پنبه‌ای به دلیل زبری و ساختار متخلخل، پس از پوشش‌دهی دچار افت استحکام و کاهش یکنواختی رفتاری شد. نخ ابریشم اگرچه سطح صافی دارد، اما تغییرات مکانیکی آن محدود بوده و هم‌افزایی قابل توجهی ایجاد نکرد. نخ لایکرا با روکش پلی‌استر نیز به دلیل ماهیت بسیار کشسان مغزی، رفتار غیرخطی و ناپایداری پس از پوشش نشان داد. در مقابل، نخ پلی‌استر تکسچره‌شده بهترین عملکرد را دارا بود؛ به‌گونه‌ای که چسبندگی مناسب با نانوالیاف، افزایش مدول و استحکام، و یکنواختی بیشتر رفتار تنش-کرنش در آن مشاهده شد. بنابراین این نخ به‌عنوان مناسب‌ترین مغزی برای ساخت نخ نانولیفی هسته-پوسته PVDF/MWCNT معرفی می‌شود.

### ۲-۳ ساختار شیمیایی نانو الیاف

طیف FTIR مربوط به چهار نمونه نخ نانولیفی PVDF حاوی درصد‌های مختلف MWCNT است که در شکل ۱۰ قابل رویت می‌باشد. به طور کلی، بسته به شکل‌گیری زنجیره‌های مولکولی درون ساختاری، PVDF می‌تواند در سه فاز آلفا، بتا و گاما ایجاد شود: (۱) مهم‌ترین پیک‌ها در فاز آلفا با مقادیر  $1383, 796, 763$  و  $1234 \text{ cm}^{-1}$  مشخص می‌گردد که شامل خمش  $\text{H}-\text{C}-\text{H}$ ، خمش  $\text{C}-\text{H}$  و کشش  $\text{C}-\text{F}$  است؛ (۵) در فاز بتا، پیک‌هایی در مقادیر  $1070, 1275, 840 \text{ cm}^{-1}$  مشاهده می‌گردد که مربوط به کشش  $\text{C}-\text{F}$ ، کشش  $\text{C}-\text{H}$  و کشش  $\text{C}-\text{C}$  است؛ و پیک‌های  $812$  و  $1234 \text{ cm}^{-1}$  نیز معرف فاز گاما هستند اما چندان رایج نیستند. حلال رایج برای PVDF حلال DMSO

جدول ۳ مقدار جذب در طول موج‌های مختلف در همه نمونه‌ها

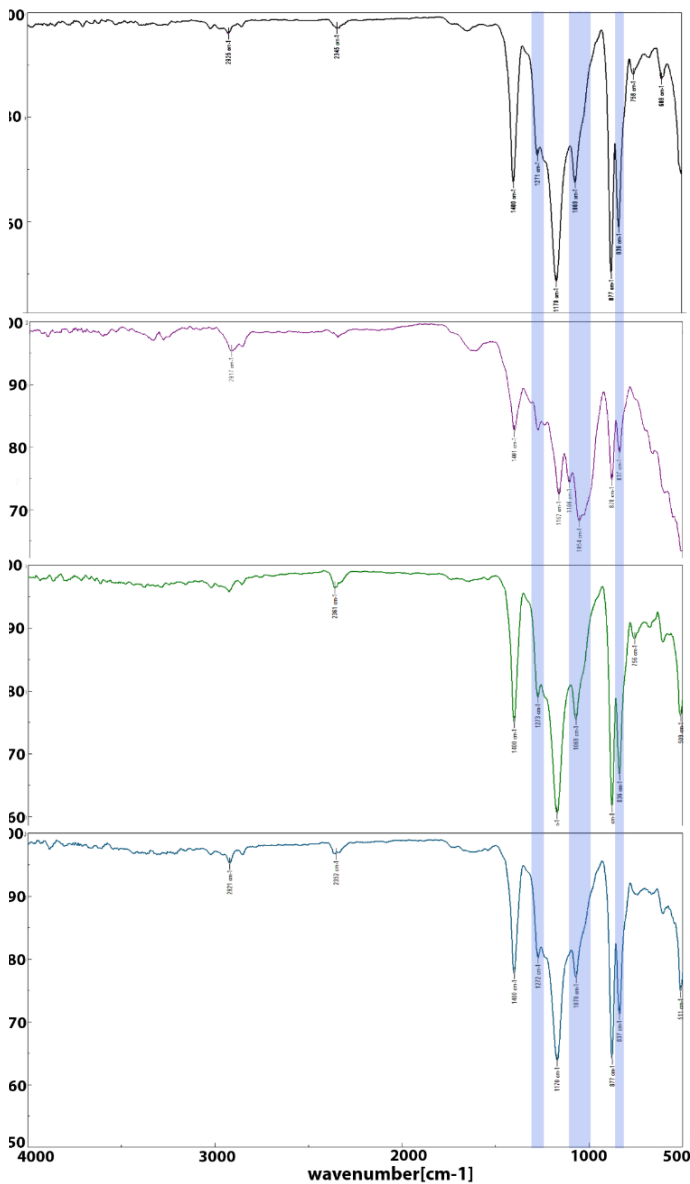
۱۲٪ PVDF ۱/۵٪ MWCNT	۱۲٪ PVDF ۱٪ MWCNT	۱۲٪ PVDF ۰/۵٪ MWCNT	۱۲٪ PVDF	درصد شماره موج
۴۳	۶۹/۶	۶۵	۸۸/۶	۷۶۳
۵/۵	۷	۱	۸/۸	۸۰۱
۲۹۰/۶	۳۱۰	۱۳۳	۴۱۶	۸۳۹
۵۵۰/۲	۵۶۷/۸	۲۹۴/۳	۷۸۲	۸۷۷
۳۰۷/۶	۴۶۰/۹	۴۴۲/۲	۵۵۶/۹	۱۰۷۱*
۸۵۲	۱۰۰۳/۳	۲۹۱/۳	۱۲۶۳/۱	۱۱۷۲
۷۷/۱۴	۷/۴	۸/۳	۱۰/۶۳	۱۲۳۷
۱۳۴/۹	۱۵۸/۷	۵۳/۹	۱۸۰/۷	۱۲۷۳*
-	-	۱۶/۲	۲۴/۳	۱۳۴۰
۷۰۲/۳	۸۳۶/۵	۳۶۰/۶	۱۰۶۸/۹	۱۴۰۱
۵۵/۴	۳۲/۴	۱۴۵/۳	۷۶/۲	۱۶۴۰

\* مقادیر مربوط به وجود فاز بتا در نمونه نخ‌های نانولیفی است.

جدول ۴ مقدار فاز بتا در نمونه‌های مختلف

۱۲٪ PVDF	۱۲٪ PVDF ۰/۵٪ MWCNT	۱۲٪ PVDF ۱٪ MWCNT	۱۲٪ PVDF ۱/۵٪ MWCNT	درصد فاز $\beta$
۷۸/۸۴	۶۱/۸۸	۷۷/۹۵	۸۴/۲۹	

در تماس با PVDF قرار می‌گیرد و باعث هسته‌زایی مضاعف بر فاز بتا می‌شود. اما چون ساختار پایه هنوز بر از MWCNT است نمی‌توان به اندازه PVDF خالص آرایش منظم فاز بتا را انتظار داشت [14-17]. بر اساس پژوهش وانگ و همکاران [23]، افزایش درصد وزنی MWCNT در نانوالیاف PVDF منجر به رشد فاز بتا، افزایش کشسانی و بهبود شدید هدایت الکتریکی شده است. همچنین پس از آستانه پراکندگی (معمولاً حدود ۱/۲٪ wt)، شبکه سه بعدی رسانا بین نانولوله‌ها پایدار شده و هدایت الکتریکی به مقدار ثابتی می‌رسد.



شکل ۱۰ تصویر FTIR نمونه‌های با مقادیر (به ترتیب از بالا به پایین) 0، 0.5، 1، و 1.5٪ MWCNT مقدار تقریباً ثابت PVDF 12٪:DMSO

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که درصد فاز بتا با افزایش مقدار MWCNT به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. ( $p < 0.05$ ) این یافته با فرضیه‌ی تعامل قوی میان زنجیره‌های PVDF و نانولوله‌های کربنی در جهت تسهیل تشکیل فاز بتا  $\beta$  کاملاً سازگار است. از آنجا که افزایش محتوای فاز بتا یکی از شاخص‌های اصلی در ارتقای عملکرد حسگرهای پیزوالکتریک به شمار می‌آید [1, 2]، بهبود مشاهده شده در این پژوهش از اهمیت کاربردی بالایی برخوردار است.

میرجلیلی و همکاران [19] نیز در مطالعه‌ی خود تأیید کرده‌اند که افزایش فاز بتا در نانوالیاف PVDF منجر به افزایش چشمگیر بازده پیزوالکتریک می‌شود. مختاری و همکاران [20] در تحقیقات اخیر خود نشان داده‌اند که کنترل دقیق مقدار و پراکندگی یکنواخت MWCNT در ساختار نانوالیاف الکترورسی شده، نقش کلیدی در بهبود خواص مکانیکی و پیزوالکتریک PVDF دارد. همچنین چاهوان [21] گزارش کرد که حتی افزودن درصدهای بسیار کم نانولوله کربنی (حدود ۰/۰۸٪) می‌تواند منجر به بهبود قابل توجه خواص کششی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های PVDF/MWCNT شود. وان و همکاران نیز با بررسی جامع کاربردهای منسوجات مبتنی بر نانوالیاف PVDF، اهمیت پارامترهای فرایندی و ساختاری را در دقت عملکرد حسگری، پوست الکترونیکی و تعامل انسان-کامپیوتر برجسته کرده‌اند. افزون بر این، در یافته‌های لیو و همکاران [22] نیز روند مشاهده شده در این پژوهش را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که حضور CNT با تحریک آرایش دیپلولی، سهم قابل توجهی در افزایش فاز  $\beta$  ایفا می‌کند.

و مطابق با نتایج طیف‌سنجی (شکل 10)، می‌توان دریافت که ساختار ایجاد شده در نخ‌های نانولیفی، ۷۸/۸٪ از نوع بتا بوده است و افزودن MWCNT می‌تواند اثر مثبتی بر بهبود این ساختار داشته باشد؛ چون MWCNT می‌تواند به عنوان عامل هسته‌زایی برای افزایش ساختار بتا ایفای نقش کند. البته لازم به ذکر است که اگر پراکندگی نانولوله‌ها به خوبی در ساختار رخ ندهد، چگونگی شکل‌گیری فاز بتا را تحت تأثیر قرار خواهد داد. همان‌طور که مشخص است با افزودن MWCNT، میزان ساختار بتا به نسبت PVDF خالص کاهش یافته و فاز  $\alpha$  به تدریج شروع به شکل‌گیری می‌کند. ضمناً با افزایش بیش‌تر MWCNT، فاز بتا مجدداً احیا می‌شود و با افزایش میزان آن روبه‌رو می‌شویم. دلیل این کاهش می‌تواند به عواملی نظیر تجمع MWCNT بازگردد؛ چرا که تجمع نانولوله‌ها می‌تواند از حرکت زنجیره‌های PVDF جلوگیری کند و مانع از شکل‌گیری ساختار قطبی بتا شود. علاوه بر این، برهم کنش سطحی بین PVDF و MWCNT می‌تواند یکی دیگر از عوامل کاهش فاز بتا باشد. بنابراین می‌توان با اصلاح سطح، پیوند PVDF و MWCNT را تقویت کرد. همچنین با افزایش غلظت، احتمال شبکه‌سازی بیش‌تر می‌شود و مقدار بیش‌تری از سطح MWCNT

[5] Ko, F., Gogotsi, Y., Ashraf, A., Naguib, N., Ye, H., Yang, G.L., Li, C., Willis, P. 2003. Electrospinning of Continuous Carbon Nanotube-Filled Nanofiber Yarns. *Advanced Materials*, 15, 1161 - 1165. [10.1002/adma.200304955](https://doi.org/10.1002/adma.200304955).

[6] Bazbouz, M. B., & Stylios, G. K. 2008. Novel mechanism for spinning continuous twisted composite nanofiber yarns. *European Polymer Journal*, 44(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.07.023>

[7] Dabirian, F., Hosseini, Y., & Ravandi, S. H. (2007). Manipulation of the electric field of electrospinning system to produce polyacrylonitrile nanofiber yarn. *Journal of Textile Institute*, 98(3), 237-241. <https://doi.org/10.1080/00405000701392854>

[8] Dabirian, F. and Hosseini, S. 2009. Novel method for nanofibre yarn production using two differently charged nozzles. *Fibers and Textiles in Eastern Europe*, 17(1), 45-48.

[9] Afifi, A. M., Nakano, S., Yamane, H., & Kimura, Y. (2010). Electrospinning of continuous aligning yarns with a funnel target. *Macromolecular Materials and Engineering*, 295(7), 660-665. <https://doi.org/10.1002/mame.201000050>

[10] Zhou, M., Xu, F., Ma, L., et al. 2022. Continuously fabricated nano/micro aligned fiber-based waterproof and breathable fabric triboelectric nanogenerators for self-powered sensing systems. *Nano Energy*, 104, 107885. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107885>.

[11] Mahfouzi, K., Norouzi, B. and Mohr, A. 2023. Mechanical properties of nanofiber yarn produced by nozzle-free electrospinning system. *Proceedings of the 13th National Textile Engineering Conference of Iran*, 2-4 November 2023.

[12] Mahfouzi, K., Khodaparast Haghi, A., Gabiloglu Abaszade, R., Khalid, S. and Hajimahmud oglu Abdullayev, V. 2025. Nanofiber yarn production machine using nozzleless electrospinning. *UK Design No.* 6464224.

[13] Joseph, J., Nair, S. V., & Menon, D. 2015. Integrating substrateless electrospinning with textile technology for creating biodegradable three-dimensional structures. *ACS Nano Letters*, 15(8), 5420-5426. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01815>

[14] Amin Esmaili, T., Abbasi, A., Asadi, A. M., Norouzi, B., Mahfouzi, K. 2022. Investigation of the influencing parameters in the production process of polyacrylonitrile nanofibers in a disk electrospinning system". 6th National Congress and Workshops on Nanoscience and Nanotechnology (NCWNN6).

[15] Qin, Y., & Rong, M. Z. 2003. Morphological characterization and preparation of poly(vinylidene fluoride) composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 89(4), 1093-1100. <https://doi.org/10.1002/app.11792>.

نتایج این پژوهش با یافته‌های منتشرشده در مطالعات اخیر پیرامون نانوالیاف PVDF/MWCNT هم‌راستا است. مطابق گزارش‌های معتبر، افزایش درصد نانولوله‌های کربنی علاوه بر بهبود رفتار الکتریکی، موجب افزایش محتوای فاز  $\beta$  و در نتیجه ارتقای عملکرد پیزوالکتریک و پیزومقاومتی ساختار می‌شود [19,20]. همچنین بر اساس داده‌های این تحقیق و مطالعات روز دنیا، کاهش مدول یانگ و افزایش کشسانی در حضور CNT پدیده‌ای مورد انتظار است که به تشکیل شبکه‌های رسانای پایدار، تقویت قطبش الکتروفعال و در نهایت دستیابی به بازده انرژی بالاتر در نانوالیاف منجر می‌شود [21,22].

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که تولید نخ‌های نانولیافی PVDF/MWCNT با استفاده از روش الکترورسی بدون نازل دیسکی، بستر مناسبی برای توسعه منسوجات هوشمند، حسگرهای انرژی و ساختارهای الکترومکانیکی پیشرفته فراهم می‌کند. به‌طور کلی، نتایج به‌دست‌آمده ضمن تأیید کارآمدی روش به‌کاررفته و ویژگی‌های مطلوب الیاف تولیدی، کاملاً در امتداد پیشرفت‌های علمی جهانی در حوزه نانوالیاف هیبریدی پیزوالکتریک قرار می‌گیرد و چشم‌انداز روشنی برای توسعه کاربردهای صنعتی و فناوری‌های حسگری نوین ترسیم می‌کند.

#### ۴ نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش الکترورسی بدون نازل دیسکی قابلیت تولید نخ‌های نانولیفی هیبریدی با ساختار هسته-پوسته و خواص مکانیکی و ریخت‌شناسی کنترل شده را دارد. افزایش درصد نانولوله‌های کربنی چند جداره و زمان الکترورسی، موجب بهبود پوشش‌دهی، افزایش قطر نخ و نانوالیاف و نزدیک شدن به یکنواختی در رفتار کششی نخ می‌شود. این نتایج مبنایی مؤثر برای توسعه منسوجات هوشمند مبتنی بر نخ‌های ترکیبی و نانو ساختار در حوزه کاربردهای پیشرفته محسوب می‌گردد.

#### مراجع

[1] Wan, X., Cong, H., Jiang, G., Lian, X., Liu, L. and He, H. 2023. A review on PVDF nanofibers in textiles for flexible sensors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15, 11244-11258.

[2] Arrigo, R., & Malucelli, G. 2020. Rheological Behavior of Polymer/Carbon Nanotube Composites: An Overview. *Materials*, 13(12), 2771. <https://doi.org/10.3390/ma13122771>.

[3] Zhang, Q., Wang, R., Lan, C., Liu, Y., Chen, H. and Li, J. 2024. Hierarchically structured hollow PVDF nanofibers for advanced tactile sensors. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155661.

[4] Fan, W., Lei, R., Dou, H., Wu, Z., Lu, L., Wang, S., Liu, X., Chen, W., RezaKazemi, M., Amin Abhavi., TM, Li, Y., Ge, S. 2024. Sweat permeable and ultrahigh strength 3D PVDF piezoelectric nanoyarn fabric strain sensor. *Nat Commun*. 25;15(1):3509. doi: 10.1038/s41467-024-47810-7. PMID: 38664454; PMCID: PMC11045766.

[16] Ruan, L., Yao, X., Chang, Y., Zhou, L., Qin, G., & Zhang, X. 2018. Properties and Applications of the  $\beta$  Phase Poly (vinylidene fluoride). *Polymers*, 10(3), 228. <https://doi.org/10.3390/polym10030228>.

[17] Lovinger, A. J. 2014. Poly(vinylidene fluoride). *Progress in Polymer Science*, 39(4), 683-706. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.09.002>

[18] Wang, T. and Li, G. 1994. Crystalline phase transformation in PVDF films: I. Thermal stress and tensile studies. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 32(5), 859-870. <https://doi.org/10.1002/polb.1994.090320509>

[19] Mirjalali, SH., Mahdavi Varposhti, A., Abrishami, SH., Bagherzadeh, R., Asadnia, Sh., Huang, M., Peng, SH., Wang, Ch. and Wu, Sh. 2023. A Review on Wearable Electrospun Polymeric Piezoelectric Sensors and Energy Harvesters. *Macromol. Mater. Eng.*, 308, 2200442. DOI: 10.1002/mame.202200442.

[20] Mokhtari, F., Samadi, A., Rashed, A. O., Li, X., Razal, J. M., Kong, L., Varley, R. J., Zhao, S. 2025. Recent progress in electrospun polyvinylidene fluoride (PVDF)-based nanofibers for sustainable energy and environmental applications. *Progress in Materials Science*, V. 148, 101376, ISSN 0079-6425, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101376>.

[21] Chauhan, D., Kumar Singh, A., Tyagi, S., Iyamperumal Anand, P., Ramakrishna, S., Kumar Srivastava, M. 2026. Engineering of electrospun lead-free PVDF/Carbon Nanofiber-ZnO nanocomposites for enhanced piezoelectric energy harvesting and wearable sensing applications *Composites Part B: Engineering*, V. 309, 113039, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113039>.

[22] Liu, Xia., Xu, Sixing., Kuang, Xuanlin., Wang, Xiaohong. 2016. Ultra-long MWCNTs highly oriented in electrospun PVDF/MWCNT composite nanofibers with enhanced  $\beta$  phase. *RSC Advances*, 6, 108. <http://dx.doi.org/10.1039/C6RA24195F>

[23] Wang, SH., Wan, Y., Sun, B., Liu, L.Z., Xu, W. 2014. Mechanical and electrical properties of electrospun PVDF/MWCNT ultrafine fibers using rotating collector. *Nanoscale Res Lett.* 23;9(1):522. doi: 10.1186/1556-276X-9-522. PMID: 25288915; PMCID: PMC4184468.