

Tuning the Actuation Performance of Poly(vinylidene fluoride)/Cloisite 30B Piezoelectric Nanofibers

Sobhan Sharafkhani*

Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful,
64616-18674, Iran

Received: 10 December 2025, accepted: 5 May 2026

ABSTRACT

Keywords:

oriented nanofibers,
 β -phase,
piezoelectric actuator,
PVDF,
Cloisite 30B

Hypothesis: Piezoelectric actuators, which can convert electrical energy into mechanical energy, have gained great interest in soft robotic systems, medical instruments, artificial muscles, electronic devices, etc. Nanostructure tailoring via the cooperative effects of creating geometrical confinement, chain orientation, and nanoparticle addition can remarkably enhance piezoelectric properties and actuation performance.

Methods: Preferably oriented poly(vinylidene fluoride) (PVDF) nanofibers containing a low amount of Cloisite 30B were introduced by electrospinning on a wire-framed rotating drum. The field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) has been used to observe the morphology and diameter distribution of the nanofibers. Transmission electron microscope (TEM) confirmed dispersion of Cloisite 30B nanoparticles inside the nanofibers. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) observed the crystalline structure of the nanofibers. The mechanical properties were measured using dynamic mechanical thermal analysis (DMTA). Finally, nanofibers were used as the unimorph cantilever beam to evaluate the piezoelectric performance.

Findings: The synergistic effects of preferential alignment, reduced fiber diameter, and Cloisite 30B platelets caused the tailoring of the polar β crystalline phase in PVDF. The well-oriented PVDF/Cloisite 30B nanofibers exhibited a smooth morphology with an average diameter beneath 100 nm and a β -phase fraction of $\sim 88\%$. The probable polymer chain-clay platelet interfacial interactions are responsible for a $\sim 84\%$ increase in the elastic modulus of the oriented PVDF nanofibers. Previously, the geometrical constraint (preferential orientation and fiber diameter reduction) had led to a 63% increase in the elastic modulus of pristine and random PVDF nanofibers. The electrospun nanofibers showed the maximum piezoelectric deflection of 11.2 μm in response to the electric field of 2 V/ μm when used as a unimorph cantilever beam, which is higher or comparable to the previously published data in literature. These results indicate that the produced PVDF/Cloisite 30B nanofibers are promising candidates for lightweight, flexible, and nano-dimensional piezoelectric actuators in next-generation multifunctional structures.

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sharafkhani@jsu.ac.ir

Please cite this article using:

Sharafkhani S., Tuning the Actuation Performance of Poly(vinylidene fluoride)/Cloisite 30B Piezoelectric Nanofibers, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 341-353, 2025.

تنظیم عملکرد محرک نانوالیاف پیزوالکتریک پلی(وینیلیدن فلوئورید)/کلویزیت 30B

سبحان شرف خانی*

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران، کد پستی ۱۸۶۷۴-۶۴۶۱۶

دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۵

چکیده

فرضیه: محرک‌های پیزوالکتریک که می‌توانند انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل کنند، در سامانه‌های رباتیک، ابزارهای پزشکی، ماهیچه‌های مصنوعی و دستگاه‌های الکترونیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. مهندسی نانو ساختار با اثر هم‌افزایی ایجاد محدودیت هندسی، آرایش‌یافتگی زنجیرهای پلیمری و افزودن کنترل‌شده نانوذرات می‌تواند خواص پیزوالکتریک و عملکرد محرک را به‌طور شایان توجهی افزایش دهد.

روش‌ها: نانوالیاف پلی(وینیلیدن فلوئورید) (PVDF) با آرایش ترجیحی دارای کلویزیت 30B با روش الکتروریسی روی استوانه با قاب سیمی تهیه شدند. از میکروسکوپ الکترونی پویشی گسیل میدانی (FE-SEM) برای مشاهده شکل‌شناسی نانوالیاف استفاده شده است. میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) پراکندگی نانوذرات کلویزیت 30B را در داخل نانوالیاف تأیید کرد. به‌کمک طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوری (FTIR) ساختار بلوری نانوالیاف بررسی شد. خواص مکانیکی با استفاده از تجزیه گرمایی مکانیکی دینامیکی (DMTA) مشاهده شد. در نهایت، از نانوالیاف به‌عنوان تیر تک‌لایه برای ارزیابی عملکرد پیزوالکتریک استفاده شد.

یافته‌ها: اثر هم‌افزایی آرایش ترجیحی نانوالیاف، کاهش قطر الیاف و وجود نانوذرات کلویزیت 30B به مهندسی فاز بلوری قطبی β در PVDF منجر شد. نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF-کلویزیت 30B با شکل‌شناسی یکنواخت، قطر متوسط کمتر از ۱۰۰ nm و کسر فاز β حدود ۸۸٪ تهیه شدند. برهم‌کنش‌های بین‌سطحی زنجیر پلیمری-نانوذرات خاک رس، مسئول افزایش ۸۴٪ در مدول کشسانی نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF هستند. پیش از این، محدودیت هندسی (آرایش ترجیحی و کاهش قطر الیاف) باعث افزایش ۶۳٪ در مدول کشسانی نانوالیاف اتفاقی PVDF شده بود. نانوالیاف الکتروریسی‌شده در نقش تیر یک‌سرگردار، از خود بیشینه خمش پیزوالکتریک $11/2 \mu\text{m}$ را در پاسخ به میدان الکتریکی $2 \text{ V}/\mu\text{m}$ نشان دادند که پاسخی رقابتی در مقایسه با آخرین کارهای منتشرشده در این زمینه با بررسی ادبیات پژوهش است. نتایج نشان می‌دهد، نانوالیاف PVDF-کلویزیت 30B، گزینه امیدوارکننده‌ای برای محرک‌های پیزوالکتریک سبک، انعطاف‌پذیر با ابعاد نانومتری در ساختارهای چندکاربردی نسل بعدی هستند.

واژه‌های کلیدی

نانوالیاف آرایش‌یافته،

فاز β ،

محرک پیزوالکتریک،

پلی(وینیلیدن فلوئورید)،

کلویزیت 30B

* پیام‌نگار:

sharafkhani@jsu.ac.ir

مقدمه

خاصیت پیزوالکتریک عبارت است از تبدیل انرژی بین منابع الکتریکی و مکانیکی. به کمک مواد با خاصیت پیزوالکتریک و از راه ایجاد ارتباط میان تحریک الکتریکی و پاسخ مکانیکی، تجهیزاتی دقیق در حوزه‌هایی مانند حسگرها و محرک‌ها در مقیاس میکرو و نانو ساخته می‌شود [۱،۳]. حسگر پیزوالکتریک، طی اثر مستقیم پیزوالکتریک، در پاسخ به انرژی مکانیکی ورودی، انرژی الکتریکی تولید می‌کند. موادی که انرژی الکتریکی را به تغییر شکل مکانیکی تبدیل کنند محرک پیزوالکتریک می‌گویند [۴،۵]. مکان‌یابی در مقیاس نانو، قطعات الکترونیکی، ماشین‌های ابزار دقیق، ماهیچه‌های مصنوعی و ربات‌های انعطاف‌پذیر از جمله زمینه‌های پرکاربرد محرک‌های پیزوالکتریک هستند [۶،۷]. سرامیک‌های پیزوالکتریک مانند تیتانات زیرکونات سرب (PZT)، باریم تیتانات (BaTiO_3) و روی اکسید (ZnO) با ضریب پیزوالکتریک بزرگ، پایداری گرمایی مناسب و پاسخ الکترومکانیکی قابل توجه، مدت‌ها به عنوان گزینه‌های اصلی در کاربردهای صنعتی مطرح بوده‌اند [۸،۹]. اما کاربرد این مواد در ابعاد کوچک‌تر از میکرون با چالش‌های جدی مواجه است. تردی ذاتی، شکنندگی زیاد، فرایندپذیری محدود، ناسازگاری با بسترهای انعطاف‌پذیر و دشواری ایجاد ساختارهای نازک و الیاف از مهم‌ترین مشکلات سرامیک‌ها در نانو فناوری است. افزون بر این، روش‌های ساخت سرامیک‌های فعال مانند تف‌جوشی، لایه‌نشانی دمای زیاد یا فرایندهای خلأ، عملاً کاربرد آن‌ها را در سامانه‌های سبک، انعطاف‌پذیر و قابل شکل‌دهی محدود می‌کند. به دلیل همین محدودیت‌ها، اخیراً توجه به مواد پلیمری پیزوالکتریک معطوف شده است [۱۰].

پلی(وینیلیدن فلوروئید) (PVDF) یکی از پرکاربردترین پلیمرهای نیمه‌بلوری پیزوالکتریک با انعطاف‌پذیری زیاد، خواص مکانیکی مناسب، فرایندپذیری راحت، مقاومت زیاد به گرما و وزن کم است که اخیراً در نقش محرک و حسگر توجه زیادی به خود جلب کرده است [۱۱،۱۲]. PVDF از پنج فاز بلوری α ، β ، δ ، ϵ و γ تشکیل شده است. اساس عملکرد پیزوالکتریک‌ها بر ناهم‌آهنگی مراکز بار مثبت و منفی در ساختار بلوری است که با اعمال تنش یا میدان الکتریکی موجب قطبش و تغییر شکل می‌شود [۱۳،۱۴]. خواص پیزوالکتریک این پلیمر ناشت گرفته از فاز قطبی β است. برخلاف فاز غیرقطبی α که در آن برآیند ممان دوقطبی‌ها با صورت‌بندی ترانس-گاش-ترانس-گاش (TGTG') صفر است، فاز قطبی β با صورت‌بندی تمام ترانس (TTTT) و حداکثر ممان دوقطبی آرایش‌یافته در یک جهت می‌تواند از خود خاصیت پیزوالکتریک مناسب بروز دهد [۱۵،۱۶]. بنابراین شرط لازم به کارگیری PVDF در نقش مواد هوشمند از

قبیل حسگرها و محرک‌ها ایجاد و کنترل بیشینه فاز β در ساختار بلوری آن است. تاکنون سازوکار متعددی برای پردازش فاز β در PVDF به کار رفته است از جمله: اعمال فشار زیاد، کشش مکانیکی، قطبی‌سازی هم‌زمان با کرنش و میدان الکتریکی بزرگ، سردکردن مذاب، الکتروریسی و افزودن نانوذرات [۱۷،۱۸]. در اغلب روش‌های نام‌برده، فرایندی دومرحله‌ای شامل کشش مکانیکی و عملیات گرمایی نیاز است تا قطبش الکتریکی و آرایش‌یافتگی بلورها اتفاق افتد [۱۹،۲۰]. خاصیت پیزوالکتریک وابستگی ابعادی دارد. ایجاد قید هندسی در ساختار مواد با تولید ساختارهای تک‌بعدی آرایش‌یافته از قبیل میکروآرایه‌های ستونی، نانومیل‌ها و نانوالیاف الکتروریسی روش مناسبی برای القای خاصیت پیزوالکتریک است. آرایش مولکولی در این دسته مواد رفتاری ناهمسان‌گرد از خود نشان می‌دهند [۲۱،۲۲]. الکتروریسی از جمله روش‌های آسان، کاربردی و ارزان‌قیمت است که تنها طی یک مرحله و بدون نیاز به هیچ گونه آمایش ثانویه، به تولید الیاف با خاصیت پیزوالکتریک قابل توجه در مقیاس میکرو تا نانومتری از مذاب یا محلول پلیمری منجر می‌شود [۲۳،۲۴]. در شرایط تهیه مشابه، ضریب پیزوالکتریک (33d) الیاف PVDF نزدیک به دو برابر نمونه‌های فیلمی اندازه‌گیری شده است [۲۵]. D'Anniballe و همکاران [۲۶] گزارش داده‌اند، نانوالیاف الکتروریسی بر پایه PVDF عملکرد پیزوالکتریک بیشتر و توان مصرف‌شده کمتر در مقایسه با فیلم اکستروژده شده دارند. همچنین، الکتروریسی این امکان را فراهم می‌سازد تا با ایجاد الیاف آرایش‌یافته، الیاف توخالی یا افزودن نانوذرات مختلف، کسر فاز β ارتقا یابد [۲۷]. تنظیم کردن پارامترهای الکتروریسی از قبیل غلظت محلول الکتروریسی، شدت ولتاژ الکتریکی، فاصله سر سرنگ تا جمع‌کننده و سرعت تغذیه بر شکل‌شناسی الیاف و تولید فاز β اثرگذار است [۲۸]. هر فیدی که به کاهش قطر نانوالیاف و افزایش آرایش‌یافتگی آن‌ها منجر شود، خاصیت پیزوالکتریک را ارتقا می‌دهد [۲۹]. نتایج نشان می‌دهد، با کاهش قطر الیاف الکتروریسی، بازدهی تبدیل انرژی الکترومکانیکی و ولتاژ تولیدی نانوالیاف PVDF افزایش می‌یابد [۳۰،۳۱]. پژوهش‌ها نشان داده است، با تغییر سرعت چرخش جمع‌کننده چرخان از ۳۵۰ rpm تا ۲۰۰۰ rpm، ابتدا کسر فاز قطبی β نزدیک به ۴۰٪ افزایش یافته، اما به تدریج شدت تغییرات کاهش می‌یابد و مستقل از سرعت چرخش جمع‌کننده می‌شود [۳۲]. براساس مطالعه Singh و همکاران [۳۳]، نانوالیافی که با سوزن کوچک‌تر تهیه شده‌اند، از کسر فاز β بزرگ‌تری بهره می‌برند. در مقایسه با فیلم‌های متداول PVDF با مدول ۲/۵ GPa، مدول الیاف PVDF کمتر از ۱۰۰ MPa گزارش شده است [۳۴،۳۵].

افزودن نانوذرات با نسبت منظر زیاد از راه افزایش برهم‌کنش‌های

از نانوالیاف تولیدی، بازدهی پیژوالکتریک آن‌ها در نقش محرک بررسی و با آخرین دستاوردهای ارائه‌شده سایر پژوهشگران مقایسه می‌شود. انتظار می‌رود، نمونه‌های با بلور قطبی فاز β بزرگ‌تر، خمش پیژوالکتریک بیشتری از خود نشان دهند.

تجربی

مواد

پلی(وینیلیدن فلوئورید) (PVDF Solef 1010) با وزن مولکولی 275000 g/mol و چگالی 1.78 g/cm^3 از شرکت Solvay آمریکا تهیه شد. دی‌متیل فرامید (DMF) با چگالی 0.948 g/cm^3 و خلوص بیش از ۹۹٪ و استون با چگالی 0.79 g/cm^3 و خلوص ۹۹٪ به‌عنوان حلال از شرکت Merck آلمان خریداری شد. نانورس اصلاح‌شده (کلویزیت 30B) با خلوص ۹۹٪ از شرکت BYK آمریکا خریداری شد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

آماده‌سازی محلول

مقدار $4/6 \text{ g}$ پودر PVDF در دفعات متوالی به مقدار مناسب از حلال استون-DMF با نسبت $70/30$ اضافه شد. این ترکیب به مدت 24 h در دمای 30°C با سرعت 200 rpm به کمک همزن مغناطیسی هم‌زده شد تا محلول یکنواخت و شفاف ۱۸٪ (وزنی) PVDF تهیه شود. برای جلوگیری از تبخیر استون حین آماده‌سازی محلول‌ها، ظروف محلول به کمک پارافیلیم عایق‌بندی شدند. ترکیب درصد کلویزیت 30B در محلول نهایی ۱٪/۰/۱ وزنی در نظر گرفته شد. به‌منظور تهیه محلول نانوکامپوزیتی، نانوذرات کلویزیت 30B به حلال DMF-استون اضافه شد. برای دستیابی به پراکنش یکنواخت نانوذرات در بستر حلال، نمونه‌ها به مدت 30 min تحت پراکنش درون دستگاه فراصوت (UP400S, Hielscher) ساخت آلمان قرار گرفت. سپس مقادیر مشخص از پودر PVDF به‌طور پیوسته به محلول آماده‌شده افزوده شد تا محلول نهایی تهیه شود. سایر فرایندها انحلال مشابه محلول خالص تکرار شد.

الکتروریسی

طرح‌واره فرایند الکتروریسی برای تولید نانوالیاف آرایش‌یافته در شکل ۱ (a) نشان داده شده است. از منبع تغذیه ولتاژ زیاد برای فراهم‌سازی میدان الکتریکی فرایند الکتروریسی استفاده شد. محلول

بین مولکولی با پلیمر موجب تشدید آرایش‌یافتگی زنجیرها و در پی آن بهبود کسر فاز قطبی β می‌شود. نانورس اصلاح‌شده (کلویزیت 30B) از جمله نانوذراتی است که می‌تواند خاصیت پیژوالکتریک PVDF را بهبود دهد [۳۶]. حین فرایند الکتروریسی ممکن است، بخشی از زنجیرهای پلیمر آرایش خود را در جهت میدان الکتریکی از دست دهند. در این شرایط، نانوذرات به‌عنوان واحدهای هسته‌گذار عمل کرده، با ایجاد برهم‌کنش‌های بین مولکولی با زنجیر پلیمری مانع از آسودگی زنجیرها از صورت‌بندی TTTT پس از حذف میدان الکتریکی می‌شوند [۳۱، ۳۷]. افزون بر این، برهم‌کنش‌های پلیمر-نانوذره کمک می‌کند تا کسری از زنجیرهای پلیمری که طی فرایند الکتروریسی نتوانسته‌اند آرایش یابند، به صورت‌بندی TTTT دست یابند [۳۸]. Liu و همکاران [۳۹] خواص پیژوالکتریک نانوالیاف PVDF در مجاورت نانورس را بررسی و با نمونه فیلمی مقایسه کردند. نتایج پدیدارشدن فاز بلوری غیرقطبی α در نانوالیاف خالص PVDF و فیلم نازک نانوکامپوزیتی را تأیید می‌کند. حال آنکه فاز α در الیاف نانوکامپوزیتی PVDF/نانورس کاملاً حذف شده است. این پدیده می‌تواند ناشی از جذب زنجیرهای پلیمری روی صفحه‌های نانورس و ایجاد برهم‌کنش‌های سازنده پلیمر-نانوذره باشد. این برهم‌کنش‌ها موجب پایداری صورت‌بندی تمام ترانس زنجیرهای پلیمری می‌شود. نانوالیاف الکتروریسی‌شده PVDF/نانورس به کمک جمع‌کننده چرخان کسر فاز β بزرگ‌تری از نانوالیاف با آرایش اتفاقی داشتند [۴۰]. وجود نانوذرات خاک رس به‌وضوح خواص پیژوالکتریک را ارتقا داده است.

با اینکه توجه اکثر پژوهشگران بر تهیه و بررسی عملکرد حسگرهای پیژوالکتریک معطوف بوده است، تلاش‌های محدودی در زمینه ساخت محرک‌های پیژوالکتریک بر پایه نانوالیاف PVDF انجام شده است. مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد، تاکنون اثر نانوذرات کلویزیت 30B بر عملکرد محرک‌های پیژوالکتریک از نانوالیاف PVDF بررسی نشده است. مهندسی نانوساختار با بهره‌گیری اثر هم‌افزایی نانوذرات کلویزیت 30B، آرایش ترجیحی نانوالیاف و کاهش قطر نانوالیاف می‌تواند به تهیه محرک پیژوالکتریک با کارایی بهتر یا قابل مقایسه نسبت به آخرین دستاوردهای تجربی گزارش‌شده منجر شود. در این راستا ابتدا نقش هم‌زمان فرایند الکتروریسی، محدودسازی قطر نانوالیاف الکتروریسی تا چند ده نانومتر و نیز آرایش ترجیحی نانوالیاف بر بلورهای قطبی فاز β و خواص مکانیکی PVDF بررسی می‌شود. در ادامه، اثر مقدار بهینه نانوذرات کلویزیت 30B بر شکل‌شناسی، خواص پیژوالکتریک و خواص مکانیکی نانوالیاف تولیدی نشان داده می‌شود. با ساخت تیرهای یک‌سرگردار

تولیدی بهره گرفته شد. پس از محاسبه ارتفاع پیک‌های جذب فاز α و β ، درصد فاز بلوری قطبی β از معادله پیش‌رو محاسبه می‌شود:

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

در معادله (۱)، A_β و A_α به ترتیب به ارتفاع پیک جذب در طول موج‌های ۷۶۰ و 837 cm^{-1} نسبت داده می‌شوند. K_β و K_α به ترتیب ضرایب جذب بلوری و α و β برابر $7/73 \times 10^4$ و $6/13 \times 10^4$ هستند.

آزمون بررسی خواص مکانیکی نانوالیاف

مدول کشسانی نانوالیاف با آزمون تحلیل دینامیکی مکانیکی گرمایی (DMTA) به کمک دستگاه NETZCH-242C ساخت آلمان بررسی شد. نانوالیاف الکترورسی مستطیلی شکل با ابعاد $8 \times 4 \times 0.1 \text{ mm}^3$ (ضخامت $\times$ عرض $\times$ طول) با سرعت گرمادهی 5°C/min در بسامد ثابت ۱ Hz در محدوده دمایی 20°C تا 70°C تحت آزمون قرار گرفتند. نیروی ثابت (۰/۰۱ N) در جهت طولی به نانوالیاف اعمال شد، به‌ترتیبی که پارگی رخ ندهد.

آزمون محرک

به‌منظور ارزیابی در نقش جزء محرک پیزوالکتریک، سطوح بالا و پایین

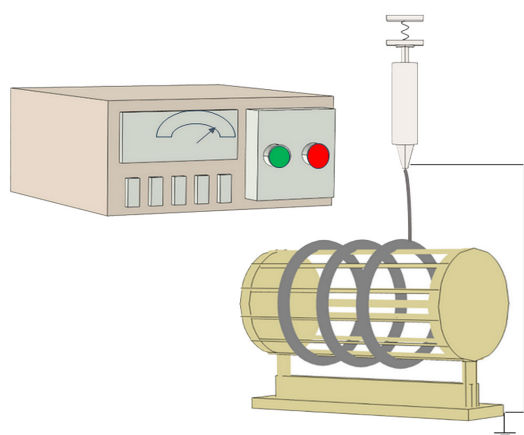
الکترورسی به وسیله سرنگ پلاستیکی با سوزن فلزی با قطر 0.5 mm و سرعت تغذیه 0.5 mL/h به کمک پمپ سرنگ (Harvard PHD 2000)، ساخت انگلستان به سمت جمع‌کننده پرتاب شد. از دو نوع جمع‌کننده فویل آلومینیمی مستطیلی ثابت و استوانه با قاب سیمی و سرعت چرخش 800 rpm برای جمع‌کردن نانوالیاف تحت ولتاژ 18 kV استفاده شد. نانوالیاف در فضای خالی چند سانتیمتری بین میله‌های فلزی استوانه تحت نیروی الکتروستاتیک کشیده می‌شوند. هرچند انتظار می‌رود، نانوالیاف جمع‌شده روی فویل آلومینیمی آرایش اتفاقی داشته باشند. فاصله جمع‌کننده تا سر سوزن سرنگ 14 cm بود. الکترورسی در دمای اتاق انجام شد.

شکل‌شناسی نانوالیاف

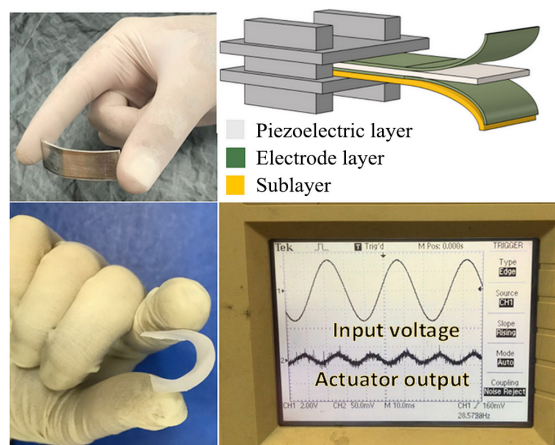
به‌منظور شکل‌شناسی نانوالیاف تولیدی و مقدار آرایش‌یافتگی نانوالیاف از میکروسکوپ الکترونی پوششی گسیل میدانی (MIRA3 TESCAN-XMU (FE-SEM) ساخت جمهوری چک استفاده شد. نانوالیاف تولیدی با روش کندوپاش با طلا پوشش‌دهی شدند. پخش نانوذرات خاک رس در نانوالیاف PVDF با میکروسکوپ الکترونی عبوری (Philips, EM 208 S (TEM) ساخت هلند بررسی شد.

طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه

از طیف‌سنج زیرقرمز تبدیل فوریه (Thermo Nicolet Avatar 360 (FTIR) ساخت آمریکا برای شناسایی و ارزیابی کمی فازهای بلوری نانوالیاف



(a)



(b)

شکل ۱- (a) طرح‌واره فرایند الکترورسی تولید نانوالیاف آرایش‌یافته روی استوانه چرخان با قاب سیمی و (b) طرح‌واره و تصویر محرک انعطاف‌پذیر پیزوالکتریک در نقش تیر تک‌لایه یک‌سرگردار. نمایشگر ولتاژ سینوسی ورودی و خروجی محرک را نشان می‌دهد.

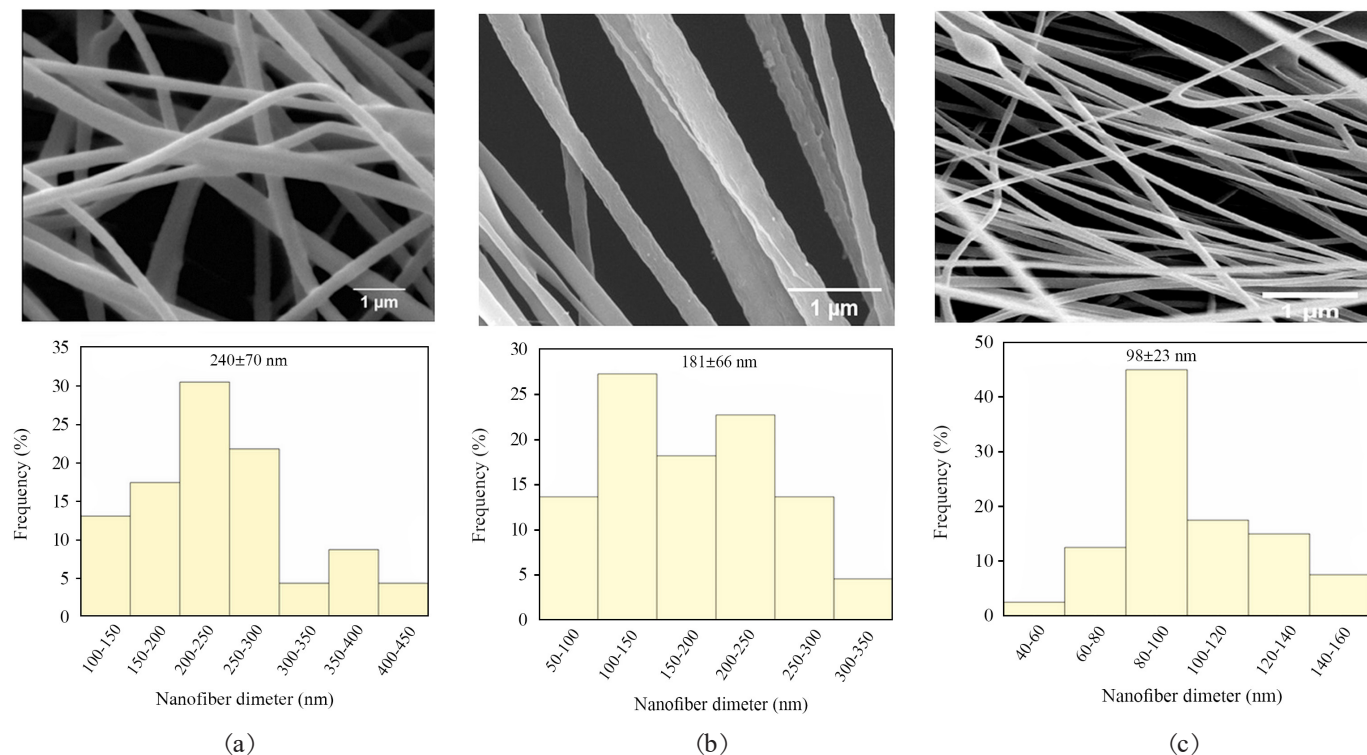
Fig. 1. (a) Schematic of the electrospinning process for producing oriented nanofibers on a wire-framed rotating drum and (b) schematic and photographs of the piezoelectric flexible actuator as a unimorph cantilever beam. The oscilloscope shows the input sinusoidal voltage and the actuator output.

نتایج و بحث

شکل‌شناسی نانوالیاف الکتروریسی

شکل ۲ تصاویر FE-SEM نانوالیاف PVDF/کلویزیت 30B و توزیع قطر را نشان می‌دهد. شکل‌شناسی کاملاً یکنواخت، سطح صاف و عاری از دانه نانوالیاف حاکی از پایداری شرایط الکتروریسی است. نانوالیاف PVDF جمع‌شده روی فویل آلومینیمی آرایش اتفاقی دارند (شکل ۲ (a))، حال آنکه نانوالیاف PVDF با وجود مقدار ۰ و ۱٪ (وزنی) نانوذرات کلویزیت 30B که روی استوانه چرخان با قاب سیمی جمع شده‌اند، کاملاً آرایش‌یافته هستند (شکل ۲ (b) و (c)). فرایند الکتروریسی با اعمال میدان الکتریکی بزرگ توأمان با کشش شدید جت پلیمری قابلیت تولید نانوالیاف آرایش‌یافته را فراهم می‌سازد [۴۱]. کشیده‌شدن نانوالیاف در فضای خالی چند سانتیمتری بین میله‌های فلزی جمع‌کننده استوانه به توسعه نیروی کشش فرایند الکتروریسی منجر شده و کمک شایان ذکری در آرایش‌یافتگی نانوالیاف کرده است. همچنین، چرخش این جمع‌کننده با سرعت ۸۰۰ rpm نیروی کشش اعمالی بر جت پلیمری حین پیمودن مسیر پروازی از خروجی

نانوالیاف با لایه‌های رسانا پوشانده شده، به اصطلاح روی سطوح جزء الکتروود اعمال می‌شود. نمدهای لیفی مستطیل شکل با طول ۴ cm، عرض ۱/۵ cm و ضخامت $10 \pm 100 \mu\text{m}$ تهیه شدند (شکل ۱ (b)). هر دو سطح بالا و پایین نمدهای لیفی به‌طور یکنواخت با لایه نازک خمیر نقره به‌ترتیبی پوشانده شد که رسانایی یکنواخت در کل سطح شکل بگیرد و نیز از اتصال کوتاه سطوح بالا و پایین نانوالیاف اجتناب شود. یک زیرلایه آلومینیمی کشسان به‌طور کامل به سطح پایینی نانوالیاف متصل شد تا پیکربندی تیر یک‌سرگیردار تشکیل شود. آزمون اندازه‌گیری عملکرد محرک پیزوالکتریک یک سامانه اندازه‌گیری غیرتماسی شامل حسگر (Gap, AEC-5505-Japan) و کابل حسگر (PC-03YY-Japan) است. داده‌ها از طریق نمایشگر به تصویر درمی‌آید و سپس برای تجزیه و تحلیل بیشتر به کمک کابل مبدل A/D به رایانه منتقل می‌شود. روش آزمون بدین ترتیب است که موج سینوسی ولتاژ پیوسته در راستای ضخامت محرک بین دو الکتروود بالا و پایین اعمال می‌شود. تغییر شکل اندازه‌گیری‌شده سر آزاد نانوالیاف به کمک حسگر اندازه‌گیری و با نمایشگر نمایش داده می‌شود. در نهایت، داده‌ها در رایانه ذخیره می‌شود.



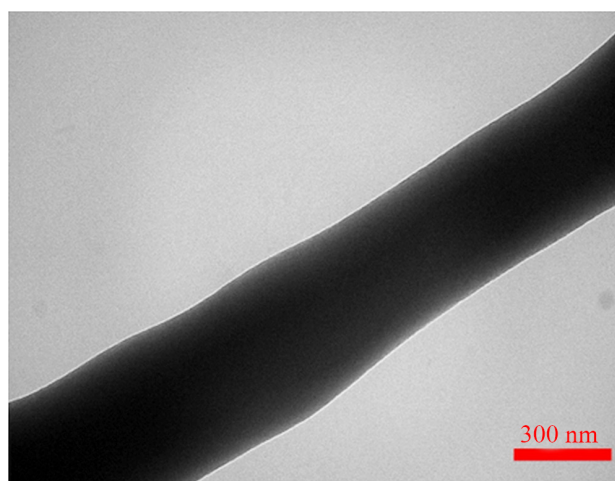
شکل ۲- تصاویر FE-SEM و توزیع قطر: (a) نانوالیاف PVDF با آرایش اتفاقی، (b) نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF و (c) نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF/0.1% (وزنی) کلویزیت 30B.

Fig. 2. FE-SEM images and diameter distribution of (a) random PVDF nanofibers, (b) oriented PVDF nanofibers, and (c) oriented PVDF/0.1% (by wt) Cloisite 30B nanofibers.

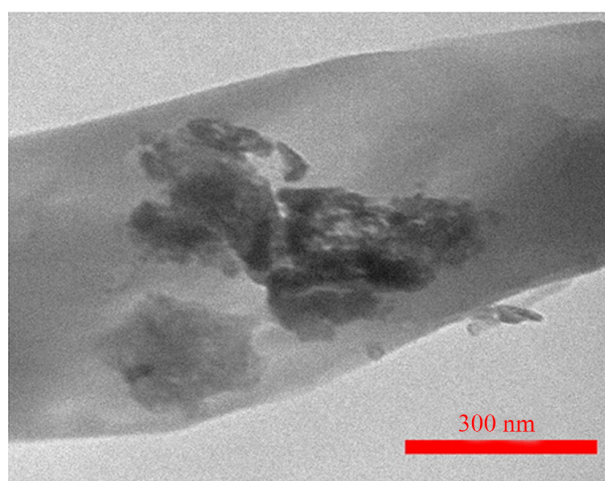
کشش سطحی محلول پلیمری منجر می‌شود. این برهم‌کنش‌ها مقاومت جت پروازی در برابر کشش حین فرایند الکتروریسی را تقویت کرده، باعث افزایش میانگین قطر نانوالیاف می‌شوند [۴۳،۴۴]. از طرفی، گزارش شده است که افزودن نانوصفحه‌های خاک رس چگالی حامل‌های بار الکتریکی محلول پلیمری را افزایش و کشش سطحی محلول را کاهش می‌دهد [۱۵،۴۵]. جت پروازی با چگالی بار بیشتر، دافعه الکتروستاتیکی قابل توجهی از بارهای سطحی نشان می‌دهد و تحت نیروی کششی الکتروریسی، بیشتر کشیده می‌شود، بنابراین نانوالیاف نازک‌تری تولید می‌شود [۴۵]. در این مورد، افزایش نیروی کولنی ناشی از وجود نانوذرات خاک رس با چگالی بار سطحی زیاد بر اثر افزایش گرانروی و کشش سطحی احتمالی غلبه کرده و قطر میانگین نانوالیاف PVDF-کلویزیت 30B به کمتر از ۱۰۰ nm کاهش یافت.

تصاویر TEM مربوط به نانوالیاف الکتروریسی در شکل ۳ نشان داده شده است. سطح نانوالیاف PVDF کاملاً یکنواخت و بدون دانه است (شکل ۳(a)). ساختار آرایش‌یافته نانوالیاف ناشی از القای نیروی کششی مضاعف است. این نیروی کششی مضاعف حاصل از اثر هم‌افزایی استفاده از روش الکتروریسی شکافی (gap spinning method) و سرعت زیاد چرخش جمع‌کننده است. شکل ۳(b) وجود نانوذرات کلویزیت 30B در نانوالیاف PVDF را تأیید می‌کند. هیچ گونه نشانه‌ای از کلوخه‌شدن نانوصفحه‌های خاک رس در بستر نانوالیاف PVDF دیده نمی‌شود، زیرا در مقدار کم و کنترل‌شده به الیاف اضافه شده‌اند. پخش بهینه فراصوت نانوذرات حین آماده‌سازی محلول نیز

سوزن سرنگ تا جمع‌کننده را افزایش می‌دهد که از دیگر عوامل آرایش‌یافتگی نانوالیاف تولیدی است. به دلیل انتخاب مناسب شرایط الکتروریسی، هر سه اجرا از توزیع قطر نسبتاً باریک برخوردار هستند. برای نانوالیاف PVDF با آرایش اتفاقی، قطر الیاف در محدوده ۱۰۰ nm تا ۴۵۰ nm توزیع شده‌اند. انحراف استاندارد ۷۰ nm است. نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF از توزیع قطر در محدوده ۵۰ nm تا ۳۵۰ nm و انحراف استاندارد ۶۶ nm برخوردار است. میانگین قطر نانوالیاف PVDF با آرایش ترجیحی نسبت به حالت آرایش اتفاقی به مقدار قابل توجه از ۲۴۰ nm به ۱۸۱ nm کاهش یافته است. نیروی کشش اضافه که در فضای خالی بین سیم‌های جمع‌کننده بر جت الکتروریسی تحمیل می‌شود و نیز سرعت چرخش زیاد جمع‌کننده به تهیه ساختار فشرده‌تر، ساختار با فضای خالی کمتر بین الیاف مجاور و صورت‌بندی متراکم تمام ترانس، الیاف نازک‌تر با آرایش ترجیحی و یکنواختی بیشتر سطح منجر می‌شود. نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF در مجاورت ۰/۱٪ (وزنی) نانوذرات کلویزیت 30B کمترین میانگین قطر معادل ۹۸ nm و انحراف استاندارد معادل ۲۳ nm نشان داده است. الیاف نانوکامپوزیتی از باریک‌ترین و یکنواخت‌ترین توزیع قطر بهره می‌برد. رقابت بین نیروی کولنی و کشش سطحی محلول پلیمری، تعیین‌کننده شکل‌شناسی نانوالیاف الکتروریسی است. نیروی کولنی تمایل به ایجاد جت کشیده و نازک دارد، در حالی که کشش سطحی محلول ترجیح می‌دهد، اشکالی با نسبت سطح به حجم کم، مانند قطره‌های کروی، تشکیل دهد [۴۲،۴۳]. افزودن نانوذرات به‌طور کلی به دلیل برهم‌کنش‌های بین‌سطحی پلیمر-نانوذره به افزایش گرانروی و



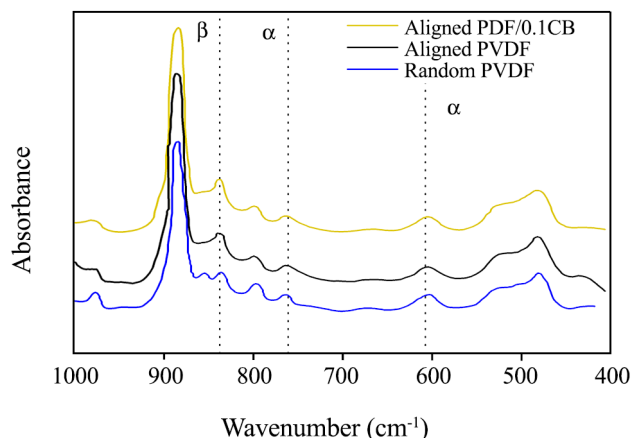
(a)



(b)

شکل ۳- تصاویر TEM (a) نانولیف PVDF و (b) نانولیف PVDF با وجود ۰/۱٪ (وزنی) نانوذرات کلویزیت 30B.

Fig. 3. TEM images of (a) single PVDF nanofiber and (b) single PVDF/0.1% (by wt) Cloisite 30B nanofiber.



شکل ۴- طیف FTIR نانوالیاف PVDF/کلویزیت 30B.

Fig. 4. FTIR spectra of PVDF/Cloisite 30B nanofibers.

کسر فاز قطبی β افزایش معناداری را تجربه کرده و به مقدار ۸۸٪ رسیده است. ایجاد برهم‌کنش‌های بین‌سطحی PVDF-کلویزیت 30B آسوده‌شدن زنجیرهای PVDF از حالت آرایش‌یافته در غیاب میدان الکتریکی را به تأخیر می‌اندازد و سبب پایدارشدن صورت‌بندی TTTT نانوالیاف الکتروریسی می‌شود.

خواص مکانیکی نانوالیاف

نتایج آزمون DMTA برای نانوالیاف تولیدی در بازه دمایی 20°C تا 70°C در شکل ۵ نشان داده شده است. نانوالیاف انعطاف‌پذیر PVDF با آرایش اتفاقی دارای مدول ذخیره به بزرگی تقریباً ۲۷ MPa در دمای اتاق بودند. در دمای اتاق، مدول ذخیره نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF در مجاورت ۰ و ۱٪ (وزنی) نانوذرات کلویزیت 30B به ترتیب به ۴۴ MPa و ۸۱ MPa افزایش یافت. شکل‌شناسی و قطر نانوالیاف بر خواص مکانیکی نانوالیاف اثرگذار است [۴۷]. ساختارهای یک‌بعدی نظیر نانوالیاف با نسبت منظر زیاد در مواجهه با نیروی کششی رفتار ناهمسان‌گرد نشان می‌دهند [۴۸، ۴۹]. به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد، نانوالیاف پلیمری می‌توانند خود را در راستای نیروی مکانیکی اعمالی آرایش دهند. هرچقدر این هم‌راستایی بیشتر باشد، توزیع نیروی اعمالی بین تمام نانوالیاف متقارن‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود. هرچقدر زاویه استقرار نانوالیاف نسبت به جهت نیروی اعمالی بیشتر شود، باربرداری نانوالیاف تضعیف می‌شود، به‌ترتیبی که نانوالیاف عمود بر راستای اعمال نیرو هیچ نقشی در باربرداری ایفا نمی‌کنند [۴۷، ۵۰]. انحراف نانوالیاف اتفاقی از جهت اعمال نیروی مکانیکی، باربرداری نانوالیاف و در پی آن رشد مدول ذخیره را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، مدول ذخیره نانوالیاف PVDF آرایش‌یافته نزدیک به ۶۳٪ بیش از مدول

بر پراکنش مناسب مؤثر است. خاک رس بدون اصلاح‌کننده‌های آلی (دنباله‌های آلکلی) جاذبه‌های الکتروستاتیکی قوی با صفحه‌های مجاور ایجاد می‌کند و تمایل به تشکیل تجمع موضعی دارد. جاذبه‌های قوی خاک رس-خاک رس موجب پراکندگی ضعیف خاک رس اصلاح‌نشده در ماتریس پلیمری می‌شود. سطح جاذبه الکتروستاتیکی بین صفحه‌های نانورس اصلاح‌شده آلی کمتر، فاصله صفحه‌های آنها بیشتر و جداسازی آنها از لایه نانورس مجاور آسان‌تر است [۴۵، ۴۶]. بنابراین، لایه‌های خاک رس اصلاح‌شده می‌توانند به طور یکنواخت در داخل ماتریس پلیمری پراکنده شوند، همان‌طور که در شکل ۳ (b) مشاهده می‌شود. این آزمون همچنین تأییدکننده پخش یکنواخت نانوذرات در محلول الکتروریسی است. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت، برهم‌کنش‌های پایدار PVDF-کلویزیت 30B حتی در ترکیب‌درصدهای کم تشکیل شده است. پخش یکنواخت نانوذرات در بستر ماتریس و تشکیل برهم‌کنش‌های پایدار بین‌سطحی ماتریس-نانوذره، آسودگی زنجیرهای پلیمری از حالت آرایش‌یافته را در غیاب نیروی کشش فرایند الکتروریسی به تأخیر می‌اندازد. به همین دلیل است که حتی پس از اتمام فرایند الکتروریسی، نانوالیاف تولیدی ساختار آرایش‌یافته خود را حفظ کرده‌اند.

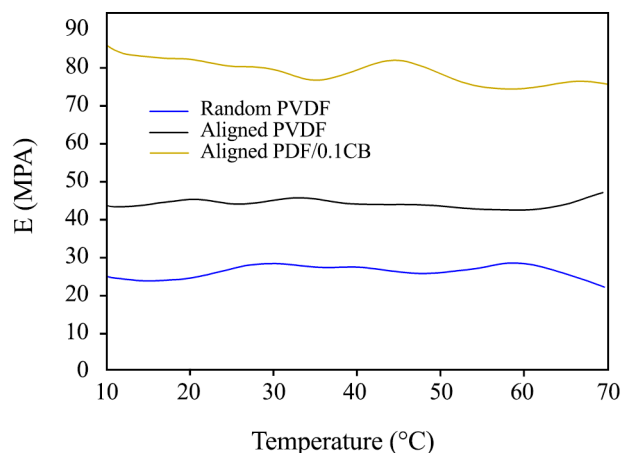
ساختار بلوری نانوالیاف

شکل ۴ نتایج آزمون FTIR نانوالیاف PVDF/کلویزیت 30B را نشان می‌دهد. پیک‌های جذب در 606 cm^{-1} و 760 cm^{-1} به فاز بلوری غیرقطبی α مربوط هستند. در حالی که پیک جذب در 837 cm^{-1} به فاز بلوری قطبی β تعلق دارد. شدت پیک β در 837 cm^{-1} برای نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF بیش از نانوالیاف PVDF با آرایش اتفاقی است. همچنین، شدت پیک‌های α در نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF نسبت به شرایطی که این الیاف آرایش اتفاقی دارند، ضعیف‌تر است. کسر فاز $F(\beta)$ برای نمونه‌های بررسی‌شده با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد. $F(\beta)$ نانوالیاف خالص PVDF با آرایش اتفاقی ۷۴٪ بود. این پارامتر برای نانوالیاف خالص آرایش‌یافته PVDF به مقدار ۸۰٪ رسید. نتایج نشان می‌دهد، فرایند الکتروریسی توانسته است، با موفقیت دوقطبی‌های محلول پلیمری با آرایش اتفاقی را با سازوکار اعمال میدان الکتریکی بزرگ و کشش شدید جهت خروجی از سرنگ به دوقطبی‌های آرایش‌یافته تبدیل کند. از طرفی، آرایش‌یافتگی نانوالیاف اثری ملموس بر $F(\beta)$ داشته است. هرچقدر درجه آرایش‌یافتگی نانوالیاف بیشتر باشد، صورت‌بندی تمام ترانس (TTTT) یا همان استقرار فلوئورها و هیدروژن‌ها در دو طرف زنجیر اصلی PVDF و عمود بر آن منظم‌تر خواهد بود. وجود ۱٪ (وزنی) نانوذرات کلویزیت 30B،

محرک پیزوالکتریک

یک تیر تک‌لایه پیزوالکتریک متشکل از یک لایه پیزوالکتریک نازک است که به یک زیرلایه کشسان غیرپیزوالکتریک متصل می‌شود (شکل ۱ (b)). شکل ۶ (a) سازوکار تغییر شکل تیر تک‌لایه پلیمری پیزوالکتریک در پاسخ به میدان الکتریکی را در نقش محرک نشان می‌دهد. پلیمرهای پیزوالکتریک مانند PVDF ضریب پیزوالکتریک طولی منفی نشان می‌دهند. با اعمال میدان الکتریکی در جهت عرضی (ضخامت)، هم‌راستا با جهت قطبش، پلیمر در راستای ضخامت منقبض می‌شود و هم‌زمان در جهت محوری منبسط می‌شود. بنابراین، زنجیر در راستای عمود بر محور اصلی فشرده می‌شود و پیکره کشیده می‌شود. از آنجا که لایه پیزوالکتریک محکم به یک زیرلایه آلومینیمی متصل شده است، نیروهای واکنشی از طرف زیرلایه آلومینیمی در سطح مشترک ظاهر می‌شوند که مانع از انبساط نانوالیاف می‌شوند. این محدودیت حرکت به خم شدن رو به پایین سر آزاد محرک منجر می‌شود. با تغییر قطبیت میدان الکتریکی، سر آزاد محرک دچار خمش رو به بالا خواهد شد.

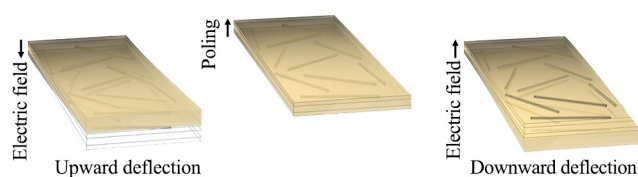
شکل ۶ (b) تغییر شکل سر آزاد محرک را تحت میدان الکتریکی سینوسی $2 \text{ V}/\mu\text{m}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در عکس نمایشگر حین آزمون مشاهده می‌شود، علائم تحریک به‌خوبی با علائم موج سینوسی ورودی مطابقت دارند که نشان‌دهنده کالبره شدن دقیق تجهیزات محرک است. نانوالیاف اتفاقی PVDF حداکثر خمش سر آزاد $6/8 \mu\text{m}$ را نسبت به انرژی الکتریکی ورودی نشان دادند. برای



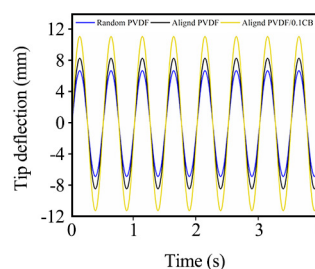
شکل ۵- نتایج آزمون DMTA نانوالیاف PVDF/کلویزیت 30B.

Fig. 5. DMTA results of PVDF/Cloisite 30B nanofibers.

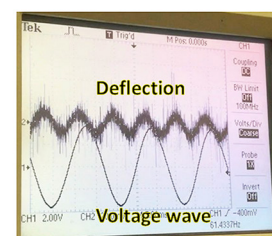
ذخیره نانوالیاف PVDF با آرایش اتفاقی اندازه‌گیری شده است. افزایش مدول ذخیره به مقدار ۸۴٪ در مجاورت نانوذرات کلویزیت 30B نسبت به نانوالیاف خالص آرایش‌یافته PVDF بار دیگر پخش یکنواخت نانوذرات کلویزیت 30B در بستر نانوالیاف و ایجاد برهم‌کنش‌های پلیمر-نانوذره را تأیید می‌کند. همان‌طور که مشاهده شد، نانوالیاف در مجاورت نانوصفحه‌های خاک رس درصد فاز بلوری قطبی β بزرگ‌تری دارند. نتایج اخیر نیز حاکی از این مطلب است که نمونه‌های با فاز قطبی β بزرگ‌تر، از مدول ذخیره بزرگ‌تری برخوردارند [۵۱].



(a)



(b)



شکل ۶- خمیدگی نسبت به میدان الکتریکی ورودی در تیر تک‌لایه PVDF با ضریب پیزوالکتریک محوری منفی: (a) تغییر شکل هنگامی که میدان الکتریکی هم‌راستا با جهت قطبش در PVDF اعمال شد و هنگامی که میدان الکتریکی در خلاف جهت قطبش اعمال شد و (b) خمیدگی محرک‌های پیزوالکتریک تحت میدان الکتریکی سینوسی $2 \text{ V}/\mu\text{m}$. عکسی از نمایشگر که علائم ورودی و خروجی را نشان می‌دهد.

Fig. 6. Tip deflection versus input electric field in a unimorph PVDF beam with a negative axial piezoelectric coefficient: (a) Deformation occurs when an electric field is identical to and also opposite to the polarization direction and (b) tip deflection of the unimorph PVDF actuators under a sinusoidal electric field of $2 \text{ V}/\mu\text{m}$. Photograph of the oscilloscope showing the input and output signals.

نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF، حداکثر خمش سر آزاد به $8/4 \mu\text{m}$ رسید. بهترین عملکرد ($11/2 \mu\text{m}$) به نانوالیاف آرایش‌یافته PVDF/کلویزیت 30B اختصاص یافت. می‌توان مشاهده کرد، خمش سر آزاد محرک‌های لیفی به‌خوبی با روند تغییر کسر فاز β مطابقت دارد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقدار کنترل‌شده از کلویزیت 30B و آرایش‌یافتگی نانوالیاف، عملکرد پیزوالکتریک را $\sim 65\%$ افزایش داد. آرایش ترجیحی زنجیرها و جهت‌گیری دوقطبی‌های پلیمری، همراه با قطبش بین‌سطحی حین الکترورسی، به افزایش محتوای فاز β ، بهبود خواص پیزوالکتریک و ارتقای عملکرد محرک منجر می‌شود [۵۲، ۵۳]. پرکننده‌های قطبی، مانند کلویزیت 30B، اگر بتوانند با زنجیر پلیمری برهم‌کنش‌های مؤثر تشکیل دهند، به ثبات آرایش‌یافتگی و جهت‌گیری ترجیحی نانوالیاف منجر شده و به تقویت فرایند قطبی‌شدن کمک می‌کنند. عملکرد بهبودیافته محرک را می‌توان به برهم‌کنش‌های بین‌سطحی صفحه‌های خاک رس-زنجیر PVDF و تبدیل فاز بلوری غیرقطبی α به بلورهای قطبی β حین فرایند الکترورسی با استفاده از روش

الکترورسی شکافی نسبت داد. محدودیت هندسی حاصل از قطر بسیار کم نانوالیاف تولیدی، آرایش‌یافتگی بیشتری بر بلورهای PVDF تحمیل می‌کند و بخشی از بی‌نظمی زنجیرهای بلند پلیمر را حین آرایش‌یافتگی کاهش می‌دهد [۵۴]. جدول ۱ عملکرد پیزوالکتریک برترین محرک‌های بر پایه الیاف PVDF از نتایج پژوهشی سایر پژوهشگران را با پژوهش پیش‌رو مقایسه می‌کند. در این مقایسه اثر پیکربندی، افزودنی، ابعاد هندسی و مقادیر انرژی الکتریکی ورودی و پاسخ پیزوالکتریک محرک‌ها بررسی شده است. پیکربندی محرک‌های استفاده‌شده در پژوهش اخیر به‌طور کلی تیر تک‌لایه یک‌سرگیردار یا دوسرگیردار هستند. برخلاف تیر یک‌سرگیردار که از سر آزاد خم می‌شوند، تیرهای دوسرگیردار تغییرشکل از مرکز نشان می‌دهند. نسبت به شدت میدان الکتریکی ورودی، محرک‌های ساخته‌شده در این پژوهش از پاسخ بهتر یا رقابتی در شرایط ساخت مشابه برخوردار هستند. فاز فعال الکتریکی منحصربه‌فرد و عملکرد پیزوالکتریک بهبودیافته نانوالیاف ساخته‌شده، قابلیت کاربردهای عملی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- کارایی محرک‌های پیزوالکتریک از الیاف PVDF.

Table 1. The performance of piezoelectric actuators from PVDF fibers.

Structure	Polymer	Additive	Area (cm^2)	Thickness (μm)	Mode	Electric field ($\text{V}/\mu\text{m}$)	Output (μm)
Present study (unimorph cantilever beam)	PVDF nanofibers	Cloisite 30B	6	100	Tip deflection	2	11.2
Unimorph cantilever beam [55]	PVDF nanofibers	MWCNT	6	120	Tip deflection	4	24
Unimorph cantilever beam [56]	PVDF nanofibers	MWCNT	6	120	Tip deflection	4	< 23
Unimorph cantilever beam [57]	Hollow PVDF nanofibers	MWCNT	6	120	Tip deflection	4	17
Unimorph cantilever beam [58]	P(VDF-TrFE-CTFE) film	-	0.4	200	Tip deflection	100	< 16
Double-clamped microfiber [59]	PVDF microfiber	MWCNT	Length: 1 mm Diameter: $10 \mu\text{m}$	-	Central deflection	1.2 – 1.5	16–23
Double-clamped microfiber [25]	PVDF microfiber	-	Length: $500 \mu\text{m}$ Diameter: $2.6 \mu\text{m}$	-	Central deflection	1.2	~ 1.57
Double-clamped microfiber [60]	PVDF microfibers	MWCNT	$10 \times 15 \text{ mm}^2$	200	Central deflection	2	< 1.5
PVDF fibers [61]	PVDF nanofibers	CNT	2	50	Strain	200 V/mm	0.08%

نتیجه‌گیری

آرایش‌یافته منجر شد. این موضوع بهبود کسر بلوری قطبی β را تا ۸۸٪ میسر ساخت. خواص پیزوالکتریک نانوالیاف الکتروریسی در نقش تیر تک‌لایه یک‌سرگردار بررسی شد. مقدار کم و کنترل‌شده از کلویزیت 30B و نیز آرایش‌یافتگی نانوالیاف، عملکرد محرک پیزوالکتریک را ۶۵٪ افزایش داد. در مقایسه با آخرین پژوهش‌های منتشرشده، محرک یک‌سرگردار ساخته‌شده در این پژوهش از نسبت خروجی-ورودی قابل مقایسه یا برتر برخوردار است.

نانوالیاف آرایش‌یافته و یکنواخت PVDF-کلویزیت 30B با فاز بلوری قطبی غالب β و میانگین قطر کمتر از ۱۰۰ nm تهیه شد. تنظیم شرایط الکتروریسی و استفاده از استوانه با قاب سیمی و سرعت چرخش زیاد اولین مرحله القای فاز بلوری قطبی β در نانوالیاف بود. در مرحله بعد، برهم‌کنش‌های نانوذرات-پلیمر به پایداری ساختار تمام ترانس و جلوگیری از آسودگی زنجیرهای پلیمری از حالت

مراجع

- Huang H., Miao Y., and Li Y., Recent Advances of Piezoelectric Materials Used in Sonodynamic Therapy of Tumor, *Coord. Chem. Rev.*, **523**, 216282, 2025.
- Wang X., Stefanello S.T., Shahin V., and Qian Y., From Mechano-electric Conversion to Tissue Regeneration: Translational Progress in Piezoelectric Materials, *Adv. Mater.*, **37**, 2417564, 2025.
- Sharafkhani S. and Kokabi M., Tailoring Favor Crystalline Structure via Electrospun PVDF/BaTiO₃ Nanofibers, *AIP Conf. Proc.*, **1920**, 20001–20005, 2018.
- Safaei M., Sodano H.A., and Anton S.R., A Review of Energy Harvesting Using Piezoelectric Materials: State-of-the-Art a Decade Later (2008–2018), *Smart Mater. Struct.*, **28**, 113001, 2019.
- Sharafkhani S., Highly Aligned Thin PVDF/Cloisite 30B Nanofibers as a Piezoelectric Sensor, *Mater. Res. Bull.*, **180**, 113060–113069, 2024.
- Uchino K., Materials Issues in Design and Performance of Piezoelectric Actuators: An Overview, *Acta Mater.*, **46**, 3745–3753, 1998.
- Jin H., Gao X., Ren K., Liu J., Qiao L., Liu M., Chen W., He Y., Dong S., and Xu Z., Review on Piezoelectric Actuators Based on High-Performance Piezoelectric Materials, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **69**, 3057–3069, 2022.
- Jia Y., Fan Y., Lei L., Gong Y., Yang Z., Dong G., Li Q., Wang W., and Fan H., Ultrahigh Electrobending Deformation in Poled Sodium Bismuth Titanate-Based Piezoelectric Ceramics by Uneven Defect Distribution, *Adv. Funct. Mater.*, **35**, 2421320, 2025.
- Bhandari S., Vajpayee G., da Silva L.L., Hinterstein M., Franchin G., and Colombo P., A Review on Additive Manufacturing of Piezoelectric Ceramics: From Feedstock Development to Properties of Sintered Parts, *Mater. Sci. Eng. R: Rep.*, **162**, 100877, 2025.
- Habib M., Lantgios I., and Hornbostel K., A Review of Ceramic, Polymer and Composite Piezoelectric Materials, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 423002, 2022.
- Hamdi O., Mighri F., and Rodrigue D., Piezoelectric Polymer Films: Synthesis, Applications, and Modeling, *Polym. Nanocompos.-Based Smart Mater.*, **31**, 79-101, 2020.
- Lu L., Ding W., Liu J., and Yang B., Flexible PVDF Based Piezoelectric Nanogenerators, *Nano Energy*, **78**, 105251, 2020.
- Lee Y., Bandari V.K., Paliakkara V.P., Monteiro Augusto S., Ehrler R., Hellwig O., Amann S., Stöwe K., Thalheim R., and Schmidt O.G., Monolithic Integration of Printable PVDF-TrFE Piezoelectric Multifunctional Devices: From Sensing to Actuation, *Adv. Funct. Mater.*, **35**, 2413500, 2025.
- Sharafkhani S. and Kokabi M., Enhanced Sensing Performance of Polyvinylidene Fluoride Nanofibers Containing Preferred Oriented Carbon Nanotubes, *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **5**, 3081–3093, 2022.
- Rajapakse R.M.G., Malalagama T., Bandara Y., and Soon Min H., Electroactive Clay Polymer Nanocomposites for Sustainable Device Applications, *J. Chem. Rev.*, 214-240, 2025.
- Morali A., Mandal A., Skorobogatiy M., and Bodkhe S., Unleashing the Piezoelectric Potential of PVDF: A Study on Phase Transformation from Gamma (γ) to Beta (β) Phase Through Thermal Contact Poling, *RSC Adv.*, **13**, 31234-31242, 2023.
- Mohammadpourfazel S., Arash S., Ansari A., Yang S., Mallick K., and Bagherzadeh R., Future Prospects and Recent Developments of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Piezoelectric Polymer; Fabrication Methods, Structure, and Electro-Mechanical Properties, *RSC Adv.*, **13**, 370-387, 2023.

18. Wu L., Jin Z., Liu Y., Ning H., Liu X., Alamusi and Hu N., Recent Advances in the Preparation of PVDF-Based Piezoelectric Materials, *Nanotechnol. Rev.*, **11**, 1386-1407, 2022.
19. Mangi M.A., Elahi H., Ali A., Jabbar H., Aqeel A.B., Farrukh A., Bibi S., Altabey W.A., Kouritem S.A., and Noori M., Applications of Piezoelectric-Based Sensors, Actuators, and Energy Harvesters, *Sensor. Actuat. Rep.*, **9**, 100302, 2025.
20. Singh H.H., Singh S., and Khare N., Enhanced β -Phase in PVDF Polymer Nanocomposite and Its Application for Nanogenerator, *Polym. Adv. Technol.*, **29**, 143–150, 2018.
21. Cauda V., Stassi S., Bejtka K., and Canavese G., Nanoconfinement: An Effective Way to Enhance PVDF Piezoelectric Properties, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 6430–6437, 2013.
22. Cauda V., Torre B., Falqui A., Canavese G., Stassi S., Bein T., and Pizzi M., Confinement in Oriented Mesopores Induces Piezoelectric Behavior of Polymeric Nanowires, *Chem. Mater.*, **24**, 4215–4221, 2012.
23. Nouri M., Mokhtar J., Salmani L., and Sadeghieh K., Electrospinning of Silk Fibroin/B-Cyclodextrin Nanofibers for Controlled Drug Release, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **29**, 89–100, 2016.
24. Saeed S.M., Zandi M., and Mirzadeh H., Effect of Solution Surface Tension on Morphology of PLGA and Gelatin Electrospun Fibers, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **25**, 3–10, 2012.
25. Pu J., Yan X., Jiang Y., Chang C., and Lin L., Piezoelectric Actuation of Direct-Write Electrospun Fibers, *Sensor. Actuat. A: Phys.*, **164**, 131–136, 2010.
26. D'Annibale R., Zucchelli A., and Carloni R., The Effect of Morphology on Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorotrifluoroethylene)-Based Soft Actuators: Films and Electrospun Aligned Nanofiber Mats, *Sensor. Actuat. A: Phys.*, **333**, 113255, 2022.
27. Zhang Q., Li J., Li G., Du J., Xie C., Li H., Jin Y., and He Y., Hierarchically Structured Hollow PVDF Nanofibers for Flexible Piezoelectric Sensor, *Chem. Eng. J.*, **498**, 155661, 2024.
28. Yin J.-Y., Boaretti C., Lorenzetti A., Martucci A., Roso M., and Modesti M., Effects of Solvent and Electrospinning Parameters on the Morphology and Piezoelectric Properties of PVDF Nanofibrous Membrane, *Nanomaterials*, **12**, 962, 2022.
29. Liu X., Xu S., Kuang X., Tan D., and Wang X., Nanoscale Investigations on β -Phase Orientation, Piezoelectric Response, and Polarization Direction of Electrospun PVDF Nanofibers, *RSC Adv.*, **6**, 109061–109066, 2016.
30. Chang C., Tran V.H., Wang J., Fuh Y.-K., and Lin L., Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency, *Nano Lett.*, **10**, 726–731, 2010.
31. Mahboubizadeh S., Dilamani S.T., and Baghshahi S., Piezoelectricity Performance and β -Phase Analysis of PVDF Composite Fibers with BaTiO₃ and PZT Reinforcement, *Heliyon*, **10**, 2024.
32. Ribeiro C., Sencadas V., Ribelles J.L.G., and Lanceros-Méndez S., Influence of Processing Conditions on Polymorphism and Nanofiber Morphology of Electroactive Poly(vinylidene fluoride) Electrospun Membranes, *Soft Mater.*, **8**, 274–287, 2010.
33. Singh R.K., Lye S.W., and Miao J., Holistic Investigation of the Electrospinning Parameters for High Percentage of β -Phase in PVDF Nanofibers, *Polymer*, **214**, 123366, 2021.
34. Carpi F. and Smela E., *Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators*, Wiley, 2009.
35. Ketpang K. and Park J.S., Electrospinning PVDF/PPy/MWCNTs Conducting Composites, *Synth. Met.*, **160**, 1603-1608, 2010.
36. Amith V., Sridhar R., Gangadhar A., and Vishnumurthy K.A., Design and Synthesis of PVDF-Cloisite-30B Nanocomposite Fibers for Energy Harvesting Applications, *Surf. Interfaces*, **22**, 100869, 2021.
37. Tiwari S., Gaur A., Kumar C., and Maiti P., Enhanced Piezoelectric Response in Nanoclay Induced Electrospun PVDF Nanofibers for Energy Harvesting, *Energy*, **171**, 485–492, 2019.
38. Yu L. and Cebe P., Crystal Polymorphism in Electrospun Composite Nanofibers of Poly(vinylidene fluoride) with Nanoclay, *Polymer*, **50**, 2133–2141, 2009.
39. Liu Y.-L., Li Y., Xu J.-T., and Fan Z.-Q., Cooperative Effect of Electrospinning and Nanoclay on Formation of Polar Crystalline Phases in Poly(vinylidene fluoride), *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2**, 1759–1768, 2010.
40. Xin Y., Qi X., Tian H., Guo C., Li X., Lin J., and Wang C., Full-Fiber Piezoelectric Sensor by Straight PVDF/Nanoclay Nanofibers, *Mater. Lett.*, **164**, 136–139, 2016.
41. Prince J.A., Singh G., Rana D., Matsuura T., Anbharasi V., and Shanmugasundaram T.S., Preparation and Characterization of Highly Hydrophobic Poly(vinylidene fluoride)-Clay Nanocomposite Nanofiber Membranes (PVDF-Clay NNMs) for Desalination Using Direct Contact Membrane Distillation, *J. Member. Sci.*, **397**, 80–86, 2012.
42. Gontarek-Castro E., Castro-Muñoz R., and Lieder M., New Insights of Nanomaterials Usage toward Superhydrophobic Membranes for Water Desalination via Membrane Distillation:

- A Review, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **52**, 2104–2149, 2022.
43. Atıcı B., Ünlü C.H., and Yanilmaz M., A Review on Centrifugally Spun Fibers and Their Applications, *Polym. Rev.*, **62**, 1–64, 2022.
 44. Kumarage S., Munaweera I., and Kottegoda N., A Comprehensive Review on Electrospun Nanohybrid Membranes for Wastewater Treatment, *Beilstein J. Nanotechnol.*, **13**, 137–159, 2022.
 45. Yoon K. and Kellarakis A., Nanoclay-Directed Structure and Morphology in PVDF Electrospun Membranes, *J. Nanomater.*, **2014**, 367671, 2014.
 46. Theng B.K.G., Clay-Polymer Interactions: Summary and Perspectives, *Clays Clay Miner.*, **30**, 1–10, 1982.
 47. Arinstein A., Burman M., Gendelman O., and Zussman E., Effect of Supramolecular Structure on Polymer Nanofibre Elasticity, *Nat. Nanotechnol.*, **2**, 59–62, 2007.
 48. Chauhan D., Singh A.K., Tyagi S., Anand P.I., Ramakrishna S., and Srivastava M.K., Engineering of Electrospun Lead-Free PVDF/Carbon Nanofiber-ZnO Nanocomposites for Enhanced Piezoelectric Energy Harvesting and Wearable Sensing Applications, *Compos. Part B: Eng.*, **309**, 113039, 2026.
 49. Sharafkhani S. and Kokabi M., Modeling the Dielectric Behavior of Polymer Nanocomposites Considering Interphase Properties and Nanoparticle Geometry, *Polym. Bull.*, **11**, 04362–04374, 2022.
 50. Kim H.H., Kim M.J., Ryu S.J., Ki C.S., and Park Y.H., Effect of Fiber Diameter on Surface Morphology, Mechanical Property, and Cell Behavior of Electrospun Poly(ϵ -caprolactone), *Mat. Fibers Polym.*, **17**, 1033–1042, 2016.
 51. Nakamura K., Nagai M., Kanamoto T., Takahashi Y., and Furukawa T., Development of Oriented Structure and Properties on Drawing of Poly(vinylidene fluoride) by Solid-State Co-extrusion, *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, **39**, 1371–1380, 2001.
 52. Zhang H., Ji X., Wang Z., Tang S., Wang Z., and Zhu W., Advances in Intelligent Polyvinylidene Fluoride-Based Piezoelectric Composites for Self-Powered Wearable Electronics, *Small*, **22**, e09387, 2026.
 53. Li T., Chen Y.H., Boey F.Y.C., and Ma J., Domain Reorientation of Piezoelectric Bending Actuators, *Sensor. Actuat. A: Phys.*, **134**, 544–554, 2007.
 54. Zhao T., Li Y., and Zhang Z., Recent Advances in β -Phase Engineering of PVDF-Based Piezoelectric Composites for Enhanced Piezoelectricity and Wearable Applications, *Chem. Commun.*, **62**, 3406–4320, 2026.
 55. Sharafkhani S. and Kokabi M., High Performance Flexible Actuator: PVDF Nanofibers Incorporated with Axially Aligned Carbon Nanotubes, *Compos. Part B: Eng.*, **222**, 109060–109068, 2021.
 56. Sharafkhani S. and Kokabi M., Coaxially Oriented PVDF/MWCNT Nanofibers as a High-Performance Piezoelectric Actuator, *Polym. Compos.*, **44**, 8780–8791, 2023.
 57. Sharafkhani S. and Kokabi M., Ultrathin-Shell PVDF/CNT Nanocomposite Aligned Hollow Fibers as a Sensor/Actuator Single Element, *Compos. Sci. Technol.*, **200**, 108425, 2020.
 58. Lheritier P., Noel S., Vaxelaire N., Domingues Dos Santos F., and Defay E., Actuation Efficiency of Polyvinylidene Fluoride-Based Co- and Ter-Polymers, *Polymer*, **156**, 270–275, 2018.
 59. Liu Z.H., Pan C.T., Lin L.W., and Lai H.W., Piezoelectric Properties of PVDF/MWCNT Nanofiber Using Near-Field Electrospinning, *Sensor. Actuat. A: Phys.*, **193**, 13–24, 2013.
 60. Ahn Y., Lim J.Y., Hong S.M., Lee J., Ha J., Choi H.J., and Seo Y., Enhanced Piezoelectric Properties of Electrospun Poly(vinylidene fluoride)/Multiwalled Carbon Nanotube Composites due to High β -Phase Formation in Poly(vinylidene fluoride), *J. Phys. Chem. C*, **117**, 11791–11799, 2013.
 61. Park J.-M., Gu G.-Y., Wang Z.-J., Kwon D.-J., Shin P.S., Choi J.Y., and DeVries K.L., Mechanical and Electrical Properties of Electrospun CNT/PVDF Nanofiber for Micro-Actuator Applications, *Adv. Compos. Mater.*, **25**, 305–316, 2016.