

Investigation of the Possibility of Generating Electric Current from PVDF/PU Polymer Alloy Layer under Cyclic Tensile Loading

Behrang Adeli, Ali Akbar Gharehaghaji*, and Ali Asghar Asgharian Jeddi

Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Postal Code 1591634311, Tehran, Iran

Received: 9 January 2022, Accepted: 28 January 2022

Abstract

Polyvinylidene fluoride (PVDF) as a piezoelectric material, is widely used due to its desirable mechanical properties. The combination of PVDF with polyurethane (PU) creates a polymer alloy with high elastic properties that allows the tensile force to be applied to the polymer alloy and its reversibility after force removal. This study aimed to generate the electric current from PVDF/PU polymer alloy without direct pressure or impact, with the new method under cyclic tensile loading. The results showed that the polymer alloy layer, under cyclic tensile loading, generates an electric current and the electric voltage between 3 mV to 8 mV. The applied tensile force created a compressive force on the body of the layer. PVDF created an electric current due to this compressive force. The fibers were aligned in the polymer layers to improve energy harvesting. The electric current from the layers was measured and compared before and after the fiber alignment. Fiber alignment was performed by increasing the rotation speed of the collecting drum. The results showed that increasing the speed of the collecting roller by 10 times, lead to an increase in the electric current generation by 27%.

Keywords: piezoelectric property, electrospinning, PVDF/PU elastic polymer alloy, energy harvesting, tensile cyclic loading

(* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: aghaji@aut.ac.ir

بررسی امکان تولید جریان الکتریکی از لایه آلیاژ پلیمری PVDF-PU تحت بارهای کششی چرخه‌ای

بهرنگ عادل، علی‌اکبر قره آقاجی*، علی‌اصغر اصغریان جدی
تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، کد پستی ۱۵۹۱۶۳۴۳۱۱

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۸

چکیده

این مطالعه نشان می‌دهد، جریان الکتریکی تولیدی از نانوالیاف هم‌راستا تحت نیروی کششی چرخه‌ای ۲۷٪ نسبت به نمونه اولیه افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: خاصیت پیزوالکتریک، الکترورسی، آلیاژ پلیمری کشسان PVDF-PU، تولید جریان الکتریکی، بارهای کششی چرخه‌ای

۱ مقدمه

در اطراف ما منابع انرژی کوچک، اما دسترس‌پذیر فراوانی وجود دارند که مجموع آن‌ها می‌تواند درخور توجه باشد. برداشت انرژی از این منابع، از راه‌حل‌های مفید برای حل بحران انرژی است. مواد پیزوالکتریک، یکی از مهم‌ترین مواد استفاده‌شده در برداشت انرژی هستند که مطالعات زیادی در زمینه‌های مرتبط با آن‌ها انجام شده است [۱،۲]. نانومولدهای (nanogenerators) پیزوالکتریک می‌توانند از طریق برداشت انرژی مکانیکی موجود در محیط اطراف، انرژی مورد نیاز دستگاه‌های الکتریکی را تولید کنند [۳،۴]. مواد پیزوالکتریک، موادی هستند که می‌توانند تنش فشاری یا ضربه‌ای واردشده به سطح آن‌ها را به انرژی الکتریکی تبدیل

پلی‌وینیلیدن فلوروئید (PVDF) به‌عنوان ماده پیزوالکتریک، به‌دلیل خواص مکانیکی مطلوبی مانند انعطاف‌پذیری زیاد، وزن کم و پایداری در میدان الکتریکی، کاربردهای بسیاری دارد. ترکیب PVDF با پلی‌یورتان گرمانرم (TPU)، نوعی آلیاژ پلیمری با خواص کشسانی زیاد ایجاد می‌کند که امکان اعمال نیروی کششی به آلیاژ پلیمری و برگشت‌پذیری آن را پس از حذف نیرو، میسر می‌سازد. هدف این مطالعه، تولید جریان الکتریکی از آلیاژ پلیمری PVDF/PU با روشی نوین از یک پیزوالکتریک، بدون اعمال فشار مستقیم یا ضربه و فقط با اعمال نیروی کششی چرخه‌ای است. نتایج نشان داد، آلیاژ پلیمری می‌تواند تحت نیروی کششی چرخه‌ای، ایجاد جریان الکتریکی و ولتاژ ۳ mV تا ۸ mV کند. PVDF موجود در آلیاژ پلیمری، تحت تأثیر نیروی فشاری ناشی از کشش، جریان الکتریکی تولید می‌کند. نیروی کششی اعمال‌شده با تغییر ابعاد لایه، سبب ایجاد نیروی فشاری بر بدنه لایه شده و در اثر این نیروی فشاری، رفتار پیزوالکتریک آلیاژ پلیمری نمایان می‌شود. برای بهبود تولید جریان الکتریکی، نانوالیاف لایه‌های پلیمری هم‌راستا شدند. جریان الکتریکی حاصل از لایه‌ها، پیش و پس از هم‌راستاسازی اندازه‌گیری و مقایسه شد. با ۱۰ برابر شدن سرعت برداشت، نانوالیاف آلیاژ پلیمری هم‌راستا شدند. نتایج

TPU در بسیاری از زمینه‌های تخصصی به‌کار گرفته می‌شوند که در آن‌ها کارایی مکانیکی و شیمیایی لازم است. از جمله خواص TPU، استحکام مکانیکی زیاد، مقاومت در برابر سایش و پارگی و کشش در دمای کم است [۱۸، ۱۹]. با افزودن TPU به PVDF، خواص مکانیکی PVDF بهبود یافته و خاصیت کشسانی آمیخته افزایش می‌یابد [۲۰]. در لایه‌های حاصل از آمیخته PVDF/TPU، افزون بر افزایش نفوذپذیری PVDF نسبت به آب، پراکندگی اندازه حفره‌ها نیز بهبود می‌یابد و یکنواخت‌تر می‌شود. افزون بر این، خواص مکانیکی لایه بهبود می‌یابد و خاصیت کشسانی لایه نیز افزایش می‌یابد [۱۸].

اگرچه در مطالعات متعدد، فرایند الکترورسی TPU و PVDF به‌طور مجزا بررسی شده‌اند، اما مطالعات محدودی درباره نانوالیاف آلیاژی PVDF/TPU وجود دارد. تولید آلیاژ پلیمری با کمک الکترورسی باعث می‌شود تا خواص پیزوالکتریک PVDF بیشتر افزایش یابد. زیرا، کشش مکانیکی ایجاد شده در فرایند تولید و قطبش در میدان الکتریکی، فاز β را در لیاف ساخته شده افزایش می‌دهد. در نتیجه، فیلم‌های PVDF حاصل، خواص پیزوالکتریک بیشتری را نسبت به سایر مواد پیزوالکتریک پلیمری سنتزی نشان می‌دهند [۲۱]. افزون بر این، ساختار بسیار انعطاف‌پذیر PVDF، باعث کاربردی شدن آن در دستگاه‌های پیزوالکتریک در وسایل الکترونیکی پوشیدنی و مهندسی بافت شده است. همچنین، برای انعطاف‌پذیری بیشتر می‌توان از لیاف PVDF/PU برای الکترورسی نانوالیاف استفاده کرد [۲۱]. در مطالعات گذشته برداشت انرژی از پیزوالکتریک PVDF، با توجه به خاصیت ذاتی مواد پیزوالکتریک، در اثر اعمال نیروی فشاری یا نیروی ضربه‌ای به سطح مواد بوده است. از این‌رو، در کار حاضر سعی شده است تا پس از تهیه نانوالیاف PVDF/PU در شرایط بهینه به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین [۲۱]، این بار با استفاده از روش الکترورسی میدان دور، بازده پیزوالکتریک و امکان تولید جریان الکتریکی تحت تأثیر نیروی کششی بررسی شود. نیروی کششی چرخه‌ای در جهت طولی نمونه اعمال شده که تأثیر آن به‌طور غیرمستقیم، ایجاد فشار بر لایه پلیمری است.

۲ تجزیه

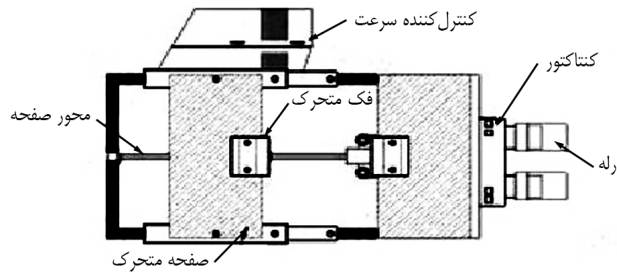
۲-۱ مواد و تجهیزات

مواد و تجهیزات استفاده شده در این پژوهش شامل پلی‌وینیلیدن

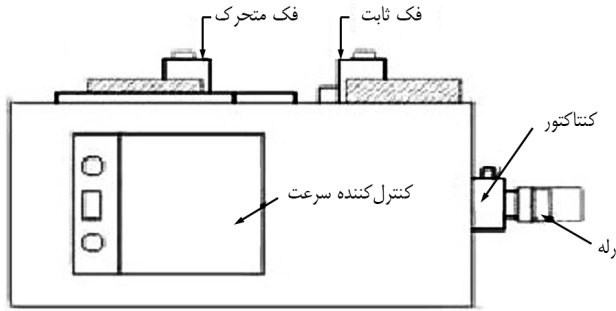
کند [۵]. در مواد پیزوالکتریک، با اعمال نیروی مکانیکی، بارهای الکتریکی سطحی ایجاد می‌شوند. این بارهای سطحی، اختلاف ولتاژی تولید می‌کنند که در مدارهای باز به‌راحتی قابل اندازه‌گیری است و پس از برداشت می‌تواند در خازن‌ها ذخیره شود [۳، ۶]. از جمله مواد پیزوالکتریک، پلی‌وینیلیدن فلئوراید (PVDF) است. PVDF، پلیمری نیمه‌بلوری بوده که به‌دلیل خواص الکتریکی منحصر به فرد آن، مانند خواص فرو، پیرو و پیزوالکتریک و همچنین خواص مکانیکی از قبیل انعطاف‌پذیری، وزن کم و پایداری طولانی مدت در میدان‌های الکتریکی قوی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷، ۸]. در میان ۵ شکل بلوری PVDF، فازهای α و β متداول‌ترین آن‌ها هستند. فاز α ناقطبی و پایدارترین شکل PVDF است. در فاز β ، گشتاورهای دوقطبی در یک جهت قرار گرفته‌اند و این فاز مسئول خواص پیزوالکتریک PVDF است [۹، ۱۰]. برای دستیابی به خواص پیزوالکتریک مدنظر در PVDF، باید فاز β تشکیل شود [۱۱، ۱۲]. بدین منظور، باید کشش مکانیکی همراه با قطبش الکتریکی اعمال شود [۱۱، ۱۲]. هنگام الکترورسی پلیمر، زنجیرهای پلیمری خارج شده از افشانک، در اثر کشش مکانیکی از حالت بی‌شکل به حالت بلور نزدیک می‌شوند. در این حالت، گشتاورهای قطبی در یک سو مرتب شده و بدین ترتیب فاز β القا می‌شود [۱۰، ۱۳].

ورقه‌های نانوالیاف الکترورسی شده دارای جهت‌گیری تصادفی، می‌توانند بدون نیاز به یک مرحله اضافی قطبش، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. با وجود این، این قبیل نانوالیاف PVDF بازده پیزوالکتریک کمی دارند و مطالعات زیادی درباره بهبود عملکرد این نانوالیاف انجام شده است [۱۲، ۱۴]. مطالعات متعدد نشان داده‌اند، در شرایط فشاری مختلف مانند فشار عمودی یا خمش، با افزایش درجه هم‌ترازی و یکنواختی نانوالیاف، بازده پیزوالکتریک افزایش می‌یابد [۱۵، ۱۶]. از روش‌های تولید نانوالیاف هم‌راستا، استفاده از الکترورسی میدان نزدیک (NFES) است. دوقطبی‌های تولید شده همچنین، در راستای محور نانوالیاف قرار می‌گیرند. همچنین، به‌دلیل کمی چگالی حجمی نانوالیاف تراشده، برای افزایش بازده پیزوالکتریک از الکترودهای شانه‌ای (interdigital electrodes) استفاده می‌شود. در نتیجه، برای دستیابی به قطبش پیزوالکتریک در راستای دوقطبی‌های متناوب به فرایند قطبش مجدد نیاز است. الکترورسی میدان دور با استفاده از استوانه چرخان به‌عنوان جمع‌کننده، روش جایگزینی برای ساخت نانوالیاف تراشده است [۱۷].

پلی‌یورتان گرمانرم (TPU)، از پرکاربردترین گرمانرم‌های مهندسی بوده که دارای خواص کشسانی است. گروه‌های الاستومر



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمای: (الف) جانبی و (ب) بالایی دستگاه اعمال نیروی کششی چرخه‌ای.

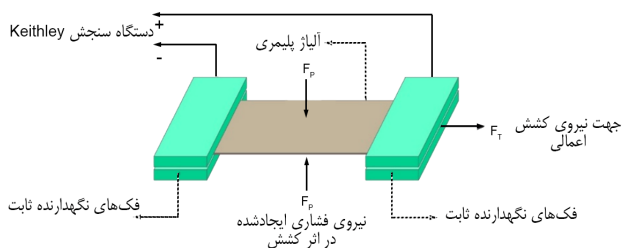
محدوده اعمال سرعت دستگاه از ۵ cycle/min تا ۴۵ cycle/min بوده و محدوده ازدیاد طول دستگاه از ۱۰٪ تا ۲۰۰٪ اندازه اولیه نمونه است.

۲-۵ بررسی تغییرات مکانیکی و تعادل نیروهای ایجادشده در

آلیاژ

آلیاژ پلیمری تولیدشده، پس از اعمال نیروی کششی به‌وسیله دستگاه تا ۱۲۰٪ اندازه اولیه، در اثر خاصیت کشسانی PU کشیده می‌شود. این عدد از مطالعات گذشته [۲۱]، انتخاب و برای اعمال میزان دامنه کشش اعمالی در دستگاه، تنظیم شد. تصویر نمای تأثیر نیروهای کششی بر لایه تحت کشش، در شکل ۲ مشخص شده است.

در اثر اعمال نیروی کششی FT به دو طرف لایه آلیاژ پلیمری، طول لایه افزایش می‌یابد. این موضوع سبب می‌شود، عرض لایه کم



شکل ۲- نمای اعمال کشش به‌وسیله دستگاه روی نمونه.

فلوئورید (Kynarfi, King of Prussia, PA, USA)، پلی‌یورتان گرمانرم (BASF Co., Ltd., Berlin, Germany) با وزن مولکولی $107020 \text{ g.mol}^{-1}$ ، دی‌متیل فراماید (DMF) ۹۸٪ (Sigma Aldrich, Taufkirchen, Germany)، تتراهیدروفوران (THF) (Merck, Germany)، دستگاه الکترورسی آزمایشگاهی (Fnm Co., Iran)، دستگاه ساخته‌شده برای اعمال نیروی کششی چرخه‌ای، میکروسکوپ الکترونی پوششی (SEM)، طیف‌سنج زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR) و دستگاه اندازه‌گیری مقاومت، جریان و ولتاژسنج Keitely هستند.

۲-۲ تهیه محلول و الکترورسی نانوالیاف

برای تهیه نانوالیاف PVDF/PU با نسبت ۸۰:۲۰، از حلال DMF و THF با نسبت ۵۰:۵۰ استفاده و دمای انحلال در حدود 60°C انتخاب شد. انحلال به‌وسیله گرم‌کن همزن‌دار به‌مدت ۷ h انجام شد تا محلول کاملاً یکنواختی به‌دست آید. گستره پارامترهای الکترورسی طوری انتخاب شد که غلظت محلول ۱۴٪ w/v پلیمر به محلول، ولتاژ دستگاه ۱۸ kv، فاصله سوزن تا صفحه جمع‌کننده آلومینیمی ۲۴ cm، دما 25°C ، سرعت تزریق ۲/۵ mm/h، سرنگ ۵ mm و قطر سوزن گیج ۱۸ (قطر داخلی ۰/۸۴ mm) باشند. گستره‌های مقادیر یادشده با استفاده از مطالعات مقدماتی و پیشین انتخاب شدند [۲۱].

۲-۳ شکل‌شناسی

شکل‌شناسی نانوالیاف PVDF/PU با استفاده از میکروسکوپ الکترونی پوششی انجام شد. برای پردازش تصاویر از نرم‌افزار Digimizer استفاده شد. بررسی فازهای بلوری نانوالیاف با استفاده از پراش پرتو ایکس انجام شد. وجود فاز β در نانوالیاف PVDF/PU با استفاده از دستگاه FTIR بررسی شد.

۲-۴ ساخت دستگاه بارگذاری کششی چرخه‌ای

با توجه به اینکه برای ایجاد جریان الکتریکی از پیژوالکتریک‌ها همواره از فشار یا ضربه استفاده می‌شود، در این پژوهش، برای ایجاد کشش در لایه‌های پلیمری PVDF/PU و جریان الکتریکی به‌وسیله نیروی کششی، دستگاهی برای بارگذاری کششی چرخه‌ای ساخته شد. اجزای دستگاه را فک‌های گیرنده نمونه از جنس نقره با رسانندگی زیاد، موتور الکتریکی، حسگرهای تنظیم اندازه کشش و همچنین تنظیم‌کننده دور موتور برای تنظیم سرعت بارگذاری تشکیل می‌دهند. شکل ۱، نمای دستگاه ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

این افزایش سرعت در دو مرحله انجام گرفت. در ابتدا، سرعت برداشت برای تولید آلیاژ پلیمری، ۲۰۰۰ rpm و سپس ۳۰۰۰ rpm تنظیم شد. این مسئله به هم‌راستایی نانوالیاف آلیاژ پلیمری منجر و تصاویر SEM از آن‌ها تهیه شد. سپس، لایه آلیاژ پلیمری در دستگاه اعمال نیروی کششی چرخه‌ای قرار گرفت و خروجی‌های دستگاه به ورودی دستگاه سنجش جریان الکتریکی Keitely متصل شد. در این مطالعه، بخش‌های 590 Quasistatic C-V Mete و Programable Voltage Source 230 Keitely به کار گرفته شدند. همچنین، از نسخه ۲۰۱۵ نمایشگر ICS برای این دستگاه استفاده شد. نیروی کششی چرخه‌ای در دو سرعت ۱۲ cycle/min و ۲۰ cycle/min روی نمونه‌ها اعمال شد.

۳ نتایج و بحث

نوآوری این مطالعه، تولید جریان الکتریکی از لایه الکترورسی شده آلیاژ پلیمری PVDF/PU تحت نیروی کشش چرخه‌ای است. تولید جریان الکتریکی همواره در اثر فشار یا ضربه مستقیم به ماده پیزوالکتریک است. در این روش با اعمال نیروی کششی، جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. بدین منظور، ابتدا خاصیت کشسانی در آلیاژ پلیمری به کمک افزودن PU به وجود آمد تا اعمال کشش زیاد و برگشت‌پذیری آن در لایه امکان‌پذیر شود. سپس، فشار ناشی از کشش به وجود آمده در سطح لایه، PVDF تحریک شده و جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. در ادامه، هم‌راستاسازی نانوالیاف موجود در آلیاژ پلیمری برای بهبود عملکرد پیزوالکتریک و افزایش تولید جریان از لایه بررسی شد.

۳-۱ بررسی طیف FTIR

با استفاده از طیف‌سنجی FTIR، فازهای تشکیل‌شده در آلیاژ پلیمری نهایی PVDF/PU و همچنین وجود دو پلیمر اثرگذاری در ساختار آلیاژ نهایی بررسی شدند. شکل ۳، طیف FTIR نانوالیاف الکترورسی شده PVDF/PU را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیک‌های شاخص PU یعنی پیک‌های مربوط به پیوندهای کششی NH و C=O، به ترتیب در ۲۹۵۰ و 1727 cm^{-1} ظاهر شدند. انتظار می‌رفت تا پیک‌های شاخص PVDF، یعنی پیوندهای ارتعاشی CH_2 ، پیوندهای کششی C-C مربوط به فاز β و پیوندهای مربوط به فاز بی‌شکل به ترتیب در 1399 ، 1073 و 878 cm^{-1} ظاهر شوند. اما، برهم‌کنش میان گروه

شده و با تغییر ابعاد دو نیروی فشاری FP به سطح لایه وارد شوند. این فشار باعث می‌شود تا PVDF موجود در لایه آلیاژ پلیمری، تحت فشار ناشی از کشش قرار گیرد و جریان الکتریکی تولید کند.

۲-۶ بررسی رسانندگی الکتریکی آلیاژ پلیمری

برای بررسی رسانندگی الکتریکی آلیاژ پلیمری، ابتدا تغییرات مقاومت الکتریکی آن تحت کشش ایجادشده، مطالعه شد. بدین ترتیب که در یک جریان ثابت ورودی به وسیله دستگاه Keitely، ولتاژهای متغیر به نمونه القا شد. نمودار مقاومت الکتریکی آلیاژ در ابتدا در حالت ثابت و بدون کشش رسم شد. سپس، با تغییر ولتاژ از ۲۰ V ولت به ۰ V و دوباره از ۰ V تا ۲۰ V به وسیله خروجی دستگاه، این مقاومت در حالت کشیده‌شده ثبت شد.

۲-۷ بررسی جریان الکتریکی تولیدشده از آلیاژ پلیمری

نمونه‌های تولیدشده آلیاژهای پلیمری به ترتیب شماره‌گذاری شدند و در چند تکرار در دستگاه کشش قرار گرفتند. خروجی نمونه‌ها از دستگاه کشش، به وسیله گیرنده‌های دستگاه Keitely ثبت و نمودار آن‌ها ترسیم شد. برای بررسی تولید جریان الکتریکی، در هر ۵ s یک کشش چرخه‌ای به نمونه اعمال و خروجی آن ثبت شد. در زمان شروع نیروی کششی، هیچ جریانی از طرف دستگاه و به صورت اولیه در آلیاژ وجود نداشت و با اعمال نیروی کششی چرخه‌ای، صرفاً خروجی جریان الکتریکی از دستگاه ثبت شد.

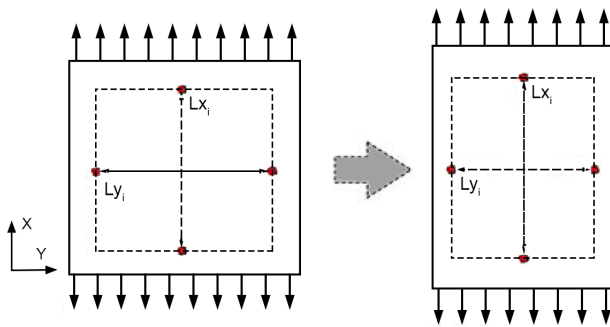
۲-۸ بررسی ولتاژ تولیدشده از آلیاژ پلیمری

در این مرحله، نمونه‌ها تحت نیروی کششی چرخه‌ای قرار گرفتند و میزان تغییرات ولتاژ دریافت‌شده از نمونه به وسیله دستگاه Keitely ثبت شد. سپس نمودار تغییرات آن تحت تنش کششی، نمایش داده شد. در ابتدا ولتاژ ثابت ۱ mV در زمان صفر و حالت عادی به نمونه اعمال شد. سپس، تحت تغییرات شرایط نمونه، در اثر اعمال تنش کششی و بازگشت نمونه از تنش به حالت اولیه، تغییرات ولتاژ ایجادشده ثبت و نمایش داده شد.

۲-۹ تهیه نانوالیاف هم‌راستا و بررسی اثر آن بر میزان تولید

جریان الکتریکی

به منظور بررسی اثر هم‌راستایی نانوالیاف در لایه آلیاژ پلیمری بر افزایش تولید جریان الکتریکی از لایه در اثر نیروی کششی چرخه‌ای، در حین فرایند الکترورسی، سرعت استوانه جمع‌کننده افزایش یافت. سرعت برداشت اولیه استوانه ۲۰۰ rpm بود که



شکل ۵- تغییر طول (Lx) و تغییر عرض (Ly) نمونه تحت اعمال نیروی کششی.

نمی‌شود، بلکه نیاز به تغییر در جهت فشار دارد. در تحلیل نیروهای اعمال شده در اثر بارگذاری کششی و ایجاد تنش کششی در نمونه، به‌طور نمایی، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، طول اولیه نمونه افزایش و در مقابل عرض آن کاهش یافته است. با دقت در تغییر میزان طول نمونه (Lx) پیش از کشش (Lx_i) و پس از آن (Lx_f) و همچنین به‌طور متقابل، در عرض نمونه (Ly) پیش از کشش (Ly_i) و پس از آن (Ly_f)، می‌توان نسبت بواسون آلیاژ پلیمری را با معادله (۱) به‌دست آورد:

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{(Ly_f - Ly_i)/Ly_i}{(Lx_f - Lx_i)/Lx_i} \quad (1)$$

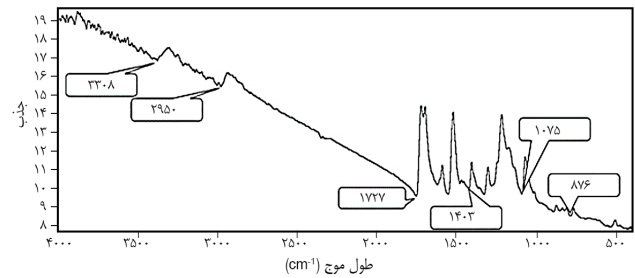
با توجه به اندازه‌گیری‌های ابعادی نمونه مشخص شد که:

$$\begin{aligned} Lx_i &< Lx_f \\ Ly_i &> Ly_f \end{aligned} \quad (2)$$

با اعمال معادله (۲) در معادله (۱) می‌توان نتیجه گرفت، حاصل کسر معادله (۱)، منفی است. در نتیجه با مثبت بودن ضریب بواسون، تنش فشاری بر سطح لایه ایجاد می‌شود. فشار ایجاد شده سبب تراکم ضخامت لایه شده و در نتیجه خاصیت پیزوالکتریک PVDF، تحت فشار حاصل از کشش، جریان الکتریکی ایجاد می‌کند. ازدیاد طول اعمال شده به لایه در اثر کشش به میزان ۱۲۰٪ طول نمونه اولیه بود. قابلیت اعمال این میزان افزایش طول و مقاومت لایه در برابر پارگی، با کمک خاصیت کشسانی پلیمر PU موجود در آلیاژ پلیمری حاصل شد.

۴-۳ بررسی رسانندگی الکتریکی

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، گستره مقاومت الکتریکی آلیاژ پلیمری از ۰ Ω تا حدود ۲/۷ × ۱۰^۹ Ω است. هنگامی که نمونه



شکل ۳- طیف FTIR نانوالیاف PVDF/PU.

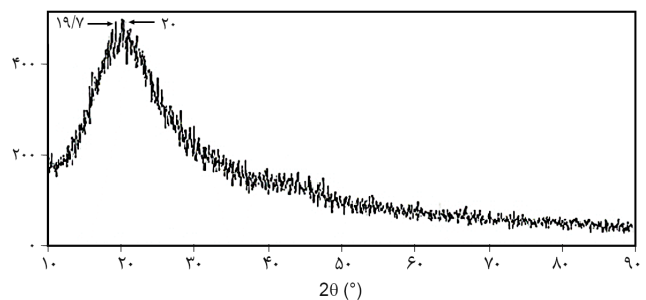
الکترون‌کننده C-F موجود در ساختار PVDF و گروه NH موجود در ساختار PU سبب جابه‌جایی کوچکی در محل پیک‌های جذبی شده و محل پیک‌ها به ترتیب به ۱۴۰۳، ۱۰۷۵ و ۸۷۶ cm⁻¹ تغییر کرده است. این پیک‌ها، مشخصه PVDF/PU در نمونه هستند.

۲-۳ نتایج طیف‌سنجی XRD

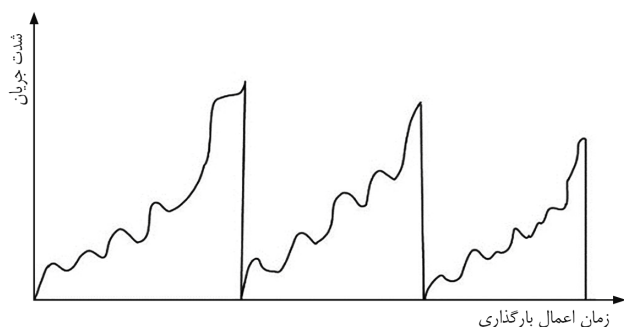
شکل ۴، طیف‌های XRD مربوط به آلیاژ PVDF/PU و پلیمرهای PVDF و PU را نشان می‌دهد. با بررسی طیف XRD مربوط به آلیاژ PVDF/PU می‌توان مشاهده کرد، دو پیک اصلی مربوط به آن، یعنی ۲۰ و ۱۹/۷°، به ترتیب مربوط به PVDF و PU هستند. با استفاده از الگوی پراش پرتو X، وجود قطعه‌های وینیلیدن فلئوراید و تشکیل فاز β در PVDF تأیید شد.

۳-۳ بررسی تغییرات مکانیکی و تعادل نیروهای ایجاد شده

کشش ایجاد شده در آلیاژ پلیمری باعث موازی‌سازی و هم‌جهتی زنجیرهای مولکولی موجود در آلیاژ پلیمری می‌شود. از طرفی این کشش، موجب افزایش در جهت طول و کاهش در جهت عرض در لایه تحت بارگذاری می‌شود. این موازی‌سازی به نوبه خود باعث کاهش مقاومت الکتریکی آلیاژ می‌شود و به بهبود انتقال جریان الکتریکی کمک می‌کند. جریان الکتریکی باید در اثر نیروی فشاری وارد شده به پلیمر پیزوالکتریک موجود در آلیاژ، ایجاد شود. زیرا کشش به تنهایی، باعث ایجاد جریان الکتریکی در مواد پیزوالکتریک



شکل ۴- طیف XRD نانوالیاف PVDF/PU.

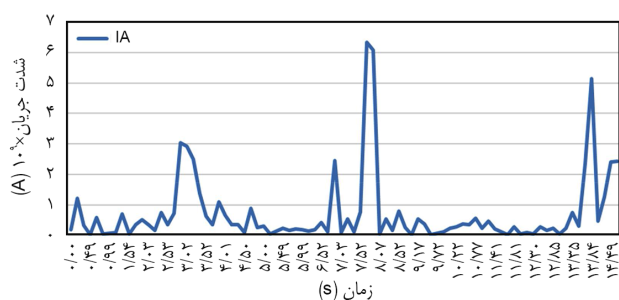


شکل ۷- نمایی از ایجاد جریان در اثر نیروی کشش چرخه‌ای.

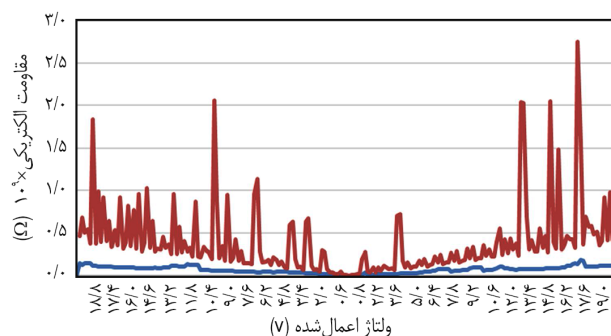
سطح لایه آلیاژ، باعث متراکم شدن لایه و تحت فشار گرفتن پلیمر پیزوالکتریک موجود در آلیاژ می‌شود. بنابراین، فشار ایجاد شده سبب شروع تولید جریان الکتریکی در اثر تحریک پلیمر PVDF موجود در آلیاژ پلیمری می‌شود.

در انتهای زمان اعمال کشش و پس از پایان تنش بیشینه روی نمونه‌ها، با بازگشت فک‌های دستگاه کشش انتظار می‌رود، جریان ایجاد شده قطع شود. در واقع تا شروع کشش بعدی، جریانی ثبت نشود و دستگاه نمودار مورد انتظار نشان داده شده در شکل ۷ را ثبت کند، اما نتایج این روال را نشان نمی‌دهد. همان‌طور که بیان شد، در برگشت از کشش نیز جریان ایجاد می‌شود.

دلیل این رخداد را می‌توان در کمانش نمونه آلیاژ پلیمری تولید شده، پس از برگشت از کشش اعمالی به وسیله دستگاه دانست. بدین ترتیب که در هنگام برگشت فک دستگاه با بازگشت آلیاژ پلیمری به طول اولیه، آلیاژ تحت نیروی کمانش قرار می‌گیرد. زیرا، برگشت نمونه در اثر کشسانی ذاتی آلیاژ پلیمری نسبت به نیروی تنش کششی اعمال شده نبوده و در واقع رهاش و خزشی ایجاد نشده است، بلکه بازگشت لایه به‌طور مکانیکی و تحت تنظیمات دستگاه رخ می‌دهد و با سرعت تنظیم شده به وسیله دستگاه به حالت قبل بازمی‌گردد. نمودار واقعی ثبت شدت جریان الکتریکی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- نمودار جریان الکتریکی ثبت شده در نیروی کششی چرخه‌ای ۱۲ cycle/min.

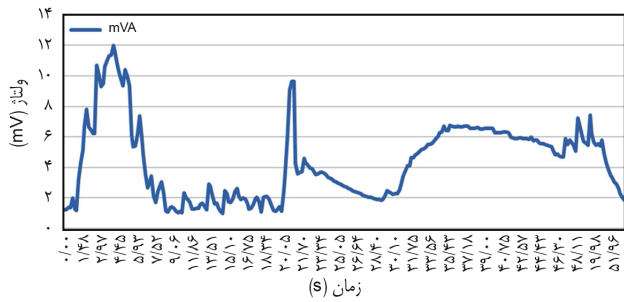


شکل ۹- نمودار مقاومت الکتریکی آلیاژ پلیمری تحت ولتاژ متغیر اعمالی.

تحت کشش قرار می‌گیرد، نمودار از حالت چین دار به حالت صاف تبدیل می‌شود. پس از اعمال نیروی کششی، مقاومت الکتریکی آلیاژ کم شده و کاهش در محدوده ۳ تا ۳۵ برابر به وجود می‌آید. برخی از این کاهش‌های مقاومت الکتریکی، ناشی از کشش آلیاژ پلیمری و هم‌راستایی اجزا و زنجیرهای پلیمری آن است. اما در ادامه کاهش مقاومت ۱۰ و ۲۰ برابری و حتی ۳۰ و ۴۰ برابری، نمی‌تواند به‌تنهایی عامل این افت مقاومت باشد. این افزایش رسانندگی الکتریکی را می‌توان ناشی از تولید جریان الکتریکی به وسیله لایه آلیاژ پلیمری دانست. زیرا، جریان ورودی اولیه از سوی دستگاه به لایه تقویت می‌شود و بر میزان جریان خروجی از دستگاه، اثرگذار است. برای بررسی این امکان، آزمایش‌های دیگری انجام و تأثیر نیروی کششی چرخه‌ای بر لایه بررسی شد.

۳-۵ بررسی جریان الکتریکی تولیدی

با شروع اعمال کشش، جریان‌های الکتریکی محدودی از آلیاژ پلیمری ثبت می‌شود که رفته‌رفته دامنه آن بیشتر می‌شود. در زمان اوج کشیدگی لایه، میزان تولید جریان الکتریکی ثبت شده به بیشترین مقدار می‌رسد. ثبت جریان‌های الکتریکی در این دامنه از کشش تا زمان رسیدن به حد نهایی تنظیم شده دستگاه اعمال کشش، در حداکثر میزان ازدیاد طول لایه آلیاژی پلیمری نشان از افزایش فشار به لایه در اثر کشش و تولید افزایشی جریان الکتریکی، در اثر افزایش فشار اعمال شده بر لایه آلیاژ پلیمری دارد. با برگشت فک‌های دستگاه کشش، میزان تنش اعمالی به لایه در اثر کشش کم می‌شود. در این حالت، دستگاه ثبات ریزجریان‌هایی را ثبت می‌کند که نشانگر خروج جریان از آلیاژ پلیمری است. تحلیل کارایی را می‌توان بدین صورت بیان کرد که شروع ایجاد جریان الکتریکی تحت تأثیر اعمال تنش کششی در جهت طولی لایه، موجب ایجاد فشار بر سطح لایه آلیاژ پلیمری می‌شود. این فشار اعمالی بر

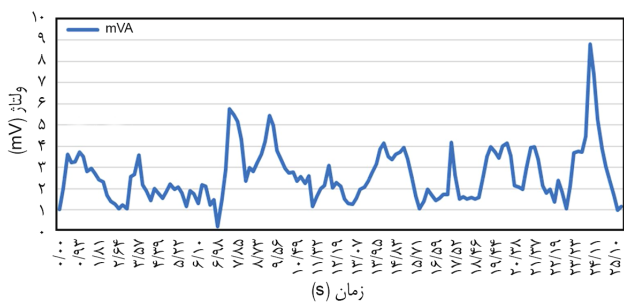


شکل ۱۰- ولتاژ ثبت شده در اثر نیروی کششی چرخه‌ای در ۱۲ cycle/min.

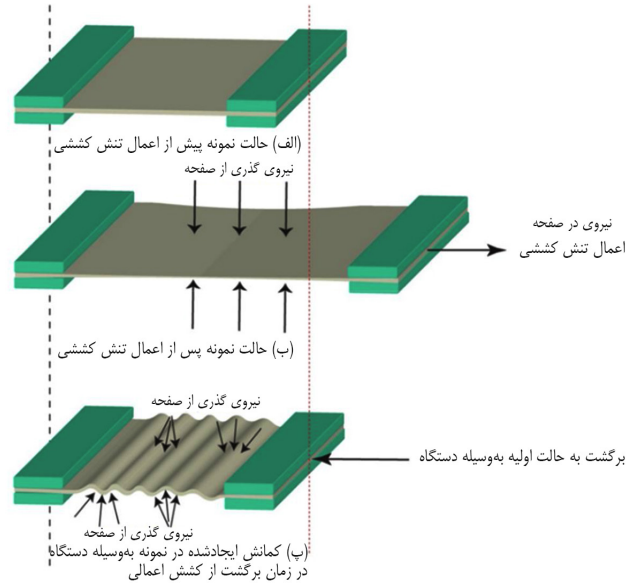
بارگذاری، می‌توان ۴ پیک ایجاد ولتاژ را مشاهده کرد. در اولین مرحله بارگذاری، ایجاد ولتاژ ثبت و ترسیم شد که تأییدی بر تولید جریان الکتریکی طی بارگذاری کششی در نمونه آلیاژ پلیمری بود. در شکل ۱۰، نمودار ثبت ولتاژ تولیدی نمایش داده شده است. انتظار می‌رفت، در اعمال ۱۰ چرخه بارگذاری در زمان ۵۰ s (۱۲ cycle/min) حدود ۱۰ پیک ولتاژ ایجاد شود، ولی در عمل از خروجی دستگاه ۴ پیک اصلی مشاهده شد.

در مرحله بعدی، برای مطالعه اثر میزان بارگذاری کششی بر تولید ولتاژ، تعداد چرخه‌های بارگذاری افزایش یافت و دستگاه روی ۲۲ cycle/min تنظیم شد. در واقع، از مدت زمان ۵ s برای هر کشش و برگشت، ۳ s زمان برای رفت و برگشت در نظر گرفته شد. این تغییر، به منظور بررسی امکان ایجاد تناسب میان تعداد پیک ولتاژ تولیدی با پیک کشش اعمال شد. نتایج حاصل از دریافت سیگنال‌ها از نمونه آلیاژ پلیمری در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر چرخه بارگذاری، نمونه تحت تأثیر تنش اعمالی، اختلاف ولتاژ مشخصی را ایجاد می‌کند که این ولتاژ به میزان حدود ۳ mV تا ۸ mV متغیر است.

هرچه سرعت اعمال بارگذاری بیشتر شود، نیروی فشاری وارد شده به سطح لایه، در زمان کمتری روی پیژوالکتریک موجود در آلیاژ اثر می‌گذارد. چون نیرو با مقدار ثابت در مدت زمان‌های



شکل ۱۱- ولتاژ ثبت شده در اثر نیروی کششی چرخه‌ای در ۲۲ cycle/min.

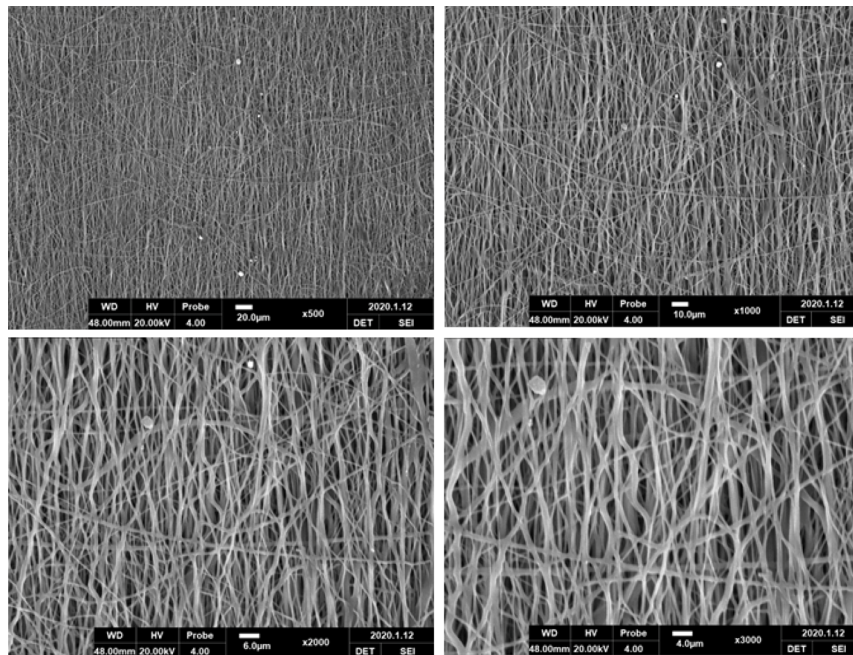


شکل ۹- نمایی از کماتش در اثر برگشت فک‌های اعمال کننده نیروی کششی چرخه‌ای.

این زمان برگشت آلیاژ پلیمری به حالت پیش از کشش، ممکن است در سرعت برگشت دستگاه، از زمان طبیعی مورد نیاز آلیاژ پلیمری برای بازگشت به حالت اولیه به کمک خاصیت کشسان، کمتر باشد. بنابراین، در آلیاژ پلیمری که از قبل، ازدیاد طول زیادی تحت تأثیر کشش داشته است، ایجاد کماتش می‌کند. زیرا آلیاژ پلیمری، فرصت لازم را برای بازگشت کشسان تحت خاصیت ذاتی خود ندارد، بنابراین کماتش تحت تأثیر نیروی بازگشتی و فشاری به نمونه، ایجاد می‌شود. ایجاد کماتش باعث ایجاد نیروی فشاری موجود بر سطح آلیاژ پلیمری می‌شود که البته این فشار به اندازه فشار ایجاد شده در اثر کشش اعمالی نبوده و بسیار کمتر از آن است. با وجود این تأثیر خود را بر پیژوالکتریک PVDF موجود در آلیاژ می‌گذارد و باعث ایجاد ریزجریان‌های الکتریکی در زمان برگشت فک از حالت کشش می‌شود. شکل ۹ نیروی کماتش ایجاد شده را نشان می‌دهد.

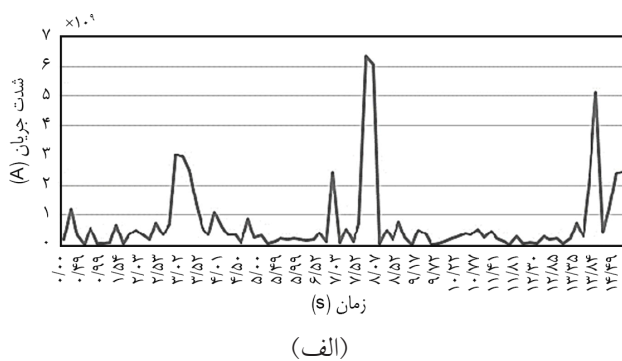
۳-۶ بررسی ولتاژ تولید شده از آلیاژ پلیمری

برای بررسی ولتاژ تولید شده از لایه آلیاژ، نمونه‌ها با تناوب ۱۲ cycle/min تحت کشش چرخه‌ای قرار گرفتند. انتظار می‌رفت، الگوی ولتاژ به دست آمده در کشش و پیک‌های خروجی ولتاژ، متناسب با زمانی باشد که کشش اعمالی به نمونه در حداکثر میزان آن باشد. این مسئله در چرخه اول اعمال نیرو مشاهده شد. اما در چرخه بعدی، این ولتاژ در بیشینه نیروی کششی اعمالی، ثبت نشد. در مجموع از حدود ۱۰ چرخه اعمال شده در زمان تقریباً ۵۰ s

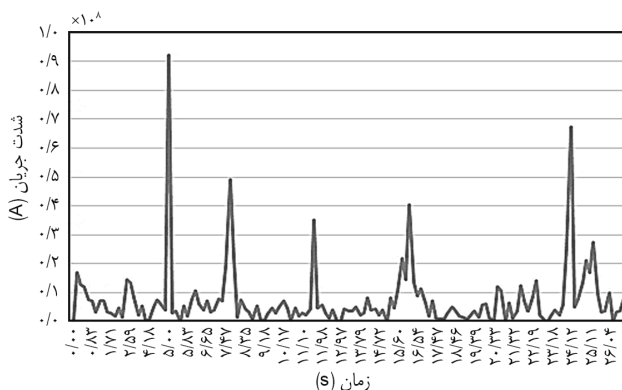


شکل ۱۲- تصاویر SEM نانوالیاف آرایش یافته با سرعت غلتک برداشت ۱۰ برابر نمونه اولیه.

اعمال کشش، فشار به طور یکنواخت تر به سطح آلیاژ پلیمری وارد شود. برای بررسی این موضوع، نمونه های تولیدی در سرعت ۲۰۰ و



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- جریان الکتریکی تولید شده در اثر بارگذاری: (الف) پیش از هم راستاسازی با سرعت استوانه ۲۰۰ cycle/min و (ب) پس از هم راستاسازی با سرعت استوانه برداشت ۲۰۰۰ cycle/min.

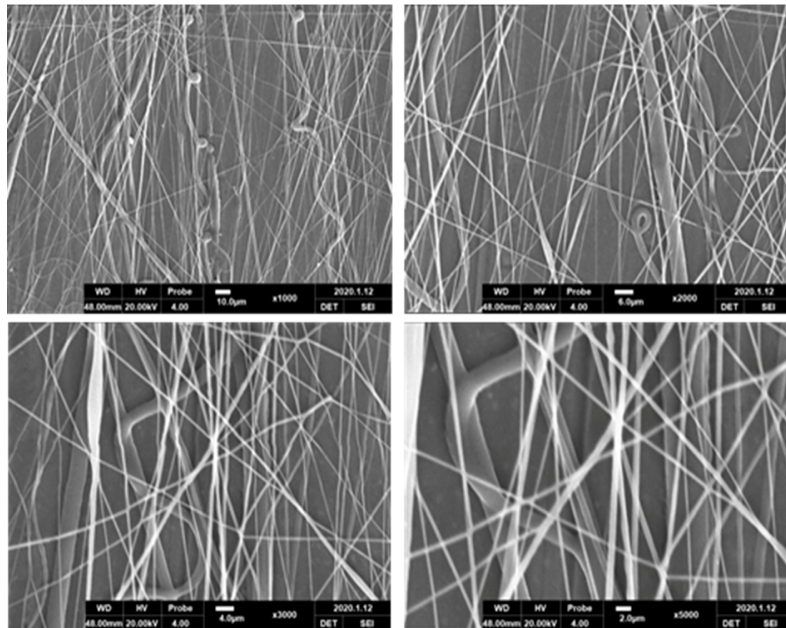
کمتری اعمال می شود، فرصت ختشی سازی آن به وسیله آلیاژ پلیمری کمتر است. بنابراین، بارگذاری از نوع نیروی ضربه ای و مشابه ایجاد ضربه در پیزوالکتریک می شود. به دلیل خاصیت ذاتی مواد پیزوالکتریک، تولید جریان الکتریکی و ایجاد ولتاژ در این مواد تحت تأثیر نیروی مکانیکی ضربه ای، ملموس تر است [۱۹].

با کاهش زمان های اعمال فشار به سطح لایه، فرصت خزش و کرنش در لایه و ختشی سازی آن تحت خاصیت ذاتی PU از دست می رود و اثر آن بر پلیمر PVDF موجود در آلیاژ بیشتر می شود. در نتیجه وجود فاز β حداکثری در نانوالیاف PVDF، امکان تولید جریان و تثبیت آن در زمان های بارگذاری بیشتر می شود. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت، بارگذاری کششی در زمان های کوتاه تر و در واقع با چرخه های بیشتر، تولید جریان متناسب و مستمر در اثر بارگذاری و ایجاد ولتاژ از آلیاژ پلیمری را امکان پذیر می سازد و انتظار کاربردهای بعدی را می توان از لایه آلیاژ داشت.

۳-۷ افزایش سرعت غلتک برداشت و اثر آن بر آرایش نانوالیاف

تصاویر SEM مربوط به نانوالیاف تولیدی نشان می دهند، با افزایش ۱۰ برابری سرعت برداشت، نظم و هم راستایی در نانوالیاف افزایش می یابد و لایه ای با سطح یکنواخت تر تولید می شود. این تصاویر در شکل ۱۲ نشان داده شده اند.

انتظار می رود، این هم راستایی باعث کاهش مقاومت الکتریکی در آلیاژ پلیمری شود. همچنین این امکان را فراهم می کند که هنگام



شکل ۱۴- تصاویر SEM نانوالیاف آرایش یافته با سرعت غلتک برداشت ۱۵ برابر نمونه اولیه.

۴ نتیجه گیری

در این مطالعه، پس از انجام فرایند الکتروسیسی، به منظور تأیید تشکیل آلیاژ PVDF/TPU، از فن‌های طیف‌سنجی FTIR و پراش پرتو X استفاده شد. در طیف FTIR، جابه‌جایی کوچک محل پیک‌های شاخص PVDF، که در اثر برهم‌کنش میان گروه الکترون‌کشنده C-F موجود در ساختار PVDF و گروه NH موجود در ساختار PU ایجاد شده بود، تشکیل آلیاژ PVDF/TPU تأیید شد. در طیف XRD، مربوط به آلیاژ PVDF/TPU، پیک‌های شاخص مربوط به دو پلیمر تشکیل‌دهنده مشاهده شد. همچنین، کاهش شدت پیک‌های شاخص PU در طیف XRD آلیاژ، اثر PVDF بر PU را تأیید کرد. با بررسی وجود پیک‌های اصلی فاز β در آلیاژ پلیمری PVDF/PU در نتایج طیف FTIR و آزمون XRD، نتیجه‌گیری شد، آلیاژ به دست آمده در برابر عوامل اثرگذار بر مواد پیزوالکتریک، مانند فشار یا فشار ناشی از کشش استفاده شده در این پژوهش می‌تواند رفتار پیزوالکتریک نشان دهد. لایه آلیاژ پلیمری PVDF/PU (۲۰/۸۰) در آزمایش‌های اولیه تحت کشش، کاهش مقاومت الکتریکی را نشان داد. پس از اعمال بار و ثبت خروجی مشخص شد، مقاومت لایه آلیاژ تا ۳۵ برابر کاهش یافته است. این تغییرات نمی‌تواند فقط تحت تأثیر آرایش‌یافتگی زنجیر مولکولی باشد و باید عامل دیگری بر این کاهش مقاومت یا جریان تولیدی اثرگذار باشد که باعث نوعی هم‌افزایی در جریان اولیه اعمالی به نمونه از طرف دستگاه می‌شود. با اعمال نیروی کششی چرخه‌ای

۲۰۰۰ rpm/min با تعداد ۱۲ cycle/min (هر ۵ s یک چرخه بارگذاری کامل) به وسیله دستگاه تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. شکل‌های ۱۳ الف و ب، جریان الکتریکی تولیدشده را پیش و پس از هم‌راستاشدن نانوالیاف نشان می‌دهند.

همان‌طور که از نمودارها مشخص است، شدت جریان الکتریکی تولیدشده در نمونه‌های هم‌راستا، ۲۷٪ بیش از نمونه‌های آرایش‌نیافته است. همچنین، در زمان اعمال حداکثر کشش، طی بازگشت نمونه به حالت پیش از کشش، شدت جریان‌های الکتریکی تولیدی اختلاف بیشتری با ریزجریان‌های تولیدشده در اثر کم‌انداختن دارند و تقریباً دامنه اختلاف کمتری را نشان می‌دهند. برای بررسی اینکه با افزایش مجدد سرعت، هم‌راستایی نانوالیاف بهبود می‌یابد، سرعت برداشت به ۱۵ برابر نمونه‌های اولیه افزایش یافت. در این آزمایش در حین الکتروسیسی، در تولید نمونه‌ها اختلال ایجاد و پراکندگی جریان الیاف مشاهده شد. سطح الیاف تولیدشده با این روش و همچنین نحوه آرایش‌یافتگی آن‌ها به وسیله تصویربرداری SEM بررسی شد که نتایج آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

با توجه به تصاویر SEM می‌توان دید، با افزایش سرعت برداشت، آشفته‌گی و بی‌نظمی در حین برداشت ایجاد می‌شود و نانوالیاف فرصت کافی برای جایگزینی در محل مناسب را پیدا نمی‌کنند. عدم هم‌راستایی و آرایش‌یافتگی و همچنین اختلاف قطر الیاف در حین برداشت سبب عدم یکنواختی نانوالیاف در آلیاژ تولیدی می‌شود که بیانگر مناسب نبودن افزایش ۱۵ برابری سرعت برداشت برای هم‌راستاکردن نانوالیاف است.

و هم‌فرکانس‌تر با زمان حداکثر کشش لایه شد. برای افزایش شدت جریان الکتریکی تولیدی، هم‌راستاسازی نانوالیاف انجام شد. نتایج نشان داد، افزایش سرعت غلتک برداشت تا ۱۰ برابر سرعت اولیه، به تولید ۲۷٪ جریان الکتریکی بیشتر نسبت به حالت اولیه منجر می‌شود.

روی نمونه‌ها، در اثر فشار ایجادشده به سطح نمونه که خود متأثر از کشش اعمالی و تنش واردشده به آلیاژ پلیمری در جهت طول است، PVDF موجود در آلیاژ، تولید جریان الکتریکی می‌کند. لایه آلیاژ پلیمری تحت نیروی کششی چرخه‌ای، ولتاژ الکتریکی ایجاد کرد و میزان ولتاژ ثبت‌شده با افزایش تعداد تکرار در دقیقه، منظم‌تر

مراجع

- [1] M.S. Sorayani Bafqi, R. Bagherzadeh, and M. Latifi, "Nanofiber alignment tuning: an engineering design tool in fabricating wearable power harvesting devices", *J. Ind. Text.*, vol. 47, no. 4, pp. 535-550, 2017.
- [2] Y. Xin, H. Sun, H. Tian, C. Guo, X. Li, S. Wang, and C. Wang, "The use of polyvinylidene fluoride (PVDF) films as sensors for vibration measurement: a brief review", *Ferroelectrics*, vol. 502, no. 1, pp. 28-42, 2016.
- [3] S. Velasco-Lozano, M. Knez, and F. López-Gallego, "Coupling enzymes and inorganic piezoelectric materials for electricity production from renewable fuels", *ACS Appl. Energ. Mater.*, vol. 1, no. 5, pp. 2032-2040, 2018.
- [4] E. Elnabawy, A.H. Hassanain, N. Shehata, A. Popelka, R. Nair, S. Yousef, and I. Kandas, "Piezoelectric PVDF/TPU nanofibrous composite membrane: fabrication and characterization", *Polymers*, vol. 11, no. 10, pp. 1634, 2019.
- [5] C. Chen, X. Wang, Y. Wang, D. Yang, F. Yao, W. Zhang, B. Wang, G.A. Sewvandi, D. Yang, and D. Hu, "Additive manufacturing of piezoelectric materials", *Adv. Funct. Mater.*, vol. 30, no. 52, pp. 2005141, 2020.
- [6] H. Wei, H. Wang, Y. Xia, D. Cui, Y. Shi, M. Dong, C. Liu, T. Ding, J. Zhang, Y. Ma, N. Wang, Z. Wang, Y. Sun, R. Wei, and Z. Guo, "An overview of lead-free piezoelectric materials and devices", *J. Mater. Chem. C*, vol. 6, no. 46, pp. 12446-12467, 2018.
- [7] J.Y. Lim, J.Y.S. Kim, and Y. Seo, "Enhancement of β -phase in PVDF by electrospinning", *AIP Conf. Proc.*, vol. 1664, no. 1, pp. 070006-1-070006-5, 2015.
- [8] P. Ueberschlag, "PVDF piezoelectric polymer", *Sensor Rev.*, vol. 21, no. 2, pp. 118-126, 2001.
- [9] J. Rho, D.Y. Lee, M.-H. Lee, B.-Y. Kim, and H. Jeong, "Characterization of PVDF/PU fibers prepared by electrospinning", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 1-8, 2018.
- [10] Y. Ahn, J.Y. Lim, S.M. Hong, J. Lee, J. Ha, H.J. Choi, and Y. Seo, "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*, vol. 1, no. 22, pp. 11791-11799, 2013.
- [11] M. Khalifa, A. Mahendran, and S. Anandhan, "Synergism of graphitic-carbon nitride and electrospinning on the physico-chemical characteristics and piezoelectric properties of flexible poly(vinylidene fluoride) based nanogenerator", *J. Polym. Res.*, vol. 26, pp. 1-13, 2019.
- [12] J. Xue, T. Wu, Y. Dai, and Y. Xia, "Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and applications", *Chem. Rev.*, vol. 119, no. 8, pp. 5298-5415, 2019.
- [13] J. Zheng, A. He, J. Li, and C.C. Han, "Polymorphism control of poly(vinylidene fluoride) through electrospinning", *Macromol. Rapid Comm.*, vol. 28, no. 22, pp. 2159-2162, 2007.
- [14] V. Cauda, S. Stassi, K. Bejtka, and G. Canavese, "Nanoconfinement: an effective way to enhance PVDF piezoelectric properties", *ACS Appl. Mater. Interf.*, vol. 5, no. 13, pp. 6430-6437, 2013.
- [15] Y. Jiang, L. Gong, X. Hu, Y. Zhao, H. Chen, L. Feng, and D. Zhang, "Aligned P(VDF-TrFE) nanofibers for enhanced piezoelectric directional strain sensing", *Polymers*, vol. 10, no. 4, pp. 364, 2018.
- [16] X. Guan, Y. Dong, H. Xia, J. Yao, and Q.-Q. Ni, "Mechanical and shape memory performance of shape memory polyurethane-based aligned nanofibers", *Polym. Test.*, vol. 91, pp. 106778, 2020.
- [17] J. Yan and Y.G. Jeong, "High performance flexible piezoelectric nanogenerators based on BaTiO₃ nanofibers in different alignment modes", *ACS Appl. Mater. Interf.*, vol. 8, no. 24, pp. 15700-15709, 2016.
- [18] H. Dong, K. Xiao, X. Tang, Z. Zhang, J. Dai, R. Long, and W. Liao, "Preparation and characterization of polyurethane (PU)/polyvinylidene fluoride (PVDF) blending membrane", *Desalin. Water Treat.*, vol. 57, no. 8, pp. 1-9, 2016.
- [19] M.Z. Yue and K.S. Chian, "Mechanical properties and morphology of thermoplastic polyurethane elastomer

- with poly(vinylidene fluoride) blends”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 60, no. 4, pp. 597-603, 1996.
- [20] H. Ma, and Y. Yang, “Rheology, morphology and mechanical properties of compatibilized poly(vinylidene fluoride) (PVDF)/thermoplastic polyurethane (TPU) blends”, *Polym. Test.*, vol. 27, no. 4, pp. 441-446, 2008.
- [21] B. Adeli, A.A. Gharehaghaji, and A.A. Asgharian Jeedi, “A feasibility study on production and optimization of PVDF/PU polyblend nanofiber layers using expert design analysis”, *Iran Polym. J.*, vol. 30, pp. 535-545,