

مبدل انرژی هیبریدی تریبو-پیزوالکتریک از پارچه پشمی و لایه نانوالیاف PVDF/BaTiO₃

شاهین قاسمی نژاد^۱، مسعود لطیفی^۲، روح الله باقرزاده^۳

۱) دانشکده مهندسی نساجی، پردیس مهندسی مواد و فرآیندهای پیشرفته، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳) آزمایشگاه تحقیقاتی سازه‌های الیافی با کارائی بالا، پژوهشکده مواد و فناوری‌های پیشرفته در نساجی، پردیس مهندسی مواد و فرآیندهای پیشرفته، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت:

۹۹/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش:

۹۹/۰۷/۰۸

برداشت انرژی‌های هدر رفتنی با کمک مبدل‌های انرژی مکانیکی به الکتریکی با توجه به معضل جهانی انرژی، از جمله رویکردهای نوین در توسعه محصولات میکروالکترونیک مبتنی بر سازوکار پیزوالکتریک و تریبوالکتریک می‌باشد. در این مقاله ترکیب‌های مختلفی از مبدل‌های الیافی شامل نانوالیاف PVDF و نانوالیاف کامپوزیتی PVDF/BaTiO₃ با لایه‌های پشمی با سه نوع بافت حلقوی پودی و الیاف پشم شانه‌شده، با توجه به جایگاه مناسب ماده پشم و PVDF در گروه مواد تریبوالکتریک، در نظر گرفته شد. میزان ولتاژ الکتریکی خروجی حاصل از تماس - جدایش تریبوالکتریک بر واحد سطح مبدل جهت ارزیابی خواص نمونه‌های تولید شده و مقایسه آنها با مبدل‌های تک‌لایه اندازه‌گیری شد. همچنین نحوه‌ی چیدمان بهینه لایه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که بهترین چیدمان لایه‌ای تریبوالکتریک در یک نیروی مشخص با ساختار کمان‌شکل حاصل شده و مقدار بالاترین خروجی (۴/۳۵ V/cm²) قابل دسترس می‌باشد. در حالی که خروجی لایه‌ی پیزوالکتریک PVDF به‌تنهایی در بهترین لایه‌ی ترکیبی آزمایش شده در نمونه‌های تریبوالکتریک به مقدار ۰/۴۷۵ (mV/cm²) می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، ساخت مبدل‌ها به صورت هیبریدی با ساختار معرفی شده در این پژوهش می‌تواند در ازای اعمال نیروی یکسان، خروجی مبدل تریبوالکتریک را نسبت به لایه‌ی مبدل پیزوالکتریک PVDF/BaTiO₃، بیش از ۹۰۰۰ برابر افزایش دهد. ساختار معرفی شده می‌تواند به عنوان گامی موثر در راستای توسعه مواد پیشرفته برای توسعه محصولات میکروالکترونیک خودشارژشونده و قابل پوشیده‌شدن مورد استفاده قرار گیرد.

مبدل های انرژی، پیزوالکتریک، تریبوالکتریک، نانوالیاف

کامپوزیتی، نانوالیاف PVDF/BaTiO₃

واژگان کلیدی

Hybrid Pizo-Triboelectric Energy Nanogenerator from Woollen fabric and PVDF/BaTiO₃ Nanofibrous Layer

Sh. Ghasemi Nezhad¹, M. Latifi², R. Bagherzadeh^{3*}

1,2. Department of Textile Engineering, School of Advanced Materials and Processes, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

3. Advanced Fibrous Materials LAB, Institute for Advanced Textile Materials and Technologies, School of Advanced Materials and Processes, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

Abstract

Harvesting of wasted energies using mechanical to electrical energy nanogenerators has become a major branch of energy research area due to the global energy concerns. Piezoelectric and triboelectric mechanisms are between the two most widely used methods in this field. In this study, different combinations of fibrous nanogenerators including PVDF nanofibers and PVDF / BaTiO₃ composite nanofibers with wool fabrics consist of three types of weft knitted fabric and combed wool fibers were prepared, due to their promising position in the triboelectric series. Different configuration of layers were also set to optimize the layer composition for the best electrical output. The electrical output voltage per unit area of different samples were measured after the contact - separation mode of electrification for each sample. Results showed that the arc-shape layer deposition has the best triboelectric layer arrangement to achieve the optimized electrical output at a specified force with the highest output value of 4.35(V/cm²), where the output of PVDF piezoelectric layer was only 0.475(mV/cm²). For a given force, the output of the triboelectric nanogenerator was more than 9000 times higher than that of the pure PVDF/BaTiO₃ piezoelectric nanogenerator. These results teach us a first step towards the fabrication of self-chargeable wearable microelectronic devices.

Keywords

Energy harvesting, Piezoelectric, Triboelectric, Composite nanofibers, PVDF/BaTiO₃ nanofibers

۱- مقدمه

انرژی هرگز از بین نمی‌رود بلکه در زنجیره‌ای قرار می‌گیرد که به شکل‌های مختلف تبدیل می‌شود. بعضی از شکل‌های انرژی ارزش بیش‌تری دارند زیرا استفاده از آنها آسان‌تر است. به‌عنوان مثال بعضی از مبدل‌ها حرکت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند که قابل استفاده و راه‌اندازی برای بسیاری از هدف‌ها است. از دیدگاه زیست‌محیطی معضل انرژی یک مسئله محوری و همیشه موجود است. با این حال راه‌های متعددی برای افزایش مزیت‌های زیست‌محیطی با تمرکز بر مراحل مختلف زنجیره‌ی تبدیل انرژی وجود دارد. یکی از این راه‌حل‌ها سرمایه‌گذاری بر روی انرژی‌های پاک است. روش دیگر رفتن به سمت استفاده‌های کارآمدتر از انرژی است [۱، ۲]. برداشت انرژی فرآیند برداشت مقادیر کوچک انرژی است که این انرژی‌ها به شکل‌های مختلف مانند گرما، صدا، ارتعاش یا جابه‌جایی اتلاف خواهند شد [۳].

مطابق با اصول حاکم بر اثر مواد پیزوالکتریک، این مواد قادر به تبدیل اطلاعات حاصل از تغییر شکل ساختار به سیگنال الکتریکی هستند. این توانایی به معنی اتصالی بین انرژی مکانیکی با انرژی الکتریکی است [۴]. از میان پلیمرهای پیزوالکتریک، پلی‌وینیلیدن‌فلوراید (PVDF) به‌علت چقرمگی، انعطاف‌پذیری و سازگاری با مواد پلیمری دیگر، به‌طور گسترده در پیزوپلیمرها مورد بررسی قرار گرفته‌است. تریووالکتریک اثر تماس منجر به القای بار الکتریکی است که به علت تماس اصطکاکی دو ماده با قابلیت باردار شدن ایجاد می‌گردد. توانایی مواد برای گرفتن یا از دست دادن الکترون بستگی به قطبیت ماده دارد. از این جهت مواد در جدولی به نام سری تریووالکتریک بر اساس تمایل به از دست دادن الکترون یا گرفتن الکترون طبقه‌بندی می‌شوند. هر چه فاصله‌ی دو ماده انتخابی این جدول از یکدیگر بیش‌تر باشد، بار بیش‌تری از تماس این دو ماده منتقل خواهد شد [۵-۷]. همچنین در مطالعات گذشته استفاده از نانو مواد در بهبود خواص الیاف الکترورسی شده تأکید شده است که از آن جمله می‌توان به افزودن مواد پلیمری به محلول الکترورسی اشاره نمود که با استفاده از آن دمای انتقال شیشه‌ای محلول الکترورسی به مقادیر بالاتر منتقل شده است [۸، ۹]. همچنین در تحقیق دیگری برای اصلاح سطحی پارچه ابریشمی از روش جذب سطحی نانولوله‌های کربنی چند دیواره استفاده شد. برای این منظور پارچه در محلول حاوی دیسپرسیون نانو لوله کربنی چند دیواره غوطه‌ور شد و برای افزایش میزان جذب نانو لوله کربنی از اسیدسیتریک (عامل اتصال عرضی) در حضور سدیم‌هیپوفسفات به عنوان کاتالیزور استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با جذب سطحی نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر روی سطح پارچه، میزان رسانایی پارچه ابریشمی افزایش یافت [۱۰]. استفاده از ساختارهای کامپوزیتی در تولید نانوالیاف نیز مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. استفاده از نانوذرات ZnO، BaTiO₃، CNT و سایر نانوذرات سرمایی سبب افزایش خاصیت پیزوالکتریک نانوالیاف

پلی‌وینیلیدن‌فلوراید شده است [۱۱-۱۶]. گل‌حسن و همکاران [۱۷] در پژوهشی اثر سختی سطح در یک برداشت‌کننده‌ی ترکیبی پیزو-تریووالکتریک را بررسی نمودند. در این پژوهش ترکیب نانو مکعب‌های (ZnSnO₃) بدون سرب با پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان همراه با الکترودهای مسی به‌عنوان لایه‌ی پیزوالکتریک و تماس الکتروده مس با لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان خالص به‌عنوان بخش تریووالکتریک در نظر گرفته می‌شد. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش سختی سطح، ولتاژ میانگین خروجی افزایش پیدا می‌کند. همچنین استفاده از نانوذرات BaTiO₃ به دلیل دارا بودن خواص ذاتی پیزوالکتریک بالا در بسیار از مقالات و پژوهش‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته است. این نانوذرات با دارا بودن خواص پیزوالکتریک مناسب می‌توانند در بهبود عملکرد نانومبدل‌های مبتنی بر نانوالیاف پلیمری موثر باشند [۱۳، ۱۴، ۱۸، ۱۹]. هم‌اجیت‌سینگ و نراج [۲۰]، یک لایه فیلم کامپوزیتی تشکیل شده از ساختار PVDF/ZnO را تهیه کردند که از تماس این لایه با یک لایه از پلیمر پلی‌تترافلئوراتیلن در تولید نانومبدل‌های ترکیبی پیزو-تریووالکتریک استفاده شده بود. مبدل ترکیبی آنها موفق به تولید بیشینه‌ی خروجی لحظه‌ای (24/5 μW/cm²) شد که حدود ۲/۵ برابر بیش‌تر از مبدل ترکیبی حاصل از پلی‌وینیلیدن‌فلوراید خالص است. پژوهش‌های مرورشده نشان داد که انتخاب مواد، انتخاب یک فرآیند تولید مناسب، طراحی یک ساختار هندسی بهینه، ترتیب چیدمان لایه‌ها، طراحی مدار الکتریکی مناسب از جمله مهم‌ترین عامل‌هایی هستند که باید در طراحی و ساخت یک مبدل ترکیبی پیزو-تریووالکتریک در نظر گرفته شوند [۲۱-۲۳].

برای این منظور در این مقاله به بررسی ترکیب‌های مختلفی از مبدل‌های الیافی شامل نانوالیاف پلی‌وینیلیدن‌فلوراید و نانوالیاف کامپوزیتی PVDF/BaTiO₃ با لایه‌های پشمی با سه نوع بافت حلقوی پودی و الیاف پشم شانه‌شده پرداخته شده است که می‌تواند به عنوان یک ابزار مهندسی در طراحی مبدل‌های هیبریدی برای توسعه مبدل‌های مبتنی بر پارچه جهت تولید دستگاه‌های الکترونیکی قابل پوشیده شدن استفاده شوند.

۲- بخش تجربی

یک دسته از مواد انتخابی برای این پژوهش شامل الیاف پشم شانه شده و سه نمونه پارچه بافته‌شده با الیاف پشم در سامانه‌ی بافندگی حلقوی پودی می‌باشد. الیاف پشم مورد استفاده دارای ظرفیت میانگین ۲۱ میکرومتر و تهیه‌شده از شرکت ریسندگی و بافندگی مطهری تهیه شد. پارچه‌های ۱۰۰ درصد پشمی این تحقیق نیز در دستگاه بافندگی حلقوی پودی در دانشگاه دیکن استرالیا تهیه شد که مشخصات این پارچه‌ها در جدول ۱ آورده شده‌است.

پلیمر پلی‌وینیلیدن‌فلوراید با متوسط وزن مولکولی ۲۷۰۰۰ گرم بر مول به‌شکل گرانول تهیه‌شده از شرکت سیگما-آلدریج، N₃N-

متصل می‌شد تا ضمن ایجاد برآمدگی مناسب برای تماس لایه‌ها، بازگشت‌پذیری لازم پس از برداشت نیرو از روی دو لایه ایجاد گردد. شکل لایه‌های ساخته‌شده به این روش در شکل ۱ آورده شده‌است. لایه‌های ساخته‌شده از نانوالیاف خالص PVDF و لایه‌های حاصل از نانوالیاف کامپوزیتی PVDF/BaTiO₃ نیز مشابه با روش فوق ایجاد گردیدند. همان‌گونه که در بخش مقدمه اشاره شد یکی از عامل‌های مهم در مقدار بار تریبوالکتریک مقدار زبری سطح لایه‌هایی است که در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند. از جمله خاصیتی که با افزایش زبری سطح افزایش پیدا می‌کند خاصیت اصطکاکی آن سطح است. جهت مقایسه‌ی خاصیت اصطکاکی پشت و روی فنی سه نمونه پارچه، از آزمایش تعیین ضرایب اصطکاکی استفاده شد. در این آزمایش پارچه بر روی سطح لغزنده متصل به نیروسنج بسته می‌شود. لغزنده با سرعت ثابت بر روی یک سطح فلزی مشخص حرکت نموده و نیروسنج از طریق سنجش نیروی اصطکاک، ضریب اصطکاک ایستایی μ_s و ضریب اصطکاک جنبشی μ_k را محاسبه می‌نماید. این دستگاه ساخت کمپانی Drick و محصول کشور چین بود. همچنین جهت مشاهده تصاویر نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. برای این منظور

دی‌متیل‌فرم‌آمید و استون با درصد خلوص ۹۹٪ به‌عنوان حلال، تهیه‌شده از شرکت مرک آلمان، نانوذره‌های باریم‌تیتانات با متوسط اندازه‌ی ذره‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر و درصد خلوص بیش‌تر از ۹۹ درصد به عنوان جزء تقویت‌کننده تهیه شده از شرکت سیگما آلدریج، جهت تولید لایه‌های نانوالیاف با استفاده از روش الکترورسی مورد استفاده قرار گرفت. جهت تولید لایه نانوالیاف در فرآیند الکترورسی، پلیمر پلی‌وینیلیدن‌فلوراید در حلال DMF/Aceton با ترکیب حجمی ۷۰/۳۰ حل شده که مشخصات آن در جدول ۲ نشان داده شده است. ورقه‌ی آلومینیومی به عنوان الکترود در ساخت مبدل مورد استفاده قرار گرفت.

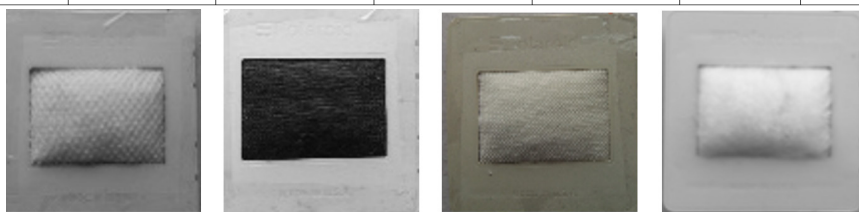
برای ساخت لایه‌های تریبوالکتریک مناسب جهت بررسی عملکرد تریبوالکتریک در حالت تماس - جدایش عمودی، مواد مورد نظر ابتدا بر روی یک سمت بستر ورقه‌ی آلومینیومی انعطاف‌پذیر قرار گرفت. سپس یک سیم مسی برای انتقال بار در سمت دیگر بستر متصل گردید. مجموعه‌ی حاصل به‌اندازه‌ی مناسب بریده می‌شد و درون یک قاب پلیمری به‌منظور نگهداری لایه قرار می‌گرفت. در انتها یک ابر یا اسفنج پلی‌یورتان برای ایجاد ساختار کمّانی به انتهای باز قاب

جدول ۱: مشخصات پارچه‌های پشمی مورد استفاده در ساخت لایه‌ی دی‌الکتریک مبدل تریبوالکتریک

شناسه پارچه	طرح بافت	جرم واحد سطح (g/m ²)	ضخامت (mm)	ظرافت الیاف (μm)	CPC	WPC	SD
F1	plain- single jersey	۱۳۳.۸۰	۰.۶۷	۱۳.۸	۱۴.۱	۱۲.۸	۱۸.۰۵
F2	plain- single jersey	۲۱۰.۵	۰.۶۲	۲۲.۶	۱۰.۷	۱۱.۲	۱۱.۹۸
F3	single jersey Pique	۲۶۷.۵	۱.۵۹	۲۱.۹	۴.۹	۵.۶	۲۷.۴

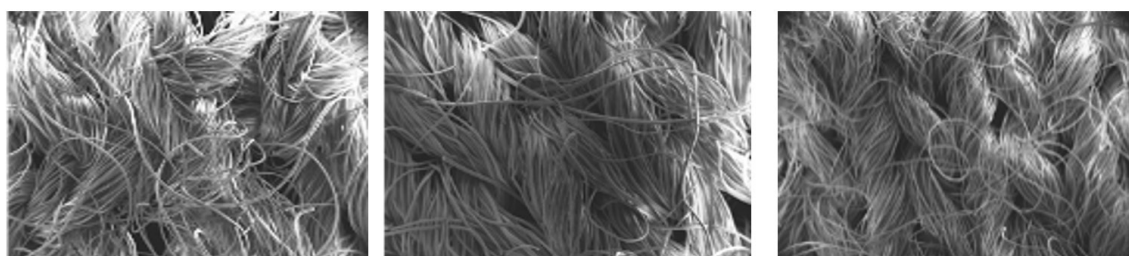
جدول ۲: درصد وزنی پلیمر و افزودنی مورد استفاده در تهیه نانوالیاف کامپوزیتی PVDF/BaTiO₃

نوع نانوالیاف	نانوالیاف خالص	نانوالیاف کامپوزیتی	نانوالیاف کامپوزیتی	نانوالیاف کامپوزیتی	نانوالیاف کامپوزیتی
PVDF % (W/V)	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳
BaTiO ₃ % (W/V)	۰	۶	۱۸	۲۲	۲۴



(الف) (ب) (ج) (د)

شکل ۱: لایه‌های ساخته‌شده برای آزمایش اندازه‌گیری بار تریبوالکتریک (الف) لایه‌ی الیاف پشم، (ب) نمونه ۱ F، (ج) نمونه ۲ F، (د) نمونه ۳ F



(الف) (ب) (ج)

شکل ۲: تصویر SEM از سطح پارچه‌های (الف) نمونه ۱ F، (ب) نمونه ۲ F، (ج) نمونه ۳ F

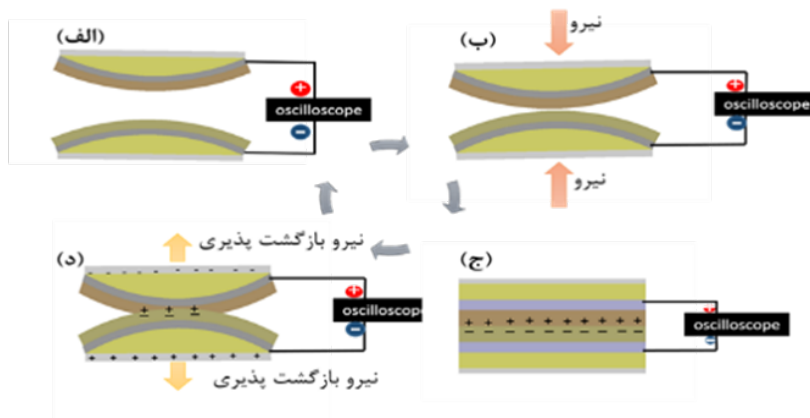
نمونه‌های روی چسب کربنی قرارداده شده و به مدت ۹۰ ثانیه توسط دستگاه کوتینگ طلا بخارنشانی طلا شدند و سپس مورد ارزیابی قرار گرفتند. تصاویر SEM از سطح سه نمونه پارچه در شکل ۲ آورده شده است.

هر لایه‌ی پلیمری ابتدا در تماس با لایه‌ی خالص از الیاف پشم قرار گرفت. نیروی مکانیکی به مقدار تقریبی 0.8 N و در محدوده فرکانس 2 Hz تا 4 Hz اعمال شد. هر لایه از طریق الکترودهای آن به درگاه‌های نوسان‌رنا متصل گردید و میزان ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شد. سپس لایه‌ی پلیمری مشخص با لایه‌های $F1$ ، $F2$ و $F3$ تحت حالت عملکردی تماس-جدایش عمودی قرار می‌گرفت و نتایج هر آزمایش ثبت شد. اصول عملکرد لایه‌های تریوالکتریک در این پژوهش در حالت تماس-جدایش عمودی بر مبنای الکتریسته تماسی و القای الکترواستاتیک به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

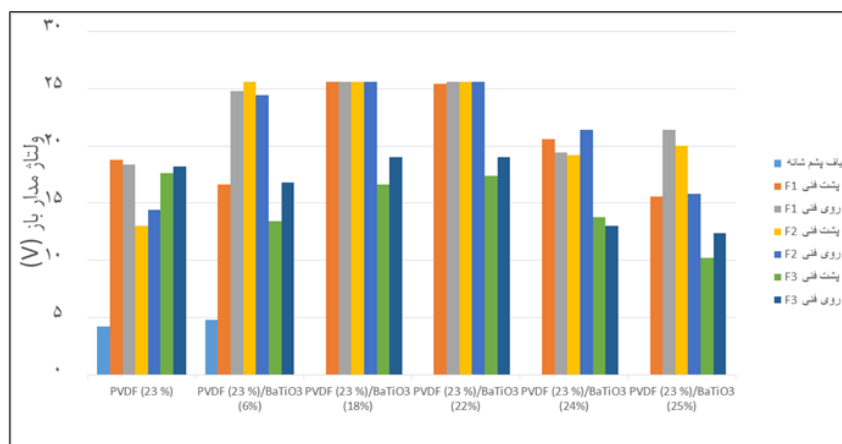
۳- نتایج و بحث

مقدار ولتاژ خروجی هر یک از مبدل‌های ساخته شده بر اساس روش اشاره شده در بخش قبل در شکل ۴ ارزیابی شده است. لازم به ذکر است که عددهای این شکل بیشینه مقدار ولتاژی است

که در تعدادی فرآیند تماس-جدایش عمودی برای ترکیب‌های مختلف لایه‌های تریوالکتریک ثبت شده‌است. با توجه به شکل فوق لایه‌ی متشکل از الیاف پشم ولتاژ پایین‌تری نسبت به نمونه‌های متشکل از پارچه پشمی داشت. به‌گونه‌ای که خروجی آن کم‌تر از یک چهارم نمونه‌های پارچه‌ای است. از آنجا که ناهمواری سطحی لایه‌ی متشکل از پارچه پشمی نسبت به لایه‌ی متشکل از الیاف موازی پشم به دلیل وجود نخ در ساختمان بافت و همچنین بافت‌رفتگی نخ، از ناهمواری سطحی بالاتری برخوردار است که این نتیجه با مطالعات پیشین مطابقت دارد [۲۴]. به‌طور تقریبی در تمامی نمونه‌های آزمایش شده ولتاژ خروجی لایه‌ی $F3$ از لایه‌های $F1$ و $F2$ پایین‌تر می‌باشد زیرا تعداد نقطه‌های تماس برای نمونه‌های $F1$ ، $F2$ و $F3$ متناسب با تراکم حلقه بر واحد سطح آنها است. در نتیجه ولتاژ خروجی پایین‌تر نمونه $F3$ نسبت به دو نمونه‌ی دیگر با توجه به تراکم پایین‌تر حلقه‌ی آن در واحد سطح توجیه‌پذیر است. از میان لایه‌های پلیمری بهترین لایه‌ها، لایه‌ی نانوالیاف کامپوزیتی پلی‌وینیلیدن‌فلوراید-باریم‌تیتانات با درصد وزنی حجمی باریم‌تیتانات ۱۸ و ۲۲ درصد می‌باشد. زیرا به‌طور کلی در بیش‌تر آزمایش‌ها هنگام تماس با لایه‌های پشمی



شکل ۳: عملکرد لایه‌های تریوالکتریک در حالت تماس-جدایش عمودی



شکل ۴: مقدار ولتاژ خروجی نمونه‌ها

ولتاژ خروجی پیرو- تریبو الکتریک مطابقت خوبی دارد. به عنوان مثال با در نظر گرفتن نمونه F ۱ در شکل ۴ مشاهده می‌شود که با ثابت بودن نوع لایه‌ی پلیمری، پشت فنی نمونه F ۱ بیشینه‌ی ولتاژ مثبت و منفی بالاتری از نظر اندازه در مقایسه با روی فنی همین نمونه دارد. بالاتر بودن ضرایب اصطکاک در پشت فنی F ۱ نسبت به روی فنی آن نشان‌دهنده‌ی سختی سطح بالاتر است که با توجه به مطالعه‌های انجام‌شده سختی سطح بالاتر باعث افزایش خروجی تریبو الکتریک لایه‌ها می‌شود. همچنین با مقایسه‌ی نتایج نمونه F ۲ و F ۳ در هر دو سمت نمونه، روی فنی هر دو نمونه ضرایب اصطکاک بالاتر و ولتاژ خروجی بالاتری نسبت به پشت فنی آنها داشته‌اند. در شکل ۵ بیشینه ولتاژ مدار باز پیرو الکتریک اندازه‌گیری شده برای مدل‌های در نظر گرفته شده در فرکانسی با بیش‌ترین مقدار خروجی الکتریکی آورده شده است.

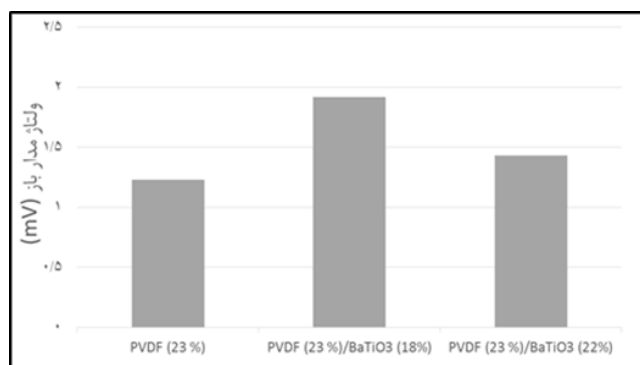
باتوجه به شک فوق میانگین بیشینه‌ی ولتاژ خروجی پیرو الکتریک برای لایه‌های نانوالیاف (23%W/V) PVDF خالص برابر با ۱/۲ (mv)، نانوالیاف کامپوزیتی PVDF(23%W/V)/ BaTiO₃(18%W/V) برابر با ۱/۹ (mv) و خروجی پیرو الکتریک PVDF(23%W/V)/BaTiO₃(22%W/V) برابر با ۱/۴ mv بود. همانگونه که در شکل ۵ مشخص شده میزان خروجی پیرو الکتریک مبدل ساخته شده با PVDF(23%W/V)/ BaTiO₃(18%W/V) دارای بهترین عملکرد در مقایسه با نمونه شاهد (PVDF(23%W/V)) و نمونه تهیه شده از لایه نانوالیاف با غلظت ۲۳ درصد از باریم تیتانات میباشد. همانگونه که در بالا اشاره شده افزایش نانوذره سرامیکی (BaTiO₃) تا حدی می‌تواند

مختلف بالاترین ولتاژهای خروجی مربوط به این لایه‌ی پلیمری می‌باشد. علت این موضوع می‌تواند به دلیل پخش‌شدگی بهتر نانوذرات باریم تیتانات در درصدهای وزنی ۱۸ و ۲۲ باشد که توانسته ساختار کامپوزیتی یکنواخت‌تری را ارایه نماید. غلظت‌های بالاتر به دلیل تجمع این ذرات در بستر پلیمری عملکرد کلی لایه نانوالیاف را مختل کرده و خروجی پیرو الکتریک را در مقایسه با غلظت‌های بهینه ۱۸ و ۲۲ کاهش داده است. همچنین به طور طبیعی غلظت‌های کمتر از ۱۸ نیز به دلیل کاهش تعداد نانوذره در واحد حجم نانوالیاف سبب کاهش در خروجی را ناشی شده است [۱۳، ۱۴، ۱۶]. از سوی دیگر بهترین لایه‌ی پشمی برای تماس تریبو الکتریک با این لایه‌های پلیمری، پشت و روی فنی نمونه F ۲ با بیشینه‌ی ولتاژ مثبت (۷) ۲۵/۶ است. در نتیجه‌ی مقایسه‌های تحلیلی برای بیان ارتباط بین آزمایش‌های مختلف و ارتباط آنها با ساختار لایه بر روی نتایج حاصل از زوج لایه‌ی تریبو الکتریک نمونه‌ی F ۲ و PVDF/BaTiO₃ با درصد وزنی حجمی باریم تیتانات ۱۸ و ۲۲ درصد و لایه‌ی نانوالیاف خالص PVDF معطوف می‌گردد. با در نظرگیری مساحت تحت تماس دو لایه، بیشینه‌ی خروجی الکتریکی این مبدل (۴/۳۵ V/Cm²) بود. نتایج حاصل از آزمایش تعیین ضرایب اصطکاک ایستایی و جنبشی برای پشت و روی فنی نمونه پارچه‌ها در این پژوهش در جدول ۳ آورده شده است.

نتایج حاصل از آزمایش ضریب اصطکاک نمونه پارچه‌ها نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک پشت و روی نمونه‌ها با یکدیگر تفاوت دارند. نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج حاصل از اندازه‌گیری

جدول ۳: نتایج حاصل از آزمایش تعیین ضرایب اصطکاک پارچه‌ها

نوع نمونه	ضرایب اصطکاک روی فنی		ضرایب اصطکاک پشت فنی	
	μk	μs	μk	μs
F۱	۰,۱۷۲۸	۰,۲۵۹۷	۰,۱۸۸۸	۰,۲۷۷۱
F۲	۰,۲۴۹۸	۰,۳۷۹۳	۰,۲۰۰۴	۰,۳۱۷۷
F۳	۰,۲۷۳۲	۰,۴۱۷۲	۰,۲۶۰۹	۰,۴۰۷۲



شکل ۵: مقایسه‌ی نتیجه‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری ولتاژ خروجی لایه‌های پیرو الکتریک

۵- مراجع

- [1] Ji SH, Lee W, Yun JS. All-in-One Piezo-Triboelectric Energy Harvester Module Based on Piezoceramic Nanofibers for Wearable Devices. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020;12(16):18609-16.
- [2] Kumar PS, Sundaramurthy J, Sundarrajan S, Babu VJ, Singh G, Allakhverdiev SI, et al. Hierarchical electrospun nanofibers for energy harvesting, production and environmental remediation. *Energy & Environmental Science*. 2014;7(10):3192-222.
- [3] Harb A. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*. 2011;36(10):2641-54.
- [4] Sirohi J, Chopra I. Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors. *Journal of intelligent material systems and structures*. 2000;11(4):246-57.
- [5] Lee SG, Ha J-W, Sohn E-H, Park IJ, Lee S-BJASS. Enhancement of polar crystalline phase formation in transparent PVDF-CaF₂ composite films. 2016;390:339-45.
- [6] Karan SK, Mandal D, Khatua BBJN. Self-powered flexible Fe-doped RGO/PVDF nanocomposite: an excellent material for a piezoelectric energy harvester. 2015;7(24):10655-66.
- [7] Cao X, Ma J, Shi X, Ren ZJASS. Effect of TiO₂ nanoparticle size on the performance of PVDF membrane. 2006;253(4):2003-10.
- [8] سمنانی رهبر را، کلانتری ب، محدث مجتهدی م. بررسی رفتار تبلور در الیاف نانو کامپوزیت پلی پروپیلن/نانو صفحات گرافن بخش اول- سینتیک تبلور همدم. مواد پیشرفته و پوشش های نوین. ۲۰۲۲-۳۵:(۲۸)۷ و ۲۰۱۹.
- [9] Sharifisamani E, Mousazadegan F, Bagherzadeh R, Latifi M. PEG-PLA-PCL based electrospun yarns with curcumin control release property as suture. *Polymer Engineering & Science*. 2020;60(7):1520-9.
- [۱۰] نوری م، مختاری ج، اصلاح س، قربانپور ص. اصلاح سطحی الیاف ابریشم توسط نانو لوله های کربنی فعال شده. مواد پیشرفته و پوشش های نوین. ۲۰۱۸ و ۲۵:(۲۵)۷ و ۲۰۱۷.
- [11] Azmi S, Hosseini Varkiani S-M, Latifi M, Bagherzadeh R. Tuning energy harvesting devices with different layout angles to robust the mechanical-to-electrical energy conversion performance. *Journal of Industrial Textiles*. 0(0):1528083720928822.
- [12] Saveh-Shemshaki N, Bagherzadeh R, Latifi M. Electrospun metal oxide nanofibrous mat as a transparent conductive layer. *Organic Electronics*.

سبب بهبود خواص پیزوالکتریک مبدل گردد. افزودن بیش از میزان بهینه به دلیل تجمع نایکناخت نانوذره در بستر پلیمری سبب کاهش عملکرد کلی نانوالیاف کامپوزیتی شده و خروجی لایه پیزوالکتریک آن کاهش میابد. در مطالعات پیشین نیز استفاده از نانوذرات باریک تیتانات با محدودیت هایی مواجه بوده به نحوی که تنها استفاده ی مقدار معینی از این نانوذرات توانسته سبب بهبود عملکرد لایه نانوالیاف گردد که نتایج آن با نتایج بدست آمده در این تحقیق مطابق میباشد [۲۵، ۲۶]. این موضوع اهمیت بهینه سازی استفاده از نانوذرات در بسترهای نانوالیافی را تاکید میکند.

۴- نتیجه گیری

طراحی ساختار مبدل های هیبریدی تریبو-پیزوالکتریک به عنوان رویکردی جدید در ساخت مبدل های انرژی مورد توجه قرار داشته که از جمله مهمترین زیربخش آن می توان به ساختار چیدمان لایه ها و نحوه ساخت مبدل میباشد. همچنین ساخت این نوع از مبدل ها به گونه ایی که بتواند در داخل البسه تجميع گردند از توجه ویژه ایی برخوردار میباشد. در این تحقیق دو لایه ی منسوجی یکی متشکل از پشم و دیگری لایه تشکیل شده از نانوالیاف الکترورسی شده PVDF/BaTiO₃ با ساختار کمان شکل طراحی و تحت نیروی مکانیکی مواجه با عمل تماس- جدایش عمودی قرار گرفتند. این امر منجر به القای الکترواستاتیک بار الکتریکی و در نتیجه تولید بار الکتریکی گردید. از آنجا که نانوالیاف کامپوزیتی PVDF/BaTiO₃ خود یک لایه با خاصیت پیزوالکتریک است هنگامی که به تنهایی تحت تنش قرار می گیرد تولید بار الکتریکی می نماید. به گونه ای که خروجی الکتریکی حاصل از تماس- جدایش عمودی یک لایه ی پشمی با یک لایه ی متشکل از نانوالیاف کامپوزیتی PVDF/BaTiO₃ (بر مبنای سازوکار تریبو الکتریک) نسبت به خروجی الکتریکی حاصل از نانوالیاف کامپوزیتی PVDF/BaTiO₃ (بر مبنای سازوکار پیزوالکتریک) بیش از ۹۰۰۰ برابر می باشد که نشان دهنده عملکرد مناسب مبدل هیبریدی طراحی شده می باشد.

2019;70:131-9.

[13] Sorayani Bafqi MS, Latifi M, Sadeghi A-H, Bagherzadeh R. Expected lifetime of fibrous nanogenerator exposed to cyclic compressive pressure. *Journal of Industrial Textiles*. 0(0):1528083720915835.

[14] Sorayani Bafqi MS, Bagherzadeh R, Latifi M. Nanofiber alignment tuning: An engineering design tool in fabricating wearable power harvesting devices. *Journal of Industrial Textiles*. 2017;47(4):535-50.

[15] Guan X, Chen H, Xia H, Fu Y, Yao J, Ni Q-Q. Flexible energy harvester based on aligned PZT/SMPU nanofibers and shape memory effect for curved sensors. *Composites Part B: Engineering*. 2020;197:108169.

[16] Queraltó A, Frohnhoven R, Mathur S, Gómez A. Intrinsic piezoelectric characterization of BiFeO₃ nanofibers and its implications for energy harvesting. *Applied Surface Science*. 2020;509:144760.

[17] Gul H, Fasihullah K, Arshad H, Shawkat A, Jinho B, Chong Hyun L. A flat-panel-shaped hybrid piezo/triboelectric nanogenerator for ambient energy harvesting. *Nanotechnology*. 2017;28(17):175402.

[18] Ejaz M, Puli VS, Elupula R, Adireddy S, Riggs BC, Chrisey DB, et al. Core-shell structured poly(glycidyl methacrylate)/BaTiO₃ nanocomposites prepared by surface-initiated atom transfer radical polymerization: A novel material for high energy density dielectric storage. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*. 2015;53(6):719-28.

[19] Kashfi M, Fakhri P, Amini B, Yavari N, Rashidi B, Kong L, et al. A novel approach to determining piezoelectric properties of nanogenerators based on PVDF nanofibers using iterative finite element simulation for walking energy harvesting. *Journal of Industrial Textiles*. 0(0):1528083720926493.

[20] Singh HH, Khare N. Flexible ZnO-PVDF/PTFE Based Piezo-Tribo Hybrid Nanogenerator. *Nano Energy*. 2018.

[21] Bafqi MSS, Bagherzadeh R, Latifi M. Fabrication of composite PVDF-ZnO nanofiber mats by electrospinning for energy scavenging application with enhanced efficiency. *Journal of Polymer Research*. 2015;22(7):130.

[22] Tiwari S, Gaur A, Kumar C, Maiti P. Electrospun hybrid nanofibers of poly(vinylidene fluoride)

and functionalized graphene oxide as a piezoelectric energy harvester. *Sustainable Energy & Fuels*. 2020;4(5):2469-79.

[23] Abolhasani MM, Naebe M, Hassanpour Amiri M, Shirvanimoghaddam K, Anwar S, Michels JJ, et al. Hierarchically Structured Porous Piezoelectric Polymer Nanofibers for Energy Harvesting. *Advanced Science*. 2020;7(13):2000517.

[24] Akgun M. Surface roughness properties of wool woven fabrics after abrasion. *The Journal of The Textile Institute*. 2016;107(8):1056-67.

[25] Sabry RS, Hussein AD. PVDF: ZnO/BaTiO₃ as high out-put piezoelectric nanogenerator. *Polymer Testing*. 2019;79:106001.

[26] Mendes SF, Costa CM, Caparros C, Senca-das V, Lanceros-Méndez S. Effect of filler size and concentration on the structure and properties of poly(vinylidene fluoride)/BaTiO₃ nanocomposites. *Journal of Materials Science*. 2012;47(3):1378-88