

ارزیابی کارایی تریبوالکتریک منسوجات پوشیدنی در تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی

Evaluating the Triboelectric Performance of wearable Textiles in the conversion of Mechanical Energy to Electrical Energy

فرزانه کریم‌دهنوی، افسانه ولی‌پوری*، عقیقه کریمیان

ایران، اصفهان ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی

چکیده

یک روش بسیار جذاب و کاربردی برای مهار انرژی ایجادشده در پارچه، ذخیره آن از طریق ژنراتورهای تریبوالکتریک است. ذخیره انرژی حرکتی انسان می‌تواند راه امیدوارکننده‌ای برای استفاده از آن در وسایل الکترونیکی پوشیدنی باشد. از آنجا که پارچه جزء دائمی و اصلی یک ژنراتور تریبوالکتریک است، در این مطالعه، خواص تریبوالکتریک چندین پارچه مورد استفاده در تولید پوشاک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این مقاله به بررسی تأثیر حالت‌های اساسی قرارگیری ژنراتورهای تریبوالکتریک در حالت عمودی تماس-جدایی عمودی و حالت لغزشی-جانبی پرداخته شده است. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در بین پارچه‌های مورد آزمایش، نایلون، پنبه و پنبه آب‌گریز، در تماس با سایر پارچه‌ها اختلاف پتانسیل و جریان الکتریکی بیشتری را ایجاد می‌کنند. همچنین نتایج نشان داده است که حالت لغزشی-جانبی سریع‌تر پاسخ می‌دهد و جریان الکتریکی بیشتری تولید می‌کند. نتایج این کار امکان تولید ژنراتورهای تریبوالکتریک پوشیدنی را برای برداشت انرژی از حرکات بیومکانیکی انسان در پارچه و لباس نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

دستگاه‌های الکترونیکی کم‌مصرف توسط فناوری‌های برداشت انرژی‌های محیطی، نه تنها آن‌ها را از وابستگی به باتری‌های حجیم رهایی می‌بخشد بلکه پایه و اساس توسعه پایدار را در این بازار نسبتاً جدید از نقطه نظر حداقل استفاده از سوخت‌های فسیلی ایجاد می‌کند. منابع انرژی محیطی که می‌توانند به الکتریسیته تبدیل شوند شامل انرژی خورشیدی، الکترومغناطیسی، انرژی حرارتی و مکانیکی است [۱،۲]. هر منبع انرژی مزایای خاص خود را در محیط‌های خاص دارد. ژنراتور تریبوالکتریک یک فناوری نوپا است که برای بازیافت انرژی‌های آزادشده توسط حرکات کوچک بدن مورد توجه بسیار قرار گرفته است [۲،۳]. اساس ژنراتورهای تریبوالکتریک بر مبنای جمع‌آوری بار از طریق القای الکترواستاتیک و الکتریسیته

با توجه به افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بحران انرژی، تولید انرژی از محیط پیرامون امری ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی در سال‌های اخیر حدود یک میلیارد نفر در سراسر جهان دارای گوشی‌های هوشمند هستند. علاوه بر گوشی‌های هوشمند، پیش‌بینی شده است که تجهیزات الکترونیکی پوشیدنی، از محدوده محصولات پزشکی و تناسب‌اندام فراتر رفته است و حتی عینک، ساعت و مواردی از این دست را نیز پوشش می‌دهند. همه‌ی این دستگاه‌ها روی هم‌رفته بار مضاعفی بر مصرف انرژی وارد می‌کنند. با این وجود توان پایین و کم‌مصرف بودن این دستگاه‌ها باعث شده است که امکان ایجاد منبع تغذیه خود-پایدار فراهم شود. شارژ

کلمات کلیدی

ژنراتور تریبوالکتریک،
حالت عمودی تماس-جدایی،
حالت لغزشی-جانبی،
لباس،
منسوج پوشیدنی

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: valipouri@iut.ac.ir

پارچه مخمل تجاری با استفاده از نانولوله کربنی (CNT) و پلی (اتیلنیمین) (PEI) پیشنهاد کردند. آن‌ها ولتاژ و جریان خروجی را بیش از ۱۰ برابر در محتوای اصلاح کننده کمتر از ۱ درصد وزنی بهبود بخشیدند. آن‌ها بیان کردند که این ژنراتور تریبوالکتریک کاملاً قابل شستشو بود و از استحکام عالی و ثبات طولانی مدت برخوردار بود و حداکثر چگالی توان W/m^2 ۳/۲ در خروجی خارجی $5 \Omega \times 10^6$ را به دست می‌آوردند. زو و همکارا ن در سال ۲۰۱۸ [۱۴]، یک جوراب برای برداشت انرژی و حس کردن سیگنال‌های مختلف فیزیولوژیکی، مانند راه رفتن، نیروی تماس، سطح عرق و غیره، تولید کرده‌اند.

آن‌ها از PEDOT: PSS (نانوژنراتور تریبوالکتریک پارچه ای) و تراشه های پیزوالکتریک زیر کونات تیتانات سرب (PZT) استفاده کرده‌اند و توان خروجی ۱،۷۱ میلی وات از جوراب را در ۲ هرتز و مقاومت بار ۵۹،۷ مگا اهم به دست آوردند.

هدف اصلی پژوهش حاضر، استفاده از پارچه معمولی به عنوان مؤلفه اصلی ساخت ژنراتور تریبوالکتریک پوشیدنی است به گونه‌ای که حرکات با فرکانس پایین انسان در همه حال مانند پیاده‌روی و زندگی روزمره می‌تواند به طور مؤثر ذخیره شود. همچنین در این مقاله به بررسی تأثیر حالت‌های اساسی قرارگیری ژنراتورهای تریبوالکتریک به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در عملکرد ژنراتورهای تریبوالکتریک، نوع پارچه و حالت‌های اساسی پرداخته شده است.

۲- بخش تجربی

۳-۲- مواد

مشخصات پارچه‌های مورد استفاده (شکل ۱) در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. تراکم، وزن واحد سطح و ضخامت پارچه‌ها به ترتیب با استفاده از پودشمار، ترازوی با دقت 0.0001 g (مدل 210Libror)، ژاپن) و ضخامت سنج پارچه با دقت 0.1 mm (مدل 8004-CH، سوئیس) اندازه‌گیری شده است. رده‌بندی مواد با توجه به توانایی آن‌ها در از دست دادن یا به دست آوردن الکترون، سری تریبوالکتریک نام دارد. هر چه به سمت انتهای منفی سری تریبوالکتریک می‌رویم، اجسام الکترون خواهی بیشتری دارند.

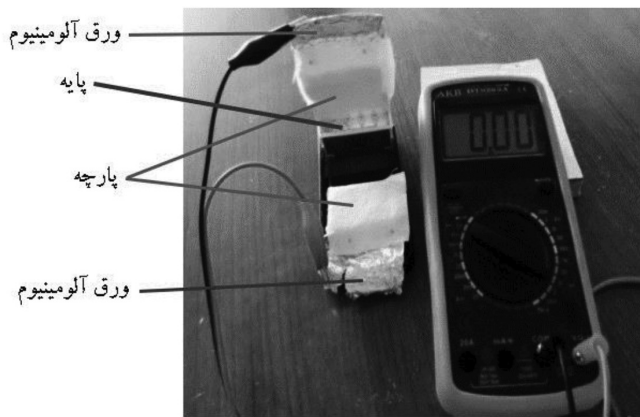
تماسی موجود در همه جا است. به محض تماس فیزیکی دو ماده‌ی متفاوت (عمدتاً پلیمرها)، بار الکترواستاتیک از طریق انتقال یون و یا الکترون، بر روی سطح پلیمر تریبوالکتریک ایجاد می‌شود [۴، ۵]. در نتیجه‌ی تماس فیزیکی، دو ماده باردار می‌شوند به گونه‌ای که یکی از آن‌ها دارای بار مثبت و دیگری دارای بار منفی خواهد بود. بارهای الکتریکی تولید شده در اثر تریبوالکتریک، تنها محدود به سطح مواد هستند. بارهای تریبوالکتریک ساکن بوده و از این رو در فرایند تولید توان الکتریکی، نیاز به الکترودهای رسانا است که در پشت دو ماده تریبوالکتریک قرار می‌گیرند و از طریق القای الکترواستاتیک، بارهای القایی روی الکترودهای رسانای پشتی منجر به برقراری جریان خروجی می‌شود. اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکتروود منجر به شارش بارهای القایی می‌شود [۶]. تراکم بار ایجاد شده در سطح پس از چندین چرخه‌ی تماس - جداسازی تثبیت می‌شود. خروجی‌های الکتریکی حاصله (به عنوان مثال، ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه) به طور خطی به چگالی بار سطح بستگی دارند [۷].

پیشرفت‌های بزرگی در زمینه‌ی دستیابی به ژنراتورهای تریبوالکتریک با توان الکتریکی بالا از طریق بهینه‌سازی مورفولوژی سطح در مقیاس نانو و میکرو [۸، ۹] شیمی سطح [۱۰] و چیدمان دستگاه [۱۱] حاصل شده است. یکی از رویکردهای بسیار جذاب و کاربردی برای به کنترل در آوردن توان تریبوالکتریک، ایجاد تریبوالکتریک ترکیب شده با البسه است که قادر به برداشت مداوم انرژی حرکتی بدن است. در حالت ایده‌ال، چنین پوشاک هوشمندی به عنوان منبع تغذیه پوشیدنی برای لوازم الکترونیکی کم‌مصرف به کار خواهد رفت. نکته‌ی جالب این است که پارچه‌ها دارای زبری طبیعی و تراکم بالای گروه‌های عاملی متنوع بر روی سطح خود هستند که در صورت استفاده‌ی صحیح از آن‌ها می‌تواند منجر به تراکم بالای بار سطحی شود. از این رو بررسی اثر تریبوالکتریک در پارچه‌هایی که مناسب برای تهیه البسه هستند، ارزشمند خواهد بود.

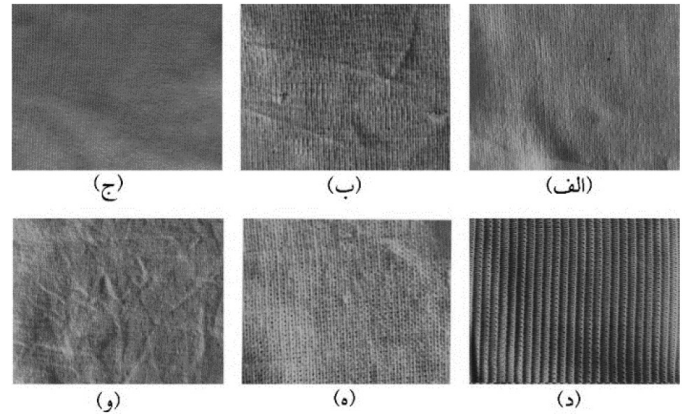
لیو و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۲]، یک روش اندازه‌گیری جدید (سیستم اندازه‌گیری تریبوالکتریک حالت کشویی) برای چگالی بار مؤثر مواد متخلخل و بسیار تغییر شکل مانند پارچه‌های نساجی ارائه داده‌اند. آن‌ها تأثیرات ساختاری پارچه‌های ساخته شده از بیست و یک نوع الیاف پلیمری شامل ضریب اصطکاک، زبری سطح، تراکم پذیری و سطح تماس تحت فشار متراکم را مورد بررسی قرار دادند. فنگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۳]، یک رویکرد کارآمد برای افزایش عملکرد تریبوالکتریک

جدول ۱- مشخصات پارچه‌های مورد استفاده

سری تریبوالکتریک مواد (nC/J)	ساختار پارچه	ضخامت (mm)	وزن واحد سطح (g/m ²)	تراکم		جنس پارچه
				پود (رج/cm)	تار (ردیف/cm)	
.....	تاری پودی	۰/۹۱	۲۷۸	۲۲	۳۲	نایلون
+۷ nC/J	حلقوی	۰/۳	۹۲/۵	۱۴	۳۴	ویسکوز
-۴۰ nC/J	حلقوی	۰/۲۳	۱۰۷	۱۸	۲۳	پلی‌استر
-۱۰ nC/J	حلقوی	۰/۳۹	۱۳۹	۲۲	۲۴	آکرلیک
+۵ nC/J	حلقوی	۰/۳۲	۱۱۲	۲۰	۲۶	پنبه
-۱۹۰ nC/J	حلقوی	۰/۳۳	۱۲۹	۱۹	۲۷	پنبه آب‌گریز



شکل ۲- ژنراتور تریبوالکتریک در حالت عمودی تماس_جدایی عمودی



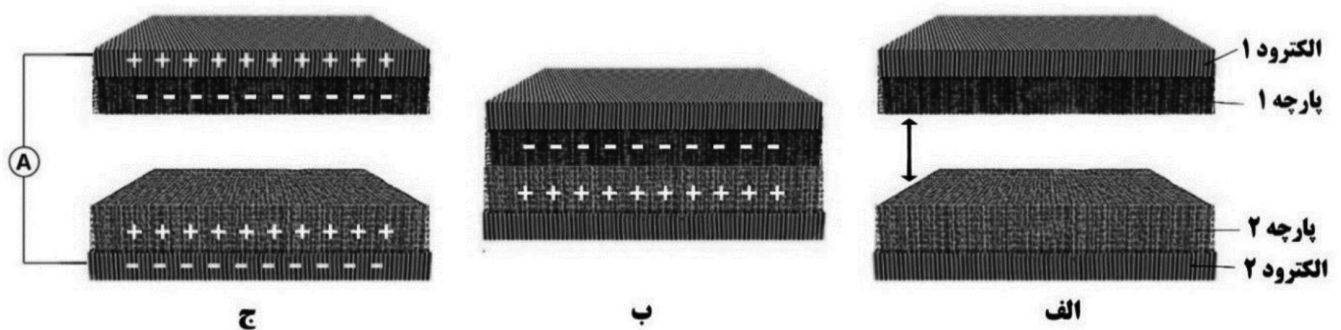
شکل ۱- پارچه‌های مورد آزمایش در این تحقیق: (الف) پارچه نایلون، (ب) پارچه ویسکوز، (ج) پارچه پلی‌استر، (د) پارچه آکرلیک، (ه) پارچه پنبه، (و) پارچه پنبه آب‌گریز شده

تیغه‌های قیچی است. بر روی صفحات تخت پایه، ورقه‌ی آلومینیومی تعبیه‌شده است که نقش الکترودهای رسانا را ایفا می‌نماید؛ و سپس پارچه‌ها بر روی الکترودهای رسانا قرار می‌گیرد. تصویر شماتیک این ژنراتور در شکل ۳ نشان داده‌شده است.

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در حالت دوم یعنی حالت لغزشی جانبی، نیز همانند حالت تماس_جدایی عمودی دو سطح تریبوالکتریک به همراه الکترودهای رسانا وجود دارد؛ با این تفاوت که دو سطح پارچه‌ای در تماس، یک لغزش نسبت به یکدیگر دارند. وجود لغزش سطوح بر روی یکدیگر منجر به ایجاد بار الکتریکی در دو سطح می‌شود. ساختار ظاهری حالت لغزشی جانبی عیناً مشابه ساختار قبلی است با این تفاوت که دو سطح با هیچ لولایی به هم متصل نمی‌شوند، از طرف دیگر تماس فیزیکی بین دو سطح به صورت تماس اصطکاکی است. تصویر شماتیک این ژنراتور در شکل ۵ نشان داده‌شده است. با اعمال فرکانس حرکتی به هر دو ژنراتور، مقدار اختلاف پتانسیل الکتریکی و جریان خروجی توسط مولتی‌متر دیجیتال مدل DT9205A اندازه‌گیری شد.

۲-۴-۲- ارزیابی کارایی ژنراتور

در این تحقیق عملکرد ژنراتور تریبوالکتریک بدین صورت ارزیابی می‌شود:



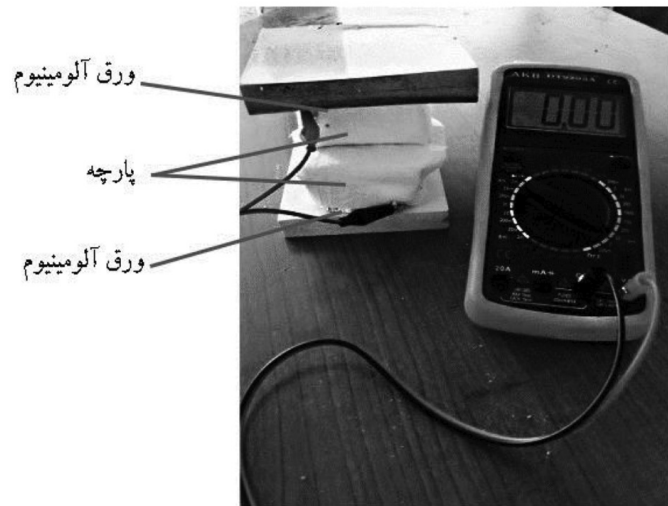
شکل ۳- تصویر شماتیک ژنراتور تریبوالکتریک در حالت عمودی تماس_جدایی عمودی: (الف) دو سطح بالا و پایین قبل از تماس با یکدیگر، (ب) تماس عمودی پارچه‌ها با یکدیگر، (ج) انتقال بار الکتریکی از پارچه به الکترودها پس از جدایی دو سطح

سایر پارچه‌های مورد آزمایش است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین ولتاژ (1 V) و جریان ($1 \mu\text{A}$)، توسط پارچه پنبه‌ای آب‌گریز ایجاد شده است. در ادامه ویسکوز و پنبه نیز منجر به ایجاد ولتاژ و جریان شده‌اند. در سایر پارچه‌ها، جریان الکتریکی برقرار نشده است. پارچه پلی‌استر در نیمه پایین سری تریبوالکتریک قرار دارد و میزان تمایل آن به دریافت الکترون برابر با -40 nC/J است، در حالی که پارچه پنبه آب‌گریز که با مواد فلئوئورکربن تکمیل شده است، به دلیل حضور ترکیبات فلئوئور که در پایین‌ترین سطح سری تریبوالکتریک قرار دارد، به مقدار -190 nC/J تمایل به دریافت الکترون دارد.

در مقایسه با ویسکوز با تمایل دریافت الکترون برابر با $+7 \text{ nC/J}$ و پنبه برابر با $+5 \text{ nC/J}$ ، فاصله‌ی پلی‌استر و پنبه آب‌گریز با سطح فلئوئورینه شده در سری تریبوالکتریک مقدار است و بعد از آن به ترتیب جفت پلی‌استر ویسکوز و سپس پلی‌استر پنبه. ژنراتور تریبوالکتریک که متشکل از یک لایه پارچه پنبه به صورت سطح ثابت و لایه‌ی دیگر شامل یکی از سایر پارچه‌های ذکر شده از قبل مورد ارزیابی قرار گرفته است و بیشینه ولتاژ و جریان در شکل ۷ ارائه شده است. در این بین جفت پنبه نایلون، بیشترین مقدار ولتاژ ($14/37$) و جریان الکتریکی ($13 \mu\text{A}$) را ایجاد نموده است. در سری تریبوالکتریک پنبه تقریباً در وسط قرار دارد و ذکر شد که تمایل پنبه به از دست دادن الکترون برابر با $+5 \text{ nC/J}$ است و جزء مواد دوقطبی ضعیف با سطح تقریباً خنثی محسوب می‌شود، در حالی که نایلون یک پارچه به شدت مثبت است و تمایل بسیار زیادی به از دست دادن الکترون دارد؛ بنابراین بر مبنای سری تریبوالکتریک، می‌توان انتظار داشت که بیشترین ولتاژ بیشینه توسط این جفت ایجاد شود. شکل ۸ نشان دهنده‌ی خروجی ولتاژ بیشینه و جریان الکتریکی ژنراتور تریبوالکتریک متشکل از پارچه ویسکوز به عنوان سطح ثابت و سایر پارچه‌ها به عنوان سطح متحرک است. انتظار می‌رود که بر اساس سری تریبوالکتریک، جفت‌های ویسکوز-آکرلیک و ویسکوز-پلی‌استر بیشترین خروجی را داشته باشند. ویسکوز ماده‌ی تریبوالکتریک است که در نیمه بالایی سری تریبوالکتریک قرار گرفته است و تمایل به از دست دادن الکترون دارد و در مقابل آکرلیک -10 nC/J و پلی‌استر در نیمه پایین سری تمایل به دریافت الکترون دارند. بیشترین مقدار ولتاژ مربوط به جفت ویسکوز-آکرلیک ($10/47$) و جریان الکتریکی ($2 \mu\text{A}$) است.

شکل ۹ نشان دهنده‌ی خروجی ولتاژ بیشینه و جریان الکتریکی ژنراتور

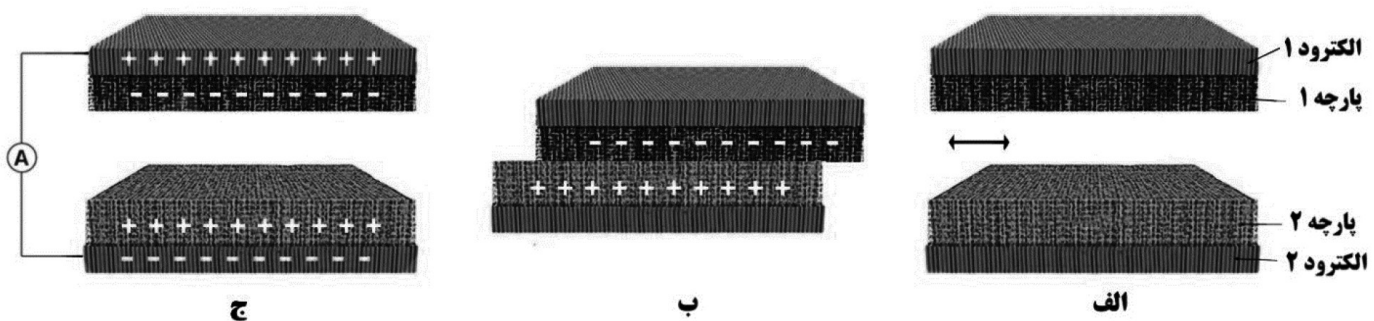


شکل ۴- ژنراتور تریبوالکتریک در حالت لغزشی جانبی

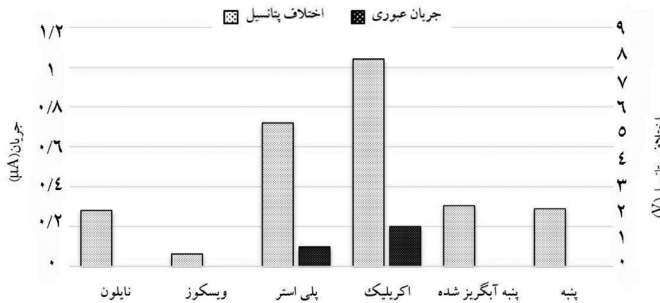
دو قطعه‌ی رسانا به مولتی‌متر وصل می‌شود و به‌طور مکرر سطح پارچه‌ها باهم تماس داده می‌شود و سپس جدا می‌شوند و در هر لحظه میزان اختلاف پتانسیل الکتریکی و جریان عبوری ثبت می‌شود. فرکانس اعمالی تماس-جدایی عمودی ۴ هرتز است. این عملیات با ۷ نوع پارچه انجام پذیرفت و در هر مرحله یکی از سطوح به‌عنوان الکتروود ثابت و سطح دیگر، الکتروود متحرک در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری ولتاژ و جریان برای هر نمونه ۵ بار تکرار شده است. ژنراتور با طراحی لغزشی جانبی نیز به همین ترتیب مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این چیدمان، فرکانس لغزش یک سطح بر روی سطح دیگر ۴ هرتز در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

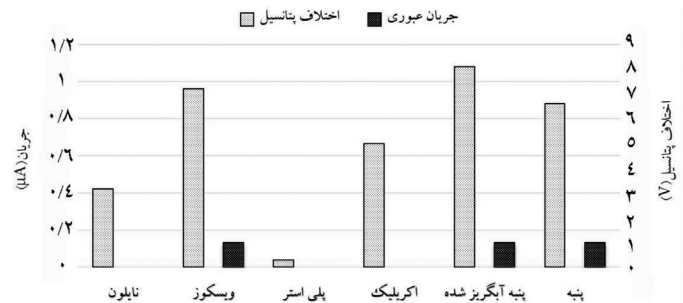
نتایج اولیه نشان داده است که حالت لغزشی جانبی سریع‌تر پاسخ می‌دهد و جریان الکتریکی بیشتری تولید می‌کند. بنابراین نتایج گزارش شده در ادامه مربوط به حالت لغزشی جانبی است. در شکل ۶ نمودار مقادیر ولتاژ بیشینه و جریان حاصل از ژنراتور تریبوالکتریک متشکل از یک لایه پارچه پلی‌استر به‌عنوان سطح ثابت و لایه دیگر شامل یکی از



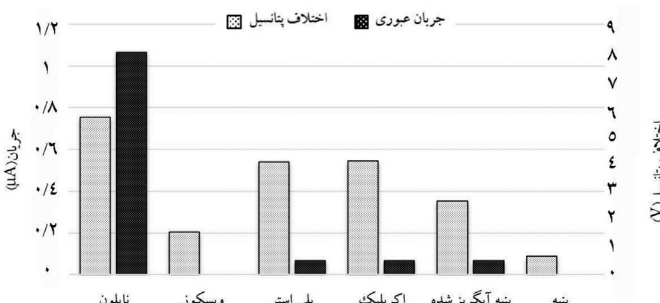
شکل ۵- تصویر شماتیک ژنراتور تریبوالکتریک در حالت لغزشی جانبی: الف) دو سطح بالا و پایین قبل از تماس با یکدیگر، ب) تماس افقی پارچه‌ها با یکدیگر، ج) انتقال بار الکتریکی از پارچه به الکتروود پس از جدایی دو سطح



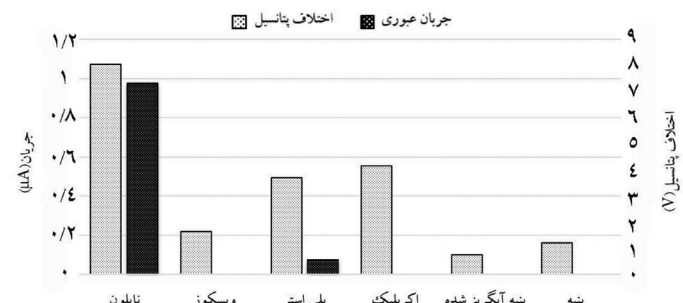
شکل ۸- مقادیر ولتاژ بیشینه و جریان حاصل از ژنراتور تریبوالکتریک متشکل از پارچه ویسکوز به‌عنوان سطح ثابت



شکل ۶- مقادیر ولتاژ بیشینه و جریان حاصل از ژنراتور تریبوالکتریک متشکل از پارچه پلی‌استر به‌عنوان سطح ثابت



شکل ۹- مقادیر ولتاژ بیشینه و جریان حاصل از ژنراتور تریبوالکتریک متشکل از پارچه پنبه آب‌گریز به‌عنوان سطح ثابت



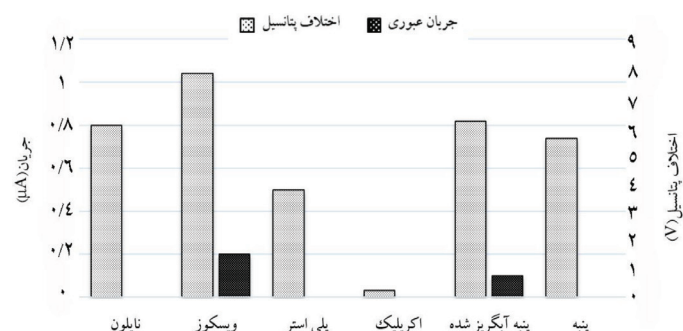
شکل ۷- مقادیر ولتاژ بیشینه و جریان حاصل از ژنراتور تریبوالکتریک متشکل از پارچه پنبه به‌عنوان سطح ثابت

داشته باشد. ویسکوز ماده‌ی تریبوالکتریکی است که در نیمه بالایی سری تریبوالکتریک قرار گرفته است و تمایل به از دست دادن الکترون دارد و در مقابل آکرلیک (-1.0 nC/J) در نیمه پایین سری تمایل به دریافت الکترون دارد. بیشترین مقدار ولتاژ مربوط به جفت آکرلیک و ویسکوز ($1.0/47$) و جریان الکتریکی ($2 \mu\text{A}$) است.

۴- نتیجه‌گیری

ذخیره انرژی ایجادشده به‌واسطه انرژی‌های جنبشی در پارچه، برای استفاده از آن در وسایل الکترونیکی پوشیدنی و شارژ دستگاه الکترونیکی، از طریق ژنراتورهای تریبوالکتریک امکان‌پذیر است. از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در عملکرد ژنراتورهای تریبوالکتریک، نوع پارچه و حالت‌های اساسی قرارگیری آن می‌باشد. در این مطالعه، ژنراتورهای تریبوالکتریک با استفاده از پارچه‌های نایلون، پلی‌استر، پنبه، پنبه آب‌گریز شده، آکرلیک و ویسکوز طراحی شدند. در هر ژنراتور یک پارچه به‌عنوان سطح ثابت در نظر گرفته شد تا اختلاف پتانسیل و جریان عبوری بیشتری حاصل شود. این ژنراتورها تحت نیروی مکانیکی با عمل تماس جدایی عمودی و لغزشی-جانبی قرار گرفتند. این امر منجر به القای الکترواستاتیک بار الکتریکی و در نتیجه تولید بار الکتریکی گردید. نتایج نشان داد که در بین پارچه‌های مورد آزمایش، نایلون، پنبه و پنبه آب‌گریز شده، در تماس با پارچه‌های دیگر، اختلاف پتانسیل و جریان عبوری بیشتری را نشان دادند. همچنین با قرارگیری ژنراتور در حالت لغزشی-جانبی نسبت به حالت عمودی تماس-جدایی عمودی، نتایج بهتر و بالاتری حاصل شد.

تریبوالکتریک متشکل از یک لایه پارچه پنبه آب‌گریز به‌صورت سطح ثابت و لایه‌ی دیگر شامل یکی از سایر پارچه‌های ذکر شده است. در این بین، جفت پنبه آب‌گریز نایلون بیشترین مقدار ولتاژ (1.67) و جریان الکتریکی ($1.1/3 \mu\text{A}$) را ایجاد نموده است. ترکیبات فلئوئر که به‌عنوان تکمیل ضد آب پارچه پنبه‌ای بکار گرفته شده است در انتهای سری تریبوالکتریک قرار دارند و تمایل شدیدی به گرفتن الکترون دارند و در مقابل سری به شدت مثبت بوده و تمایل به از دست دادن الکترون دارد؛ بنابراین بر مبنای سری تریبوالکتریک، می‌توان انتظار داشت که بیشترین ولتاژ بیشینه توسط این جفت ایجاد شود. همچنین جریان الکتریکی قابل توجهی توسط این ژنراتور جاری شده است. شکل ۱۰ نشان‌دهنده خروجی ولتاژ بیشینه و جریان الکتریکی ژنراتور تریبوالکتریک متشکل از پارچه آکرلیک به‌عنوان سطح ثابت و سایر پارچه‌ها به‌عنوان سطح متحرک است. انتظار می‌رود که بر اساس سری تریبوالکتریک، جفت آکرلیک و ویسکوز بیشترین خروجی را



شکل ۱۰- مقادیر ولتاژ بیشینه و جریان حاصل از ژنراتور تریبوالکتریک متشکل از پارچه آکرلیک به‌عنوان سطح ثابت

مراجع

- letters, no. 6, pp. 3109-3114, 2012.
9. W. Seung et al., Nanopatterned textile-based wearable triboelectric nanogenerator, *ACS nano*, no. 4, pp. 3501-3509, 2015.
 10. H. Y. Li, L. Su, S. Y. Kuang, C. F. Pan, G. Zhu, and Z. L. Wang, Significant enhancement of triboelectric charge density by fluorinated surface modification in nanoscale for converting mechanical energy, *Advanced Functional Materials*, no. 35, pp. 5691-5697, 2015.
 11. G. Cheng, Z.-H. Lin, L. Lin, Z.-I. Du, and Z. L. Wang, Pulsed nanogenerator with huge instantaneous output power density, *Acs Nano*, no. 8, pp. 7383-7391, 2013.
 12. Liu, S., Zheng, W., Yang, B., and Tao, X., "Triboelectric charge density of porous and deformable fabrics made from polymer fibers", *Nano energy*, vol. 53, pp. 383-390, 2018.
 13. Feng, P.-Y. et al., "Enhancing the Performance of Fabric-Based Triboelectric Nanogenerators by Structural and Chemical Modification", *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 13, no. 14, pp. 16916-16927, 2021.
 14. Zhu, M. et al., "Self-powered and self-functional cotton sock using piezoelectric and triboelectric hybrid mechanism for healthcare and sports monitoring", *ACS nano*, vol. 13, no. 2, pp. 1940-1952, 2019.
 1. D. J. Norris and E. S. Aydil, Getting Moore from solar cells, *Science*, no. 6107, pp. 625-626, 2012.
 2. M. Ha, J. Park, Y. Lee, and H. Ko, Triboelectric generators and sensors for self-powered wearable electronics, *Acs Nano*, no. 4, pp. 3421-3427, 2015.
 3. J. Zhong et al., Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication, *ACS nano*, no. 6, pp. 6273-6280, 2014.
 4. L. S. McCarty and G. M. Whitesides, Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets, *Angewandte Chemie International Edition*, no. 12, pp. 2188-2207, 2008.
 5. C. Liu and A. J. Bard, Electrostatic electrochemistry at insulators, *Nature materials*, no. 6, pp. 505-509, 2008.
 6. Z. L. Wang, L. Lin, J. Chen, S. Niu, and Y. Zi, Eds. *Triboelectric nanogenerators*. Springer, 2016.
 7. S. Niu et al., Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source, *Energy & Environmental Science*, no. 12, pp. 3576-3583, 2013.
 8. F.-R. Fan, L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, and Z. L. Wang, Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films, *Nano*

Evaluating the Triboelectric Performance of wearable Textiles in the conversion of Mechanical Energy to Electrical Energy

Farzaneh Karimdehnavi, Afsaneh Valipuri*, Afifeh Karimian

Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 83111-84156, Iran

Abstract

Employing triboelectric generators is a very interesting and practical approach to store the created energy in textiles. Harvesting human-motion energy and converting/storing it in the form of electrical energy is a promising method in wearable electronics in which the textile fabric is the main component of the system. In this study, the triboelectric properties of several fabrics common in garment manufacturing were investigated. In addition, the effect of the fundamental placement modes of triboelectric generators (i.e., the lateral sliding mode and contact-separation mode) was studied. Nylon, cotton, and hydrophobic cotton fabrics in contact with other fabrics showed a greater potential difference and electric current. Moreover, the lateral-sliding mode responded faster and generated a higher electric current. The results of this work showed the possibility of producing wearable triboelectric generators for harvesting energy from human biomechanical movements in fabrics and clothing.

Keywords

triboelectric generator,
 lateral-sliding mode,
 contact-separation mode,
 garment,
 wearable textile

(* Address Correspondence to A. Valipuri, E-mail: valipouri@iut.ac.ir