مقاله مروری

فصلنامه علمی
سال نهم، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۴، تابستان ۱۴۰۳
Vol. 9, No. 2, Issue No. 34
Summer 2024, Quarterly
صفحه ۸۸-۷۷

Iran Polymer Technology: Research and Development

نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر

سارا تراشی*
تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده ...

فناوری نانومولدهای برق تریبوالکتریک، انقلابی در تولید انرژی پاک و پایدار به وجود آورده است. این دستگاه‌های پیشرفته، با استفاده از اثر تریبوالکتریک، انرژی مکانیکی را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند و کاربردهای متنوعی در دنیای فناوری دارند. اکثر مواد تماسی نانومولدهای تریبوالکتریک از پلیمرها تشکیل شده‌اند که می‌توانند دارای منشأ مصنوعی یا طبیعی باشند. به‌طورکلی، پلیمرها، به‌دلیل خصوصیات منحصربه‌فردی چون وزن سبک، فرایندپذیری و شکل‌دهی آسان، مقاومت و سختی مناسب و خواص سطحی و ضدمیکروبی قابل تنظیم، به‌عنوان ماده اصلی در ساخت این مولدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله، به بررسی ساختار، عملکرد و مزایای نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر پرداخته می‌شود. همچنین، نقش خصوصیات مختلف پلیمرها بر عملکرد این مولدها مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت، چالش‌ها و مسائل کلیدی موجود در مسیر توسعه و کاربرد این فناوری در صنعت و کاربردهای عملی، به‌خصوص در زمینه‌هایی نظیر سامانه‌های برداشت انرژی، حسگرها و دستگاه‌های الکترونیکی پوشیدنی، به‌طور جامع مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج این کار بر اهمیت و ظرفیت بالای نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر در ایجاد راهکارهای نوین برای رفع چالش‌های انرژی تأکید خواهد داشت و افق‌هایی برای پژوهش‌های پیش رو در این حوزه ترسیم خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی:
نانومولد تریبوالکتریک،
پلیمر،
برداشت انرژی،
حسگر زیستی

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
s.tarashi@ut.ac.ir

۱ مقدمه

تولید برق، یکی از موضوعات کلیدی در دنیای امروز است و روش‌های مختلفی برای دستیابی به این هدف وجود دارد. رایج‌ترین روش، استفاده از نیروگاه‌های سوخت فسیلی است که با سوزاندن سوخت‌هایی مانند گاز یا زغال سنگ، بخار با فشار بالا تولید می‌کنند و از آن برای به حرکت درآوردن توربین‌ها و تولید برق استفاده می‌شود. این روش اگرچه رایج است، اما آلودگی و هزینه‌های زیادی به همراه دارد. در مقابل، روش‌های مبتنی بر انرژی‌های پاک، مانند انرژی خورشیدی و بادی نه‌تنها هزینه کمتری دارند، بلکه به‌دلیل استفاده از منابع طبیعی، پاک و دوستدار محیط زیست هستند. با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد؛ برای مثال، استفاده از انرژی خورشیدی در مناطقی که روزهای آفتابی کمتری دارند، چالش‌برانگیز است. با این حال دنیای فناوری همواره راه‌حل‌های نوینی ارائه می‌دهد و با افزایش تقاضا برای ایجاد منابع انرژی پاک و جایگزین، محققان فناوری‌های مختلفی از جمله سامانه‌های فتوولتائیک، دستگاه‌های پیزوالکتریک، مبدل‌های ترموالکتریک و نانومولدها را با هدف تولید انواع انرژی‌های تجدیدپذیر از طریق تبدیل انرژی‌های محیط اطراف به انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار دادند [۱]. در این میان، نانومولدهای تریبوالکتریک (TENG) به‌دلیل داشتن صرفه اقتصادی، سبک بودن، سهولت در ساخت، بازده تبدیل انرژی و توان خروجی مطلوب، بسیار مورد توجه قرار گرفته است و به‌عنوان فناوری نوظهور، از جمله مهم‌ترین سامانه‌های تولیدکننده انرژی پاک شناخته می‌شود که انقلابی در تولید برق ایجاد کرده‌اند. این فناوری به ما اجازه می‌دهد تا از هر حرکتی، حتی حرکت خارهای بیابانی ناشی از وزش باد یا تنفس انسان، برق تولید کنیم. این روش نه‌تنها محدودیت‌های جغرافیایی را از بین می‌برد، بلکه راه را برای استفاده از منابع انرژی بی‌پایان و در دسترس هموار می‌سازد. به عبارتی، نانومولدهای تریبوالکتریک قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی هدررفته محیطی به انرژی الکتریکی را دارند. واژه تریبوالکتریک از کلمه یونانی تریبوس (Tribos) برگرفته شده است و به اصطکاک از طریق سایش اشاره دارد، بنابراین، تریبوالکتریک نانومولدها دارای قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی سایشی یا اصطکاک به انرژی الکتریکی هستند. با توجه به اینکه انرژی‌های مکانیکی سهم قابل ملاحظه‌ای در زندگی روزمره بشر دارد، بنابراین در سال‌های اخیر، ساخت نانومولدهای تریبوالکتریک، توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

اولین نانومولد تریبوالکتریک در سال ۲۰۱۲ به دنیا معرفی شد، اما کارایی آن به حدی پایین بود که نمی‌توانست به‌عنوان فناوری جدید برای کاربردهای عملی استفاده شود. با مطالعات بیشتر در این زمینه، نشان داده شد که نانومولدهای تریبوالکتریک امکان توسعه بیشتر و قابلیت بهره‌برداری انرژی‌های مکانیکی سطح پایین را نیز دارند [۲]. به عبارتی با تغییر در طراحی نانومولدهای تریبوالکتریک، کامپوزیت کردن، بهره‌گیری از مواد جدید و مهندسی سطح آن‌ها می‌توان پیشنهادهای امیدوارکننده‌ای برای افزایش بازده و توان خروجی آن‌ها ارائه کرد. با توجه به اینکه ولتاژ خروجی این منابع در مقایسه با جریان گذرنده از آن‌ها بسیار بالاتر است و تولید برق به شیوه‌ای پایدار و پاک امکان‌پذیر است، بنابراین، گزینه مناسبی برای کاربردهای با ولتاژ بالا محسوب می‌شوند و می‌توان انتظار داشت که در آینده، نانومولدهای تریبوالکتریک جایگزین برق شهری شوند و این بدان معناست که می‌توانیم به سمت آینده‌ای روشن‌تر و سازگارتر با محیط زیست حرکت کنیم. کاربرد این فناوری تنها به تولید انرژی محدود نمی‌شود، برای مثال، می‌توان از این فناوری برای تولید صفحات لمسی شامل آرایه‌هایی از TENG تقویت‌شده و همچنین ساخت TENGهای حساس به دما استفاده کرد [۳].

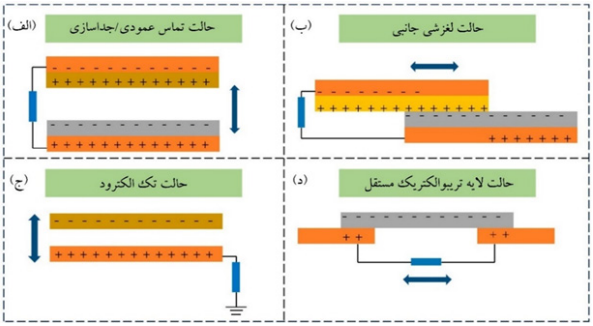
TENGها نیاز به مواد دی‌الکتریک تماسی با خواص تریبوالکتریک مطلوب دارند. به علاوه مواد مورد استفاده در ساخت نانومولدهای تریبوالکتریک می‌بایست قابلیت اصلاح، دوام طولانی‌مدت و انعطاف‌پذیری کافی برای ایجاد سطح تماس مناسب را داشته باشند. مجموعه این ویژگی‌ها غالبا در پلیمرها وجود دارد، بنابراین، اکثر مواد تماسی TENGهای تریبوالکتریک از پلیمرها تشکیل شده‌اند که می‌توانند دارای منشأ مصنوعی یا طبیعی باشند. به‌طور کلی، پلیمرها به‌دلیل مزایای کلیدی مانند وزن سبک، فرایندپذیری و شکل‌دهی آسان، مقاومت و سختی مناسب و خواص سطحی و ضدمیکروبی قابل تنظیم، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. در دهه گذشته، کاربرد پلیمرها در زمینه دستگاه‌های تولید و ذخیره انرژی و ساخت نانومولدهای تریبوالکتریک به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. اولین مواد پلیمری مورد استفاده در ساخت دستگاه تریبوالکتریک، کاپتون و پلی‌استر بود. پس از آن، با گذشت کمتر از یک دهه، کارایی نانومولدهای تریبوالکتریک پلیمری صدها برابر شد. در واقع، پتانسیل پلیمرها برای استفاده به‌عنوان عایق یا دی‌الکتریک، این فرصت را فراهم کرد که بتوان از طریق آلیاژسازی با سایر پلیمرها، افزودن انواع پرکننده‌ها و نانوذرات رسانا، اصلاح شیمیایی و سایر روش‌ها، نانومولدهای تریبوالکتریک پلیمری با خواص قابل تنظیم و کارایی بالا تولید کرد [۴]. از این رو امروزه، بررسی روش‌های جدید برای تولید

دی‌الکتریک‌های نانوکامپوزیتی با گذردهی الکتریکی بالا در حوزه نانومولدهای تریبوالکتریک، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است.

۲ اصول کار نانومولدهای تریبوالکتریک

نانومولدهای تریبوالکتریک دارای ساختار چندلایه‌ای، شامل دو لایه اصطکاکی متفاوت است که دو الکترود پشت لایه‌ها قرار گرفته است. بین این دو لایه اصطکاکی، فاصله‌دهنده‌ای وجود دارد که باعث جدایی آن‌ها می‌شود. به‌طور کلی عملکرد نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر دو پدیده اساسی است: اثر تریبوالکتریک و القای الکترواستاتیک. هنگامی که دو ماده مختلف با هم تماس برقرار می‌کنند، از طریق انتقال الکترون‌ها بین دو ماده، بارهای الکتریکی مخالف در لایه‌های نانومولد تولید می‌شود. در هنگام جدا شدن دو ماده، این بارها منجر به ایجاد اختلاف پتانسیل در طول الکترود می‌شود که اساس انتقال الکترون‌ها از لایه الکترون‌دهنده به لایه الکترون‌گیرنده و در نتیجه تولید برق در TENG را تشکیل می‌دهد [۵].

محققان چهار حالت عملیاتی اصلی را برای قابلیت برداشت انرژی TENG معرفی کرده‌اند که شامل حالت تماس عمودی/جداسازی، حالت لغزشی جانبی، حالت تک‌الکترود و حالت لایه تریبوالکتریک مستقل است (شکل ۱) [۱]. در حالت تماس عمودی/جداسازی، TENG از دو لایه مواد تریبوالکتریک مختلف تشکیل شده است که در جهت عمودی در تماس با یکدیگر قرار گرفته و سپس جدا می‌شوند (شکل ۱ الف). هنگامی که این دو لایه با هم تماس پیدا می‌کنند، به‌دلیل اصطکاک، بارها بین دو سطح تماس منتقل می‌شود و با جدا شدن آن‌ها اختلاف پتانسیل به‌وجود می‌آید که منجر به عبور جریان از مدار خارجی می‌شود. تکرار فرآیند تماس و جداسازی در این حالت، جریان متناوب تولید می‌کند [۶]. حالت لغزشی جانبی، مشابه حالت تماس عمودی/جداسازی است، با این تفاوت که حرکت نسبی لایه‌های تریبوالکتریک در حالت لغزشی جانبی در جهت موازی رخ می‌دهد (شکل ۱ ب). این فرایند منجر به تغییر در ناحیه تماس و تغییرات دوره‌ای در بار می‌شود که در نتیجه آن اختلاف پتانسیل و جریان ایجاد می‌شود [۷]. حالت تک‌الکترودی ساختار ساده‌تری نسبت به دو حالت قبل دارد و در آن تنها یک لایه تریبوالکتریک با یک الکترود در ارتباط است (شکل ۱ ج). در این حالت، جسم متحرک با لایه تریبوالکتریک در تماس قرار می‌گیرد و بار تولید می‌کند. تغییر پتانسیل ایجادشده در این حالت باعث می‌شود بار به سمت الکترود مرجع متصل به زمین جریان یابد. این حالت آزادی حرکت جسم را بیشتر می‌کند و برای حرکات نامنظم یا تصادفی مناسب است [۸]. حالت لایه تریبوالکتریک مستقل شامل یک لایه تریبوالکتریک متحرک است که می‌تواند آزادانه حرکت کند و با دو الکترود ثابت در ارتباط است (شکل ۱ د). حرکت جسم موقعیت نسبی آن را نسبت به الکترودها تغییر می‌دهد و در نتیجه اختلاف پتانسیل و جریان ایجاد می‌کند. این حالت برای کاربردهایی که نیاز به یکپارچگی و دوام زیاد دستگاه دارند مناسب است [۹].



شکل ۱. طرح‌واره چهار پیکربندی عملیاتی اصلی TENG شامل (الف) حالت تماس عمودی/جداسازی، (ب) حالت لغزشی جانبی، (ج) حالت تک‌الکترود و (د) حالت لایه تریبوالکتریک مستقل [۱].

هر یک از این چهار حالت دارای مزایا و کاربردهای منحصربه‌فرد خود است که به TENG اجازه می‌دهد تا انرژی را با توجه به محیط‌ها و نیازهای مختلف برداشت کند. درک و اجرای این حالت‌های عملیاتی به‌طور قابل‌توجهی توسعه فناوری نانومولدهای تریبوالکتریک را در حوزه برداشت انرژی و دستگاه‌های هوشمند پیشرفت داده است.

۳ دسته‌بندی نانومولدهای تریبوالکتریک براساس نوع پلیمر

تغییرات ساختاری و شیمیایی مواد تریبوالکتریک دو جنبه بسیار مهم و اثرگذار در عملکرد آن‌هاست که در پلیمرهای فعال تریبوالکتریک قابل اصلاح است. تغییرات ساختاری و شیمیایی شامل هر تغییری در مورفولوژی TENG و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده فعال تریبوالکتریک است، مانند الگوگذاری (Patterning) که از طریق افزایش مساحت فعال، چگالی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجا که چگالی جریان نقطه ضعف اصلی TENG هاست، این حوزه به‌طور مکرر به‌منظور بهبود کارایی TENG مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰]. علاوه بر این، آنچه کمتر مورد توجه قرار گرفته، این است که می‌توان از طریق مطالعه خواص رئولوژیکی پلیمرها ارتباط میان ویژگی‌های ویسکوالاستیک پلیمرها و نیروهای تریبولوژیکی مانند ایجاد

رزونانس به‌وسیله نیروهای نوسانی را بررسی کرد و به تنظیم و تقویت هر چه بیشتر عملکرد TENG مبتنی بر پلیمر دست یافت. در ساخت نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر از انواع پلیمرهای طبیعی و مصنوعی استفاده می‌شود که هر دسته نگرش عمیقی را در مورد خواص مواد، سازگاری با محیط زیست و کاربردهای عملی آن‌ها ارائه می‌دهد.

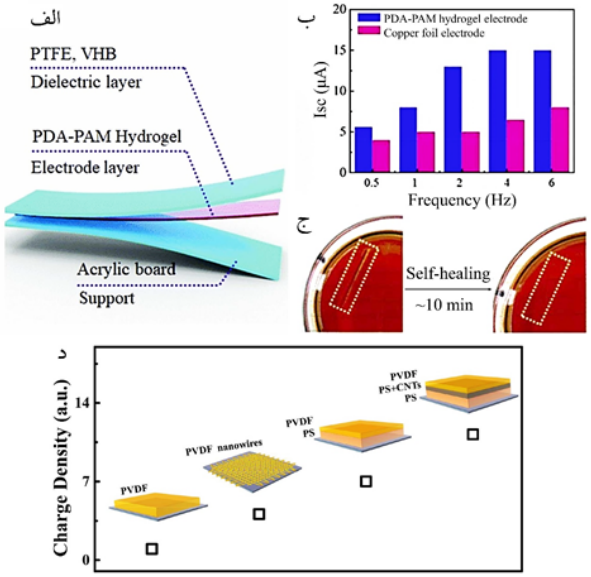
به‌طور کلی، پلیمرهای طبیعی و مصنوعی هر دو مزایای منحصربه‌فرد خود را در توسعه نانومولدهای تریبوالکتریک ارائه می‌دهند. انتخاب انواع پلیمرها نه‌تنها بر کارایی و طول عمر TENG تأثیر می‌گذارد، بلکه ملاحظاتی را در مورد پایداری و اثرات زیست‌محیطی در نظر می‌گیرد. به‌وسیله بررسی تحقیقات انجام‌شده روی TENGهای مبتنی بر پلیمرها، می‌توان به درک دقیقی از این طبقه‌بندی در استفاده از پتانسیل پلیمرها برای کاربردهای متنوع در حوزه انرژی دست یافت.

۳-۱ نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمرهای مصنوعی

پلیمرهای مصنوعی دوام بالا و عملکرد الکتریکی قابل تنظیمی را نشان می‌دهند و قابلیت تطبیق‌پذیری و اصلاح خواص مهندسی و امکان سفارشی‌سازی دارند که آن‌ها را به‌عنوان موادی بسیار امیدوارکننده برای طراحی TENGهای تریبوالکتریک مناسب می‌سازد. نمونه‌های رایج پلیمرهای مصنوعی مورد استفاده در کاربردهای TENG عبارتند از: پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، پلی‌وینیلیدین‌فلوراید، پلی‌اتیلن‌ترفتالات، پلی‌لاکتیک‌اسید و پلی‌اکریلونیتریل و غیره. در واقع، به‌دلیل قابلیت تنظیم ساختار، آرایش مولکولی و ترکیب درصد در پلیمرهای مصنوعی حین سنتز، می‌توان عملکرد TENG را برای کاربردهای خاص، از حسگرهای مقیاس کوچک تا سامانه‌های برداشت انرژی در مقیاس بزرگ، بهینه کرد. به‌عنوان مثال، پلی‌وینیلیدین‌فلوراید به داشتن خواص پیزوالکتریک قوی مشهور است که می توان از آن در ارتباط با اثر تریبوالکتریک برای افزایش بازده تبدیل انرژی بهره برد [۴]. در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است که در ادامه به مرور برخی از این موارد می‌پردازیم.

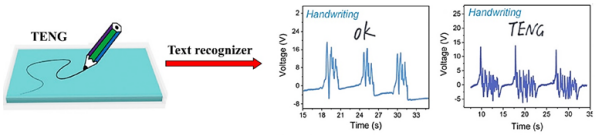
لانگ و همکاران [۱۱]، به‌وسیله پلیمری‌شدن منومر آکریل‌آمید در محلول حاوی پلی‌دوپامین و سدیم‌هیدروکسید، هیدروژل پلی‌آکریل‌آمید/ پلی‌دوپامین تهیه کردند. به‌منظور بررسی عملکرد تریبوالکتریک این هیدروژل مطابق شکل ۲ الف، هیدروژل در یک TENG گنجانده می‌شود. با توجه به نتایج شکل ۲ ب، هنگامی که این هیدروژل به‌عنوان الکترود در TENG قرار می‌گیرد در مقایسه با حالتی که از فویل مسی به‌عنوان الکترود استفاده می‌شود، خروجی الکتریکی بهتری ایجاد می‌کند. به علاوه این هیدروژل توانایی خودترمیمی بسیار خوبی نشان داد و تنها پس از گذشت ۱۰ دقیقه از برش، سطح برش‌خورده ترمیم گشت (شکل ۲ ج). توانایی خودترمیمی این هیدروژل ناشی از تشکیل مجدد پیوندهای هیدروژنی بین پلیمرهای پلی‌آکریل‌آمید و پلی‌دوپامین است.

افزایش چگالی بار تریبوالکتریک روی لایه‌های اصطکاکی، رویکردی کلیدی در بهینه‌سازی خروجی نانومولدهای تریبوالکتریک محسوب می‌شود. در این راستا در تحقیقی دیگر گوی و همکاران [۱۲]، سازوکار ذخیره بار تریبوالکتریک در لایه‌های اصطکاکی شامل پلی‌استایرن و نانولوله‌های کربن در پلی‌وینیلیدین‌فلوراید را مطالعه کردند و تأثیر عملکرد حامل‌ها در فرایند ذخیره بار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ساختار کامپوزیتی در لایه اصطکاکی، می‌تواند توزیع عمقی بارهای تریبوالکتریک را تنظیم کرده و عملکرد TENG را بهبود بخشد. به‌طوری‌که براساس شکل ۲ د، لایه اصطکاکی کامپوزیتی، چگالی بار تریبوالکتریک را تا ۱۱/۲ برابر نسبت به لایه اصطکاکی پلی‌وینیلیدین‌فلوراید خالص، افزایش می‌دهد. ماندگاری طولانی الکترون‌ها در این لایه، به‌دلیل وجود سطوح تله الکترونی فراوان



شکل ۲ (الف) قرارگیری هیدروژل بین دو لایه پلی‌ترا فلوئورواتیلن و بوتیرونیتریل به‌صورت ساندویچی به‌منظور تشکیل TENG، به‌منظور ایجاد چسبندگی بهتر، از نوار چسب بسیار چسبنده (VHB) برای لایه پلی‌ترا فلوئورواتیلن استفاده می‌شود. (ب) مقایسه خروجی الکتریکی هیدروژل و فویل مسی. (ج) بررسی توانایی خودترمیمی هیدروژل [۱۱]. (د) اثرات بهبود ساختارهای مختلف لایه اصطکاکی کامپوزیتی [۱۲].

در پلی‌استایرن است.
لو و همکاران [۱۳] اخیراً TENG مبتنی بر پلی‌وینیل‌الکل/ نانوصفحات مکسین را معرفی کردند که دارای ویژگی‌های برجسته‌ای چون روش ساخت آسان، عملکرد خروجی بالا و کاربردهای متنوع است. نتایج نشان داد، افزودن نانوصفحات مکسین از طریق ایجاد اتصالات عرضی با پلیمر، انعطاف‌پذیری و استحکام کششی را بهبود می‌بخشد. نانوصفحات مکسین همچنین میکروکانال‌هایی را روی سطح تشکیل می‌دهند که نه‌تنها رسانایی پلیمر را با بهبود انتقال یون‌ها افزایش می‌دهد، بلکه خروجی تریبوالکتریک اضافی را از طریق سازوکار پتانسیل ارتعاش جریان ایجاد می‌کند. این طراحی نوآورانه، ولتاژ قابل‌توجهی تا ۲۳۰ ولت را در حالت تک‌الکترود فراهم می‌کند. به‌علاوه، این TENG منعطف، قابلیت کشش تا ۲۰۰ درصد طول اصلی خود را دارد و رابطه افزایشی یکنواخت بین طول قابل کشش و ولتاژ اتصال کوتاه را نشان می دهد. این گروه در نهایت نشان داد که نانومولد حاصل به‌طور بالقوه می‌تواند به‌عنوان پد نوشتاری عمل کند و قادر به شناسایی ورودی‌های دست‌نویس است؛ به‌طوری‌که، سیگنال‌های ولتاژ متمایزی را از اشکال، اعداد و حروف مختلف تولید کند. این امر به‌طور بالقوه روشی جدید برای تشخیص دست‌خط افراد ارائه می‌دهد که در ترکیب با یادگیری ماشین، می‌تواند در رمزگذاری و تشخیص متن انقلابی ایجاد کند. همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، الگوهای ولتاژ خروجی متون نوشته توسط توسط یک شخص، کاملاً تکرارپذیر است.
در پژوهشی دیگر، چن و همکاران [۱۴] ویژگی‌های تریبوالکتریک پلیمرهای مصنوعی پلی‌لاکتیک اسید و کوپلیمر پلی (لاکتیک-گلیکولیک اسید) و آلیاژ این دو پلیمر را بررسی کردند. مشخص شد که آلیاژ این دو پلیمر دارای عملکرد الکتریکی و تریبوالکتریک برجسته و استحکام مکانیکی مناسب است. همچنین قابلیت تجزیه‌پذیری به‌وسیله آب شور دریا را دارد و پس از نه ماه به‌طور کامل در آب دریا تجزیه می‌شود. به‌منظور بررسی عملکرد تریبوالکتریک در این تحقیق، صفحه‌ی توخالی TENG طراحی شد که در آن آلیاژ پلی‌لاکتیک اسید و کوپلیمر پلی (لاکتیک-گلیکولیک اسید) به‌عنوان لایه الکتریکی

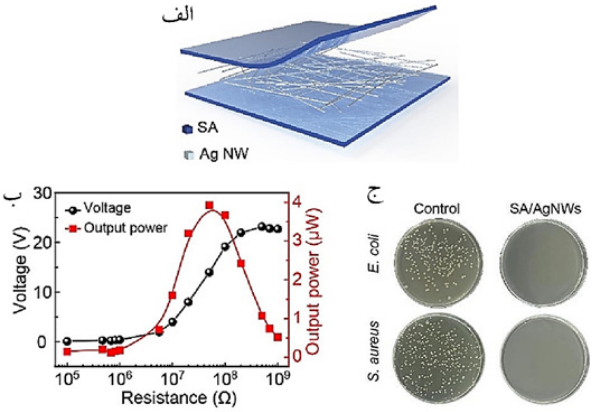


شکل ۳ استفاده از TENG مبتنی بر پلی‌وینیل‌الکل/ نانوصفحات مکسین به‌عنوان پد نوشتاری برای تشخیص متن [۱۳].

و منیزیم به‌عنوان الکترود مورد استفاده قرار گرفت. نشان داده شد این نانومولد تریبوالکتریک توانایی تبدیل انرژی ارتعاشی امواج آب را به الکتریسیته دارد. TENG طراحی‌شده در این کار رویکرد پاک و بدون آسیب‌های زیست‌محیطی برای بهره‌برداری از انرژی امواج دریا و تأمین انرژی الکتریسیته برای تجهیزات دریایی را ارائه می‌دهد.

۳-۲ نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمرهای طبیعی

تا به امروز بیشتر پلیمرهای مورد استفاده در TENGها، پلیمرهای مصنوعی بودند که غالباً تجزیه‌پذیر نیستند و می‌توانند مواد شیمیایی مضری را در محیط آزاد کنند. از این رو، در سال‌های اخیر، علاقه قابل‌توجهی به استفاده از پلیمرهای طبیعی در ساخت نانومولدهای تریبوالکتریک به‌وجود آمده است. به‌طور کلی، پلیمرهای طبیعی از منابع زیستی به دست می‌آیند و پایداری و زیست‌سازگاری مطلوبی را ایجاد می‌کنند. موادی مانند کیتوسان، سلولز و فیبروئین ابریشم به‌دلیل ساختار مولکولی ذاتی خود، خواص تریبوالکتریک منحصربه‌فردی دارند. به‌عنوان مثال، کیتوسان، به‌دلیل ویژگی‌های زیست‌تخریب‌پذیری و الکتریکی، برای ساخت دستگاه‌های پوشیدنی و کاربردهای سازگار با محیط‌زیست مناسب است. به‌طور مشابه، سلولز، به‌دلیل فراوانی و تجدیدپذیری، عملکرد امیدوارکننده‌ای را در برداشت انرژی نشان می‌دهد و در عین حال تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند. استفاده از این پلیمرهای طبیعی نه‌تنها کارایی TENG¬ها را افزایش می‌دهد، بلکه در راستای اهداف پایداری جهانی (Global Sustainability) نیز است [۱۵].
در این راستا، لی و همکاران [۱۶] اخیراً فناوری نوآورانه را در زمینه انرژی تجدیدپذیر و حسگرهای لمسی معرفی کردند. آن‌ها TENG مبتنی بر پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر، شفاف و ضد باکتری سدیم‌آلژینات توسعه دادند که قادر به برداشت انرژی مکانیکی است (شکل۴ الف). این تیم تحقیقاتی با افزودن گلیسرول، به‌عنوان افزودنی سازگار با محیط زیست، انعطاف‌پذیری و چسبندگی سدیم آلژینات را بهبود بخشیدند که منجر به ایجاد الکترودهای سدیم آلژینات/نانوسیم نقره (Silver nanowire) با شفافیت و رسانایی بالا شد. با توجه به شکل۴ ب، TENG ساخته‌شده عملکرد فوق‌العاده‌ای از خود نشان داد؛ به‌طوری که میزان ولتاژ خروجی، شارژ انتقالی و توان پیک به‌ترتیب ۵۳ ولت، ۱۸ نانوکولن و ۴ میکروووات اندازه‌گیری شد. این اعداد نشان‌دهنده پتانسیل TENG در تأمین انرژی برای دستگاه‌های الکترونیکی کوچک است. علاوه بر این، این TENG خواص

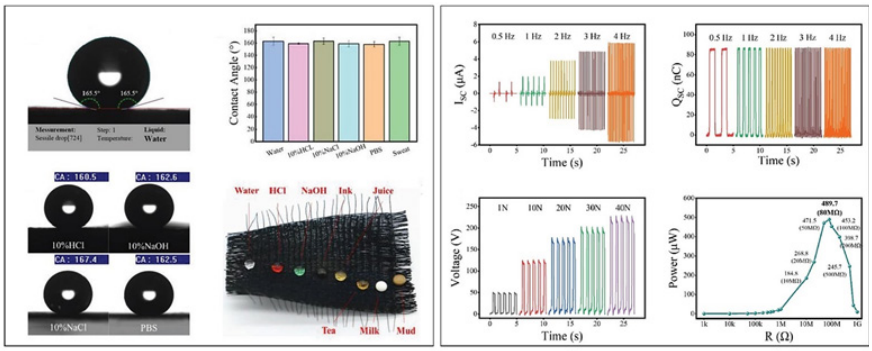


شکل ۴. (الف) طرح‌واره TENG انعطاف‌پذیر و شفاف بر پایه الکترودهای سدیم آلژینات/نانوسیم نقره. (ب) نتایج کمی حداکثر توان و ولتاژ TENG تحت مقاومت‌های مختلف. (ج) تصاویری از رشد باکتری‌های مختلف، قبل و بعد از کشت همزمان، پس از گذشت ۲۴ ساعت [۱۶].

ضد باکتریایی و زیست‌تخریب‌پذیری قابل‌توجهی را نیز به نمایش گذاشت (شکل۴ ج). این تحقیق راهبرد جدید برای طراحی TENGهای شفاف، انعطاف‌پذیر و سازگار با محیط‌زیست ارائه می‌دهد و راه را برای توسعه دستگاه‌های خود تغذیه پایدار و نسل بعدی محصولات الکترونیکی هموار می‌کند.
کاراگینان وآگار از جمله پلیمرهای طبیعی پلی‌ساکاریدی استخراج‌شده از جلبک های قرمز هستند که قابلیت خوبی برای کاربرد در نانومولدهای تریبوالکتریک نشان داده‌اند. به‌عنوان مثال، کانگ و همکاران [۱۷] کامپوزیت زیست‌تخریب‌پذیر متشکل از این دو پلیمر را توسعه دادند و نشان دادند که این پلیمرها می‌توانند از طریق تشکیل ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی به‌عنوان موادی برای برداشت موثر انرژی زیست‌مکانیکی برای تولید الکتریسیته از طریق اصطکاک در دستگاه‌های TENG مورد استفاده قرار گیرند. براساس نتایج این پژوهش، کامپوزیت حاصل در ترکیب درصد بهینه ۲۰/۸۰ از کاراگینان/آگار، با افزایش قابل توجه خاصیت اهدای الکترون، پتانسیل سطحی را تا ۵۷/۵ درصد نسبت به مواد معمولی بهبود می‌بخشد. این افزایش به‌دلیل حضور کاتیون‌های کلسیم و گروه‌های استرسولفات در ساختار کامپوزیت است که مکان‌های به دام انداختن بار را فراهم می‌کنند. نتایج همچنین نشان داد که این کامپوزیت دارای سازگاری زیستی و تجزیه‌پذیری بالایی است و برای کاربردهای درون بدن مناسب است، بنابراین، TENG تولیدشده از آن کاربرد بالقوه‌ای در زمینه زیست‌پزشکی دارد و می‌تواند انرژی خازن‌ها را بدون وجود منبع تغذیه خارجی تأمین کند.
نانومولد تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر طبیعی، انعطاف‌پذیر و زیست‌سازگار ژلاتین توسط هان و همکاران [۱۸] تهیه شد. این TENG توانایی چشمگیری در تولید انرژی الکتریکی دارد و ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و چگالی توان خروجی آن به‌ترتیب تا ۱۳۰ ولت، ۰/۳۵ میکروآمپر و ۴۵/۸ میکروووات بر سانتی‌متر مربع می‌رسد که آن را به گزینه‌ای برتر در مقایسه با سایر مواد اصطکاک مثبت رایج مانند فویل آلومینیوم، پلی‌اتیلن‌ترفتالات و کاغذ چاپ تبدیل می‌کند. این عملکرد فوق‌العاده به‌دلیل توانایی منحصربه‌فرد ژلاتین در اهدای الکترون در فرآیند تریبوالکتریک است. این انرژی تولید شده به حدی قدرتمند است که می‌تواند ۵۰ عدد از دیودهای نورافشان تجاری (LED) را به‌طور مستقیم روشن کند. علاوه بر این، TENG تهیه‌شده به‌دلیل پایداری و حساسیت فوق‌العاده‌اش، کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف دارد. به‌عنوان مثال، از آن به‌عنوان حسگر خودکار برای نظارت بر سیگنال‌های فیزیولوژیکی انسان، مانند لمس انگشت، حرکت مفاصل و تنفس، استفاده شده است.
این فناوری، رویکردی مقرون‌به‌صرفه، ساده و سازگار با محیط زیست برای تولید انرژی زیست‌مکانیکی ارائه می‌دهد و قابلیت بالایی در تأمین انرژی الکترونیکی پوشیدنی‌های نسل آینده و نظارت بر علائم حیاتی انسان دارد.
چن و همکاران [۱۹] نانومولد تریبوالکتریک جدید دوستدار محیط‌زیست را معرفی کردند که از سلولز باکتری رسانای الکتریکی فوق آب‌گریز ساخته شده است. برای تهیه این نانومولد فوق آب‌گریز بادوام، از روش زیستی مبتکرانه برای تشکیل ساختار پوسته–هسته استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که TENG حاصل حداکثر ولتاژ مدار باز ۲۶۶ ولت، جریان اتصال کوتاه ۵/۹ میکروآمپر و توان خروجی ۴۸۹/۷ میکروووات را نمایش می‌دهد (شکل۵) و با موفقیت دستگاه‌هایی مانند کرونومتر و ماشین حساب را تغذیه می‌کند. قابلیت آب‌گریزی، خودتمیزشوندگی و ضدرسوب در این TENG سلولزی، عملکرد خروجی پایدار آن را در شرایط محیطی سخت مانند نشت مایعات گوناگون تضمین می‌کند (شکل۵). با توجه به اینکه این نانومولد برای تشخیص سیگنال‌های حرکتی طراحی شده است، می‌تواند به‌منظور توسعه و ساخت سامانه نظارت بر ورزش و سلامت استفاده شود.

۴ کاربرد نانومولدهای تریبوالکتریک پلیمری

همان‌طور که اشاره شد نانومولدهای تریبوالکتریک پلیمری، به‌عنوان یکی از نوآوری‌های برجسته در حوزه فناوری نانو، به‌دلیل قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود در تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. این نانومولدها تحت تأثیر نیروی اصطکاک و حرکات مکانیکی،



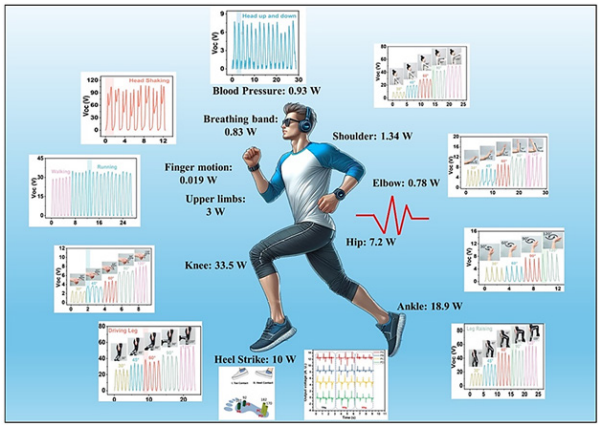
شکل ۵ زوایای تماس الیاف سلولزی با محلول‌های آب، NaCl، NaOH، HCl و PBS (سمت چپ). عملکرد خروجی TENG سلولزی (سمت راست) [۱۹].

الکتریسیته تولید می‌کنند. از این رو، کاربردهای آن‌ها در زمینه‌های مختلفی همچون تأمین انرژی دستگاه‌های الکترونیکی خودکار، حسگرهای محیطی و سامانه‌های الکتریکی بدون نیاز به باتری به‌طور روزافزونی در حال گسترش است. همچنین، به‌دلیل سبکی و قابلیت انعطاف‌پذیری این نانومولدها، آن‌ها را به گزینه‌ای مطلوب برای پیاده‌سازی در فناوری‌های نوین مانند پوشیدنی‌های هوشمند و دستگاه‌های اینترنت اشیا تبدیل کرده است. در نتیجه، نانومولدهای تریبوالکتریک پلیمری نه تنها به‌عنوان منبعی از انرژی پایدار و خودکفا، بلکه به‌عنوان عاملی موثر در توسعه فناوری‌های آینده نیز به شمار می‌آیند. در ادامه به بررسی برخی از مهم‌ترین کاربردهای TENGهای پلیمری می‌پردازیم.

۴-۱ برداشت انرژی

حرکات ساده از جمله ضربه‌زدن با دست و پا می‌توانند انرژی زیست‌مکانیکی تولید کنند. مقالات متعددی در مورد TENGها گزارش شده است که نشان می‌دهد انرژی حاصل از حرکات ضربه‌زدن برای روشن کردن LED هایی که به صورت سری متصل شده‌اند کافی است. اما، با توجه به شکل۶ الف برخلاف تنظیمات آزمایشگاهی انجام شده، LEDها در فاصله بین ضربات خاموش می‌شوند، و این در حالیست که وسایل الکترونیکی قابل حمل نیازمند منبع تغذیه مداوم و بدون قطع‌شدن هستند. بنابراین، جریان متناوب تولیدشده توسط TENG باید توسط سامانه‌های مدیریت توان، مانند یکسوکننده‌ها و خازن‌ها به جریان مستقیم تبدیل شود تا بتواند دستگاه‌هایی مانند ساعت‌های الکترونیکی، زمان‌سنج‌ها، دماسنج‌ها و ماشین حساب‌ها را شارژ کند [۲۰]. انرژی زیست‌مکانیکی همچنین می‌تواند از راه رفتن حاصل شود. به‌عنوان مثال، TENGهای منعطف مبتنی بر هیدروژل‌های پلیمری می‌توانند به کفش افراد یا مستقیماً به پاهای آن‌ها متصل شوند و انرژی مکانیکی ناشی از راه رفتن افراد را به الکتریسیته تبدیل کنند. در شکل ۶ب، TENG ساخته‌شده به‌وسیله چاپ سه‌بعدی در کف کفش نصب شده است و اجازه می‌دهد تا از طریق تبدیل انرژی حین حرکت، انرژی لازم برای روشن کردن LEDهای موجود در بند کفش تامین شود [۲۱]. افزون بر حرکات ضربه‌ای و راه رفتن، حرکات خمشی نیز می‌توانند انرژی مورد نیاز برای دستگاه‌های الکترونیکی را از طریق TENGها تأمین کنند (شکل۶ ج). به‌عنوان مثال، برخی از TENGهای نرم و انعطاف‌پذیر، قادر به برداشت انرژی مکانیکی از خم‌شدن انگشت، زانو، آرنج، مچ و سایر مفاصل و استفاده از آن برای روشن کردن LEDها هستند. در شکل۷، طرح‌واره نقاط اصلی تولید انرژی و میزان انرژی تولیدشده در طول فعالیت‌های بدنی روزمره بدن انسان نمایش

شکل ۶ کاربرد نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر برای برداشت انرژی. (الف) برداشت انرژی حاصل از حرکات ضربه‌زدن به‌وسیله TENG مبتنی بر هیدروژل برای روشن کردن مستقیم چندین دیود گسیل نور که به‌صورت سری به هم متصل شده‌اند [۲۰]. (ب) نصب TENG تولیدشده با چاپ سه‌بعدی در داخل کفش به‌منظور جمع‌آوری انرژی مکانیکی حاصل از راه رفتن و استفاده برای روشن کردن LEDها [۲۱]. (ج) استفاده از انرژی زیست‌مکانیکی که توسط خمش زانو تولید می‌شود [۲۲].



شکل ۷ طرح‌واره نقاط اصلی تولید انرژی و میزان انرژی تولیدشده در طول فعالیت‌های بدنی روزمره بدن انسان [۲۳].

داده شده است [۲۲، ۲۳]. علاوه بر انرژی حرکات انسان، TENGها می‌توانند از انرژی مکانیکی محیط اطراف نیز استفاده کنند. به‌عنوان مثال، یکی از کاربردهای بارز و مؤثر این فناوری، برداشت کارآمد انرژی باد و امواج آب است که با استفاده از سامانه‌های تبدیل انرژی نانومولد TENG می‌تواند انرژی طبیعی در دسترس را به صورت مستقیم و با کیفیت بالا به انرژی الکتریکی تبدیل کند [۱].

۴-۲ پزشکی و سلامت

فناوری نوین نانومولدهای تریبوالکتریک، نقش مهمی در توسعه ابزارهای تشخیصی و درمانی ایفا می‌کنند. این فناوری مبتنی بر تولید الکتریسیته از اصطکاک مواد مختلف، انرژی پایداری را بدون نیاز به منابع خارجی تأمین می‌کند. در صنعت پزشکی، این نانومولدها به‌عنوان حسگرهای زیستی قدرتمند عمل می‌کنند، که با قرارگیری بر روی پوست یا درون بدن قادر به نظارت بر علائم حیاتی مانند ضربان قلب، فشار خون و دما هستند. این نظارت دقیق، ابزار مهمی در تشخیص و نظارت بر سلامت بیماران به حساب می‌آید. علاوه بر این، نانومولدهای تریبوالکتریک می‌توانند انرژی مورد نیاز دستگاه‌های کاشتنی در بدن مانند ضربان‌سازها و پمپ‌های انسولین را تأمین کنند. این امر وابستگی به باتری‌های خارجی را کاهش داده و طول عمر این دستگاه‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، این فناوری، قابلیت توسعه دستگاه‌های پوشیدنی هوشمند که انرژی لازم برای عملکرد خود را از انرژی حرکتی بدن فراهم می‌کنند، دارند. کاربرد فناوری TENG در پزشکی، به دلیل تولید انرژی پاک و کارآمد، می‌تواند هزینه‌ها را کاهش داده و دسترسی به فناوری‌های پیشرفته پزشکی را آسان‌تر کند. با توجه به مزایای ذکرشده، نانومولدهای تریبوالکتریک آینده درخشانی در حوزه پزشکی دارند و انتظار می‌رود در تحقیقات و نوآوری‌های آتی، نقش پررنگ‌تری ایفا کنند.

همان‌طور که اشاره شد از جمله کاربردهای نانومولد تریبوالکتریک پلیمری، ردیابی حرکت است. به‌عنوان مثال، حسگرهای پوشیدنی مبتنی بر پلیمرها را می‌توان در لباس‌های ورزشی، مچ‌بند یا کفی‌ها تعبیه کرد و داده‌های حرکتی لحظه‌به‌لحظه مانند شمارش گام‌ها، سرعت، مسیر حرکت، مصرف کالری و حتی میزان فعالیت و وضعیت ماهیچه‌ای را زیر نظر گرفت. از طریق ردیابی و تجزیه‌وتحلیل این داده‌ها، افراد می‌توانند شرایط فیزیکی خود را بهتر درک کنند و برنامه‌های تناسب اندام شخصی را تدوین و تنظیم کنند، در نتیجه به سبک زندگی سالم‌تر دست می‌یابند. علاوه بر این، می‌توان از TENG های مبتنی بر پلیمرهای زیست‌سازگار برای توسعه حسگرهای کاشتنی و نظارت طولانی‌مدت بیماران مبتلا به بیماری‌های مزمن استفاده کرد [۲۴، ۲۵].

با توجه به اینکه تنفس بازتاب مهمی از وضعیت متابولیک و سلامتی انسان است. با تجزیه‌وتحلیل سیگنال‌های تنفسی یا نشانگرهای زیستی موجود در تنفس، مانند استون، اکسیدنیتریک و دی‌اکسیدکربن، می‌توان بیماری‌های مختلفی مانند دیابت، آسم و بیماری انسداد مزمن ریه را کنترل و به‌صورت غیرتهاجمی تشخیص داد. در این راستا، وانگ و همکاران [۲۶] نانومولد تریبوالکتریک محلول در آب سلولزی ساختندکه به‌عنوان ماده الکترود مثبت عمل می‌کند. این TENG مقرون‌به‌صرفه، سبک و زیست‌تخریب‌پذیر به‌عنوان حسگر بانداژ ابداع شد که می‌تواند به راحتی در آب حل شود. تغییرات در ولتاژ خروجی این TENG قادر است به‌طور دقیق بین حالات تنفسی مختلف تمایز قائل شود و آن را برای استفاده به‌عنوان حسگر نظارت بر سیگنال فیزیولوژیکی مناسب کند. کیم و همکاران [۲۷] نیز نوع جدیدی از TENG بسیار الاستیک و خودترمیم شونده مبتنی بر هیدروژل پلیمری کاتکول را سنتز کردند که به‌عنوان حسگر لرزش متصل به پوست، برای نظارت بر وضعیت سلامت بیماران مبتلا به بیماری پارکینسون استفاده می‌شود.

۵ چشم انداز آتی

باوجود پیشرفت های قابل‌توجه در حوزه نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر، هنوز مسائل حل‌نشده و چالش‌های بسیاری برای بهینه سازی این نوع TENGها وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیشتر است. به‌منظور سوق دادن فناوری TENGهای مبتنی بر پلیمر به سمت کاربردهای گسترده‌تر در

برداشت انرژی، پزشکی، سلامت و غیره، در ادامه به معرفی چندین چالش و مسئله کلیدی در این زمینه می‌پردازیم. با پرداختن به این مسائل و انجام تحقیقات متمرکز در آینده، فناوری TENGهای مبتنی بر پلیمر این قابلیت را خواهد داشت که کاربردهای خود را در حسگرهای خودکار، دستگاه‌های پوشیدنی، و برداشت انرژی محیطی متحول کند و در نتیجه آن دور جدیدی از نوآوری‌های فناوریکی و استراتژی‌های توسعه پایدار ظهور خواهد کرد.

• بهینه‌سازی عملکرد خروجی: چالش‌ها در بهینه‌سازی عملکرد و کارایی TENGهای مبتنی بر پلیمر، از جمله افزایش توان خروجی و بهبود بازده تبدیل انرژی، هنوز جای کار دارد. چالش‌های مربوط به عملکرد خروجی را می‌توان به‌وسیله راهکارهای گوناگون از طریق انتخاب مواد مناسب، طراحی ساختاری دقیق، بررسی ساختار میکرو/نانو سطوح، استفاده از اصلاحات شیمیایی مانند نیتراسیون و آمیناسیون و همچنین بهینه‌سازی سامانه‌های مدیریت انرژی مرتفع ساخت. با این حال، پیاده‌سازی اکثر این روش‌ها پیچیده و پرهزینه هستند.

• پایداری و دوام: TENGهای مبتنی بر پلیمر اغلب با مشکلات کاهش عملکرد مکانیکی، سایش و تخریب سریع زیستی یا افزایش حساسیت محیطی در کاربردهای طولانی مدت مواجه هستند. به‌خصوص در شرایط تنش مکانیکی مکرر، ساختار پلیمرها ممکن است تغییر کند و منجر به کاهش عملکرد تریبوالکتریک شود. قرار گرفتن طولانی مدت در معرض شرایط آب‌وهوایی شدید، از جمله رطوبت بالا، تابش نور یووی و تغییرات دما، می‌تواند بر عملکرد پلیمرها تأثیر منفی بگذارد. بنابراین، تحقیقات در حال انجام بر روی توسعه پوشش‌های محافظ یا مواد هیبریدی متمرکز است که می‌توانند در چنین شرایطی بدون کاهش عملکرد مقاومت کنند. علاوه بر این، برخی پلیمرها ممکن است به فعالیت‌های میکروبی حساس باشند، که می‌تواند تخریب مواد را در محیط‌های خاص تسریع کند و در نتیجه آن بر پایداری و دوام طولانی‌مدت دستگاه TENG تأثیر بگذارد و طول عمر موثر آن را کوتاه کند. این چالش نیازمند نوآوری در انتخاب مواد و طراحی و افزایش پایداری و دوام پلیمرها از طریق عملیات سطحی، تقویت پیوندهای متقابل، استفاده از مواد کامپوزیت و توسعه روش‌های کپسوله‌سازی هستند. پرداختن به این مسائل برای کاربرد گسترده فناوری TENGهای مبتنی بر پلیمر در برداشت انرژی، حسگرهای خود تغذیه و دستگاه‌های الکترونیکی پایدار بسیار مهم است.

• تولید و استانداردسازی مقیاس‌پذیر: باوجود قابلیت بالای TENGهای مبتنی بر پلیمر در کاربردهای مختلف، تولید در مقیاس بزرگ و کاربرد گسترده آن‌ها همچنان با موانع زیادی روبرو است. منابع متنوع و عملکردهای متفاوت پلیمرها منجر به افزایش پیچیدگی در فرایندهای تولید و تنوع در عملکرد محصول نهایی می‌شود. علاوه بر این، پردازش و اصلاح پلیمرها نیازمند رویکردهای ظریف و پرهزینه است که منجر به محدودیت بیشتر در مقیاس پذیری TENGهای مبتنی بر پلیمر می‌شود. چالش‌های استانداردسازی را نیز نباید نادیده گرفت، زیرا در حال حاضر استانداردهای مشخص برای ارزیابی و تأیید عملکرد و ایمنی محصولات مختلف TENG وجود ندارد. برای غلبه بر این چالش‌ها، می‌بایست فرایندهای تولید کارآمد و اقتصادی توسعه یابد و استانداردها و مقررات آزمایشی جامع وضع شود.

• یکپارچه‌سازی و سازگاری: ادغام TENGهای مبتنی بر پلیمر در دستگاه‌ها و سامانه‌های عملی مستلزم پرداختن به چالش‌های مربوط به یکپارچه‌سازی دستگاه، قابلیت اطمینان و سازگاری با محیط‌های کاربردی مختلف و فناوری‌های موجود است. با توجه به خواص منحصربه‌فرد پلیمرها، ممکن است هنگام ادغام با فناوری‌ها و دستگاه‌های الکترونیکی موجود، با مشکلات تطبیق مواد و سازگاری رابط مواجه شوند. علاوه بر این، ویژگی‌های انرژی خروجی TENG باید با نیازهای انرژی سامانه‌های الکترونیکی پشتیبان مطابقت داشته باشد، که لازمه آن توسعه راهکارهای مدیریت و تبدیل انرژی کارآمد برای اطمینان از منبع تغذیه مداوم و پایدار است. با غلبه بر این چالش، انتظار می‌رود TENGهای مبتنی بر پلیمر نقش مهمی در تولید دستگاه‌های پوشیدنی، حسگرهای خودکار، کاربردهای زیست‌پزشکی و نظارت بر محیط‌زیست ایفا کنند.

۶ نتیجه‌گیری

نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر به عنوان یکی از نوآوری‌های پیشرفته در حوزه تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، توجهات زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این فناوری با بهره‌گیری از اثر تریبوالکتریک و استفاده از مواد پلیمری، امکان تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را فراهم می‌سازد. انواع پلیمرهای طبیعی و مصنوعی با توجه به خواص منحصربه‌فرد فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و الکتریکی می‌توانند به‌عنوان مواد اصلی در ساخت این مولدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پژوهش‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای برای تقویت کارایی و افزایش بهره‌وری این مولدها صورت گرفته است. عواملی نظیر طراحی ساختاری بهینه، انتخاب مواد مناسب

و فناوری‌های جدید ساخت، نقش مهمی در عملکرد و پایداری این سامانه‌ها ایفا می‌کنند. نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که نانومولدهای تریبوالکتریک مبتنی بر پلیمر می‌توانند به‌عنوان منبع انرژی پاک و قابل اعتماد در کاربردهای مختلف از جمله دستگاه‌های پوشیدنی، حسگرهای زیستی و سامانه‌های خودکار مورد استفاده قرار گیرند. با پیشرفت تحقیقات و توسعه فناوری‌های مرتبط، انتظار می‌رود که این نانومولدها سهم قابل توجهی در تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر در کاربردهای عملی داشته باشند و به کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی و افزایش پایداری محیط‌زیست کمک کنند.

مراجع

1. Zhu Q., Sun E., Zhao Z., Wu T., Meng S., Ma Z., Shoaib M., Ur Rehman H., Cao X., and Wang N., Biopolymer Materials in Triboelectric Nanogenerators: A Review, *Polymers*, 16, 1304, **2024**.

2. Fan FR., Tian ZQ., and Lin Wang Z., Flexible Triboelectric Generator, *Nano Energy,* 1, 328–334, **2012**.

3. Xie X., Zhang Y., Chen C., Chen X., Yao T., Peng M., Chen X., Nie B., Wen Z., and Sun X., Frequency-independent Self-Powered Sensing Based on Capacitive Impedance Matching Effect of Triboelectric Nanogenerator, *Nano Energy,* 65, 103984, **2019**.

4. Shanbedi M., Ardebili H., and Alamgir K., Polymer-based Triboelectric Nanogenerators: Materials, Characterization, And Applications, *Progress in Polymer Science*, 144, 101723, **2023**.

5. Wang Z.L., Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-powered Systems and As Active Mechanical and Chemical Sensors, *ACS Nano*, 7, 9533–9557, **2013**.

6. Zhang Z., Zhang Q., Zhou Z., Wang J., Kuang H., Shen Q., and Yang H., High-power Triboelectric Nanogenerators by Using In-situ Carbon Dispersion Method for Energy Harvesting and Self-powered Wireless Control*, Nano Energy,* 101, 107561, **2022**.

7. Chen M., Zhou Y., Lang J., Li L., and Zhang Y., Triboelectric Nanogenerator and Artificial Intelligence to Promote Precision Medicine for Cancer, *Nano Energy,* 92, 106783, **2022**.

8. Sun H., Zhao Y., Jiao S., Wang C., Jia Y., Dai K., Zheng G., Liu C., Wan P., and Shen C., Environment Tolerant Conductive Nanocomposite Organ Hydrogels as Flexible Strain Sensors and Power Sources for Sustainable Electronics, *Adv. Funct. Mater*., 31, 2101696, **2021**.

9. Cheng J., Ding W., Zi Y., Lu Y., Ji L., Liu F., Wu C., and Wang Z.L., Triboelectric Micro Plasma Powered by Mechanical Stimuli, *Nat. Commun*., 9, 3733, **2018**.

10. Harnchana V., Van Ngoc H., He W., Rasheed A., Park H., and Amornkitbamrung V., Enhanced Power Output of a Triboelectric Nanogenerator Using Poly(dimethylsiloxane) Modified with Graphene Oxide and Sodium Dodecyl Sulfate, *ACS Appl Mater Interfaces,* 10, 25263, **2018**.

11. Long Y., Chen Y., Liu Y., Chen G., Guo W., Kang X., Pu X., Hu W., and Wang Z.L., A Flexible Triboelectric Nanogenerator Based on a Super-Stretchable and Self-Healable Hydrogel as the Electrode, *Nanoscale*, 12, 12753, **2020**.

12. Cui N., Gu L., Lei Y., Liu J., Qin Y., Ma X., Hao Y., and Wang Z. L., Dynamic Behavior of the Triboelectric Charges and Structural Optimization of the Friction Layer for a Triboelectric Nanogenerator, *ACS Nano*, 10, 6131, **2016**.

13. Luo X., Zhu L., Wang C., Li J., Nie J., and Wang Z.L., A Flexible Multifunctional Triboelectric Nanogenerator based on Mxene/PVA Hydrogel, *Adv. Funct. Mater.*, 31, 2104928, **2021**.

14. Chen G., Xu L., Zhang P., Chen B., Wang G., Ji J., Pu X., and Wang Z.L., Seawater Degradable Triboelectric Nanogenerators for Blue Energy, *Adv. Mater. Technol*., 5, 2000455, **2020**.

15. Liang S., Wang Y., Liu Q., Yuan T., and Yao C., The Recent Progress in Cellulose Paper-Based Triboelectric Nanogenerators, *Adv. Sustain. Syst*., 5, 2100034, **2021**.

16. Li Y., Chen S., Yan H., Jiang H., Luo J., Zhang C., Pang Y., and Tan Y., Biodegradable, Transparent, and Antibacterial Alginate-based Triboelectric Nanogenerator for Energy Harvesting and Tactile Sensing, *Chem. Eng. J*., 468, 143572, **2023**.

17. Kang M., Bin M.S., Kim Y., Kim B., Park B.J., Hyun I., Imani I.M., Choi B., and Kim S., Nature-Derived Highly Tribo-positive κ-Carrageenan-Agar Composite-based Fully Biodegradable Triboelectric Nanogenerators, *Nano Energy,*100, 107480, **2022**.

18. Han Y., Han Y., Zhang X., Li L., Zhang C., Liu J., Lu G., Yu H.D., and Huang W., Fish Gelatin based Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Biomechanical Energy and Self-Powered Sensing of Human Physiological Signals, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 16442–16450, **2020**.

19. Chen K., Li Y., Yang G., Hu S., Shi Z., and Yang G., Fabric-based TENG Woven with Bio-Fabricated Superhydrophobic Bacterial Cellulose Fiber for Energy Harvesting and Motion Detection, *Adv. Funct. Mater*., 33, 2304809, **2023**.

20. Guan Q., Lin G., Gong Y., Wang J., Tan W., Bao D., Liu Y., You Z., Sun X., Wen Z., and Pan Y., Highly Efficient Self-Healable and Dual Responsive Hydrogel-based Deformable Triboelectric Nanogenerators for Wearable Electronics, *J. Mater. Chem. A*, 7,13948–13955, **2019**.

21. Chen B., Tang W., Jiang T., Zhu L., Chen X., He C., Xu L., Guo H., Lin P., Li D., Shao J., and Wang Z.L., Three-Dimensional Ultra flexible Triboelectric Nanogenerator Made by 3D Printing, *Nano Energy*, 45, 380–389, **2018**.

22. Wang S., He M., Weng B., Gan L., Zhao Y., Li N., and Xie Y., Stretchable and Wearable Triboelectric Nanogenerator Based on Kinesio Tape for Self-Powered Human Motion Sens-

ing, *Nanomaterials*, 8, 657, **2018**.
23. Sayam A., Rahman M.M., Sayem A.S.M., Ahmed A.T.M.F., and Alimuzzaman S., Carbon-Based Textile-Structured Triboelectric Nanogenerators for Smart Wearables, Adv. *Energy Sustainability Res*., 5, 2400127, **2024**.
24. Nie S., Cai C., Lin X., Zhang C., Lu Y., Mo J., and Wang S., Chemically Functionalized Cellulose Nanofibrils for Improving Triboelectric Charge Density of a Triboelectric Nanogenerator, ACS Sustain. *Chem. Eng*., 8, 18678–18685, **2020**.
25. Shi X., Wei Y., Yan R., Hu L., Zhi J., Tang B., Li Y., Yao Z., Shi C., and Yu H., Leaf Surface-Microstructure Inspired Fabrication of Fish Gelatin-Based Triboelectric Nanogenerator, *Nano Energy,* 109, 108231, **2023**.
26. Wang T., Li S., Tao X., Yan Q., Wang X., Chen Y., Huang F., Li H., Chen X., and Bian Z., Fully Biodegradable Water-Soluble Triboelectric Nanogenerator for Human Physiological Monitoring, *Nano Energy*, 93, 106787, **2022**.
27. Kim J., Lee J., Lee H., and Oh I., Stretchable and Self-Healable Catechol-Chitosan-Diatom Hydrogel for Triboelectric Generator and Self-Powered Tremor Sensor Targeting at Parkinson Disease, *Nano Energy*, 82, 105705, **2021**.