

Polymerization
Quarterly, 2026
Volume 15, Number 4
Pages 71-81
ISSN: 2252-0449

Application of Biocompatible Polymers in Design and Development of Triboelectric Nanogenerators

Fatemeh Golestani and Sara Tarashi*

Polymer Engineering Department, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 12 November 2025, Accepted: 25 April 2026

Abstract

The depletion of fossil fuel resources and the rapid increase in electronic waste have made the development of sustainable energy technologies an inevitable necessity. Meanwhile, triboelectric nanogenerators (TENGs) have attracted growing attention as efficient components for harvesting ambient mechanical energy and converting it into electrical energy. Their simple structure, high efficiency at low frequencies, flexibility, and potential for large-scale manufacturing are among the key advantages of this technology. One of the effective strategies in improving the performance and sustainability of TENGs is the use of biocompatible and biodegradable polymers. Due to their suitable dielectric properties, high flexibility, and biological safety, these materials enable the design of wearable and implantable medical devices and can directly contact with biological tissues without causing toxicity or unwanted reactions. In addition, natural degradability after the end of the device lifetime plays an important role in reducing environmental impacts and electronic waste. In recent years, the use of natural polymers such as cellulose, chitosan, and silk, as well as biocompatible synthetic polymers including polylactic acid and polycaprolactone, has demonstrated promising results in energy harvesting, sensing, and biomedical applications. However, challenges such as limited durability, high costs of high-performance materials, and difficulties in large-scale production remain. This review provides a comprehensive overview of the role of biocompatible polymers in the design and development of TENGs, discussing their advantages and limitations while highlighting future perspectives of this technology in sustainable energy and medical applications.

Key Words

triboelectric nanogenerator,
biocompatible polymer,
biodegradable,
sustainable energy,
wearable device

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: s.tarashi@ut.ac.ir

کاربرد پلیمرهای زیست سازگار در طراحی و توسعه نانوذراتورهای تریبوالکتریک

فاطمه گلستانی و سارا تراشی*

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده گان فنی، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۵

چکیده

کاهش منابع سوخت های فسیلی و افزایش چشمگیر زباله های الکترونیکی، توسعه فناوری های نوین انرژی پایدار را به ضرورتی اجتناب ناپذیر تبدیل کرده است. در این میان، نانوذراتورهای تریبوالکتریک (TENGs) به عنوان قطعات کارآمدی برای برداشت انرژی مکانیکی محیطی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، توجه فزاینده ای را جلب کرده است. سادگی ساختار، بازده زیاد در بسامدهای کم، انعطاف پذیری و قابلیت تولید در مقیاس بزرگ از مهم ترین مزایای این فناوری به شمار می روند. از راهبردهای مؤثر در بهبود عملکرد و پایداری TENGها، به کارگیری پلیمرهای زیست سازگار و زیست تجزیه پذیر است. این مواد به دلیل خواص دی الکتریک مناسب، انعطاف پذیری زیاد و ایمنی زیستی، امکان طراحی قطعات پوشیدنی و کاشتنی پزشکی را فراهم می کنند و می توانند بدون ایجاد سمیت یا واکنش های ناخواسته با بافت های زیستی در تماس مستقیم قرار گیرند. افزون بر این، تخریب پذیری طبیعی پس از پایان عمر مفید قطعه، نقش مهمی در کاهش آثار زیست محیطی و زباله های الکترونیکی ایفا می کند. در سال های اخیر، استفاده از پلیمرهای طبیعی نظیر سلولوز، کیتوسان و ابریشم و نیز پلیمرهای سنتزی زیست سازگار، مانند پلی لاکتیک اسید و پلی کاپرولاکتون، نتایج امیدبخشی در برداشت انرژی، حسگری و کاربردهای زیست پزشکی ارائه داده است. با این حال، چالش هایی از جمله دوام محدود، هزینه مواد کارآمد و دشواری تولید در مقیاس صنعتی همچنان پابرجاست. در این مقاله نقش پلیمرهای زیست سازگار در طراحی و توسعه TENGها به طور جامع مرور شده و ضمن بررسی مزایا و محدودیت ها، چشم انداز آینده این فناوری در حوزه انرژی پایدار و پزشکی بحث می شود.



فاطمه گلستانی



سارا تراشی

واژگان کلیدی

نانوذراتور تریبوالکتریک،
پلیمر زیست سازگار،
زیست تخریب پذیر،
انرژی پایدار،
دستگاه پوشیدنی

مقدمه

در سال‌های اخیر، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و رشد تقاضای انرژی جهانی، توجه را به‌سوی منابع تجدیدپذیر مانند باد، خورشید، زیست‌توده و زمین‌گرمایی جلب کرده است. این منابع افزون‌بر جبران محدودیت انرژی‌های فسیلی، نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییرات اقلیمی دارند. توسعه فناوری‌های مبتنی بر انرژی‌های پاک، هم برای امنیت انرژی و رشد اقتصادی و هم برای حفظ محیط‌زیست اهمیت ویژه‌ای دارد [۱-۳]. با گسترش دستگاه‌های هوشمند و پوشیدنی، نیاز به منابع انرژی پایدار و کوچک‌مقیاس افزایش یافته است. در این میان، TENG ها به‌دلیل طراحی ساده، بازده زیاد و مقیاس‌پذیری به یکی از فناوری‌های کلیدی در برداشت انرژی مکانیکی محیط تبدیل شده‌اند [۴]. از رویکردهای مهم در بهبود کارایی TENG ها، استفاده از پلیمرهای زیست‌سازگار است. این مواد به‌سبب زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری و خواص دی‌الکتریک مطلوب در طراحی دستگاه‌های پوشیدنی و کاشتنی جایگاه ویژه‌ای دارند [۵]. آن‌ها می‌توانند بدون ایجاد آثار سمی یا حساسیت‌زا در تماس با بدن استفاده شوند و در حوزه‌هایی چون داربست‌های مهندسی بافت، پروتزها، زخم‌پوش‌ها و سامانه‌های دارورسانی به‌کار روند. افزون‌براین، به‌دلیل تخریب‌پذیری طبیعی پس از پایان عمر، نقش مهمی در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ایفا می‌کنند [۶-۸]. در این مقاله به بررسی نقش پلیمرهای زیست‌سازگار در توسعه نانوزنراتورهای تریبولکتریک پرداخته می‌شود. در ابتدا اصول عملکرد و انواع TENG معرفی شده و سپس مواد استفاده‌شده با تمرکز بر پلیمرهای زیست‌سازگار مرور می‌شود. در ادامه، ضمن بررسی کاربردهای آن‌ها در نسل‌های جدید TENG، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده این فناوری بحث می‌شود.

نانوزنراتورهای تریبولکتریک

تعریف و اصول عملکرد

اثر تریبولکتریک فرایندی است که طی آن، در اثر تماس و جدایش دو ماده ناهمسان، بار الکتریکی ایجاد می‌شود. هنگام تماس، الکترون‌ها میان سطوح مبادله شده و پتانسیل الکتریکی برابر می‌شود. اما با جدا شدن سطوح، یکی از آن‌ها بار مثبت یا منفی می‌گیرد و در تماس مجدد با سطح دارای بار مخالف، تخلیه الکتریکی رخ می‌دهد. این جابه‌جایی الکترون‌ها موجب ایجاد اختلاف پتانسیل

پایدار و در نتیجه تولید جریان الکتریکی می‌شود. نمونه ساده‌ای از این پدیده، مالش شانه پلاستیکی بر مو و تولید الکتریسته ساکن است. شدت و نوع بار حاصل به عواملی مانند جنس مواد، میزان کرنش مکانیکی، دما و زبری سطح بستگی دارد. دو سازوکار اصلی این پدیده، بارگذاری تماسی (انتقال واقعی بار هنگام تماس) و القای الکتروستاتیکی (بازتوزیع بار تحت میدان خارجی) هستند. هرچند پدیده‌هایی مانند تریبولوژی یا مطالعه اصطکاک و سایش سطوح و فلکسو الکتریسته (flexoelectricity) یا تولید بار الکتریکی در اثر کرنش مکانیکی می‌توانند نقش فرعی داشته باشند، اما منشأ اصلی الکتریسته مالشی ترکیب بارگذاری تماسی و القای الکتروستاتیکی است [۹، ۱۰]. با توجه به طراحی ساختاری و الگوی حرکتی لایه‌های تریبولکتریک، چهار حالت عملکردی اصلی برای نانوزنراتورهای تریبولکتریک تعریف شده است:

الف- تماس-جدایش عمودی (VCSTENG)؛

ب- لغزش جانبی (lateral triboelectric nanogenerator, LSTENG sliding)؛

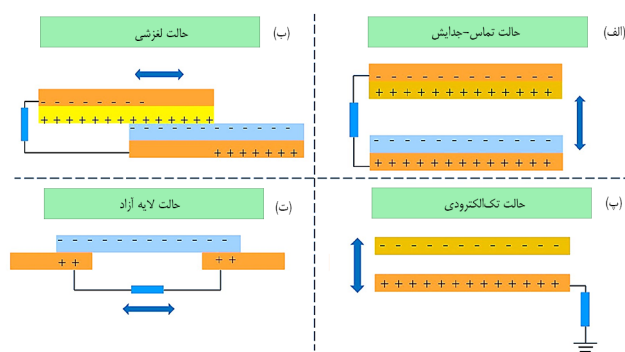
پ- تک‌الکترودی (SETENG)؛

ت- لایه تریبولکتریک خودایستا (FSTENG).

این چهار حالت در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۱، ۱۲]:

الف- حالت تماس-جدایش: در این حالت، دو سطح تریبولکتریک تحت نیروی خارجی (مانند ضربه یا فشار) با یکدیگر تماس می‌یابند و بارهای مخالف دریافت می‌کنند. با جدایش سطوح، اختلاف پتانسیل الکتروستاتیکی ایجاد شده و جریان الکترونی بین الکترودها برقرار می‌شود. تکرار این چرخه، جریان متناوب تولید می‌کند. این حالت در دو پیکربندی دی‌الکتریک-دی‌الکتریک (شکل الف) و دی‌الکتریک-رسانا مشاهده می‌شود. VCSTENG ها به‌دلیل طراحی ساده و چگالی توان زیاد، به‌ویژه برای برداشت انرژی از حرکات انسانی مانند راه رفتن کاربرد دارند و طراحی‌هایی از نوع فرنی، زیگزاگی و قوسی برای آن‌ها گزارش شده است [۱۳].

ب- حالت لغزشی: در این حالت، حرکت نسبی لایه‌ها به‌صورت افقی یا طولی انجام می‌شود (شکل ب) و همانند VCSTENG می‌تواند در دو پیکربندی دی‌الکتریک-دی‌الکتریک یا دی‌الکتریک-رسانا عمل کند. LSTENG ها قابلیت آن را دارند که انرژی مکانیکی منابعی چون باد و جریان آب را به برق تبدیل کنند و برای حرکات صفحه‌ای یا چرخشی بهینه شده‌اند. هرچند اصطکاک زیاد بازده و دوام قطعه را کاهش می‌دهد، اما گزارش‌ها نشان داده‌اند که میزان بار ایجادشده در اثر لغزش بیش از تماس ساده است و توان خروجی بیشتری نسبت به VCSTENG را فراهم می‌کند [۱۴].



شکل ۱- نمایی از حالت‌های عملکردی TENG: (الف) تماس-جدایش، (ب) لغزشی، (پ) تک‌الکترودی و (ت) حالت لایه آزاد [۱۱].

از مواد زیست‌سازگار و زیست‌تجزیه‌پذیر مانند سلولوز و کیتوسان، آثار منفی را به حداقل می‌رساند [۱۷]. باوجود مزایای فراوان، TENGها با چالش‌های مهمی روبه‌رو هستند. اصلی‌ترین مشکل، توان و جریان خروجی کم در اثر محرک‌های مکانیکی متغیر است. همچنین، فشار چرخه‌ای می‌تواند موجب تخریب لایه‌ها شود و اصطکاک میان آن‌ها با ایجاد گرما و تغییرات ساختاری، عملکرد قطعه را کاهش دهد. برای رفع این مشکل، استفاده از مواد خودترمیم پیشنهاد شده است. سایر محدودیت‌ها شامل دوام کم، کاهش کارایی پس از تنش مکانیکی و نبود پایداری بلندمدت است. افزون‌براین، ضرورت تولید اقتصادی و مقیاس‌پذیر همچنان مانع توسعه کاربردی TENGهاست. بااین‌حال، پژوهش‌ها در حال گسترش‌اند تا چالش‌ها برطرف شده و از TENGها به‌عنوان پاسخی به نیاز روزافزون انرژی‌های پاک استفاده شود [۹،۱۰].

مواد استفاده‌شده در TENGهای رایج

عملکرد و بازده نانوزنراتورهای تریبوالکتریک به انتخاب مواد وابسته است. این مواد براساس نقش آن‌ها در سری تریبوالکتریک به دو گروه کلی مواد دارای بار مثبت و بار منفی تقسیم می‌شوند [۱۸].

مواد دارای بار مثبت

فلزاتی مانند آلومینیم (Al)، مس (Cu) و روی (Zn) رایج‌ترین مواد مثبت هستند. این فلزات به‌دلیل چگالی زیاد الکترون، ثبات مکانیکی، هزینه کم و قابلیت انتقال بار کارآمد به‌کار می‌روند. در میان آن‌ها، آلومینیم به‌دلیل تابع کار کم (۴/۱ eV) و پایداری در شرایط معمولی از سال ۲۰۱۲ کاربردترین ماده مثبت در میان TENGها بوده است. مطالعات نشان می‌دهد، جهت انتقال بار در رابط فلز-دی‌الکتریک به تابع کار فلز بستگی دارد، بنابراین انتخاب صحیح فلز اثر مستقیم بر عملکرد قطعه TENG دارد [۱۹،۲۰].

مواد دارای بار منفی

گستره وسیعی از پلیمرها، کامپوزیت‌ها و مواد هیبریدی به‌عنوان مواد منفی در TENGها استفاده می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد، تاکنون دست‌کم چهارده نوع ماده پذیرنده الکترون بدین‌منظور به‌کار رفته است [۱۸].

- پلیمرهای طبیعی: شامل سلولوز، ابریشم، DNA و پروتئین‌ها هستند که به‌دلیل زیست‌سازگاری، زیست‌تجزیه‌پذیری و فراوانی در طبیعت، توجه زیادی را جلب کرده‌اند. برای نمونه، نانوزنراتورهای مبتنی بر کاغذ سلولوزی با فرایندی ساده و کم‌هزینه ساخته شده و

پ- حالت تک‌الکترودی: این نوع به دو زیرشاخه SETENG تماس-جدایش و SETENG لغزشی تقسیم می‌شود. هریک از آن‌ها می‌توانند پیکربندی دی‌الکتریک-رسانا یا دی‌الکتریک-دی‌الکتریک داشته باشند (شکل ۱پ). مزیت اصلی آن‌ها این است که لایه تریبوالکتریک نیاز زیادی به اتصال مستقیم به مدار خارجی ندارد که تطبیق‌پذیری و کاربردپذیری قطعه را افزایش می‌دهد. باوجوداین، به‌دلیل پدیده محافظت الکتروستاتیکی به‌وسیله الکتروود اصلی، بازده انتقال بار در این حالت حداکثر ۵۰٪ مقدار متناظر در VCSTENG یا LSTENG است [۱۵].

ت- حالت لایه آزاد: این نوع که به‌تازگی معرفی شده، شامل دو پیکربندی تماسی و لغزشی است (شکل ۱ت). دراین‌حالت، لایه تریبوالکتریک آزاد می‌تواند از جنس دی‌الکتریک یا فلز باشد. FSTENGها با بازده بیشتر، پایداری طولانی‌تر و کاهش سایش سطحی نسبت به سایر حالت‌ها شناخته می‌شوند. نوع تماسی قابلیت برداشت انرژی از هر تحریک مکانیکی خارجی را دارد. درحالی‌که نوع لغزشی بدون نیاز به تماس مستقیم میان سطوح عمل کرده و گرما و سایش کمتری را ایجاد می‌کند. البته عملکرد مطلوب این حالت مستلزم پیش‌باردارشدن لایه تریبوالکتریک است [۱۶].

TENGها نسبت به سایر فناوری‌های برداشت انرژی چند مزیت برجسته دارند. آن‌ها در بسامدهای کم بازدهی زیاد (تا حدود ۸۵٪) ارائه می‌دهند و برای تبدیل انرژی مکانیکی منابعی چون امواج اقیانوس و باد بسیار مناسب‌اند. ساختار سبک و انعطاف‌پذیر TENGها، به‌ویژه با استفاده از پلیمرها، امکان ادغام در سامانه‌های پوشیدنی و پزشکی را فراهم می‌کند. همچنین به‌دلیل مقیاس‌پذیری، هزینه تولید کم و قابلیت ساخت با روش‌هایی مانند چاپ پیوسته رول به رول (roll-to-roll) و چاپ سه‌بعدی، گزینه اقتصادی برای تولید انبوه محسوب می‌شوند. از دیدگاه زیست‌محیطی نیز استفاده

کارایی قابل قبولی را نشان داده‌اند [۲۱،۲۲].

- پلیمرهای سنتزی: این دسته از مواد به دلیل تنوع و خواص تنظیم پذیر، بیشترین کاربرد را در TENGها دارند و به سه گروه تقسیم می‌شوند [۱۸،۱۹]:

الف- غیرفلوئوردار: مانند پلی استیرن، نایلون و پلی اتیلن. بهبود این مواد از طریق دوپه کردن یا افزودنی‌های شیمیایی امکان پذیر است.

ب- فلوئوردار: شامل موادی مانند پلی تترافلوئورواتیلن، پلی وینیلیدین فلوئورید و اتیلن پروپیلن فلوئوردار که به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، پایداری زیاد و بازده بهتر از کاربردی ترین مواد منفی به شمار می‌روند.

پ- عملکردی: مانند کاپتون، پلی دی متیل سیلوکسان، پلی یورتان و پلی اتیلن ترفتالات که انعطاف پذیری، شفافیت و فراورش پذیری مناسبی دارند و برای طراحی دستگاه‌های پوشیدنی یا انعطاف پذیر استفاده می‌شوند.

- پلیمرهای اصلاح شده: اصلاح ساختار شیمیایی پلیمرها می‌تواند ویژگی‌های الکتروستاتیکی آن‌ها را بهبود دهد. به عنوان نمونه، پلی ایمید اصلاح شده با گروه‌های جذب کننده الکترون، عملکرد خروجی زیادتری را نسبت به نمونه خالص خود ارائه داده است [۲۳].

- کامپوزیت‌ها و مواد هیبریدی: این مواد با ترکیب پلیمرها با نانو ذرات معدنی یا فلزی ساخته می‌شوند. کامپوزیت‌ها عمدتاً از ماتریس پلیمری و الیاف یا ذرات تقویت کننده تشکیل می‌شوند. درحالی که مواد هیبریدی حاصل ترکیب شیمیایی مواد آلی و معدنی هستند. هر دو دسته به طور شایان ملاحظه‌ای خواص الکتریکی و مکانیکی TENGها را بهبود می‌بخشند [۲۴].

پلیمرهای زیست سازگار

تعریف و انواع

پلیمرهای زیست سازگار به موادی گفته می‌شود که می‌توانند بدون ایجاد آثار سمی یا حساسیتی در تماس مستقیم با بافت‌ها و مایعات بدن قرار گیرند و عملکرد طبیعی سامانه‌های زنده را مختل نکنند. این پلیمرها که می‌توانند طبیعی یا سنتزی باشند، به دلیل قابلیت تعامل ایمن با سلول‌ها و اندام‌ها، جایگاه ویژه‌ای در پزشکی و زیست فناوری یافته‌اند. از جمله کاربردهای آن‌ها می‌توان به مهندسی بافت و داربست‌های سلولی، پیوندهای مصنوعی، ترمیم زخم، سامانه‌های دارورسانی کنترل شده و مواد پرکننده استخوان اشاره کرد [۶]. مواد زیست تخریب پذیر و زیست سازگار که به عنوان لایه‌های تریوالکتریک در نانوژنراتورها به کار می‌روند، به طور کلی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند [۲۵]:

- مواد طبیعی با منشأ حیوانی: این گروه شامل کیتین و مشتقات آن (کیتوسان)، ابریشم، ژلاتین، پروتئین‌ها و پپتیدهاست. کیتین در پوسته سخت سخت پوستان و حشرات وجود دارد و کیتوسان از آن مشتق می‌شود. این مواد به دلیل داشتن گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل و کربوکسیل به راحتی در برهم کنش‌های الکتروستاتیک شرکت می‌کنند و تمایل زیادی به ازدست دادن الکترون دارند. ویژگی‌هایی چون زیست تخریب پذیری، زیست سازگاری و حتی خاصیت ضدباکتری باعث شده‌اند در پزشکی و قطعات الکترونیکی کاشتنی پرکاربرد باشند. ژلاتین نیز به دلیل منشأ کلاژنی، زیست سازگاری زیاد و تخریب پذیری، گزینه مناسبی برای TENGهای کاشتنی و دستگاه‌های گذرا به شمار می‌آید [۲۶،۲۷].

- مواد طبیعی با منشأ گیاهی: این دسته شامل سلولوز، کاغذ، برگ‌ها، چوب، آلژینات و نشاسته (مانند کاغذ برنج) می‌شود. سلولوز به عنوان فراوان ترین پلی ساکارید طبیعی، ویژگی‌هایی چون تجدید پذیری، زیست تجزیه پذیری و فراورش ساده دارد. برای مثال، آلژینات که از جلبک‌ها به دست می‌آید، افزون بر زیست سازگاری، امکان تشکیل فیلم‌های پایدار از طریق پیوندهای یونی دارد و در TENGهای زیست تخریب پذیر استفاده شده است. کاغذ و نیتروسلولوز نیز به عنوان لایه‌های تریوالکتریک ارزان قیمت و دوستدار محیط زیست، عملکرد مناسبی را نشان داده‌اند [۲۸،۲۹].

- مواد سنتزی: این دسته شامل پلیمرهای سنتز شده به طور شیمیایی و خواص تنظیم پذیر است. از مهم ترین آن‌ها می‌توان به پلی لاکتیک اسید (PLA)، پلی کاپرولاکتون (PCL)، پلی لاکتیک-کو-گلیکولیک اسید (PLGA)، پلی وینیل الکل (PVA) و کوپلیمر پلی (۳-هیدروکسی بوتیرات-کو-۳-هیدروکسی والرات) (PHBV) اشاره کرد. PLA و PLGA به دلیل پیوندهای استری و تولید فراورده‌های طبیعی در بدن، زیست جذب پذیر بوده و برای کاربردهای کاشتنی مناسب‌اند. PCL و PVA نیز با انعطاف پذیری، زیست تخریب پذیری و خواص مکانیکی مطلوب، افزون بر کارایی الکتریکی مناسب، قابلیت تولید انبوه و طراحی ساختارهای متنوع برای TENGها را فراهم می‌کنند [۵].

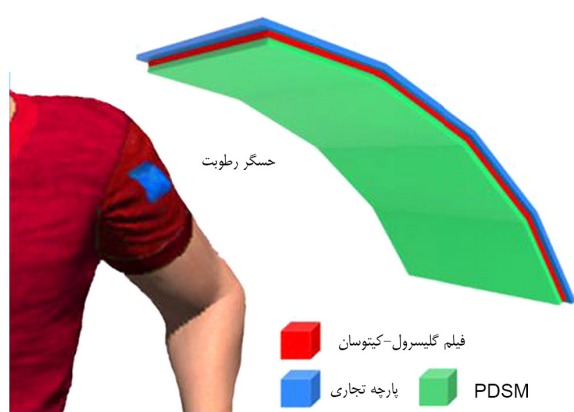
لایه تریوالکتریک بخش اصلی TENGهاست و انتخاب ماده مناسب در کارایی خروجی نقش اساسی دارد. پلیمرهای زیست تجزیه پذیر و زیست سازگار به دلیل ایمنی زیستی، استفاده در تماس مستقیم با بدن و کاربردهای پزشکی را امکان پذیر می‌سازند. این مواد پس از پایان عمر قطعه بدون ایجاد آلودگی تخریب می‌شوند و به توسعه فناوری‌های انرژی سبز کمک می‌کنند. انعطاف پذیری ساختاری آن‌ها، امکان طراحی لایه‌های نازک و کشسان را برای

ادغام در تجهیزات پوشیدنی و کاشتنی افزایش می دهد. همچنین، خواص دی الکتریک مطلوب این پلیمرها با افزایش چگالی بار، بازده تولید انرژی را ارتقا می دهد. ترکیب ویژگی هایی چون انعطاف پذیری، زیست سازگاری، زیست تجزیه پذیری و کارایی دی الکتریک، این مواد را به گزینه ایده آلی برای توسعه نسل جدید TENG ها بدل کرده است.

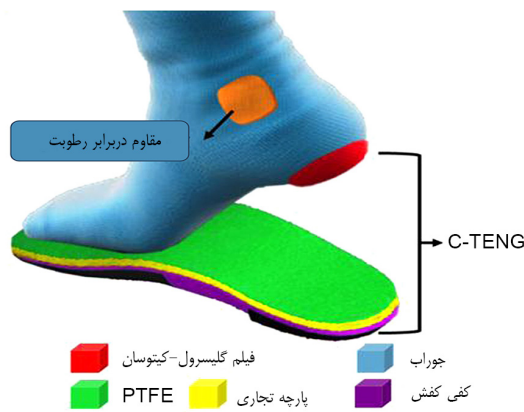
طراحی و توسعه TENG های بر پایه پلیمرهای زیست سازگار

استفاده از پلیمرهای طبیعی زیست سازگار

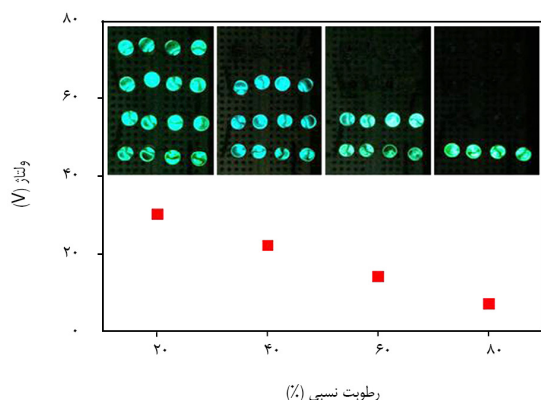
Pan و همکاران [۳۰]، نوعی نانوذرات تریبوالکتریک زیست تخریب پذیر (BD-TENG) بر پایه فیلم ژلاتین و غشای نانوالیاف PLA را توسعه دادند. این قطعه با ابعاد $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ از طریق بهینه سازی خواص سطحی و مکانیکی، ولتاژ مدار باز 500 V ، چگالی جریان $10/6 \text{ mA/m}^2$ و توان بیش از 25 W/m^2 را تولید کرد.



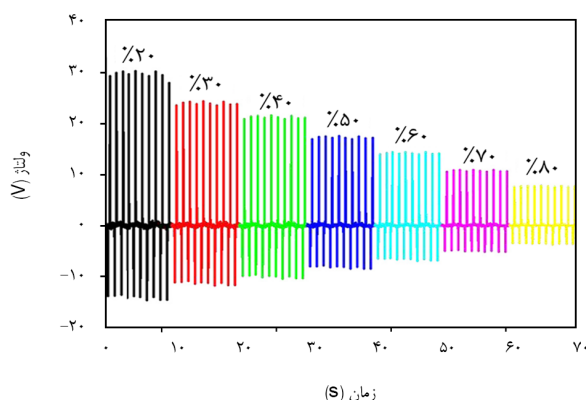
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۲- (الف) ساختار نمادین C-TENG طراحی شده روی جوراب ها و حسگر رطوبت خودتوان بر پایه کیتوسان، (ب) پیکربندی گرافیکی حسگر خودتوان عرق روی منسوجات تجاری، (پ) منحنی ولتاژ متقاطع حسگر رطوبت خودتوان در رطوبت های نسبی مختلف و (ت) LED های تجاری که با ولتاژ خروجی حسگر در رطوبت های نسبی مختلف تغذیه می شوند [۳۱].

به سامانه‌های متداول ارائه می‌دهد (شکل ۲پ). این ویژگی‌ها C-TENG را گزینه امیدبخشی برای پوشاک هوشمند، پایش سلامت و حسگرهای خودتوان (self-powered) می‌سازد.

Niu و همکاران [۳۲]، زیست‌نانوژنراتور تریبوالکتریک تمام‌ابریشمی (all-silk bio-TENG) را با استفاده از فیلم نانونوری ابریشمی (silk nanoribbon film, SNRF) و فیلم فیبروئین ابریشمی بازساختی (regenerative silk fibroin film, RSFF) توسعه دادند. این قطعه به دلیل ساختار زیستی و زیست‌سازگاری برای کاربردهای کاشتنی بسیار مناسب است. اختلاف ریزساختار و تابع کار میان لایه‌های اصطکاکی به تولید ولتاژ مدار باز $41/64\text{ V}$ ، جریان $0/5\text{ }\mu\text{A}$ و چگالی توان $86/7\text{ mW/m}^2$ منجر شد. آزمایش‌های زیستی نیز نشان داد، فیلم SNRF نسبت به RSFF چسبندگی و تکتیر بهتری برای سلول‌های شوان (schwann cells) فراهم می‌کند. افزون‌براین، قطعه تریبوالکتریک قابلیت آن را دارد که تحریکات مکانیکی بسیار ضعیف مانند ضربه انگشت، گام‌برداری و حتی نبض مچ دست را با دقت ثبت کند. این نتایج، کاربرد TENG زیستی تمام‌ابریشمی را در طراحی حسگرهای پوشیدنی و ابزارهای پایش سلامت کاشتنی بسیار نویدبخش می‌سازد.

استفاده از پلیمرهای سنتزی زیست‌سازگار

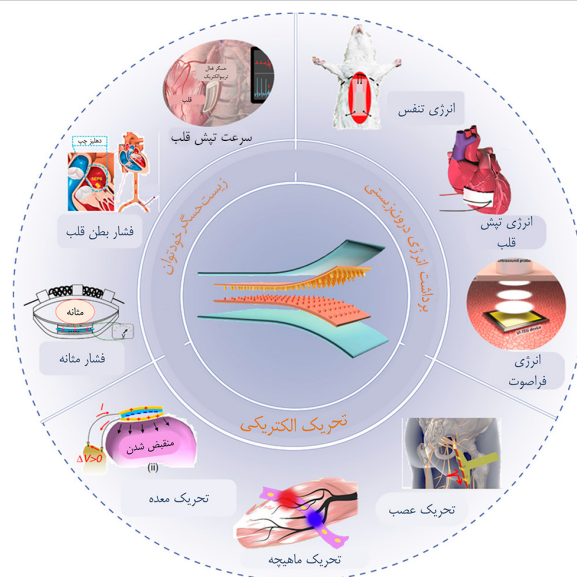
Li و همکاران [۳۳]، نوعی نانوژنراتور تریبوالکتریک کاشتنی و زیست‌تخریب‌پذیر (BD-TENG) را طراحی کردند که از نانومیله‌های طلای حساس به نور زیرقرمز نزدیک برای کنترل سرعت تخریب بهره می‌برد. این قطعه با ساختار آرایه‌ای نیم‌کروی، ولتاژ مدار باز 28 V را در شرایط برون‌تنی و حدود 2 V در شرایط درون‌تنی تولید کرد. آزمایش‌های حیوانی نشان داد، BD-TENG در بدن موش بیش از ۲۸ روز پایدار باقی می‌ماند و تحت تابش نور زیرقرمز نزدیک طی ۱۴ روز به‌طور کامل تخریب می‌شود. افزون‌براین، تحریک الکتریکی ایجادشده به‌وسیله قطعه تریبوالکتریک باعث افزایش مهاجرت فیبروبلاست‌ها شد و روند ترمیم زخم را به‌طور محسوسی سرعت بخشید. این ویژگی‌ها، BD-TENG را به گزینه نویدبخشی برای توسعه سامانه‌های موقت، زیست‌سازگار و کارآمد در حوزه‌های مختلف پزشکی تبدیل می‌کند.

Zheng و همکاران [۳۴]، نوعی نانوژنراتور تریبوالکتریک زیست‌تخریب‌پذیر را با استفاده از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر شامل PVA، PCL، PLGA و PHBV و الکترودهای منیزیمی توسعه دادند. این قطعه قابلیت تولید ولتاژ مدار باز حدود 40 V ، جریان مدار کوتاه نزدیک به 1 mA و چگالی توان $32/26\text{ mW/m}^2$

را داشت. ایجاد ریزساختارهای سطحی روی پلیمرها نیز کارایی خروجی را به‌طور شایان توجهی افزایش داد. آزمایش‌های درون‌تنی نشان داد، BD-TENG بدون ایجاد واکنش التهابی یا سمیت تخریب می‌شود. نمونه‌های پوشش‌یافته با PVA ظرف 72 h و با PLGA طی ۹ هفته از بین رفتند. این سامانه قابلیت برداشت انرژی مکانیکی درون‌بدنی مانند ضربان قلب و حرکات تنفسی را دارد و حتی در جهت‌دهی رشد سلول‌های عصبی نیز می‌تواند مؤثر باشد. این نتایج، BD-TENG را به گزینه نویدبخشی برای ابزارهای پزشکی کاشتنی موقت و سامانه‌های درمانی زیستی بدل می‌سازد.

Peng و همکاران [۳۵]، نوعی پوست الکترونیکی (E-Skin) نوین مبتنی بر نانوژنراتور تریبوالکتریک تمام‌الیافی را ارائه کردند که ویژگی‌هایی چون تنفس‌پذیری، زیست‌تخریب‌پذیری و خاصیت ضدباکتری دارد. این ساختار با قرار دادن نانوسیم‌های نقره میان لایه‌های PLGA و PVA ساخته شد و به دلیل ساختار شبکه‌ای متخلخل میکرو-نانو، سطح تماس زیادی برای تولید بار تریبوالکتریک فراهم آورد. با این قطعه چگالی توان در حدود 2130 mW/m^2 ایجاد شد. خاصیت ضدباکتری آن در برابر باکتری‌های اشرشیا کلی (*E. coli*) و استافیلوکوکوس اورئوس (*S. aureus*) اثبات شد و طول عمر آن با تغییر ترکیب PVA و PLGA از چند ساعت تا چند هفته تنظیم‌پذیر بود. این پوست الکترونیکی قابلیت آن را دارد که سیگنال‌های فیزیولوژیکی (تنفس، نبض و حالات صورت) و حرکات مفاصل را به‌طور بی‌درنگ و با انرژی خودتوان پایش کند و چشم‌اندازی نو برای سامانه‌های پوشیدنی زیست‌سازگار و ایمن در پایش سلامت ارائه دهد.

شکل ۳، نمایی از کاربردهای متنوع نانوژنراتورهای تریبوالکتریک زیست‌سازگار را در حوزه‌های زیست‌پزشکی و برداشت‌کننده انرژی درون‌تنی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، این سامانه‌ها قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی حاصل از پدیده‌های فیزیولوژیکی بدن نظیر میزان تپش قلب، فشار بطن قلب، فشار مثنای و حرکات تنفسی را به انرژی الکتریکی دارند. انرژی تولیدی می‌تواند برای کاربردهایی ازجمله زیست‌حسگرهای خودتوان، برداشت‌کننده انرژی درون‌تنی و تحریک الکتریکی استفاده شود. همچنین، نانوژنراتورهای تریبوالکتریک تحریک هدفمند بافت‌ها و اعصاب، ازجمله تحریک‌های عصبی معده، عضلانی و عصب را امکان‌پذیر می‌سازند. این قابلیت‌ها در کنار زیست‌سازگاری و انعطاف‌پذیری مواد به‌کاررفته، نقش مهمی در توسعه قطعات پوشیدنی و سامانه‌های کاشتنی پایدار با حداقل نیاز به منابع انرژی



مقایسه پلیمرهای زیست سازگار مختلف استفاده شده در ساخت TENGها و کاربردهای گزارش شده آنها در کارهای پژوهشی مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین مقایسه ای از نظر هزینه، میزان دسترس پذیری و چشم انداز تولید در مقیاس بزرگ در جدول ۲ ارائه شده است. براساس داده های این جدول، پلیمرهای طبیعی از لحاظ هزینه کمتر و دسترس پذیری بیشتر دارای مزیت هستند، اما درکل دوام مکانیکی کمتری نشان می دهند. درمقابل، پلیمرهای سنتزی زیست تخریب پذیر نظیر پلی لاکتیک اسید و پلی کاپرولاکتون از توازن مناسب تری میان عملکرد، هزینه و مقیاس پذیری برخوردارند و می توانند گزینه های مناسب تری برای تجاری سازی نانوژنراتورهای تریبو الکتریک به شمار آیند.

چالش ها و چشم انداز آینده

یکی از موانع اصلی در مسیر تجاری سازی نانوژنراتورهای تریبو الکتریک مسائل مرتبط با هزینه مواد، دوام و بازده خروجی است. هرچند مواد کم هزینه ای مانند پلیمرهای زیست تخریب پذیر و منابع طبیعی برای ساخت TENG به کار رفته اند، با این حال دوام کم، استفاده صنعتی از آنها را با محدودیت روبه رو کرده است.

شکل ۳- نمایی از کاربردهای متنوع نانوژنراتورهای تریبو الکتریک زیست سازگار [۱۸].

خارجی ایفا می کنند [۱۸].

مقایسه پلیمرهای زیست سازگار استفاده شده در طراحی نانوژنراتورهای تریبو الکتریک

جدول ۱- مقایسه پلیمرهای زیست سازگار در طراحی نانوژنراتورهای تریبو الکتریک و کاربردهای آنها.

پلیمر	منشأ	الکترو د دیگر	زیست تخریب پذیر- زیست سازگار	خروجی الکتریکی	اندازه (cm×cm)	کاربرد	مرجع
ژلاتین	طبیعی	پلی لاکتیک اسید	هر دو	۵۰۰ V-۱۶ μA	۴×۴	برداشت انرژی	۳۰
کیتین- کیتوسان	طبیعی	پلی تترافلوئورو اتیلن	زیست سازگار	۱۳۰ V-۱۵ μA	۳×۵	زیست حسگر عرق	۳۱
ابریشم- فیبروئین ابریشم	طبیعی	ابریشم باز ساختی	هر دو	۴۱/۶ V-۰/۵ μA	۱×۲	زیست حسگر پوشیدنی	۳۲
PLGA	سنتزی	نانومیل های طلا	هر دو	۲۸ V-۲۲۰ nA	۱/۲×۱/۲	ترمیم بافت	۳۳
PHBV	سنتزی	PLGA-PVA-PCL	هر دو	۲۸ V-۰/۶ μA ۱۳ V-۰/۲ μA ۱۵ V-۰/۳ μA	۲×۳	دستگاه کاشتی با سامانه محرک	۳۴
PVA	سنتزی	PLGA-PHBV-PCL	هر دو	۲۶ V-۰/۴ μA ۱۵ V-۰/۳ μA ۱۳ V-۰/۲ μA	۲×۳	"	۳۴
PLGA	سنتزی	PVA-PHBV-PCL	هر دو	۴۰ V-۱ μA ۲۶ V-۰/۴ μA ۱۵ V-۰/۳ μA	۲×۳	"	۳۴
PCL	سنتزی	PVA-PHBV-PLGA	هر دو	۴۰ V-۱ μA ۲۸ V-۰/۶ μA ۱۵ V-۰/۳ μA	۲×۳	"	۳۴
PLGA	سنتزی	پوست	هر دو	۹۰ V-۱/۵ μA	۲×۲	پوست الکترونیکی	۳۵

جدول ۲- مقایسه پلیمرهای زیست‌سازگار مورد استفاده در نانوژنراتورهای تریبوالکتریک از نظر هزینه، دسترس‌پذیری و چشم‌انداز تولید در مقیاس بزرگ.

پلیمر	منشأ	دوام مکانیکی	دسترس‌پذیری	هزینه نسبی مواد اولیه	پتانسیل تولید انبوه	مرجع
سلولوز	طبیعی	متوسط	بسیار زیاد	بسیار کم	بسیار زیاد	۲۱ و ۵
کیتوسان	طبیعی	کم-متوسط	زیاد	کم	متوسط	۳۱ و ۵
ابریشم	طبیعی	زیاد	محدود	زیاد	محدود	۳۲
ژلاتین	طبیعی	کم	زیاد	کم	متوسط	۳۰
PLA	سنتزی	متوسط	بسیار زیاد	کم-متوسط	بسیار زیاد	۳۳ و ۳۰
PCL	سنتزی	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	۳۴ و ۵
PLGA	سنتزی	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	۳۴ و ۳۳
PVA	سنتزی	کم	بسیار زیاد	کم	زیاد	۳۵ و ۳۴
PLGA	زیست‌پایه	زیاد	محدود	زیاد	محدود	۳۴ و ۲۵

دارد. ادغام فناوری‌های انعطاف‌پذیر ذخیره‌سازی انرژی با TENG می‌تواند نسل جدیدی از تجهیزات پایش سلامت را ممکن سازد. همچنین، توسعه TENG‌های زیست‌تجزیه‌پذیر مبتنی بر امواج فراصوت چشم‌اندازی برای کاهش هزینه‌های جراحی و جایگزینی حسگرهای باتری‌محور فراهم می‌آورد. در کنار آن، طراحی TENG‌های کشسان تک‌الکترودی شبیه پوست می‌تواند مسیر گسترش الکترونیک‌های انعطاف‌پذیر و پایدار را هموار سازد [۱۸، ۱۹].

نتیجه‌گیری

پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، پلیمرهای زیست‌سازگار می‌توانند نقش کلیدی در ارتقای کارایی و پایداری نانوژنراتورهای تریبوالکتریک ایفا کنند و مسیر توسعه سامانه‌های انرژی سبز و کاربردهای پزشکی پیشرفته را هموار سازند. با این حال، چالش‌هایی همچون دوام کم برخی مواد طبیعی، هزینه زیاد مواد کارآمد، محدودیت در مقیاس‌پذیری روش‌های تولید و نیاز به کنترل دقیق تخریب در سامانه‌های کاشتنی، همچنان پابرجاست. دستیابی به نسل آینده TENG‌ها مستلزم تمرکز بر توسعه مواد نوین، طراحی‌های ترکیبی کارآمد و فناوری‌های تولید اقتصادی و پایدار است. این رویکرد می‌تواند راه را برای تجاری‌سازی گسترده TENG‌ها و ادغام آن‌ها در حوزه‌های انرژی، محیط‌زیست و پزشکی هموار کند.

در مقابل، مواد کارآمد نظیر نانولوله‌های کربنی و سرامیک‌ها عملکرد بهتری دارند، اما از نظر اقتصادی به صرفه نیستند. راهکار پیشنهادی، استفاده از کامپوزیت‌ها و کپسول‌دار کردن مواد است تا میان هزینه و عملکرد تعادل ایجاد شود. از سوی دیگر، روش‌های آزمایشگاهی نظیر چاپ سه‌بعدی، بخارنشانی شیمیایی و لیتوگرافی پرهزینه و غیرمقیاس‌پذیرند. از این رو برای تولید انبوه، می‌توان از فناوری‌هایی مانند چاپ پیوسته غلتکی یا ریخته‌گری تحت فشار استفاده کرد. همچنین در فرایند کوچک‌سازی (miniaturization) که برای کاربردهای پوشیدنی و پزشکی ضروری است، توان خروجی TENG کاهش می‌یابد. این موضوع تنها با مهندسی سطح و طراحی‌های هیبریدی بهبودپذیر است. در نانوژنراتورهای تریبوالکتریک زیست‌تخریب‌پذیر نیز چالش‌هایی مشابه وجود دارد از جمله محدودیت در انتخاب مواد زیست‌تخریب‌پذیر با بار سطحی زیاد، دشواری کنترل دقیق زمان تخریب و نگرانی‌های مربوط به پایداری مکانیکی و ایمنی زیستی. بنابراین، توسعه مواد نوین و طراحی‌های چندمنظوره شرط اصلی برای غلبه بر این محدودیت‌ها و حرکت به سمت کاربردهای صنعتی و پزشکی است [۱۸، ۱۹].

نانوژنراتورهای تریبوالکتریک زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر به دلیل نقش مؤثر در کاهش زباله‌های الکترونیکی به‌طور ویژه در ساخت دستگاه‌های پوشیدنی و کاشتنی پزشکی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود پیشرفت‌های اخیر در این حوزه، همچنان نیاز به شناسایی و بهینه‌سازی مواد زیست‌منشأ برای این سامانه‌ها وجود

مراجع

1. Strielkowski W., Civiñ L., Tarkhanova E., Tvaronavičiene M., and Petrenko Y., Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review, *Energies*, **14**, 8240, 2021.
2. Zhu Q., Sun E., Zhao Z. et al., Biopolymer Materials in Triboelectric Nanogenerators: A Review, *Polymers*, **16**, 1304, 2024.
3. Zhu G., Peng B., Jing Q., and Wang Z., Triboelectric Nanogenerators as a New Energy Technology: From Fundamentals, Devices, to Applications, *Nano Energy*, **14**, 126-138, 2015.
4. Wang Y.M., Zeng Q., He L. et al., Fabrication and Application of Biocompatible Nanogenerators, *iScience*, **24**, 102274, 2021.
5. Chao S., Ouyang H., Jiang D., Fan Y., and Li Z., Triboelectric Nanogenerator Based on Degradable Materials, *EcoMat*, **3**, 12072, 2021.
6. Arif U., Haider S., Haider A. et al., Biocompatible Polymers and Their Potential Biomedical Applications: A Review, *Curr. Pharm. Des.*, **25**, 3608-3619, 2019.
7. Yum H.Y., Han S.A., Konstantinov K., Kim S.-W., and Kim J.H., Smart Triboelectric Nanogenerators Toward Human-Oriented Technologies: Health Monitoring, Wound Healing, Drug Delivery, *Adv. Mater. Technol.*, **8**, 10, 2201500, 2023.
8. Xiao X., Xiao X., Nashalian A. et al., Triboelectric Nanogenerators for Self-powered Wound Healing, *Adv. Healthc. Mater.*, **10**, 20, 2100975, 2021.
9. Alam S.N., Ghosh A., Shrivastava P. et al., An Introduction to Triboelectric Nanogenerators, *Nano Struct. Nano Obj.*, **34**, 100980, 2023.
10. 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.
11. Pabba D.P., Satthiyaraju M., Ramasdoss A. et al., MXene-Based Nanocomposites for Piezoelectric and Triboelectric Energy Harvesting Applications, *Micromachines*, **14**, 1273, 2023.
12. Dassanayaka D.G., Alves T.M., Wanasekara N.D., Dharmaseena I.G., and Ventura J., Recent Progress in Wearable Triboelectric Nanogenerators, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2205438, 2022.
13. Zhang Z., Zhang Q., Zhou Z. et al., High-power Triboelectric Nanogenerators by Using In-Situ Carbon Dispersion Method for Energy Harvesting and Self-powered Wireless Control, *Nano Energy*, **101**, 107561, 2022.
14. 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.
15. Sun H., Zhao Y., Jiao S. et al., Environment Tolerant Conductive Nanocomposite Organ Hydrogels as Flexible Strain Sensors and Power Sources for Sustainable Electronics, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2101696, 2021.
16. Cheng J., Ding W., Zi Y. et al., Triboelectric Micro Plasma Powered by Mechanical Stimuli, *Nat. Commun.*, **9**, 3733, 2018.
17. Hosseini V.S.M., Rashidi S., and Ehsani M.H., Enhancing Sustainable Energy Harvesting with Triboelectric Nanogenerators (TENGs): Advanced Materials and Performance Enhancement Strategies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **216**, 115663, 2025.
18. Wang C., Shi Q., and Lee C., Advanced Implantable Biomedical Devices Enabled by Triboelectric Nanogenerators, *Nanomaterials*, **12**(8), 1366, 2022.
19. Zhan F., Wang G., Wu T.T. et al., High Performance Asymmetric Capacitive Mixing with Oppositely Charged Carbon Electrodes for Energy Production from Salinity Differences, *J. Mater. Chem. A*, **5**, 20374-20380, 2017.
20. Lee J.W., Jung S., Lee T.W. Et al., High Output Triboelectric Nanogenerator Based on Dual Inductive and Resonance Effects-Controlled Highly Transparent Polyimide for Self-powered Sensor Network Systems, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1901987, 2019.
21. Chen S., Jiang J., Xu F., and Gong S., Crepe Cellulose Paper and Nitrocellulose Membrane-Based Triboelectric Nanogenerators for Energy Harvesting and Self-Powered Human-Machine Interaction, *Nano Energy*, **61**, 69-77, 2019.
22. Zhang J., Zheng Y., Xu L., and Wang D., Oleic Acid Enhanced Triboelectric Nanogenerator with High Output Performance and Wear Resistance, *Nano Energy*, **69**, 104435, 2020.
23. Lee J.W. et al., Sustainable Highly Charged C60-Functionalized Polyimide in a Non-Contact Mode Triboelectric Nanogenerator, *Energy Environ. Sci.*, **14**, 1004-1015, 2021.
24. Xia J., Zheng Z., and Guo Y., Mechanically and electrically robust, electro-spun PVDF/PMMA blend films for durable triboelectric nanogenerators, *Composites Part A*, **157**, 106914, 2022.
25. Kang M., Lee D.M., Hyun I. et al., Advances in Bioresorbable Triboelectric Nanogenerators, *Chem. Rev.*, **123**, 11559-11618, 2023.
26. Jiang W., Li H., Liu Z. et al., Fully Bioabsorbable Natural-Materials-Based Triboelectric Nanogenerators, *Adv. Mater.*, **30**, 1801895, 2018.
27. Han Y., Han Y., and Zhang X., 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.
28. Wu C., Kima T.W., Sung S., Park J.H., and Li F., Ultrasoft and

- Cutable Paper-Based Triboelectric Nanogenerators for Mechanical Energy Harvesting, *Nano Energy*, **44**, 279-287, 2018.
29. He X., Zou H., and Geng Z., A Hierarchically Nanostructured Cellulose Fibre-Based Triboelectric Nanogenerator for Self-powered Healthcare Products, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1805540–1805547, 2018.
 30. Pan R., Xuan W., Chen J. et al., Fully Biodegradable Triboelectric Nanogenerators Based on Electrospun Polylactic Acid and Nanostructured Gelatin Films, *Nano Energy*, **45**, 193–202, 2018.
 31. Jao Y.T., Yang P.-K., Chiu C.-M. et al., A Textile-Based Triboelectric Nanogenerator with Humidity-Resistant Output Characteristic and Its Applications in Self-powered Healthcare Sensors, *Nano Energy*, **50**, 513–520, 2018.
 32. Niu Q., Huang L., Lv S., Pulse-Driven Bio-triboelectric Nanogenerator Based on Silk Nanoribbons, *Nano Energy*, **74**, 104837, 2020.
 33. Li Z., Feng H., Zheng Q. et al., Photothermally Tunable Biodegradation of Implantable Triboelectric Nanogenerators for Tissue Repairing, *Nano Energy*, **54**, 390–399, 2018.
 34. Zheng Q., Zou Y., Zhang Y. et al., Biodegradable Triboelectric Nanogenerator as a Life-Time Designed Implantable Power Source, *Sci. Adv.*, **2**, 1501478, 2016.
 35. Peng X., Dong K., Ye C. et al., A Breathable, Biodegradable, Antibacterial, and Self-Powered Electronic Skin Based on All-Nanofiber Triboelectric Nanogenerators, *Sci. Adv.*, **6**, 9624, 2020.