

اصطکاک: اتلاف یا تولید انرژی؟- معرفی نانوژنراتورهای تریبوالکتریک^۱

فائزه ازهای^۱، راحله محمدپور^{۱*}، پژمان ساسانپور^۲، امید اخوان^۳، محمدعلی شکرگزار^۴

۱- پژوهشکده‌ی علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- گروه مهندسی و فیزیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران

۳- دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۴- بخش بانک سلولی، انستیتو پاستور ایران، تهران

چکیده

با ورود تجهیزات الکترونیکی قابل حمل به زندگی روزمره‌ی انسان‌ها، نیاز به منابع انرژی کم‌حجم و در دسترس به شدت گسترش یافته است. نانوژنراتورهای تریبوالکتریک این قابلیت را دارند که با بهره‌گیری از تجمع بارهای الکترواستاتیک ناشی از اصطکاک، انرژی الکتریکی مورد نیاز برای راه‌اندازی بسیاری از ادوات الکترونیکی را تأمین کنند. هنگامی که دو سطح با اعمال نیروی مکانیکی با یکدیگر اتصال می‌یابند، بار تریبوالکتریک بر آن‌ها ایجاد می‌شود. با جدا شدن دو سطح از یکدیگر، بارهای موجود روی سطوح یک اختلاف پتانسیل ایجاد می‌کنند که می‌تواند باعث تولید جریان الکتریکی شود. از زمان اختراع نانوژنراتورهای تریبوالکتریک در سال ۲۰۱۲، پیشرفت‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی طراحی و به کارگیری مواد گوناگون صورت گرفته که باعث بهبود مقدار توان خروجی تا بیش از 2600 W/m^2 شده است. امروزه، نانوژنراتورهای تریبوالکتریک در زمینه‌های بسیار متنوعی از جمله حسگرهای خودمولد، صفحات لمسی و پوست الکترونیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای این منظور، صورت‌های متفاوتی از انرژی مکانیکی در محیط قابلیت تبدیل به انرژی الکتریکی را حاصل کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به حرکات طبیعی بدن انسان، ارتعاشات ناشی از صوت و جریان آب اشاره کرد. در این پژوهش، پس از معرفی ویژگی تریبوالکتریک و نحوه‌ی عملکرد نانوژنراتورهای تریبوالکتریک، به خلاصه‌ای از کاربردهای این منابع پاک و کم‌هزینه‌ی انرژی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: نانوژنراتور تریبوالکتریک، اصطکاک، انرژی مکانیکی، انرژی الکتریکی، خودمولد

ایمیل نویسنده مسئول: mohammadpour@sharif.edu

¹ Triboelectric nanogenerator

۱- مقدمه

با ورود ادوات الکترونیکی به زندگی انسان و گسترش کاربردهای آن در زندگی روزمره، تلاش‌های بسیاری به منظور ساخت منابع انرژی کوچکتر و قابل حمل انجام شده است. پرکاربردترین منابع انرژی مورد استفاده در ادوات الکترونیکی قابل حمل، باتری‌های لیتیومی هستند که به طور مداوم نیاز به شارژ دارند. از این رو کاربر نیاز دارد در مدت زمان کوتاهی باتری را شارژ و پس از مدت زمان مشخصی آن را تعویض کند. افزون بر این، تعداد ادوات الکترونیکی که افراد روزانه استفاده می‌کنند در حال افزایش است و هر کدام از این ادوات نیاز به منبع انرژی مجزایی دارد.

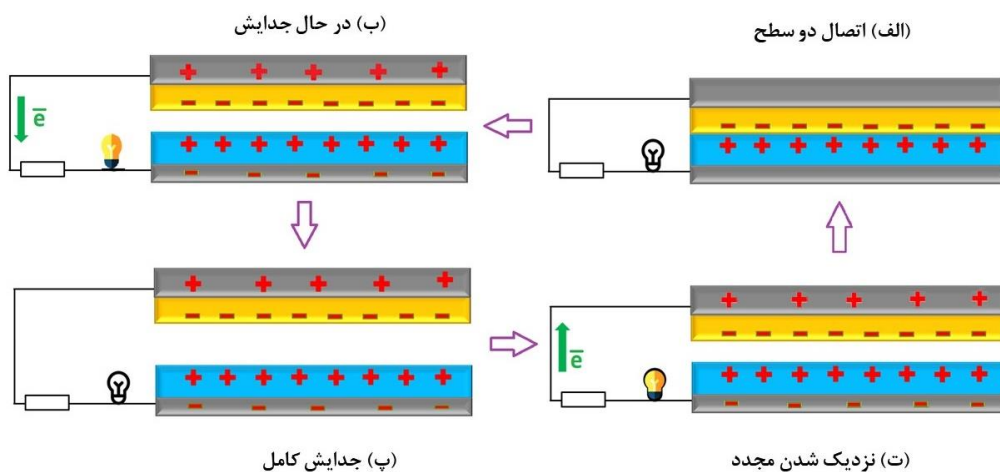
همواره یکی از راه‌حل‌های جایگزین جهت سهولت دسترسی به انرژی الکتریکی و نیز کاهش آلودگی محیط زیست، استفاده از انرژی‌های پاک بوده است. گرچه امروزه در بسیاری از کشورها از نور خورشید، باد، امواج دریا و سایر منابع تجدیدپذیر به منظور تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود، اما نمی‌توان از این منابع به طور مستقیم در ادوات الکترونیکی قابل حمل استفاده کرد. راه حلی که در سال‌های اخیر مطرح شده و به سرعت در حال پیشرفت است، استفاده از انرژی مکانیکی اتلافی در محیط است. با معرفی نانوژنراتورهای پیزوالکتریک در سال ۲۰۰۶ [۱]، برای نخستین بار این ایده مطرح شد که می‌توان با استفاده از موادی که خاصیت پیزوالکتریک دارند، از انرژی مکانیکی، انرژی الکتریکی تولید کرد.

در سال ۲۰۱۲ و با ظهور نانوژنراتورهای تریبوالکتریک [۲]، قدم‌های بزرگتری به منظور بهره‌برداری از انرژی مکانیکی برداشته شد. در این نانوژنراتورها، افزون بر افزایش چشمگیر توان خروجی، از تجمع بار سطحی برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شود که پیش از این عمدتاً به عنوان پدیده‌ای مزاحم شناخته می‌شد [۳]. به منظور آشنایی بیشتر با این فرایند

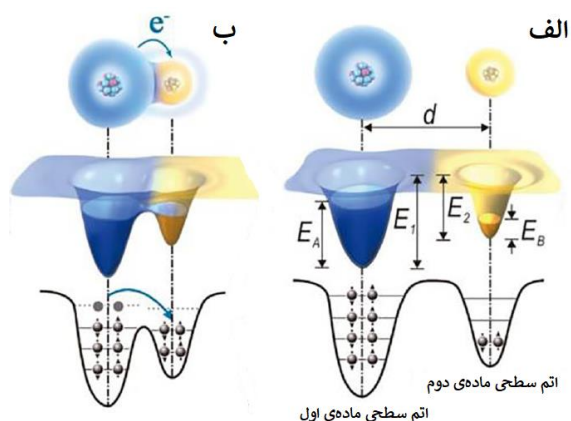
نوین تولید انرژی، ابتدا به معرفی پدیده تریبوالکتریک و بررسی انواع نانوژنراتورهای تریبوالکتریک پرداخته می‌شود و سپس، به کاربردهای متنوعی که این منابع انرژی پاک در حیطه‌های متفاوت زندگی خواهند داشت، اشاره خواهد شد.

۲- پدیده تریبوالکتریک

اگر سطح دو جسم با جنس متفاوت با یکدیگر اتصال داشته باشد و یک نیروی خارجی این دو سطح را به یکدیگر فشرده کند، بار الکتریکی روی سطوح ایجاد می‌شود که به آن اثر تریبوالکتریک گویند [۴]. حرکت دو سطح نسبت یکدیگر می‌تواند افقی و یا عمودی باشد، که در حالت اول اصطلاح اصطکاک و در حالت دوم اصطلاح ضربه به کار می‌رود. با وجودی که قدمت شناسایی پدیده تریبوالکتریک به حدود ۳۰۰۰ سال می‌رسد اما همچنان درباره‌ی نحوه‌ی ایجاد بار روی سطوح ابهاماتی وجود دارد [۵]. هنگامی که دو سطح با اعمال نیروی مکانیکی از یکدیگر جدا می‌شوند، بارهای القاشده روی سطوح منجر به تولید اختلاف پتانسیل می‌شوند [۴]. در صورتی که در پشت هر لایه (با ضخامت به اندازه کافی نازک) دو صفحه‌ی رسانا قرار بگیرد و هر دو صفحه با یک سیم رسانا به هم متصل شوند، امکان برقراری تعادل بار وجود دارد [۳]. در این حالت بارهای تجمع یافته روی دو سطح، بار مخالفی را روی صفحات رسانا القا می‌کنند که باعث می‌شود الکترون‌ها از یک رسانا به دیگری منتقل شوند. در نتیجه جریان الکتریکی از یک الکترون به دیگری منتقل می‌شود. هنگامی که دو سطح مجدداً به یکدیگر نزدیک می‌شوند، الکترون‌ها باید مسیر عکس را طی کنند تا تعادل بار برقرار شود [۳]. در این حالت جریان الکتریکی به صورت غیرخطی (AC) تولید می‌شود. فرایند تولید الکتریسیته در نانوژنراتورهای تریبوالکتریک در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- نحوه تولید جریان الکتریکی در نانوژنراتورهای تریبوالکتریک به کمک اعمال ضربه: الف-اتصال دو سطح با یکدیگر، ب- فرایند جدایش دو سطح از یکدیگر، پ- جدایش کامل دو سطح از یکدیگر، ت- نزدیک شدن مجدد دو سطح به یکدیگر.



شکل ۲- چاه پتانسیل اتم‌های سطحی در دو ماده: الف- قبل از اتصال کامل دو سطح، ب- پس از اتصال کامل با اعمال نیرو [۴].

بنا بر آنچه گفته شد، برای انتقال الکترون از یک سطح به سطح دیگر، لازم است تماسی همراه با اعمال نیرو بین دو سطح ایجاد شود. در این صورت هر گونه انرژی مکانیکی -هرچند اندک- قابل تبدیل به انرژی الکتریکی است. انرژی مکانیکی مورد استفاده برای حرکت دادن صفحات نسبت به یکدیگر می‌تواند به صورت‌های متفاوتی در محیط وجود داشته باشد. به عنوان مثال می‌توان به حرکت بدن انسان، راه رفتن، گردش خون، ارتعاش، گردش چرخ، وزش باد و جریان آب اشاره کرد [۳].

۳- انواع نانوذرات‌های تریبو الکتریک

نانوذرات‌های تریبو الکتریک دارای چهار حالت اصلی‌اند: اتصال- جدایش عمودی^۱، لغزش افقی^۲، تک‌الکترونی^۳ و لایه‌ی معلق^۴ [۳]. در ادامه به توضیح هر یک از این چهار حالت می‌پردازیم.

۳-۱- حالت اتصال- جدایش عمودی

در این حالت سطح دو ماده به کمک ضربه‌های متناوب با یکدیگر اتصال برقرار می‌کنند (شکل ۳-الف). همان طور که در بخش ۲ اشاره شد، هنگامی که دو ماده با یکدیگر در اتصالند، بر اثر پدیده‌ی تریبو الکتریک بار الکتریکی روی دو سطح ایجاد می‌شود [۴]. در این حالت هر دو سطح در تعادل الکترواستاتیکی قرار دارند. با فاصله گرفتن دو سطح از یکدیگر، دو ماده از شرایط تعادل فاصله می‌گیرند. حال اگر بین دو اتصال الکتریکی وجود نداشته و مدار باز باشد، ولتاژ بین دو سطح افزایش می‌یابد و پس از بازگشت به حالت اولیه، ولتاژ دوباره صفر می‌شود [۳] (شکل ۴-الف). واضح است که با جابجایی سیم‌های متصل به پایه‌ی ولت‌متر، جهت قله تغییر می‌کند.

بر سطح هر دو ماده‌ی متفاوت که با نیرو با یکدیگر تماس یابند، بار مثبت و منفی ایجاد می‌شود [۴]. تعیین نوع بار روی هر یک از سطوح بستگی دارد به تمایل آن ماده به گرفتن یا از دست دادن الکترون. سری تریبو الکتریک مواد (جدول ۱) به ما کمک می‌کند تا براساس جایگاه ماده در این سری، نوع بار سطحی هر دو ماده را نسبت به هم تشخیص دهیم [۳]. به عنوان مثال اگر پارچه‌ی پشمی به سطح آلومینیم مالش داده شود، روی سطح پارچه بار مثبت و روی آلومینیم بار منفی ایجاد می‌شود؛ در حالی که برای پلی‌استر و آلومینیم علامت بارها برعکس خواهد بود. واضح است که هر چه فاصله‌ی دو ماده در سری تریبو الکتریک از یکدیگر بیشتر باشد، مقدار بار سطحی بر سطح هر دو ماده افزایش می‌یابد.

هرچند فرایند ایجاد بار تریبو الکتریک روی سطوح هنوز کاملاً مشخص نیست، اما مقبول‌ترین نظریه در این باره بر اساس انتقال الکترون‌ها بین دو سطح مطرح شده است [۴]. مطابق شکل ۲، با نزدیک شدن دو اتم به یکدیگر (در گستره جاذبه)، هیچ الکترونی بین دو نوع اتم سطحی منتقل نمی‌شود (شکل ۲-الف). بالاترین انرژی در اتم سطحی ماده‌ی اول برابر E_A و در ماده‌ی دوم برابر E_B است. الکترون‌های اتم سطحی در ماده‌ی نخست برای خروج از چاه پتانسیل نیاز دارند از سد پتانسیل با انرژی E_1 عبور کنند و این مقدار برای ماده‌ی دوم برابر E_2 است [۴]. اما در صورتی که این دو اتم با اعمال نیرو تا جایی به یکدیگر نزدیک شوند که چاه پتانسیل آنها به میزان کافی با یکدیگر تداخل یابد (در گستره دافعه)، امکان انتقال الکترون از یک ماده به ماده‌ی دیگر وجود دارد (شکل ۲-ب). در این حالت الکترون از اتم سطحی در یک ماده به تراز انرژی پایین‌تر در ماده‌ی دیگر منتقل می‌شود [۴]. برای این انتقال بستگی به نسبت E_A و E_B دارد و بر اساس آن‌ها نوع بار روی سطح هر ماده تعیین می‌شود.

جدول ۱: بخشی از سری تریبو الکتریک مواد [۳ و ۵].

نوع ماده	
دست انسان	
پلی آمید	
پشم	+
ابریشم	
آلومینیم	
سلولز	
فولاد	
چوب	
مس	
نقره	
پلی‌استر	
پلی‌استایرن	
پلی‌اتیلن	
پلی‌پروپیلن	-
پلی‌ایمید (کپتون)	
پلی‌تترافلوئورو اتیلن (تفلون)	

¹ Vertical contact-separation mode

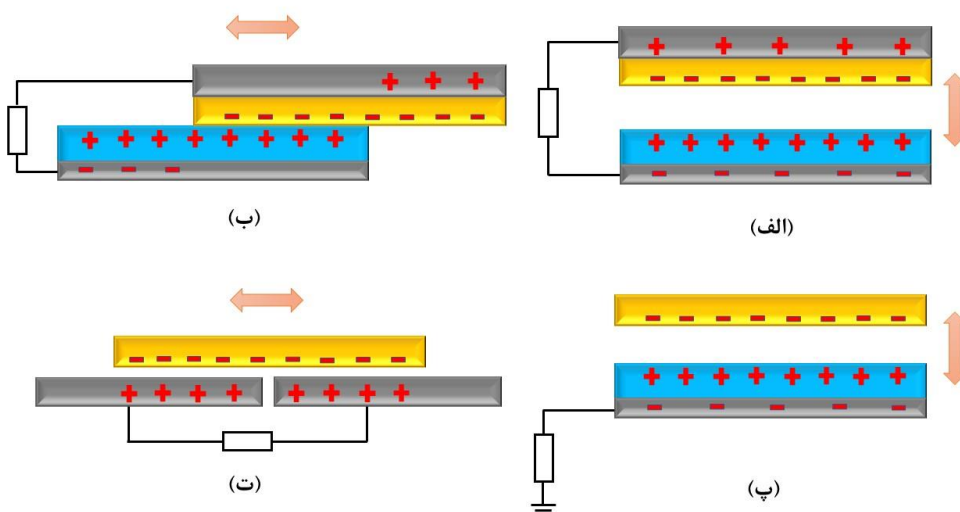
² Lateral sliding mode

³ Single-electrode mode

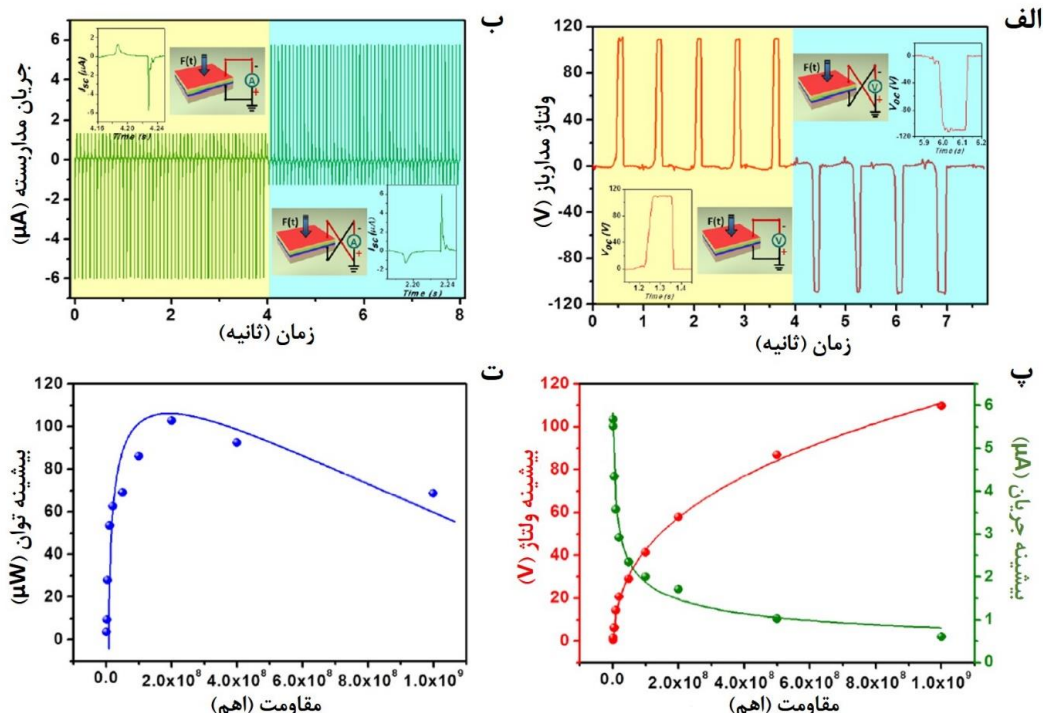
⁴ Freestanding layer mode

ضربه زدن بستگی دارد. این جریان متناوب را می‌توان به کمک یک پل دیود یکسو کرد و سپس در یک خازن ذخیره کرد. عموماً، مقدار جریان و ولتاژ خروجی با افزایش بسامد و نیروی ضربه افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه برسد [۳]. در حالت مدار باز، مقدار ولتاژ در مقاومت بی‌نهایت و در حالت مدار بسته، مقدار جریان در مقاومت صفر به دست می‌آید. به منظور تعیین مقدار توان نانوژنراتور، ولتاژ و جریان در مقادیر متفاوت مقاومت اندازه‌گیری (شکل ۴-پ) و سپس بالاترین مقدار به عنوان بیشینه‌ی چگالی توان تولیدی گزارش می‌شود [۶] (شکل ۴-ت). با تقسیم این مقدار بر سطح یا حجم نانوژنراتور به ترتیب، مقدار چگالی سطحی یا حجمی توان محاسبه می‌شود.

برای ایجاد حالت تعادل در کل فرایند ضربه، لازم است روی دو اتصال فلزی که در پشت دو ماده قرار دارند بار القا شود [۳]. در صورتی که دو سطح با یکدیگر اتصال الکتریکی داشته باشند، الکترون‌ها از یک الکتروود به الکتروود دیگر منتقل و جریان الکتریکی در مدار مشاهده می‌شود. هنگامی که به اندازه‌ی کافی بار روی دو اتصال فلزی قرار گرفت، دوباره حالت تعادل برقرار می‌شود و جریان صفر خواهد شد [۵]. با حرکت مجدد دو ماده به سمت یکدیگر بایستی بار از روی اتصالات حذف شود تا باز هم تعادل برقرار شود [۳]. در این حالت الکترون‌ها عکس مسیر قبلی را در مدار طی می‌کنند تا کل مجموعه به حالت تعادل بازگردد [۳]. در نتیجه در هر حرکت رفت و برگشتی، یک قله‌ی مثبت و یک قله‌ی منفی برای جریان مشاهده می‌شود [۶] (شکل ۴-ب). رفتار این قله‌ها به نحوه‌ی



شکل ۳- چهار حالت نانوژنراتورهای تریبوالکتریک: الف- اتصال- جدایش عمودی، ب- لغزش افقی، پ- تک الکتروودی و ت- لایه‌ی معلق.



شکل ۴- ویژگی نانوژنراتور تریبولکتریک با الکترودهای کیتون و پلی متیل متاکریلات (PMMA): الف- ولتاژ مدار باز، ب- جریان مدار بسته، پ- تغییرات بیشینه ولتاژ و جریان بر حسب مقدار مقاومت، ت- بیشینه توان تولیدی در هر مقاومت [۶].

۳-۲- لغزش افقی

در این حالت، دو ماده به طور افقی روی یکدیگر می‌لغزند و یک مسیر رفت و برگشتی را طی می‌کنند (شکل ۳-ب). فرایند تولید جریان الکتریکی در این حالت مشابه حالت قبل است با این تفاوت که حرکت دو ماده نسبت به یکدیگر افقی است و در نتیجه مقدار سطح در حال تماس بین دو ماده تغییر می‌کند. در این حالت، بار الکتریکی فقط در قسمتی از رساناها القا می‌شود که دو سطح با یکدیگر در تماس نیستند [۳]. این حالت برای کاربردهای با بسامد بالا مطلوب‌تر است و برخلاف حالت عمودی می‌تواند جریان پیوسته تولید کند [۵]. با این وجود، سایش مداوم دو سطح روی یکدیگر باعث تخریب سریع تر سطوح می‌شود و در نتیجه پایداری نانوژنراتور افت می‌کند [۵].

۳-۳- حالت تک الکترودی

در این حالت، اتصال فلزی تنها در پشت یکی از الکترودها قرار می‌گیرد و به الکتروود مرجع متصل است (شکل ۳-پ). در این شرایط، الکتروود مرجع (زمین) منبع شار الکترون‌ها خواهد بود [۳]. این حالت برای استفاده در صفحات لمسی بسیار مناسب است و پوست دست (که همواره بار مثبت دارد) می‌تواند با اتصال روی صفحات، بار منفی ایجاد کند [۳]. هرچند توان خروجی این نوع از نانوژنراتورها پایین است اما به دلیل سهولت استفاده و کم‌جا بودن، آینده‌ی روشنی در صنعت صفحات لمسی و گوشی‌های هوشمند خواهد داشت [۵].

۳-۴- لایه‌ی معلق

در این حالت نیز مشابه حالت دوم، حرکت مکانیکی افقی انجام می‌شود و یک لایه در بالای دو الکتروود به صورت معلق حرکت می‌کند (شکل ۳-ت). در این حالت دو الکتروود پایینی با یکدیگر در اتصالی و با حرکت جسم معلق باردار در بالای آنها، بار الکتریکی از یکی به دیگری منتقل می‌شود [۳]. از لحاظ نظری این ساختار بالاترین بازدهی را دارد، اما به دلیل ساختار خاص آن نمی‌توان در کاربردهای متنوعی از آن بهره گرفت [۵].

۴- کاربردهای نانوژنراتورهای تریبولکتریک

نانوژنراتورهای تریبولکتریک یکی از منابع کم‌هزینه و در دسترس برای تولید جریان الکتریکی هستند. این نانوژنراتورها می‌توانند به اشکالی بسیار متنوع و متناسب با کاربرد مورد نظر تهیه شوند. یکی از ساده‌ترین ساختارهای نانوژنراتورهای تریبولکتریک، ساختار کمانی شکل است که در حالت اتصال-جدایش عمودی کار می‌کند و در سمت راست شکل ۵-الف مشاهده می‌شود [۳]. ساختارهای دیگری با استفاده از فنر (برای جدایش آسانتر صفحات)، به صورت زیگزاگ (برای افزایش توان تولیدی) و به شکل تانکر (به منظور استفاده از هرگونه جابجایی مکانیکی در هر راستا) پیشنهاد شده‌اند [۵] (شکل ۵-الف). علاوه بر این، اشکال متنوعی از نانوژنراتورهای تریبولکتریک می‌توانند به طرق متفاوت از جمله کفی کفش، لباس، دیسک چرخان و صفحات لمسی طراحی شوند [۳] (شکل

۴-۱- حسگرهای خودمولد

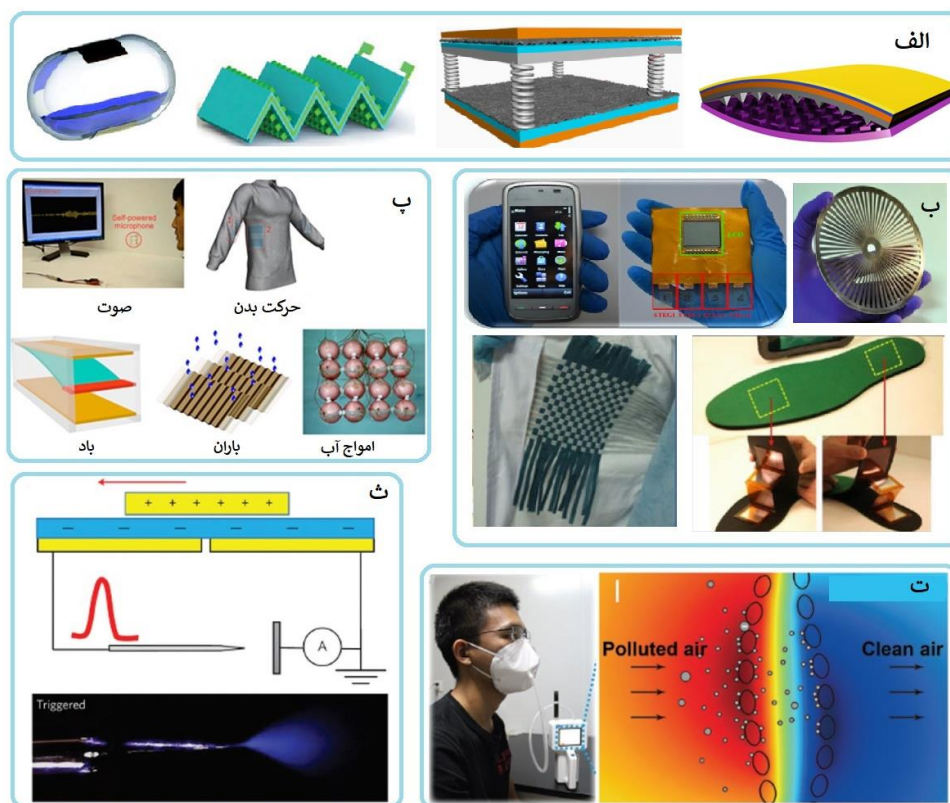
همان گونه که پیش از این اشاره شد، مقدار جریان و ولتاژ خروجی رابطه‌ی مستقیمی با مقدار نیروی اعمال شده دارد. بنابراین، نخستین کاربردی که می‌توان برای نانوذراتورها در نظر گرفت، حسگرهای فشار یا نیرو هستند [۹]. مطابق شکل ۶-الف، با افزایش نیروی ضربه، مقدار ولتاژ مدارباز افزایش می‌یابد [۱۰]. برای بررسی نحوه‌ی پاسخ حسگر به تغییرات نیرو، تغییرات $(V_0 - V)/V_0$ را بر حسب تغییر فشار در نظر می‌گیرند. مطابق شکل ۶-ب، پاسخ حسگر دارای دو منطقه‌ی خطی است که در آن‌ها حساسیت مناسبی به تغییرات مشاهده می‌شود [۱۰]. در اینجا، حساسیت حسگر معادل مقدار شیب نمودار پاسخ تعریف شده است.

اگر تغییرات نیرو در حین اعمال ضربه رخ دهد، بهتر است که به جای ولتاژ، پاسخ جریان خروجی مداربسته بررسی شود [۱۰] (شکل ۶-پ). از آن جایی که فشار به صورت مقدار نیرو بر واحد سطح تعریف می‌شود، معمولاً مقدار جریان نیز بر واحد سطح و به صورت چگالی جریان گزارش می‌شود. در این حالت مشاهده می‌شود که با تغییر مداوم نیرو (و در نتیجه فشار اعمالی)، مقدار چگالی جریان خروجی افزایش می‌یابد. همان طور که در شکل ۶-ت ملاحظه می‌شود، این روند برگشت‌پذیر است و با کاهش نیرو، همان مسیر رفت را طی می‌کند [۱۰].

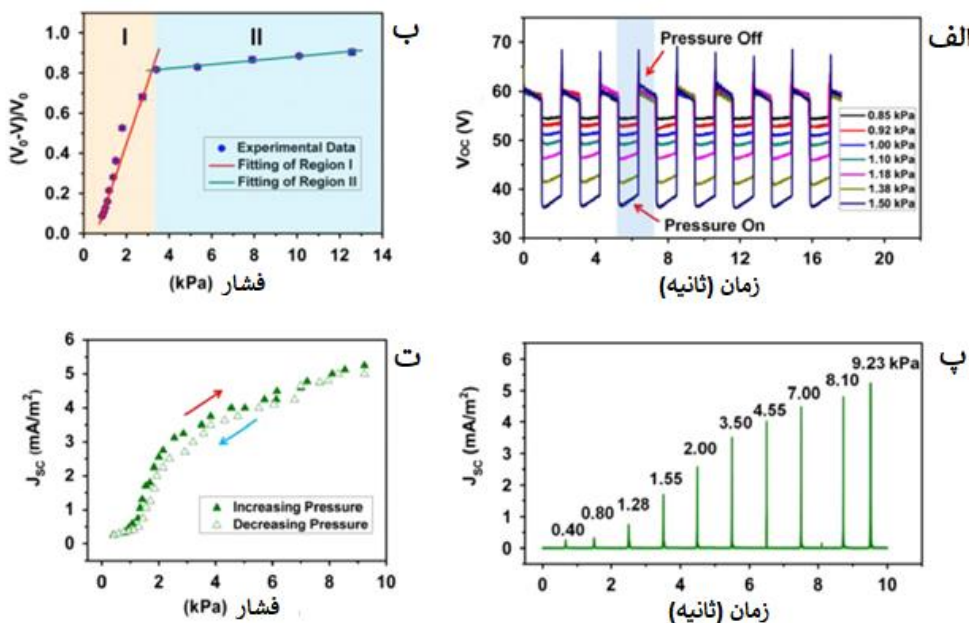
۵-ب). انرژی مکانیکی مورد نیاز هم می‌تواند به صورت‌های متفاوتی از جمله حرکات بدن انسان، ارتعاشات ناشی از صوت، نیروی امواج آب، باران و وزش باد مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۷] (شکل ۵-پ). با اتصال هر نانوذراتور به یک خازن یا باتری قابل شارژ، می‌توان انرژی الکتریکی مورد نیاز را ذخیره و در موقع لزوم مصرف کرد.

از آن جایی که نانوذراتورها جریان پایینی (در گستره میکروآمپر) تولید می‌کنند، معمولاً لازم است که جریان خروجی به کمک یک ترانسفورماتور تقویت شود. اما از طرفی، برای کاربردهایی که نیاز به ولتاژ بالا دارند، نیازی به تقویت جریان نیست [۸]. به عنوان مثال، یکی از راه‌های تصفیه‌ی هوای آلوده، استفاده از فیلترهایی است که دارای ولتاژ بالایی هستند و ذرات را به خود جذب می‌کنند [۷] (شکل ۵-ت). همچنین در مواردی که نیاز به گسیل پرتو در اثر یک میدان قوی وجود دارد، می‌توان از ولتاژ بالای نانوذراتورهای تریبوالکتریک به طور مستقیم استفاده کرد [۸] (شکل ۵-ث).

در کاربردهای بالا، نانوذراتورهای تریبوالکتریک صرفاً نقش منبع تغذیه را ایفا می‌کنند. اما گاهی عوامل محیطی می‌توانند تغییرات مستقیمی روی جریان و یا ولتاژ خروجی داشته باشد. در این صورت نیازی به ذخیره‌ی انرژی نیست و نانوذراتورها نقش فعالی را در مجموعه بازی می‌کنند. پس از معرفی نانوذراتورهای تریبوالکتریک در سال ۲۰۱۲، انبوهی از کاربردهای متنوع در زمینه‌های گوناگون حسگری، پزشکی، الکترونیک و ... برای آنها مطرح شده است. در ادامه به بخشی از شاخص‌ترین پژوهش‌هایی که در این زمینه انجام گرفته است، اشاره خواهد شد.



شکل ۵- الف- انواع ساختارهای نانوژنراتورهای تریبوالکتریک (از راست به چپ): کمانی شکل، با استفاده از فنر، زیگزگ و به شکل تانکر [۵]، ب- برخی از انواع نانوژنراتورهای تریبوالکتریک ساخته شده [۳]، پ- انواع انرژی مکانیکی مورد استفاده جهت تولید جریان الکتریکی [۷]، ت- جذب آلودگی هوا به کمک ولتاژ بالای ایجاد شده روی فیلتر توسط نانوژنراتور تریبوالکتریک [۸]، ث- طیف سنجی جرمی مولکولی به کمک نانوژنراتور تریبوالکتریک [۷].



شکل ۶- حسگر فشار: الف- تغییرات ولتاژ مدار باز و ب- پاسخ ولتاژ به تغییرات فشار، پ- تغییرات چگالی جریان مدار بسته و ت- پاسخ جریان به تغییرات فشار [۱۰].

ولتاژ تولید و در صورت قطع تماس، ولتاژ مجدداً صفر می‌شود. حسگرهای لمسی می‌توانند کاربردهای متنوعی داشته باشند. به عنوان مثال، به محض تماس دست با دستگیره در، یک پالس الکتریکی به آژیر خطر ارسال می‌شود و آن را روشن می‌کند.

حسگر بالا در حالت اتصال- جدایش عمودی کار می‌کند، اما اگر حسگر به صورت تک‌الکترودی ساخته شود می‌تواند هر گونه تماس با سطح نانوژنراتور را نشان دهد که به آن حسگر لمسی گویند [۱۱]. در این حالت، در اثر تماس پوست با نانوژنراتور،

[۱۱]. همچنین، اگر نانوذراتور به صورت شفاف تهیه شود می‌توان از آن در صفحات لمسی استفاده کرد [۱۱]. افزون بر این، می‌توان حسگرهای خودمولدی تهیه کرد که مکان جسم بر یک صفحه، جایجایی یک جسم روی مسیر مشخص، سرعت چرخش دورانی یک پره و یا شدت ارتعاشات ناشی از صوت را نشان دهد [۹].

دسته‌ی دیگری از حسگرهای خودمولد که می‌توان به کمک نانوذراتورها تهیه نمود، حسگرهای گازی هستند. در این حسگرها، نانوذراتورها به دو صورت نقش ایفا می‌کنند. در حالت اول، نانوذراتور در مداری با یک الکتروود حساس به گاز قرار می‌گیرد [۱۲] (شکل ۷-الف). با نشستن گاز روی سطح الکتروود، مقاومت آن تغییر می‌کند و به همین دلیل میزان ولتاژ و جریان خروجی نانوذراتور نیز تغییر می‌یابد (شکل ۷-ب). اما در حالت دوم، یکی از الکتروودهای به کار رفته در نانوذراتور به گاز حساس است و در اثر نشست گاز، مقدار ولتاژ (و گاهی جریان) تغییر می‌کند [۱۳] (شکل ۷-پ). تاکنون حسگرهای گازی متنوعی بر پایه‌ی نانوذراتورها معرفی شده‌اند که توانسته‌اند تغییرات رطوبت [۱۲ و ۱۳]، اتانول [۱۴]، H_2 [۱۵]، C_2H_2 [۱۶] و NH_3 [۱۷] را گزارش کنند.

در حسگرهای نوری مانند حسگرهای گاز، نانوذراتور می‌تواند نقشی فعال یا غیرفعال ایفا کند [۱۸]. در این حسگرها از یک ماده‌ی حساس به نور استفاده می‌شود و معمولاً با تابش طیف مشخصی از نور، مقاومت تغییر می‌کند (شکل ۷-ت) [۱۹]. گاهی نیز این تغییرات به صورت مستقیم و با مشاهده‌ی تغییرات جریان و ولتاژ خروجی نانوذراتور سنجیده می‌شود [۲۰]. نانوذراتور علاوه بر شناسایی گستره مشخصی از طیف نور، شدت آن را نیز تعیین می‌کند [۱۹]. بدین ترتیب، امکان ساخت شناساگرهای نوری خودمولد با قابلیت تعیین همزمان طول موج و شدت نور فراهم می‌شود. علاوه بر آنچه در این بخش عنوان شد، امکان ساخت حسگرهای خودمولد دیگر بر پایه نانوذراتورها وجود دارد. به عنوان مثال، جذب یک گونه‌ی شیمیایی روی سطح الکتروود می‌تواند بار الکتریکی سطحی و در نتیجه مقدار جریان و ولتاژ را تغییر دهد [۹]. در نتیجه می‌توان مقدار یک یون یا مولکول را در محیط حاوی انواع گونه‌های شیمیایی گزارش کرد. به عنوان مثال در شکل ۷-ث، یون جیوه در محیطی حاوی یون‌های دیگر با انتخاب‌پذیری بالا شناسایی شده است [۲۱].

۴-۲- کاربردهای زیستی

فرایند گردش خون در بدن می‌تواند به عنوان منبع انرژی مکانیکی لازم برای نانوذراتورها استفاده شود. همزمان می‌توان از انرژی الکتریکی تولیدشده برای بهبود فرایند خون‌رسانی بهره برد [۳]. انرژی مکانیکی حاصل از تپش قلب، کشش عضلات و یا انقباض آئورت برای تولید جریان الکتریکی مفیدند [۲۲]. علاوه بر این می‌توان انرژی الکتریکی به دست‌آمده، قابلیت استفاده در ضربان‌سازها (برای تنظیم ضربان قلب) را دارد [۲۳]. از آن

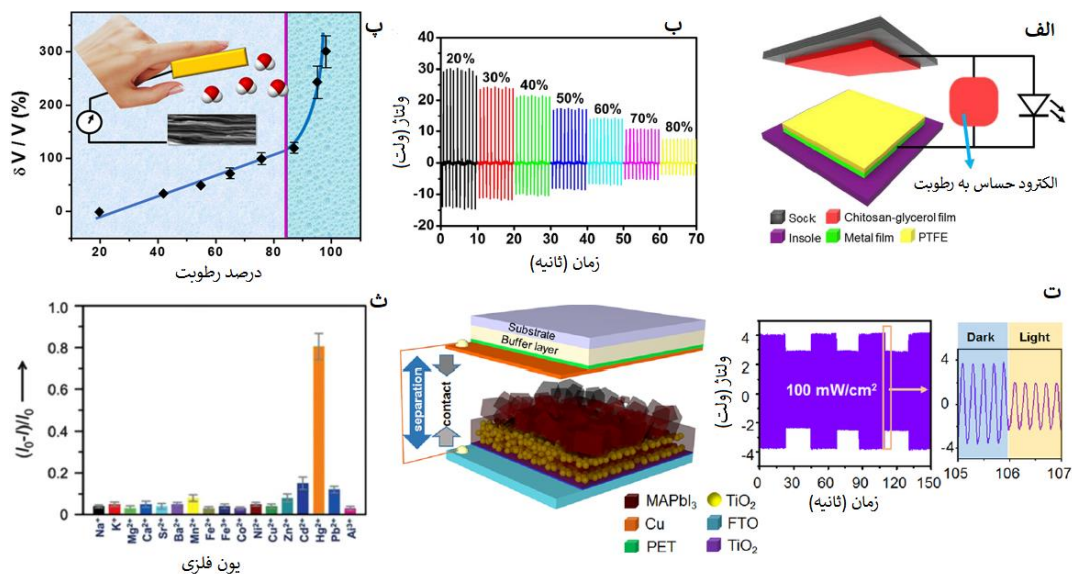
جایی که ضربان‌سازها عمر متوسطی بین ۷ تا ۱۰ سال دارند، لازم است برای جایگزینی باتری، مجدداً عمل قلب باز انجام شود [۲۲]. نانوذراتورها می‌توانند به طور چشمگیری زمان لازم برای تعویض باتری را به تعویق بیندازند. در این شرایط نانوذراتور می‌تواند افزون بر تنظیم ضربان قلب، مقدار ضربان را نیز مانند یک حسگر گزارش کند [۲۳].

کاربردهای فوق نیاز به کاشت داخل بدن دارند اما نانوذراتورها می‌توانند با قرارگیری بر پوست محلی که شریان از آن عبور می‌کند، نبض فرد را نیز نشان دهند [۲۴] (شکل ۸-الف). همچنین، از نانوذراتورهای تریوالکتریک می‌توان به منظور تحریک عصبی به کمک پالس‌های الکتریکی ضعیف استفاده کرد که باعث انقباضات عضلانی و حرکت بدن در بیماران شوند [۲۲]. علاوه بر این، تحقیقاتی وجود دارد که امکان ایجاد تمایز سلول‌های عصبی را در مهندسی بافت نشان می‌دهد [۲۶]. از دیگر کاربردهای زیستی نانوذراتورها، ضدعفونی محیط آب از میکروب‌ها به کمک ایجاد یک میدان الکتریکی بسیار قوی است [۲۷].

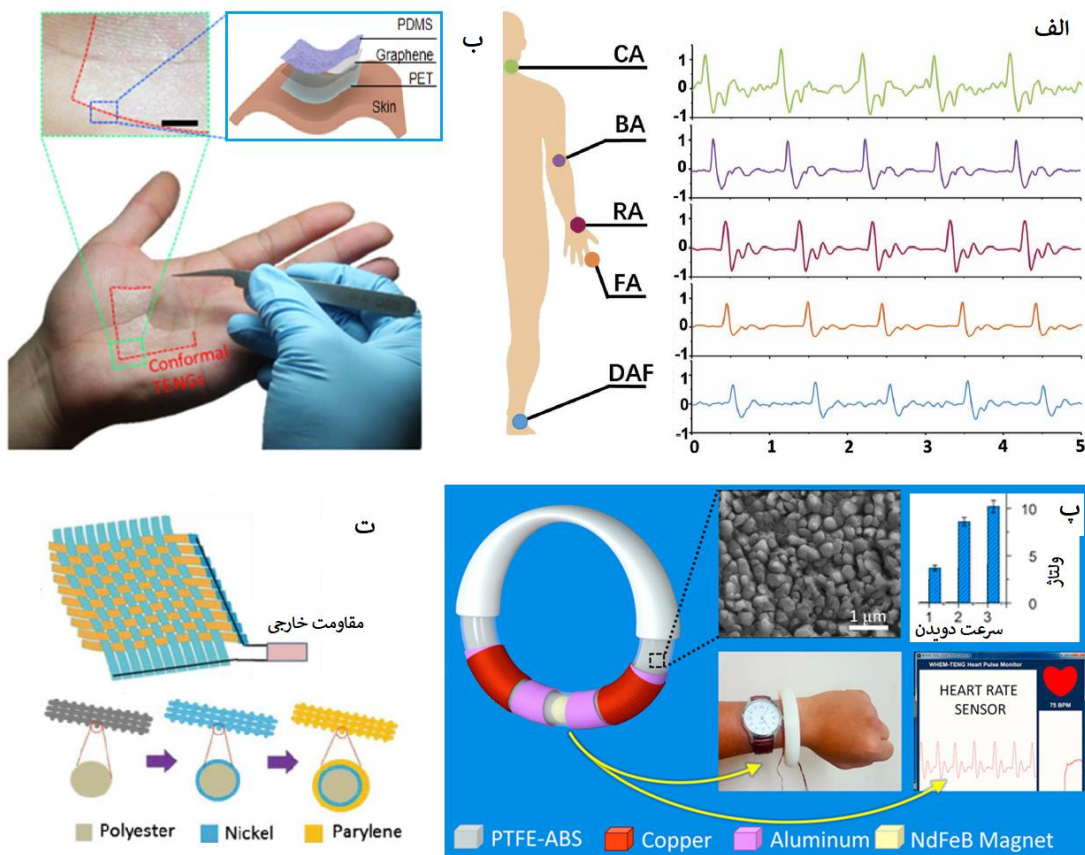
۴-۳- سایر کاربردها

با توجه به گستردگی ساختار و مواد قابل استفاده در نانوذراتورهای تریوالکتریک، کاربردهای متنوع دیگری در حوزه‌های قطعات الکترونیکی انعطاف‌پذیر [۷]، حسگرهای زیستی [۲۸]، رباتیک [۲۹] و میکروفلوئیدیک [۳۰] پیشنهاد شده است. یکی از این حوزه‌ها که تحقیقات قابل توجهی را به خود معطوف کرده است، پوست الکترونیکی است [۳۱]. پوست الکترونیکی بایستی خواصی نزدیک به پوست داشته باشد که از آن جمله می‌توان به امکان تشخیص فشار و گرما، انعطاف‌پذیری بالا و استحکام پارگی کافی اشاره کرد [۳۱]. علاوه بر این لازم است شفاف باشد و تطابق خوبی با سطح ناهموار پوست برقرار کند [۳۲]. از آن جایی که نانوذراتورهای تریوالکتریک به نیرو و دما حساسند، می‌توانند تغییرات آن‌ها را به خوبی نشان دهند. کافی است مطابق شکل ۸-ب، لایه‌ها از مواد مناسب و به اندازه‌ی کافی نازک تهیه شوند تا همه‌ی ویژگی‌های لازم تامین شود [۳۲].

یکی از جدیدترین حوزه‌های وسایل الکترونیکی که به شدت در حال رشد است، محصولات پوشیدنی الکترونیکی هستند. این محصولات می‌توانند در بخشی از لباس و یا به صورت تجهیزات جانبی (مانند مچ‌بند) استفاده شوند. در صورتی که بتوان نیاز به باتری و شارژ شدن را در این محصولات کاهش داد، امکان استفاده‌ی آسانتر و گسترده‌تری فراهم می‌شود. به همین دلیل تلاش‌های فراوانی به منظور به کارگیری نانوذراتورها در محصولات پوشیدنی صورت گرفته است. به عنوان مثال می‌توان حسگر ضربان قلب را به صورت یک دستبند (فاقد باتری) تهیه کرد [۳۳] (شکل ۸-پ). در این حالت انرژی الکتریکی مورد نیاز حسگر از طریق حرکت‌های طبیعی مچ دست تامین می‌شود.



شکل ۷- الف- حسگر خودمولد رطوبت که در آن الکترود حساس به رطوبت خارج از نانوذرات قرار دارد [۱۲]، ب- تغییرات ولتاژ به تغییرات درصد رطوبت [۱۲]، پ- حسگر خودمولد رطوبت که در آن یکی از الکترودهای نانوذرات به رطوبت حساس است و پاسخ ولتاژ به این تغییرات [۱۳]، ت- پاسخ و ساختار حسگر نوری حساس به تابش ماورای بنفش [۱۹]، ث- حسگر شیمیایی خودمولد برای تشخیص یون جیوه در محیط [۲۱].



شکل ۸- الف- ثبت ضربان قلب با قرارگیری نانوذرات روی شریان‌های سطحی متفاوت [۲۴]، ب- پوست الکترونیکی به صورت نانوذرات تک‌الکترونی [۳۲]، ت- نانوذرات پوشیدنی به شکل مچ‌بند برای گزارش ضربان قلب [۳۳]، ث- نانوذرات پوشیدنی به شکل پارچه‌ای بافته شده [۳۴].

تار و پود پارچه به صورت دو الکترود نانوذرات عمل و جریان الکتریکی تولید می‌کنند [۳۴] (شکل ۸-ت). این جریان می‌تواند

گونه‌ای دیگر از نانوذرات پوشیدنی به صورت پارچه طراحی می‌شوند تا به صورت لباس استفاده شوند. در این حالت

در بخشی از لباس که نقش باتری را دارد ذخیره و بعداً استفاده شود [۳]. علاوه بر این می‌توان در همین لباس از حسگرهای متفاوت که اطلاعات بیولوژیکی یا محیطی را ثبت می‌کنند، استفاده کرد. حسگرهای پوشیدنی می‌توانند اطلاعات را از طریق امواج به گوشی هوشمند انتقال دهند [۳۲].

۵- نتیجه‌گیری

از آن جایی که نانوژنراتورهای تریبوالکتریک رشد قابل قبولی در میزان توان تولیدی داشته‌اند، امید بسیار زیادی وجود دارد تا به زودی بازار قابل توجهی را به خود اختصاص دهند. چگالی توان تولیدی با انتخاب مناسب مواد، مهندسی سطح و طراحی ساختارهای متنوع، به سرعت از 3 W/m^2 به 313 W/m^2 در طول یک سال افزایش یافت [۳]. در سال‌های گذشته این افزایش توان ادامه داشته و به مقادیری بالاتر از 2600 W/m^2 رسیده است [۷]. هرچند اکثر حسگرها نیاز به توان کمی برای راه‌اندازی دارند، اما برای استفاده در برخی زمینه‌ها هنوز نیاز به افزایش توان وجود دارد. با افزایش ابعاد نانوژنراتور به راحتی می‌توان توان تولیدی را افزایش داد، اما باید توجه داشت که مقدار توان بر واحد سطح ثابت می‌ماند [۵]. در حال حاضر تلاش برای بهبود توان تولیدی به دو صورت عمده ادامه دارد: ۱- ایجاد ساختارهای کامپوزیتی مناسب، ۲- بهبود سطح تماس مؤثر بین دو سطح از طریق اعمال فرایندهای سطحی [۸].

چالش مهم دیگری که در مسیر تجاری شدن نانوژنراتورهای تریبوالکتریک وجود دارد، قابلیت مجتمع شدن^۱ با سایر قطعات الکترونیکی در ابزار مورد نظر است [۵]. باتری‌ها به دلیل قابلیت تولید در ابعاد متفاوت، به راحتی در انواع دستگاه‌ها استفاده می‌شوند. نانوژنراتورها نیز این امکان را دارند تا با ساختارها و اشکال بسیار متنوعی برای کاربردهای متفاوت تولید شوند. با این وجود هنوز لازم است تمهیدات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کامل‌تری برای استفاده از نانوژنراتورهای تریبوالکتریک در دستگاه‌های متفاوت فراهم شود.

جدول ۲ بخشی از مراحل پیشرفت نانوژنراتورهای تریبوالکتریک که تا کنون انجام گرفته است و مسیر احتمالی آینده را تصویر می‌کند. این مراحل در چهار بخش منابع تغذیه‌ی میکرو یا نانو^۲، حسگری خودمولد^۳، انرژی آبی^۴ و منابع ولتاژ بالا^۵ تقسیم شده است [۸]. در صورتی که این مسیر بر طبق پیش‌بینی‌ها طی شود، این امید وجود دارد که تا پیش از سال ۲۰۲۷، نانوژنراتورهای تریبوالکتریک وارد بازار صنعتی دنیا شوند [۸]. بنابراین به نظر می‌رسد سرمایه‌گذاری در این زمینه می‌تواند جایگزین مناسبی برای تامین بخشی از انرژی روزانه‌ی مورد نیاز در کشورمان باشد.

¹ Integration

² Micro/nano power sources

³ Self-powered sensing

⁴ Blue energy

⁵ High-voltage power sources

جدول ۲- گذشته و آینده نانوژنراتورهای تریبولکتریک در چهار حوزه اصلی [۸].

حوزه تحقیقاتی	تا سال ۲۰۱۷	تا سال ۲۰۲۰	تا سال ۲۰۲۴	تا سال ۲۰۲۷
منبع انرژی	بهره‌برداری از انواع انرژی مکانیکی به صورت پارچه/ کفی/ کفش/ داخل بدن/ ارتعاشات	بهبود توان مجتمع شدن دوام انعطاف‌پذیری زیست‌سازگاری	مدیریت توان ذخیره انرژی ترکیب شدن با سایر منابع انرژی از جمله مغناطیسی، خورشیدی، نانوژنراتور پیزوالکتریک	مجموعه‌های خودشارژشونده وسایل الکترونیکی قابل حمل وسایل پوشیدنی دستگاه‌های قابل کاشت در بدن شبکه‌ی حسگری
حسگری خودمولد	حسگرهای فشار، شتاب، صوت و شیمیایی	بهبود دقت و حد تشخیص پایداری دوام کوچک‌سازی	ایجاد بستر نرم‌افزاری ابرداده (big data) یادگیری ماشین ارتباط بی‌سیم	رابطه‌های هوشمند بین انسان و ماشین با توان پایین نظارت بر محیط/ ترافیک/ وضعیت تایلر نظارت بر سلامت حسگرهای زیستی با کاربرد پزشکی
انرژی آبی	تولید الکتریسیته از امواج آب، باد، ترافیک و ...	بهبود بازدهی طراحی ساختار افزایش پایداری	مدیریت توان قرارگیری درون یک شبکه‌ی هماهنگ بهینه‌سازی در ابعاد کوچک	تولید انرژی در ابعاد بزرگ ارزیابی موقعیت مکانی تحلیل هزینه‌ی عمر بررسی اثرات زیست‌محیطی
منبع ولتاژ بالا	تولید منبع ولتاژ بالا با قابلیت حمل	بهبود ولتاژ بهبود بسامد ایمنی	مدار تقویت جریان/ولتاژ کنترل خروجی مجتمع‌سازی	کنترل کیفیت هوا حفاظت از سلامت شخص استفاده به عنوان منابع تغذیه‌ی جایگزین در دستگاه‌های ولتاژ بالا

۶- منابع

- [13] F. Ejehe, R. Mohammadpour, E. Asadian, P. Sasanpour, S. Fardindoost, O. Akhavan, Sci. Rep., 10, 7312, (2020).
- [14] X. Xue, Y. Fu, Q. Wang, L. Xing, Y. Zhang, Adv. Funct. Mater., 26, 3128–3138, (2016).
- [15] S.H. Shin, Y. Kwon, Y.H. Kim, J.Y. Jung, J. Nah, Nanomaterials 6, 186–190 (2016).
- [16] A.S.M.I. Uddin, U. Yaqoob, G.S. Chung, ACS Appl. Mater. Interfaces, 8, 30079–30089, (2016).
- [17] S. Cui, Y. Zheng, T. Zhang, D. Wang, F. Zhou, W. Liu, Nano Energy, 49, 31–39, (2018).
- [18] Z. Wen, J. Fu, L. Han, Y. Liu, M. Peng, L. Zheng, L. Zhu, X. Sun Y. Zi, J. Mater. Chem. C, 6, 11893, (2018).
- [19] L. Su, Z. X. Zhao, H. Y. Li, J. Yuan, Z. L. Wang, G. Z. Cao, G. Zhu, ACS Nano, 9(11), 11310–11316, (2019).
- [20] R. Mohammadpour, Adv. Eng. Mater., 20, 1700767, (2017).
- [21] Z. H. Lin G. Zhu, Y. S. Zhou, Y. Yang, P. Bai, J. Chen, Z. L. Wang, Z. L. Angew. Chem. Int. Ed., 52, 5065–5069, (2013).
- [22] H. Feng, C. Zhao, P. Tan, R. Liu, X. Chen, Z. Li, Adv. Healthcare Mater., 7, 1701298, (2018).
- [23] Q. Zheng, B. Shi, F. Fan, X. Wang, L. Yan, W. Yuan, S. Wang, H. Liu, Z. Li, Adv. Mater., 26, 5851–5856, (2014).
- [24] H. Ouyang, J. Tian, G. Sun, Y. Zou, Z. Liu, H. Li, L. Zhao, B. Shi, Y. Fan, Y. Fan, Z. L. Wang, Z. Li, Adv. Mater., 29, 1703456, (2017).
- [1] Z. L. Wang, J. Song, Science, 312, 242–246 (2006).
- [2] Z. L. Wang, ACS Nano, 7, 9533–9557, (2013).
- [3] Z. L. Wang, L. Lin, J. Chen, S. Niu, Y. Zi, Springer, ISBN: 978-3-319-40039-6, (2016).
- [4] Z. L. Wang, A. C. Wang, Mater. Today, 30, 34–51, (2019).
- [5] M. Han, X. Zhang, H. Zhang, Wiley, ISBN: 978-3-527-82014-6, (2019).
- [6] G. Zhu, C. Pan, W. Guo, C. Chen, Y. Zhou, R. Yu Z. L. Wang, Nano Lett., 12, 4960–4965, (2012).
- [7] Q. Shia, T. He, C. Lee, Nano Energy, 57, 851–87, (2019).
- [8] C. Wu, A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, Z. L. Wang, Adv. Energy Mater., 9, 1802906, (2019).
- [9] S. Wang, L. Lin, Z. L. Wang, Nano Energy, 11, 436–462, (2015).
- [10] L. Lin, Y. Xie, S. Wang, W. Wu, S. Niu, X. Wen, Z. L. Wang, ACS Nano, 7, 8266–8274, (2013).
- [11] G. Zhu, W. Q. Yang, T. Zhang, Q. Jing, J. Chen, Y. S. Zhou, P. Bai, Z. L. Wang, Nano Lett., 14(6) 3208–3213, (2014).
- [12] Y. T. Jao, P. K. Yang, C. M. Chiu, Y. J. Lin, S. W. Chen, D. Choid, Z. H. Lin, Nano Energy, 50, 513–520, (2018).



- [30] J. Chen, H. Guo, J. Zheng, Y. Huang, G. Liu, C. Hu, Z. L. Wang, ACS Nano, 10, 8104–8112 (2016).
- [31] X. Wang, L. Dong, H. Zhang, R. Yu, C. Pan, Z. L. Wang, Adv. Sci., 2, 1500169 (2015).
- [32] H. Chu, H. Jang, Y. Lee, Y. Chae, J. H. Ahn, Nano Energy, 27, 298–305 (2016).
- [33] P. Maharjan, R. M. Toyabur, J. Y. Park, Nano Energy, 46, 383-395 (2018).
- [34] X. Pu, L. Li, H. Song, C. Du, Z. Zhao, C. Jiang, G. Cao, W. Hu, Z. L. Wang, Adv. Mater., 27, 2472–2478 (2015).
- [25] S. Lee, H. Wang, Q. Shi, L. Dhakar, J. Wang, N. V. Thakor, S. C. Yen, C. Lee, Nano Energy, 33, 1-11 (2017).
- [26] W. Guo, X. Zhang, X. Yu, S. Wang, J. Qiu, W. Tang, L. Li, H. Liu, Z. L. Wang, ACS Nano, 10(5), 5086-5095 (2016).
- [27] J. Tian, H. Feng, L. Yan, M. Yu, H. Ouyang, H. Li, W. Jiang, Y. Jin, G. Zhu, Z. Li, Nano Energy, 36, 241-249 (2017).
- [28] H. Zhang, Y. Yang, T. C. Hou, Y. Su, C. Hu, Z. L. Wang, 2, 1019-1024 (2013).
- [29] A. Ahmed, S. L. Zhang, I. Hassan, Z. Saadatni, Y. Zi, J. Zu, Z. L. Wang, Extreme Mech. Lett., 13, 25-35 (2017).