



## کاربری نانوزنراتورهای تریبوالکتریک در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر

امیرحسین مردانی<sup>1</sup>، آسیه سادات کاظمی<sup>2\*</sup>، علی بابایی<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

2- استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\* تهران، 1684613114، [asiehsada\\_kazemi@iust.ac.ir](mailto:asiehsada_kazemi@iust.ac.ir)

### چکیده

امروزه با رشد جمعیت جهان و صنعتی شدن کشورها، الگوی تولید و مصرف انرژی دچار تغییرات به‌سزایی شده است. با افزایش سطح تقاضای انرژی و با توجه به ذخایر محدود انرژی فسیلی و دائمی نبودن آن‌ها، جوامع بشری برآن شده‌اند تا با بهره‌گیری از منابع طبیعی نامحدود همچون باد، آب و بدن انسان تغییراتی را در عرضه انرژی ایجاد کنند. با پیشرفت فناوری، استفاده از منابع تجدیدپذیر به عنوان جایگزین مطمئنی برای منابع فسیلی مطرح شده ولی روش‌های رایج در استفاده از این انرژی‌ها دارای نقاط ضعفی از جمله بازده پایین، هزینه بالا، وابستگی به شرایط جوی و دانش فنی پیچیده است. در این میان، نانوزنراتورهای تریبوالکتریک با چشم‌انداز بسیار امیدوارکننده، دروازه جدیدی را به سمت تامین انرژی گشوده‌اند. این نانوزنراتورها، با توانایی تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی در زندگی روزمره، کاربردهای بالقوه‌ای دارند. در اینجا، مکانیسم تولید انرژی از این نانوزنراتورها شرح داده شده و کاربری نانوزنراتورهای تریبوالکتریک در تولید انرژی با بهره‌گیری از ورزش باد، انرژی حاصل از حرکت اعضای بدن انسان، حرکت قطرات آب و امواج دریا، همچنین امواج صوتی و میدان مغناطیسی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در پایان، مزایا و چالش‌های استفاده از نانوزنراتورهای تریبوالکتریک در زندگی روزمره و در مقیاس تجاری مطرح شده است.

**کلیدواژگان:** منابع تجدیدپذیر، نانوزنراتور تریبوالکتریک، برق رسانی تماسی، نانوزنراتورهای تریبوالکتریک پوشیدنی

## Triboelectric nanogenerators applications in renewable energy production

Amir Hossein Mardani<sup>1</sup>, Asieh Sadat Kazemi<sup>2\*</sup>, Ali Babaei<sup>1</sup>

1-MSc student, Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1684613114 Tehran, Iran, [asiehsadat\\_kazemi@iust.ac.ir](mailto:asiehsadat_kazemi@iust.ac.ir)

Received: 23 October 2024 Accepted: 11 May 2025

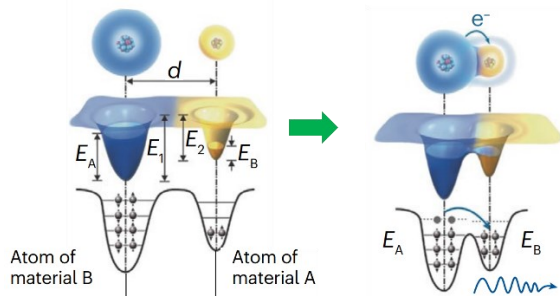
### Abstract

The growth of global population and technological advancements in different countries have evolved the energy supply and demand models. The increase in energy demands and limitations in fossil fuels and their shortage have enforced human beings to modify energy models with the exploitation of unlimited natural resources such as wind, water and human body. With innovations in technology, the use of renewable resources has been the center of interest for the replacement of fossil fuels. However, the current methods of exploiting these resources have many shortcomings. Low efficiency, high cost, dependence on atmospheric conditions and the requirement of complex technical knowledge are some of the limitations. Among these resources, triboelectric nano generators however, have opened new avenues to energy supply with their exceptional perspectives. With the capacity to turn mechanical energy into electrical energy, these generators can be very useful in daily basis requirements. Herein, the mechanisms of energy generation by triboelectric nanogenerators are discussed. The energy intake from human body movements, wearable devices, water droplets, ocean waves, wind, acoustic waves and magnetic fields are categorized and presented. Finally, the benefits and challenges in applying triboelectric nanogenerators in real life and commercialization have been discussed.

**Keywords:** Renewable resources, Triboelectric nanogenerators, contact power generation, wearable triboelectric nanogenerators.

## 1- مقدمه

قطبش ماده دی‌الکتریک، میدان الکتریکی ثانویه‌ای ایجاد می‌کند که بخشی از میدان الکتریکی کل است. الکترونها در پتانسیل مختلف‌اند و با اتصال به هم، جریان الکتریکی ایجاد می‌شود [21].



شکل 1 مدل ابر الکترونی دو ماده A و B با انرژی‌های  $E_A$  و  $E_B$  که ابتدا در فاصله  $d$  از هم هستند و بعد از تماس، انتقال بار بین آنها رخ می‌دهد [21].

TENG ها به دلیل عواملی همچون زیست‌سازگاری، در حسگرهای خودشارژ شونده، منابع ذخیره انرژی در مقیاس نانو/میکرو و قطعات الکترونیکی مینیاتوری، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. به عنوان مثال با تبدیل انرژی مکانیکی موجود در راه رفتن روزانه افراد، دویدن ورزشکاران و یا نیروی موجود در بین مفاصل (زانو، آرنج و انگشتان) به انرژی الکتریکی و یا استفاده از انرژی موجود در امواج صوتی [22]، امواج دریاها و امواج الکترومغناطیس [13] می‌توان برق مورد نیاز را توسط این نانوژنراتورها با صرف کمترین هزینه و زمان حتی در دورافتاده‌ترین مکان‌ها، نیز فراهم آورد. بعلاوه، از TENG ها در منبع تغذیه ولتاژ بالا در محیط پلاسما، الیاف الکتروستاتیک و فیلترهای ذرات هم استفاده می‌شود. سیستم‌های ذخیره انرژی بر پایه نانوژنراتورها در گستره وسیعی از کاربردها شامل بهداشت و درمان، داروسازی، حفاظت محیط زیست، هوش مصنوعی، صنایع دفاعی مورد توجه اند [21]. در بخش‌های بعد، به نحوه عملکرد TENG، برخی از کاربردهای مهم آن مطابق جدول 1 و در نهایت، چالش‌های موجود در توسعه این فناوری بحث و جمع‌بندی می‌گردد.

جدول 1 حوزه کاربری TENG ها و چالش‌های عمده و محدودیت‌ها.

حوزه کاربری	چالش‌ها، محدودیت‌ها و مزایا
نانوژنراتورهای پوشیدنی	مناسب مقیاس آزمایشگاهی؛ پیچیدگی در ساخت در عین سازگاری با محیط زیست و پوست انسان
حرکت مکانیکی بدن انسان	وابستگی مواد به شرایط محیطی و رطوبت؛ نیاز به مدارهای الکترونیکی برای فیلتر و تقویت سیگنال تولیدی
وزش باد	نیاز به طراحی متفاوت و کارآمد در تولید بزرگ مقیاس (مانند مزارع بادی)؛ وابستگی خروجی به سرعت و جهت وزش باد
سلول‌های هیبریدی	متغیر بودن شرایط آب و هوایی و شدت و زاویه تابشی نور خورشید، وابستگی خروجی به سرعت باد
امواج آب	طراحی پیچیده و طول عمر پایین به دلیل تلاطم دریا و فرسایش آبی؛ وابستگی خروجی به حرکت امواج

برای امروزه اهمیت و ضرورت توسعه فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر و فواید متعدد آن‌ها بر کسی پوشیده نیست. با در نظرگیری کاهش سریع و فزاینده سوخت‌های فسیلی، افزایش قیمت این منابع، مشکلات فراوان در حمل و نقل، رشد بی‌رویه جمعیت جهان و نیازهای انرژی‌محور آن و مهم‌تر از همه، تهدیدهای زیست محیطی مختلفی که به سبب استفاده دیرینه انسان‌ها از منابع فسیلی؛ اقلیم، اکوسیستم‌ها و زیست‌بوم‌های گوناگون را در نقاط مختلف دنیا درگیر خود کرده، لزوم و ضرورت جایگزینی فراگیر انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک با انرژی‌های سنتی بیش از همه دوران‌هاست [1-5].

متأسفانه این انرژی‌ها با تمام مزایایی که داشته‌اند دارای مشکلاتی از قبیل بالا بودن هزینه بهره‌وری، بازدهی پایین تبدیل انرژی، تخریب و آلودگی زیست بوم، مشکلات فناوری و وابستگی به شرایط جغرافیایی و جوی [6-12] هستند که استفاده از آن‌ها را با محدودیت‌هایی روبه‌رو کرده است. در چند سال اخیر با پیشرفت فناوری‌های مبتنی بر پدیده‌های تریبولکتریک، پیزوالکتریک، مگنتوالکتریک<sup>1</sup>، ترموالکتریک و فوتولتائیک، تامین انرژی از خورشید، باد، نوسانات و ارتعاشات، گرمای محیط، امواج الکترومغناطیس، فرکانس رادیویی، فعالیت‌های انسانی [13] و امواج دریاها یا اقیانوس‌ها [14] به نحوی فراهم شده که فاقد نقاط ضعف روش‌های معمول‌اند. همچنین با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین از جمله محاسبات کوانتومی در بحث بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت و افزایش تولید از مزارع انرژی [15]، فناوری نانو در راستای تولید و انتقال بهینه انرژی الکتریکی [16] و نیز ورود اینترنت اشیا<sup>2</sup> در این حوزه جهت انتقال برق بدون نیاز به سیم‌کشی [13] می‌توان نیاز مصرفی را تامین نمود. مقاله حاضر به تولید انرژی توسط نانو ژنراتورهای تریبولکتریک<sup>3</sup> می‌پردازد که قابلیت فراوانی جهت پاسخگویی به تقاضای انرژی دارند. ازین به بعد جهت رعایت اختصار، به جای نانوژنراتورهای تریبولکتریک از TENG استفاده می‌شود. TENG ها با ادغام دو اثر "الکتریسیته تماسی" و "القای الکتروستاتیک" جهت تبدیل موثر انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی، عمل می‌کنند [17]. اثر تریبولکتریک، نوعی الکتریسیته تماسی است که طی آن، بارها بین دو جسم با مکانیسم انتقال الکترون حرکت می‌کنند بعد از تماس فیزیکی و سپس جدایی، به لحاظ الکتریکی باردار می‌شوند. شکل 1 مدل ابر الکترونی دو ماده را نشان می‌دهد. جریان جابجایی ماکسول<sup>4</sup> در این جابجایی به عنوان موتور محرک حرکت عمل می‌کند [18]. TENG ها در تبدیل انرژی مکانیکی نامنظم و با فرکانس و دامنه پایین به انرژی الکتریکی بسیار موثر هستند. یک قطعه TENG معمولاً متشکل از ماده دی‌الکتریک و یک الکتروود است. با اعمال نیروی خارجی مکانیکی، بارهای تریبولکتریک روی سطوحی که با هم تماس پیدا می‌کنند ایجاد می‌شود. با چند سیکل اعمال نیرو، چگالی بار افزایش می‌یابد و به حالت اشباع می‌رسد. بارهای تریبولکتریک به تدریج، بطور یکنواخت روی سطوح تماسی توزیع می‌شوند. این بارها، با اندازه یکسان و با علامت مخالف‌اند [19، 20]. در TENG دو نوع بار وجود دارد؛ نوع اول بارهای تریبولکتریک‌اند که در سطح ماده دی‌الکتریک توزیع می‌شوند و نمی‌توانند آزادانه حرکت کنند. نوع دوم، بارهای آزادی هستند که در سطح ماده الکتروود، القا و توزیع می‌شوند. مجموعه این بارها، میدان الکتریکی تولید و ماده دی‌الکتریک را قطبیده می‌کند.

4 Maxwell's displacement current

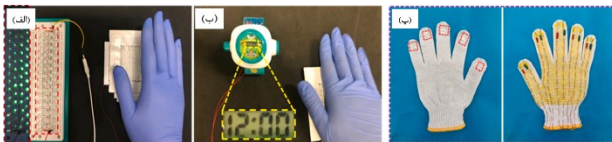
1 Magnetolectric  
2 Internet of things (IOT)  
3 Triboelectric nanogenerator (TENG)

و با فرایند کشش یا ارتجاعی شدن ماده، جریان تولید می‌کنند (شکل 2-ت) [23].

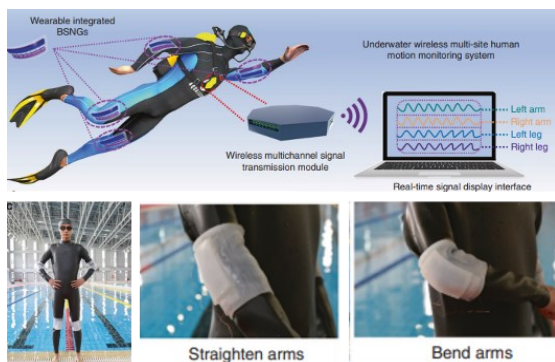
### ۳- مکانیسم‌های مختلف تبدیل انرژی در TENG ها

#### 3-1- تولید برق با استفاده از حرکات بدن بواسطه لوازم پوشیدنی

امروزه استفاده از صنعت نوین بافندگی در انواع گوناگونی از تجهیزات اعم از پوشش رباتیک، وسایل الکترونیکی پوشیدنی و ابزار آلات پزشکی استفاده می‌شود. مواد تولید شده در این صنعت، به دلیل انعطاف‌پذیری و پایداری بالا، وزن سبک و گستردگی در کاربرد، بسیار رونق گرفته است. با پیشرفت صنایع نساجی در حوزه TENG، حسگرهای تریبولکتریک پوشیدنی‌ای طراحی شده که از حساسیت بسیار بالایی برخوردارند. این TENG ها، کاربرد بالقوه‌ای در کنترل علائم حیاتی بدن نظیر، تنفس، ضربان قلب و فشار خون دارند. با پیشرفت سریع لوازم الکترونیک پوشیدنی، توسعه نوع جدیدی از TENG با ساختار بافته شده<sup>۱</sup> با قابلیت‌هایی نظیر انعطاف‌پذیری بالا، عبور جریان هوای مطلوب، امکان شستشو و دوام عالی ارائه شده که زمینه‌ساز رویکرد جدیدی در تولید منسوجات خودکار با کاربرد در استحصال انرژی بیومکانیکی، الکترونیک پوشیدنی و نظارت بر حرکت انسان است. این TENG ها در مقیاس آزمایشگاهی پاسخ‌های مناسبی نشان داده‌اند اما در کاربری خشن روزمره ممکن است عمر پایینی داشته باشند و پس از استفاده مداوم، خروجی تولیدی کاهش پیدا کند [24]. شکل 3 نمونه-ای از استحصال انرژی از تکان دادن دست را نشان می‌دهد. در تحقیقات دیگری با به‌کارگیری TENG بر پایه لاستیک‌های انعطاف‌پذیر<sup>۲</sup> از انرژی حاصل از خمش زانو و آرنج و نیروی بین مفاصل در شکل 4، انرژی الکتریکی تولید شده است [25].



شکل 3 (الف) استحصال انرژی از تکان دادن دست برای روشن کردن مستقیم LED ؛ (ب) ساعت روشن شده با WS-TENG ؛ (پ) نمای دستکش هوشمند [24].



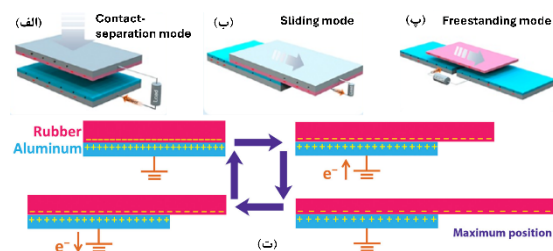
شکل 4 (الف) طراحی شماتیک از TENG منعطف بر روی مفاصل غواص [27].

این نانوزنراتورهای کشسان ممکن است در حین استفاده عملی، دچار آسیب‌های مکانیکی شوند، از همین رو ساخت TENG های خودترمیم شونده

حسگری کاهش ولتاژ خروجی در اثر رطوبت؛ متغیر بودن بار الکترواستاتیک و فاصله میان انگشتان دست و سطح سنسور امواج صوتی احتمال آسیب TENG در اثر برخورد با امواج صوتی شدید میدان وابستگی عملکرد دستگاه به شدت میدان مغناطیسی، تنظیم نسبت جرمی لایه پاسخ‌دهنده مغناطیسی، متغیر بودن فاصله بین لایه پاسخ‌دهنده و آهنربا مغناطیسی

### 2- نحوه کار TENG

شکل 2 نمایش شماتیک از یک TENG را نشان می‌دهد که بر اساس حالت‌های مختلف، توانایی تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را دارد.



شکل 2 ساختار پایه برای نانومولدهای تریبولکتریک با دو الکتروود؛ (الف) تماس-جدایش عمودی، (ب) لغزش درون صفحه‌ای، (پ) حالت آزاد در پیکربندی [22] (ت) بر پایه مواد انعطاف‌پذیر [23].

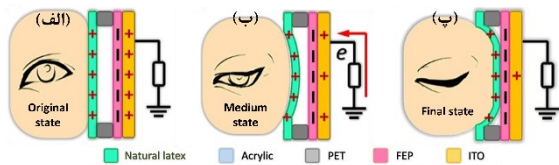
بطور کلی، عملکرد TENG ها با چهار مدل اساسی قابل بررسی است؛ 1- جدایی-تماس، 2- لغزش افقی، 3- معلق و 4- غلطشی. در اینجا سه حالت عملیاتی‌تر بررسی می‌شود و برای هر حالت، پیکربندی تک الکتروود و دو الکتروود وجود دارد. شکل 2-الف، TENG جدایی-تماس را نشان می‌دهد که از دو لایه دی‌الکتریک متفاوت، تشکیل شده است. وقتی که دو سطح توسط یک نیروی خارجی به همدیگر فشرده می‌شوند، سطوح دو دی‌الکتریک، یکی به عنوان آند و دیگری به عنوان کاتد، شارژ می‌شوند. دی‌الکتریک‌ها با جدا شدن از هم، شارژ به وجود آمده را حفظ می‌کنند و یک اختلاف پتانسیل بین آنها ایجاد می‌شود. لذا بار الکتریکی از یک الکتروود به الکتروود دیگر انتقال می‌یابد. از طریق تکرار فرایند تماس و جدایی، جریان متناوب تولید می‌شود. TENG لغزش افقی (شکل 2-ب) متشکل از دو ماده است که همواره با هم در تماس بوده و از یکدیگر جدا نمی‌شوند. در حین لغزش اصطکاکی دو لایه مختلف روی هم، بارهای تریبولکتریک روی سطح دو دی‌الکتریک ایجاد شده و باعث ایجاد اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود می‌شود و همین اختلاف پتانسیل تناوبی، باعث تولید جریان متناوب می‌شود. دو لایه در TENG معلق (شکل 2-پ)، برخلاف حالت لغزش افقی، هیچ تماسی با هم پیدا نمی‌کنند و دوام مواد تریبولکتریک افزایش می‌یابد. این حالت بر اساس اصطکاک طبیعی بین یک لایه تریبولکتریک و یک ماده در محیط اطرافش کار می‌کند.

در TENG های لایه معلق، به دلیل حرکت نامنظم لایه تریبولکتریک، یک میدان الکتریکی نامتقارن با تغییر فاصله بین الکتروود و ماده باردار شده، ایجاد می‌شود. این میدان، بین دو ماده اختلاف پتانسیل ایجاد می‌کند و جریان متناوب تولید می‌شود [22]. برخی TENG ها هم مبتنی بر مواد انعطاف‌پذیرند

2 Stretchable-rubber-based (SR-based) TENG

1 Woven-structured triboelectric nanogenerator (WS-TENG)

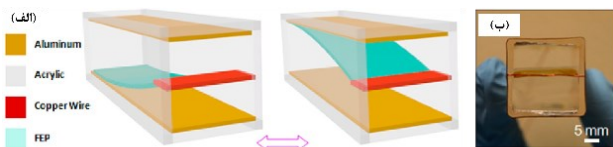
TENG، نیاز به مدارهای الکترونیکی پیچیده برای فیلتر و تقویت سیگنال است که نیازمند تنظیم و نگهداری مداوم می‌باشد [34].



شکل 6 (الف-پ) نمای شماتیک از عملکرد TENG با حرکات اطراف چشم [34]. در پژوهشی دیگر، با اتصال و جدایی متوالی میان انگشت دست انسان و پلیمر ترکیب شده با گرافن اکسید متصل به الکترو، یک حسگر خود شارژ شونده برای تشخیص رطوبت محیط تولید شده که می‌تواند با قرار گرفتن در سایر نقاط بدن، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه ربات‌های هوشمند داشته باشد [35].

### 3-3- تولید برق به روشی نوین از انرژی بادی

انرژی بادی یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است و در تولید برق، نقش به‌سزایی را ایفا می‌کند ولی توربین‌های بادی رایج، دارای نقاط ضعف پرنرگ از جمله پیچیدگی ساختاری، ابعاد بزرگ و کم بودن بازدهی به دلیل فرسودگی‌های مکانیکی هستند. امروزه تلاش‌ها در راستای بهره‌گیری از روش‌های نوینی است که این نکات منفی برطرف و یا کم‌رنگ شده باشند. در یکی از روش‌های جدید با طراحی نوعی خاصی از TENG، از اتصال و جدایی لایه FEP<sup>3</sup>، امکان تولید برق از نیروی باد فراهم شده است (شکل 7) [36]. این TENG در ابعاد کوچک عملکرد خوبی دارد ولی برای تولید انبوه (مانند مزارع بادی) نیازمند طراحی دقیق و بهینه‌سازی بیشتر است. از آنجایی که باد عملاً یک انرژی عظیم و بدون کربن است، یک منبع انرژی ایده‌آل برای سیستم‌های خود نیرو است. از ژنراتورهای تریبولکتریک و الکترومغناطیسی به‌طور گسترده برای تبدیل انرژی بادی به الکتریکی استفاده شده است [37].



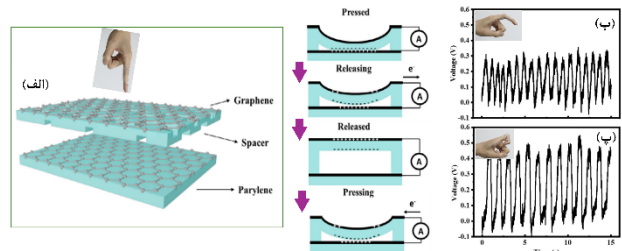
شکل 7 (الف) طرح شماتیک از TENG بادی. (ب-ت) نماهای واقعی [36].

یک پیکربندی TENG ارتعاشی ناشی از گرداب (VIV-TENG<sup>4</sup>) برای برداشت انرژی بادی در یک تونل باد از جهت‌های دلخواه باد در [38] ساخته شده (شکل 8)، که به دلیل طراحی ضد آب و منحصر به فرد، حتی در شرایط رطوبت بالا عملکرد خروجی و دوام خوبی را نشان داده است.

توانسته باعث افزایش طول عمر و خروجی این قطعات گردد [26]. محققین با طراحی و ساخت نانوزنراتورهای کششی پیشرفته، با خمش آرنج و زانوان غواص در هنگام شنا کردن، خروجی الکتریکی تولید و بطور همزمان، میزان فعالیت بدنی غواص را در هنگام شنا کردن بررسی کرده‌اند [27].<sup>1</sup> BSNG ها با ویژگی‌های امیدوارکننده در استحصال انرژی زیرآبی و حسگری، چالش‌هایی مانند پوشش دهی، پایداری، خروجی ولتاژ و پذیرش بازار دارند تا بتوانند به کاربردهای گسترده دست یابند. حل این مشکلات در توسعه الکترونیک پوشیدنی و سایر فناوری‌ها ضروری است.

### 3-2- تولید برق از تحرکات مستقیم اعضای بدن

با پیشرفت‌های اخیر، TENG ها با توجه به مزایایی همچون هزینه کم، ایمنی و پایداری بالا، سازگاری با بدن انسان و محیط زیست توجه زیادی را در استحصال انرژی و سنجش حرکت زیستی به خود جلب کرده‌اند [28-30]. در این راستا، استفاده از باتری‌های نازک و یا میکرو ابرخازن‌ها [31] پیشنهاد شده اما به دلیل خواص مکانیکی نامناسب و مواد شیمیایی نامطلوب، بعنوان سیستم‌های تعبیه بر روی پوست مناسب شناخته نشدند. در مقابل، TENG ها قابلیت قرارگیری به صورت یکپارچه روی سطح بدن را دارند و برخلاف قطعات دیگر، منبع تغذیه سازگار با بدن و محیط زیست به‌شمار می‌روند. در TENG های نسل جدید، از گرافن به عنوان یک الکتروود شفاف، فوق نازک و انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود [32]. این TENG ها به دلیل نازک بودن، در سطوح منحنی هم کاربرد دارند و در اثر خمیدگی مفصل انگشتان، می‌توان ولتاژ تولید کرد (شکل 5-ب و پ). از آنجا که TENG ساخته شده مبتنی بر گرافن و لایه پارلین است، می‌تواند به شرایط محیطی مثل رطوبت و دما حساس باشد و عملکرد آن را تحت تأثیر قرار دهد [33].

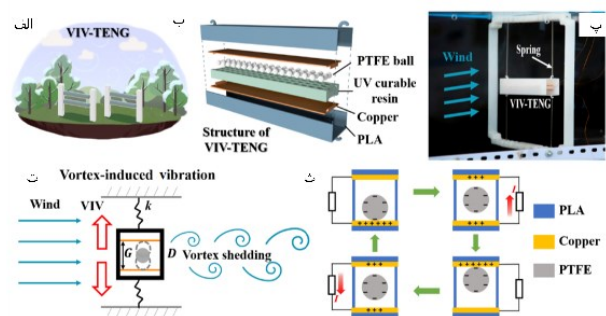
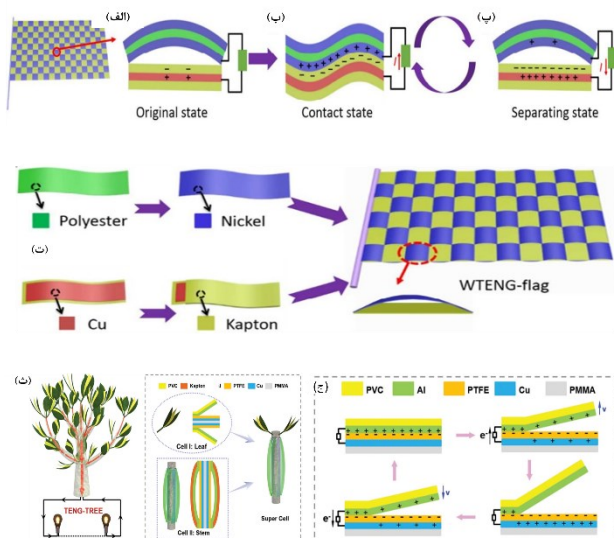


شکل 5 (الف) نحوه تولید ولتاژ بر اثر ضربه‌های عمودی انگشت در TENG مبتنی بر گرافن با ابعاد 2cm x 2cm، (ب و پ) نحوه تولید ولتاژ بر اثر خمیدگی انگشتان؛ خروجی ولتاژ به ازای انگشت [33].

حرکات پوست مجاور چشم انسان، با استفاده از حسگرهای میکروحرکتی مبتنی بر TENG<sup>2</sup> منبع خوبی جهت تولید سیگنال است (شکل 6) [34] و با قرارگیری در دسته عینک، در سامانه‌های مدیریت خانه‌های هوشمند، کارایی دارد. با پلک زدن کاربر، سیگنال‌های تولید شده به سیگنال‌های کلیدزنی قطعات الکترونیکی منزل تبدیل می‌شوند. از این حسگرها در تجهیزات بی‌سیم و بدون دخالت دست و صرفاً با پلک زدن، استفاده می‌شود. از معایب این

3 Fluorinated ethylene propylene (FEP)  
4 Vortex Induced Vibration Triboelectric Nanogenerator (VIV-TENG)

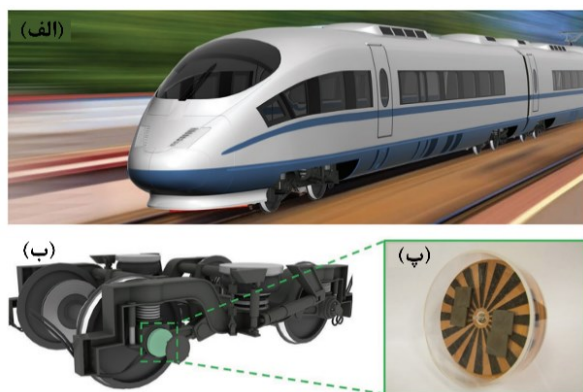
1 bionic stretchable nanogenerator (BSNG)  
2 Triboelectric nanogenerator (TENG)-based micromotion sensor



شکل 8 (الف) طرحواره VIV-TENG؛ (ب) ساختار دقیق VIV-TENG؛ (پ) راهاندازی آزمایشی در تونل باد؛ (ت) ارتعاش VIV-TENG ناشی از گرداب؛ (ث) خلاصه عملکرد VIV-TENG [38].

شکل 9 عملکرد TENG (الف) حالت طبیعی (ب) هنگام اتصال (پ) بعد از اتصال. (ت) اجزای تشکیل دهنده TENG ریزبافت [39]، (ث) طرحواره TENG درختی؛ (ج) TENG متشکل از دو نوع سلول TENG در برگها و در ساقه است [40].

در رویکردی دیگر، با طراحی خلاقانه TENG یکسر آزاد و یکسر ثابت، انرژی مکانیکی حاصل از چرخ متحرک قطار ذخیره سازی شده است [41]. با یک ساختارگردان (شکل 10)، چنین TENG ای قادر است جریان  $55 \mu A$  ولتاژ  $500 V$  و بار  $235 nC$  را با سرعت چرخش  $400 rpm$  تامین کند. همچنین پایداری فوق العاده این TENG در محیط ارتعاشی به اثبات رسیده است. تولید و آزمایش چنین قطعه TENG و عملکرد بالای آن، راه را برای تولید سایر TENG ها در حوزه ترابری هوشمند باز می کند [41].



شکل 10 (الف) طرح شماتیک TENG در چرخ قطار خودشارژ شونده، (ب و پ) جزئیات شماتیک و واقعی نصب TENG بر روی چرخ قطار [41].

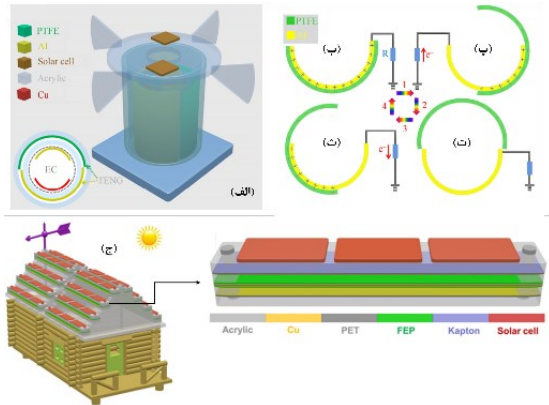
با توجه به پتانسیل های فراوان باد در زمینه تولید انرژی پاک، دانشمندان نسل جدیدی از نانوزنراتورها (TEHG) را معرفی کرده اند که توسط باد هدایت می شود تا انرژی چرخشی را استحصال کند [42]. واحدهای تولید برق درون

مطابق با شکل 8-ب، VIV-TENG از چهار قسمت تشکیل شده؛ سیلندر مربعی به عنوان ارتعاش گر، واحد تولید برق داخلی، چهار فنر و یک قاب خارجی. واحد تولید برق داخلی از دو الکترود مسی، توپ های PTFE<sup>1</sup> و یک قاب لانه زنبوری ساخته شده است. شکل 8-پ عملکرد ارتعاش و تولید برق در تونل باد را نشان می دهد. از معایب چنین ساختاری، کاهش دامنه ارتعاش با افزایش شدید سرعت باد است که عملکرد دستگاه را ناپایدار می کند [38]. انرژی باد در ارتفاعات بالا به مراتب نسبت به ارتفاعات پایین، پایدارتر و قوی تر است ولی متأسفانه از دسترس توربین های بادی خارج است. در یکی از تحقیقات صورت گرفته با ابداع پرچمی از TENG های ریزبافت<sup>2</sup>، قابلیت بهره گیری از انرژی بادی در ارتفاعات بالا فراهم شده است (شکل 9 الف-ت). این نوع از نانوزنراتورها، بسیار سبک، کم هزینه و دارای تنوع هستند و می توانند در هواشناسی و حسگرهای محیطی کارایی داشته باشند [39].

یکی دیگر از روش های تولید برق از انرژی باد، ساخت TENG درختمانند است که در آن برگها و ساقه، خود نوعی TENG بوده و هرکدام الکتریسیته تولید می کنند (شکل 9-ث و ج). از برق تولید شده توسط این TENG ها می توان در تونل های طویل برای روشن نمودن تابلوهای تبلیغاتی استفاده کرد [40]. اساس کار تمامی TENG های به کار رفته در ساقه ها و برگها بر مبنای اتصال و انفصال متناوب میان الکترودها توسط باد حاصل از حرکت خودروها و قطارها است.

1 Polytetrafluoroethylene (PTFE)  
2 Woven triboelectric nanogenerator flag (WTENG-flag)

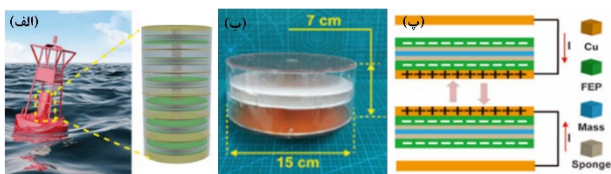
الکترونیکی در شهرهای هوشمند بهره برد [44]. از چالش‌های این TENG وابستگی عملکرد آن به شدت نور خورشید و تغییرات اندازه سرعت باد است. مثلا در روزهای ابری یا بدون باد، عملکرد آن محدود خواهد بود. تغییر جهت باد (از زاویه مطلوب  $0^\circ$  تا  $40^\circ$ ) باعث کاهش توان نانوژنراتور می‌شود [44].



شکل 12 (الف) طرحواره سلول‌های هیبریدی؛ (ب-ث) فرآیند تولید برق در یک چرخه کامل [43]، (ج) طرحواره‌ای از قرارگیری نانوژنراتورهای هیبریدی بر روی سقف خانه‌های مسکونی و جزئیات ساختار آن [44].

### 3-5- TENG های مبتنی بر امواج

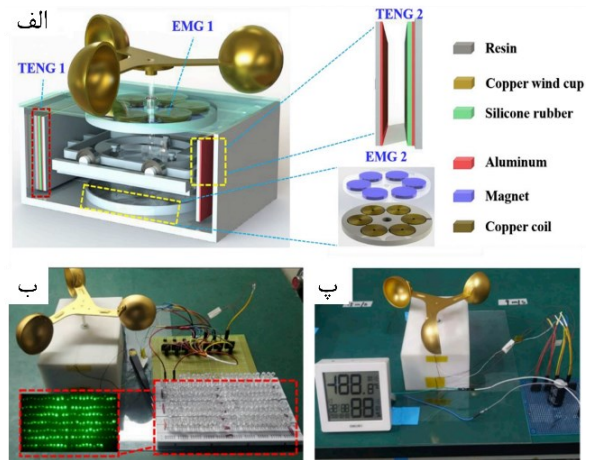
از آنجایی که بیش‌تر سطح زمین از آب پوشیده شده است، انرژی موجود در امواج آب یکی از مطمئن‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌گردد. استحصال انرژی از امواج اقیانوس‌ها یک برنامه جهانی برای استفاده از یک منبع طبیعی نامحدود است که امروزه توجه زیادی را به سوی خود جلب کرده است. البته به دلایل زیر امکان بهره‌برداری مطلوب از این منبع انرژی محدود شده است: 1- اتکاء فناوری‌های موجود به ژنراتورهای الکترومغناطیسی سنگین وزن با هزینه‌های سرسام‌آور، 2- لزوم استفاده از تجهیزات پیشرفته برای جلوگیری از غرق شدن ژنراتورها، 3- لزوم غلبه بر محیطی ناآرام برای بهره‌گیری از انرژی موجود در امواج و 4- پایین بودن فرکانس حرکت امواج دریا. با پیشرفت‌های حاصل شده در حوزه فناوری‌های مرتبط با TENG، استفاده از این ابزار در جهت دستیابی به انرژی امواجی که دارای حرکت با فرکانس پایین هستند به مراتب از ژنراتورهای الکترومغناطیسی به‌صرفه‌تر شده است [45]. با استفاده از یک سیستم شناور هوشمند خودکار متشکل از TENG چند لایه (شکل 13)، می‌توان حرکت امواج آب را به انرژی الکتریکی تبدیل کرد [46].



شکل 13 (الف) ساختار TENG چندلایه شناور روی سطح دریا؛ (ب) عکسی از TENG ساخته شده؛ (پ) مکانیسم کار جدایی-تماس TENG ساخته شده [46].

یک روش خلاقانه جهت دستیابی به چگالی توانی بالا در آب، استفاده از برج TENG یا TENG های طبقاتی است (شکل 14-الف). هر طبقه متشکل از

بدنه این دستگاه محصور شده‌اند (شکل 11-الف) که شامل چهار مجموعه از نانوژنراتورهای تریبولکتریک و الکترومغناطیسی است.

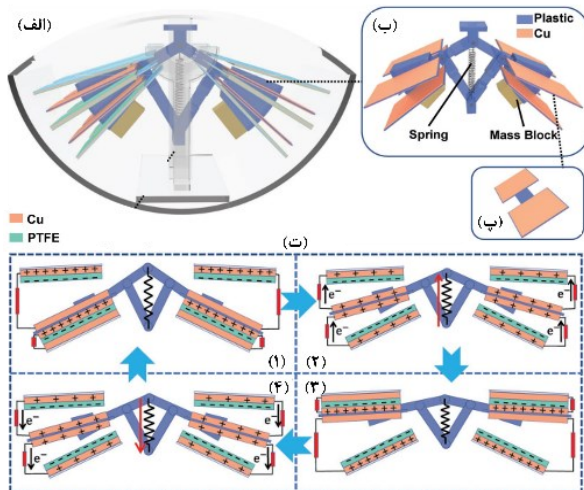


شکل 11 (الف) طرحواره‌ای از ساختار TEHG؛ (ب) روشن شدن LED های سری توسط این دستگاه؛ (پ) استفاده از نانوژنراتور هیبریدی برای تامین انرژی یک هیگروترموگراف با کمک یک خازن  $4700 \mu F$  [42].

یک فنجان باد مسی ثابت در بالای قاب بدنه برای جمع آوری انرژی باد استفاده می‌شود و انرژی مکانیکی چرخشی را برای واحدهای مولد برق فراهم می‌کند. قسمت داخلی فریم بدنه، از یک جزء کشویی و یک قسمت چرخان تشکیل شده است. با ترکیب اجزای دوار و مولفه لغزشی، حرکت چرخشی ایجاد شده توسط حرکت مکانیکی محیطی می‌تواند به حرکت خطی تبدیل شود. این طرح با کمک قسمت کشویی می‌تواند شرایط تماس و جداسازی تناوبی بین دو ماده تریبولکتریک مختلف را ایجاد کند. به دلیل فرآیندهای تریبولکتریفیکاسیون و القای الکترواستاتیک، تماس و جداسازی بین دو ماده می‌تواند انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. در عین حال، حرکت نسبی بین آهنرباها و سیم پیچ‌ها می‌تواند انرژی مکانیکی دوار را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. طراحی این TENG شامل اجزای مختلفی از جمله ژنراتورهای تریبولکتریک، ژنراتورهای الکترومغناطیسی، و قطعات مکانیکی پیچیده مانند دیسک‌ها و یاتاقان‌ها است که فرآیند تولید و مونتاژ را پیچیده و پرهزینه می‌کند.

### 3-4- سلول‌های هیبریدی

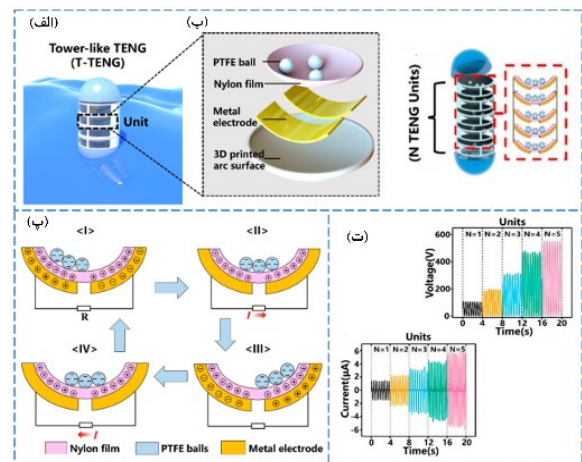
استفاده از سلول‌های هیبریدی متشکل از TENG، سلول خورشیدی و سلول الکتروشیمیایی در مطالعه‌های دیگر [43] منجر به تولید انرژی الکتریکی شده است. در این مطالعه، به طور همزمان و یا مستقل، از انرژی بادی، انرژی خورشیدی و انرژی شیمیایی استفاده شده است. شکل 12-الف-ث طرحواره‌ای از این سلول هیبریدی را نمایش می‌دهد. در بالای این ساختار، سلول خورشیدی جهت دستیابی به انرژی خورشید تعبیه شده و در درونی‌ترین لوله TENG، سلول الکتروشیمیایی قرار گرفته است [43]. در پژوهشی دیگر با طراحی یک نانوژنراتور هیبریدی که قابل نصب بر روی پشت‌بام ساختمان‌ها است (شکل 12-ج)، امکان تولید انرژی به صورت همزمان از انرژی‌های بادی و خورشیدی فراهم می‌گردد. از این قطعات می‌توان برای تامین انرژی ادوات



شکل 15 (الف) نمایی از ساختار TENG پروانه‌ای. (ب) تصویری از چهار میله متصل به هم و فنر به کار رفته به همراه وزنه‌های تعبیه شده؛ (پ) باله‌های TENG پروانه‌ای که شامل لایه مسی قرار گرفته بر روی سطح پلاستیکی است، (ت) مراحل 1-4 چرخه تولید انرژی الکتریکی ناشی از بالا و پایین شدن باله‌های نانوزنراتور [48].

با ظهور مواد دوبعدی با ویژگی‌های منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی، و در صدر آنها، گرافن با کاربردهای مختلف در حوزه ترشوندگی و نمک‌زدایی [50-53]، زمینه توسعه بیشتر TENG ها بر پایه این مواد هم فراهم شده است. بررسی‌های اخیر نشان داده با تغییر ویژگی‌های شبه خازن ناشی از اثر تریبوالکتریک بین قطره آب و گرافن تک‌لایه بر روی زیرلایه PTFE برق تولید می‌شود [54]. مادامی‌که قطره آب روی سطح گرافن بدون حرکت بماند، اختلاف پتانسیلی در دو سر قطره ایجاد نمی‌شود (شکل 16-الف). با حرکت قطره در یک جهت، کاتیون‌های درون قطره آب در جلوی قطره جمع می‌شوند (شکل 16-ب). با توجه به تغییر کاتیون‌ها، تعادل یکنواخت بارهای سطحی گرافن شکسته می‌شود و همین امر، موجب ایجاد اختلاف پتانسیل در دو سر قطره آب می‌گردد و جریان تولید می‌کند [55-56]. در شکل 16-الف، یک قطره  $0.5 \text{ mol/m}^3$  سدیم کلرید بر روی سطح گرافن/PTFE قرار گرفته و با کج کردن مصنوعی سطح ساخته شده، قطره روی بستر شروع به حرکت می‌کند. سیگنال‌های خروجی از این فرایند، توسط یک اسیلوسکوپ ثبت می‌شوند. مطالعات نشان داده که تعداد لایه‌های گرافن انتقال یافته بر روی PTFE و همچنین میزان غلظت قطره مورد آزمایش بر روی ولتاژ خروجی مطابق شکل 16-ج و ح، تاثیر دارد [54]. با افزایش تعداد لایه‌های گرافن، ولتاژ خروجی کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد (شکل 16-چ). همچنین مشخص شده که کاهش غلظت قطره سدیم کلرید باعث کاهش میزان ولتاژ تولیدی از حرکت قطره روی سطح TENG می‌شود (شکل 16-ح). از سوی دیگر، افزایش مداوم غلظت قطره لزوماً باعث افزایش ولتاژ تولیدی نمی‌شود؛ به نحوی که در غلظت‌های بالاتر از  $0.5 \text{ mol/m}^3$  کاهش ولتاژ رخ می‌دهد [54]. یکی از چالش‌های این روش این است که دستگاه برای عملکرد بهینه نیاز به گرافن تک‌لایه با کیفیت بالا دارد. تولید تک‌لایه از این ماده به روش‌های پیشرفته و

یک TENG شامل توپ‌های PTFE، لایه نایلونی، دو الکتروود و صفحه مقعر است (شکل 14-ب) [47]. این توپ‌ها به دلیل وجود نیروی گرانش، نیروی عکس العمل سطح و گشتاور میراکننده، به صورت مستمر، به چپ و راست حرکت کرده و باعث ایجاد جریان متناوب در مدار می‌شوند (شکل 14-ت). با افزایش تعداد واحدهای TENG، میزان تولید برق نیز افزایش می‌یابد (شکل 14-پ) [47]. محیط آبی با تلاطم‌های فراوان، طول عمر دستگاه را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین عملکرد TENG ها در این محیط، به جهت حرکت موج وابسته است. در زاویه‌های  $90^\circ$  و  $270^\circ$  نسبت به الکتروودها، جابه‌جایی بار کمتری رخ می‌دهد و عملکرد دستگاه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با ابداع TENG پروانه‌ای<sup>1</sup> که از اتصال چهار میله و یک فنر تعبیه شده، امکان تولید برق از امواج آب فراهم شده است (شکل 15) [48].



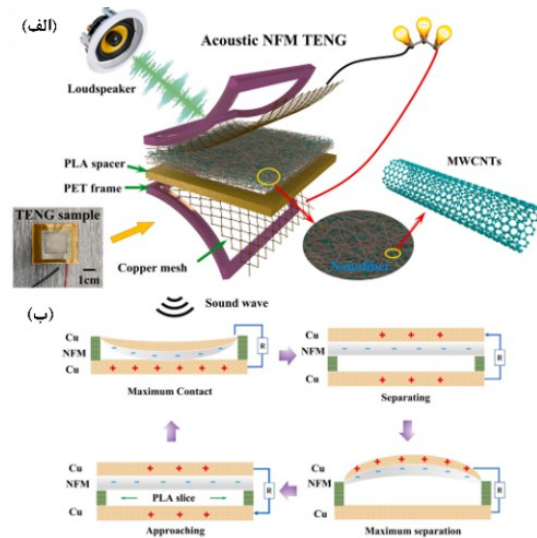
شکل 14 (الف) ساختار TENG طبقاتی. (ب) ساختار درونی یک واحد. (پ) نمای از طبقات TENG. (ت) اساس عملکرد یک واحد TENG و توزیع بارها در مراحل مختلف (ث) افزایش میزان ولتاژ خروجی و جریان با افزایش تعداد واحدهای TENG [47].

مطابق با شکل 15-الف، برای جذب نیروی امواج آب، پوسته بیرونی این قطعه، به صورت خمیده طراحی شده و چهار میله به همراه یک فنر درون آن قرار دارند (شکل 15-ب) که موجب حرکت‌های گوناگون TENG می‌شوند؛ در نتیجه امکان استفاده از انرژی موجود در امواج با فرکانس پایین فراهم می‌آید [48]. ساختار خاص این نانوزنراتور، باعث بالا و پایین شدن مکرر باله‌ها و حرکت‌های نوسانی در TENG می‌شود که هرکدام می‌توانند انرژی الکتریکی تولید کنند [48]. این نوع نانوزنراتورها را می‌توان در حسگرها و منابع تغذیه مورد استفاده در اقیانوس‌ها بکار برد [49].



#### 4- مزایا و چالش‌های توسعه فناوری TENG

انرژی‌های مکانیکی به طور روزمره در مقیاس بزرگ در جهان به هدر می‌رود. ذخیره این منابع انرژی از طریق تبدیل آن به انرژی الکتریکی از طریق توسعه قطعات TENG یکی از حوزه‌های به شدت رو به رشد است. شکل 21 الف، منابع مختلف انرژی مکانیکی را بر حسب فرکانس تولیدی نشان می‌دهد که بیشتر به آنها اشاره شد. اکثر این منابع بسیار فراوان هستند و اثرات سوء زیست‌محیطی هم ندارند. در رویکردهای نوین، از نانوزنراتورهای پیزوالکتریک، تریبولکتریک و یا الکترومغناطیسی جهت افزایش کاربری و بازدهی، به صورت هیبریدی استفاده می‌شود. در این میان، TENGها به تنهایی فواید گسترده‌ای دارند از جمله: در دسترس بودن و انتخاب مواد اولیه مختلف، هزینه‌های نسبتاً پایین تولید و سادگی ساخت قطعات. طی ده سال گذشته در سطح جهان، مطالعات گسترده‌ای در این حوزه صورت گرفته و تلاش‌های بسیاری هم جهت تجاری سازی برخی محصولات موفق آزمایشگاهی رخ داده است. شکل 21 ب) نقشه راهبری توسعه این فناوری را در سال‌های اخیر و پیش رو نشان می‌دهد. یکی از مهم‌ترین چالش‌های تجاری شدن این فناوری، محیط و فضای هدف، جهت نصب سیستم‌های TENG است. از چالش‌های دیگر، ناپایداری مواد به کار رفته در TENG ها و همچنین نویز اندازه‌گیری‌هاست که باید بر این موارد غلبه شود. یکی از پیشنهادها در جهت بهبود دوام مواد به کار رفته در TENG ها، استفاده از پلیمرهای خود-ترمیم‌شونده است. از طرفی برای کاهش نویزها، در مطالعات مختلف، استفاده از اسفنج‌های فلزی متخلخل پیشنهاد شده است. همچنین، استفاده از مواد بیولوژیکی بعنوان منابع انرژی در قطعات الکترونیکی پوشیدنی، کاشتنی و دوستدار محیط زیست جهت کاهش مشکلات ناشی از مواد مصنوعی مطرح شده است. یکی از چالش‌های بسیار مهم دیگر، خروجی تولید شده از قطعات TENG است که در زمان بسیار کوتاه قابل اندازه‌گیری است. این زمان خروجی در حدود چند میلی‌ثانیه به‌زای هر تماس ورودی است و کاربری قطعات را محدود می‌کند. در این راستا، برای افزایش انرژی الکتریکی تولیدی، استفاده از طراحی‌های مبتنی بر پمپاژ بار، موفقیت‌هایی بدست آورده است. چالش دیگر، این است که جریان متناوب پالسی خروجی در زندگی واقعی و قطعات الکترونیکی مرتبط، خیلی مناسب نیست و باید به دنبال تولید جریان مستقیم و پایدار بود. بنابراین انتظار می‌رود استراتژی‌های جدیدی برای کاربری بهینه قطعات TENG در آینده مطرح گردد [63-65].



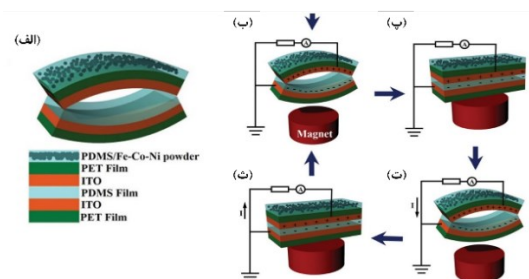
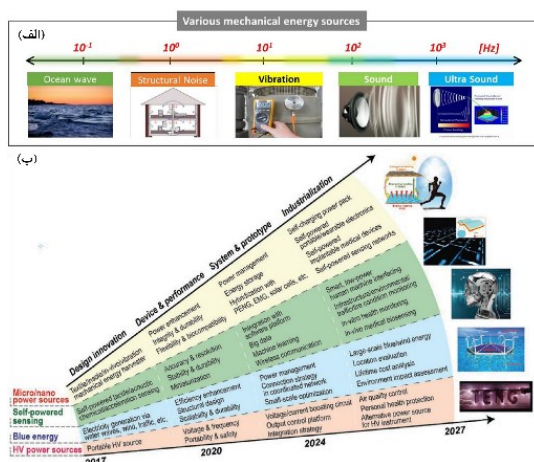
شکل 18 الف) نمایی از TENG فوق العاده نازک طراحی شده. ب) نحوه تولید سیگنال خروجی با هر بار برخورد امواج صوتی به TENG [60].



شکل 19 نمایی از تبدیل انرژی صوتی به انرژی الکتریکی توسط TENG [61].

#### 3-8- تولید برق از انرژی میدان مغناطیسی

انرژی مغناطیسی مانند برخی انرژی‌های طبیعی، گسترده نیست ولی در محیط پیرامون ساختمان‌ها، کارخانجات و در اطراف کابل‌های برق که از آن‌ها جریان الکتریکی عبور می‌کند، وجود داشته و پتانسیل استفاده در تولید برق را دارد. ثابت شده که با استفاده از TENGهای خاص می‌توان از انرژی موجود در میدان مغناطیسی برای تولید برق استفاده کرد. بدنه این نوع از TENG ها مانند شکل 20، شامل لایه حساس به میدان مغناطیسی و لایه فعال TENG است. [62]. عملکرد دستگاه ساخته شده به تنظیم نسبت جرمی لایه پاسخ‌دهنده مغناطیسی، فاصله بین لایه پاسخ‌دهنده و آهنربا، و شدت میدان مغناطیسی وابسته است. هر گونه خطا در تنظیم این پارامترها ممکن است باعث کاهش خروجی برق و عملکرد کلی دستگاه شود. همچنین تغییرات در شدت میدان مغناطیسی بر نیروی جذب و در نتیجه تماس و جداسازی تأثیر می‌گذارد، که می‌تواند خروجی تولید شده را ناپایدار کند.



شکل 20 الف) نمایی شماتیک از اجزای یک TENG مغناطیسی. ب-ت) عملکرد TENG در راستای تولید برق از میدان مغناطیسی [62].

- [11] J. C. M. Pires and A. L. da Cunha Gonçalves, (Eds.), Bioenergy with carbon capture and storage: using natural resources for sustainable development. *Academic Press*, 2019.
- [12] A. Hassan *et al.*, Monetization of the environmental damage caused by fossil fuels, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28, pp. 21204-21211, 2021.
- [13] C. Jiang, X. Li, S. W. M. Lian, Y. Ying, J. S. Ho and J. Ping, Wireless technologies for energy harvesting and transmission for ambient self-powered systems, *ACS nano*, Vol. 15, No. 6, pp. 9328-9354, 2021.
- [14] X. Wei *et al.*, All-weather droplet-based triboelectric nanogenerator for wave energy harvesting. *ACS nano*, Vol. 15, No. 8, pp. 13200-13208, 2021.
- [15] A. Giani and Z. Eldredge, Quantum computing opportunities in renewable energy, *SN Computer Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 393, 2021.
- [16] B. Shao, *et al.*, Bioinspired hierarchical nanofabric electrode for silicon hydrovoltaic device with record power output, *ACS nano*, Vol. 15, No. 4, pp. 7472-7481, 2021.
- [17] Z. L. Wang, *et al.*, On the origin of contact-electrification. *Mater. Today*, Vol. 30, pp. 34-51, 2019.
- [18] J. Shao, *et al.*, 3D mathematical model of contact-separation and single-electrode mode triboelectric nanogenerators, *Nano Energy*, Vol. 60, pp. 630-640, 2019.
- [19] C. Zhang *et al.*, Surface charge density of triboelectric nanogenerators: Theoretical boundary and optimization methodology, *Applied Materials Today*, Vol. 18, pp. 100496, 2020.
- [20] R. D. Dharmasena *et al.*, Nature of power generation and output optimization criteria for triboelectric nanogenerators. *Adv. Energy Mater.* 8, 1802190, 2018.
- [21] T. Cheng, J. Shao and Z.L. Wang, Triboelectric nanogenerators. *Nat Rev Methods Primers*, Vol. 3, pp. 39 (2023).
- [22] W-G. Kim *et al.*, Triboelectric nanogenerator: Structure, mechanism, and applications. *ACS Nano*, Vol. 15.1, pp. 258-287, 2021.
- [23] F. Yi *et al.*, Stretchable-rubber-based triboelectric nanogenerator and its application as self-powered body motion sensors. *Advanced Functional Materials*, Vol. 25, No. 24, pp. 3688-3696, 2015.
- [24] X. Guan *et al.*, Breathable, washable and wearable woven-structured triboelectric nanogenerators utilizing electrospun nanofibers for biomechanical energy harvesting and self-powered sensing, *Nano Energy*, Vol. 80, pp. 105549, 2021.
- [25] C. Li, *et al.*, Self-healable triboelectric nanogenerators: Marriage between self-healing polymer chemistry and triboelectric devices, *Advanced Functional Materials*, Vol. 33, No. 20, pp. 2208372, 2023.
- [26] C. Li, *et al.*, Self-healable, stretchable triboelectric nanogenerators based on flexible polyimide for energy harvesting and self-powered sensors. *Nano Energy*, Vol. 109, pp. 108285, 2023.
- [27] Y. Zou *et al.*, A bionic stretchable nanogenerator for underwater sensing and energy harvesting. *Nature Communications*, Vol. 10, No. 1, pp. 2695, 2019.
- [28] Y. Gao *et al.*, Asymmetric-elastic-structure fabric-based triboelectric nanogenerators for wearable energy harvesting and human motion sensing, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 466, pp. 143079, 2023.
- [29] W. Yuan *et al.*, Wearable, breathable and waterproof triboelectric nanogenerators for harvesting human motion and raindrop energy, *Advanced Materials Technologies*, Vol. 7. No. 6, pp. 2101139, 2022.
- [30] M. Wu, and Z. Li, A wearable flexible triboelectric nanogenerator for bio-mechanical energy harvesting and badminton monitoring, *Heliyon*, Vol. 10, No. 10, 2024.
- [31] C. Gao *et al.*, A seamlessly integrated device of micro-supercapacitor and wireless charging with ultrahigh energy density and capacitance, *Nature communications*, Vol. 12, No. 1, pp. 2647, 2021.
- [32] Z. Liu *et al.*, Ultraflexible in-plane micro-supercapacitors by direct printing of solution-processable electrochemically exfoliated graphene, *Advanced Materials*, Vol. 28, No. 11, pp. 2217-2222, 2016.

شکل 21 (الف) منابع ذخیره انرژی مکانیکی در طبیعت بر حسب فرکانس تولیدی، (ب) نقشه راهبردی توسعه TENGها در سال‌های اخیر و پیش رو [63].

## 5- نتیجه گیری

در اینجا، ابتدا TENGها و اساس کار، فرایند برق رسانی تماسی، و مدهای مختلف عملکرد آن‌ها مورد بحث قرار گرفت. سپس به مرور چگونگی عملکرد TENGها و کاربرد آن‌ها در راستای تامین انرژی از منابع گوناگون از جمله انرژی موجود در مفاصل (زانو، آرنج و انگشتان)، انرژی باد، امواج صوتی، امواج دریاها یا اقیانوسها، قطرات آب و میدان مغناطیسی پرداخته شد. همچنین نشان داده شد که از TENGها می‌توان به عنوان منابع تجدیدپذیر پوشیدنی بهره‌برداری کرد و از طریق آن عملکرد بدن، ضربان قلب، فشار خون و سایر علائم حیاتی را مونیتور کرد. هدف اصلی از ارتقای چنین سیستم‌هایی تامین برق در کم‌ترین زمان و با کم‌ترین هزینه در تمامی مکان‌ها است. با توجه به آنکه توسعه این سیستم‌ها به ثبات بیشتر تولید برق در منابع تجدیدپذیر و نیز به کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند، اهمیت این فناوری‌ها به صورت فزاینده‌ای رو به افزایش است. با این حال، TENGها در نقاط مختلف دنیا در ابتدای مسیر خود بوده و نقاط ضعفی نظیر بازدهی کم، محدودیت در استفاده از مواد، نوسان زیاد در تولید انرژی و باقی ماندن در مقیاس آزمایشگاهی دارند. هر ماده‌ای را نمی‌توان در ساختار TENGها به کار گرفت و لازم است از موادی استفاده شود که نحوه انتقال بار در آن‌ها با نوع کارکردی که TENGها دارند متناسب باشد. نوسان زیاد در تولید انرژی هم به دلیل وابستگی زیاد به شرایط محیطی رخ می‌دهد. این فناوری نوظهور در جهت رشد و گسترش، نیاز به حمایت سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در سطح کلان، حمایت‌های دولتی و همچنین محلی و نیز جلب اعتماد سرمایه‌گذاران بازار انرژی را دارند.

## 6- مراجع

- [1] R. E. C. P. A. IRENA, *International Renewable Energy Agency*. 2021.
- [2] N. El Bassam, M. Schlichting, D. Pagani, Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities, *Empowering a Sustainable, Competitive, and Secure Twenty-First Century*. Elsevier. (Eds.) 2021.
- [3] M. Popek, Alternative Fuels-Prospects for the Shipping Industry, *TransNav, Int. J. Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 18, No. 1, pp. 25-33, 2024.
- [4] N. Belyakov, Sustainable Power Generation. *Current status, Future challenges, and perspectives*, pp. 417-438, 2019.
- [5] G. Halkos, E-C. Gkampoura, Assessing fossil fuels and renewables impact on energy poverty conditions in Europe, *Energies*, Vol. 16, No. 1, pp. 560, 2023.
- [6] H. Ye *et al.*, Research progress of nano-catalysts in the catalytic conversion of biomass to biofuels: Synthesis and application, *Fuel* Vol. 356, pp. 129594, 2024.
- [7] K. Dorota, J. Z. Piotrowski, and J. Latosińska, Biomass-alternative renewable energy source to the fossil fuels, *E3S web of conferences*. Vol. 14. *EDP Sciences*, 2017.
- [8] A. Heras, Supply-side climate policy and fossil fuels in developing countries: a neo-Gramesian perspective, *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, Vol. 24, No. 1, pp. 49-74, 2024.
- [9] U. Mukhopadhyay and R. Pani, Emission and sectoral energy intensity: A variance decomposition analysis, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 955-974, 2022.
- [10] G. Loffreda *et al.*, The dangers of "health washing" the fossil fuel industry, *bmj*, Vol. 381, 2023.

- by Chemical Vapor Deposition Methods, *J. of Materi Eng and Perform*, Vol. 33, pp. 1996-2001, 2024.
- [56] A. Noori, M.J. Eshraghi, A.S. Kazemi, Effect of temperature on low pressure chemical vapor deposition of graphene, *Advanced Ceramics Progress*, Vol. 8, No. 1, pp. 36-43, 2022.
- [57] Y. Tang *et al.*, Triboelectric touch-free screen sensor for noncontact gesture recognizing, *Advanced Functional Materials*, Vol. 30, No. 5, pp. 1907893, 2020.
- [58] R. Hinchet *et al.*, Transcutaneous ultrasound energy harvesting using capacitive triboelectric technology, *Science*, Vol. 365, No. 6452, pp. 491-494, 2019.
- [59] Z. Yu *et al.*, Integrated piezo-tribo hybrid acoustic-driven nanogenerator based on porous MWCNTs/PVDF-TrFE aerogel bulk with embedded PDMS tympanum structure for broadband sound energy harvesting, *Nano Energy*, Vol. 97, pp. 107205, 2022.
- [60] W. Sun *et al.*, Enhancing the acoustic-to-electrical conversion efficiency of nanofibrous membrane-based triboelectric nanogenerators by nanocomposite composition, *Nano Energy*, Vol. 108, pp. 108248, 2023.
- [61] Y. Li *et al.*, Self-powered acoustic sensor based on triboelectric nanogenerator for smart monitoring, *Acoustics Australia*, Vol. 50, No. 3, pp. 383-391, 2022.
- [62] L-B. Huang *et al.*, Magnetic-assisted noncontact triboelectric nanogenerator converting mechanical energy into electricity and light emissions, *Advanced materials*, Vol. 28, No. 14, pp. 2744-2751, 2016.
- [63] C. Dongwhi *et al.*, Recent Advances in Triboelectric Nanogenerators: From Technological Progress to Commercial Applications, *ACS Nano*, Vol. 17, pp. 11087-11219, 2023.
- [64] S. H. Jeong *et al.*, Accelerated wound healing with an ionic patch assisted by a triboelectric nanogenerator, *Nano Energy*, Vol. 79, pp. 105463, 2021.
- [65] Y. Su *et al.*, Self-powered respiration monitoring enabled by a triboelectric nanogenerator, *Adv. Mater.*, Vol. 33, No. 35, pp. 2101262, 2021.
- [33] Z. Liu *et al.*, Ultrathin, flexible and transparent graphene-based triboelectric nanogenerators for attachable curvature monitoring, *J. Phys. D: Applied Physics*, Vol. 52, No. 31, pp. 314002, 2019.
- [34] X. Pu *et al.*, Eye motion triggered self-powered mechnosensational communication system using triboelectric nanogenerator, *Science Advances*, Vol. 3, No. 7, pp. 1700694, 2017.
- [35] N. Mohamadbeigi *et al.*, Triboelectric nanogenerator-enabled 3D microporous polydimethylsiloxane-graphene oxide nanocomposite for flexible self-powered humidity sensing applications, *Energy Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 2301136, 2024.
- [36] Y. Yang *et al.*, Triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and as self-powered wind vector sensor system, *ACS nano*, Vol. 7, No. 10, pp. 9461-9468, 2013.
- [37] S. Liu, P. Li, and Y. Yang, On the design of an electromagnetic aeroelastic energy harvester from nonlinear flutter, *Meccanica*, Vol. 53, pp. 2807-2831, 2018.
- [38] Y. Wang, *et al.*, A humidity resistant and high performance triboelectric nanogenerator enabled by vortex-induced vibration for scavenging wind energy, *Nano Research*, Vol. 15, pp. 3246-3253, 2022.
- [39] Z. Zhao, *et al.*, Freestanding flag-type triboelectric nanogenerator for harvesting high-altitude wind energy from arbitrary directions, *ACS Nano*, Vol. 10, No. 2, pp. 1780-1787, 2016.
- [40] Bian, Y., Jiang, T., Xiao, T., Gong, W., Cao, X., Wang, Z., & Wang, Z. L. Triboelectric nanogenerator tree for harvesting wind energy and illuminating in subway tunnel, *Advanced Materials Technologies*, 3(3), 1700317, (2018).
- [41] L. Jin *et al.*, Free-fixed rotational triboelectric nanogenerator for self-powered real-time wheel monitoring, *Advanced Materials Technologies*, Vol. 6, No. 3, pp. 2000918, 2021.
- [42] X. Fan, *et al.*, Triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator driven by wind for self-powered wireless transmission in Internet of Things and self-powered wind speed sensor, *Nano Energy*, Vol. 68, pp. 104319, 2020.
- [43] Y. Wu *et al.*, Hybrid energy cell for simultaneously harvesting wind, solar, and chemical energies, *Nano Research*, Vol. 7, pp. 1631-1639, 2014.
- [44] S. Wang *et al.*, Efficient scavenging of solar and wind energies in a smart city, *ACS nano*, 10(6), 5696-5700, 2016.
- [45] Z. L. Wang *et al.*, Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks, *Nano Energy*, Vol. 39, pp. 9-23, 2017.
- [46] F. Xi, *et al.*, Self-powered intelligent buoy system by water wave energy for sustainable and autonomous wireless sensing and data transmission, *Nano Energy*, Vol. 61, pp. 1-9, 2019.
- [47] M. Xu *et al.*, High power density tower-like triboelectric nanogenerator for harvesting arbitrary directional water wave energy, *ACS nano*, Vol. 13, No. 2, pp. 1932-1939, 2019.
- [48] R. Lei *et al.*, Butterfly-Inspired Triboelectric Nanogenerators with Spring-Assisted Linkage Structure for Water Wave Energy Harvesting, *Advanced Materials Technologies*, Vol. 4, No. 3, pp. 1800514, 2019.
- [49] Z. L. Wang, Catch wave power in floating nets, *Nature*, Vol. 542, No. 7640, pp. 159-160, 2017.
- [50] A.S. Kazemi, *et al.*, Large total area membrane of suspended single layer graphene for water desalination, *Desalination*, Vol. 451, pp. 160-171, 2019.
- [51] A.S. Kazemi *et al.*, Support based novel single layer nanoporous graphene membrane for efficacious water desalination, *Desalination*, Vol. 451, pp. 148-159, 2019.
- [52] A.S. Kazemi, and M.A. Abdol, Nano-Porous Graphene as Free-Standing Membranes, in Two-Dimensional (2D) Nanomaterials in Separation Science, *Springer*, pp. 43-86, 2021.
- [53] F. B. Azadzadegan and A.S. Kazemi, Structure and wettability variations of single layer graphene via SF6 plasma, *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, in peer review.
- [54] J. Yin, *et al.*, Generating electricity by moving a droplet of ionic liquid along graphene, *Nat. Nanotech.*, Vol. 9, No. 5, pp. 378-383, 2014.
- [55] A. Noori, M.J. Eshraghi, M. Samiee, A.S. Kazemi, The Effect of Pressure on the Growth of Single-Layer Graphene on Copper Sheets