نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۵، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۰۲۳ تا ۳۰۳۴
DOI: 10.22060/mej.2020.17624.6629

# ساخت و مشخصه‌یابی نانوژنراتور انعطاف‌پذیر با استفاده از پدیده الکتروووتینگ معکوس

مهدی سن سبلی [۱]، یگانه گرگیج [۲]، امین بهزادمهر [۲*]، طاهره فنایی شیخ الاسلامی [۳]

۱- پژوهشکده فناوری نانو، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۳- گروه مهندسی مکانیک - مکاترونیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

**خلاصه:** برداشت انرژی‌های تلف‌شونده محیطی، به‌منظور تغذیه سنسورها و مدارها درشبکه‌های بی‌سیم مورد توجه بسیاری از محققان قرار دارد. کار حاضر به طراحی و ساخت نوعی برداشت‌کننده انرژی برای تولید انرژی الکتریکی به روش الکتروووتینگ معکوس می‌پردازد. عملکرد این نانوژنراتور در اثر حرکات مکانیکی با فرکانس‌های متفاوت در مقادیر مختلفی از ولتاژ بایاس و بار خارجی اندازه‌گیری و مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ساخت نانوژنراتور از آب مقطر بعنوان مایع دوقطبی محصور بین دو الکترود استفاده شد. پلیمر پلی دی متیل سیلوکسان که دارای آب‌گریزی و انعطاف‌پذیری خیلی خوبی می‌باشد، بعنوان لایه دی‌الکتریک در نظر گرفته شد. نشان داده شده است که افزایش فرکانس نیروی اعمالی تا حدی می‌تواند باعث افزایش جریان و توان خروجی شود که خازن به‌طور کامل تخلیه نشود. ملاحظه می‌گردد که توان خروجی با افزایش مقاومت بار خارجی زیاد می‌شود. این رفتار تا جایی ادامه می‌یابد که مقدار بار با مقاومت درونی نانوژنراتور برابر بوده و امپدانس سازگار اتفاق بیفتد. نتایج نشان می دهد که نانوژنراتور ساخته شده قادر به تولید چگالی توان ۱/۰۸ وات بر متر مربع از نوسانات مکانیکی با فرکانس یک هرتز با استفاده ازقطره آب به حجم یک میکرولیتری محصور شده در میان صفحات خازنی و باردار شده با ولتاژ ۷ ولت می‌باشد.

**تاریخچه داوری:**
دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

**کلمات کلیدی:**
نانوژنراتور
الکتروووتینگ معکوس
انعطاف‌پذیر
پلی دی متیل سیلوکسان

## ۱- مقدمه

با توجه به گسترش فناوری‌های جدید در حوزه‌هایی نظیر افزاره‌های الکترونیکی همراه، مخابرات و اخیرا توسعه سیستم‌ها مبتنی بر مفهوم اینترنت اشیا، طراحی و ساخت میکرو و نانوژنراتورهایی برای تامین و تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز آن‌ها در محل (بصورت یک سیستم مجتمع) را به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل نموده است. این در حالی است که شرایط محیطی کارکرد اغلب این تجهیزات همراه با حرکات و ضربات مکانیکی می‌باشد. در سال‌های اخیر انرژی جنبشی ناشی از حرکات مکانیکی به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر و پایدار برای تبدیل به انرژی الکتریکی مورد توجه قرارگرفته است [۱]. یکی از مفاهیمی که برای این منظور به‌عنوان یک رویکرد جدید در برداشت انرژی مکانیکی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته پدیده الکتروووتینگ معکوس[1] است [۲-۴]. سیستم الکتروووتینگ معکوس شامل یک مایع دو قطبی، یک زیر لایه پوشش داده‌شده با یک الکترود و یک لایه دی‌الکتریک می‌باشد. مایع رسانا بین دو زیر لایه پوشش داده‌شده با لایه الکترود قرار دارد، الکترودها به یک منبع ولتاژ خارجی متصل شده و پلاریزاسیون بین هر قطره و الکترود رخ می‌دهد. سطح تماس بین قطره و زیر لایه را با اعمال نیرو بر روی قطره تغییر می‌دهد. این تغییر در سطح تماس به نوبه خود باعث تغییر در ظرفیت خازنی این ساختار می‌شود. این مکانیسم معادل یک خازن متغیر است؛ بنابراین مقدار انرژی الکتریکی تولیدشده با استفاده از برداشت انرژی الکتروووتینگ معکوس ارتباط نزدیکی با ظرفیت خازن سطحی و ولتاژ اعمالی دارد.

در سال ۲۰۱۱ کروپنکن و همکاران [۲] برای اولین بار تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی مبنی بر پدیده الکتروووتینگ معکوس را معرفی کردند. آنها معتقد بودند که این روش دارای مزایای مهمی، ازجمله چگالی توان بسیار بالا، توانایی برای استفاده از طیف گسترده‌ای از نیروهای مکانیکی و حرکات مکانیکی که به‌وسیله سیستم‌های پیزوالکتریک یا روش‌های الکترومغناطیسی قابل‌دسترس

1 Reverse Electrowetting

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amin.behzadmehr@eng.usb.ac.ir

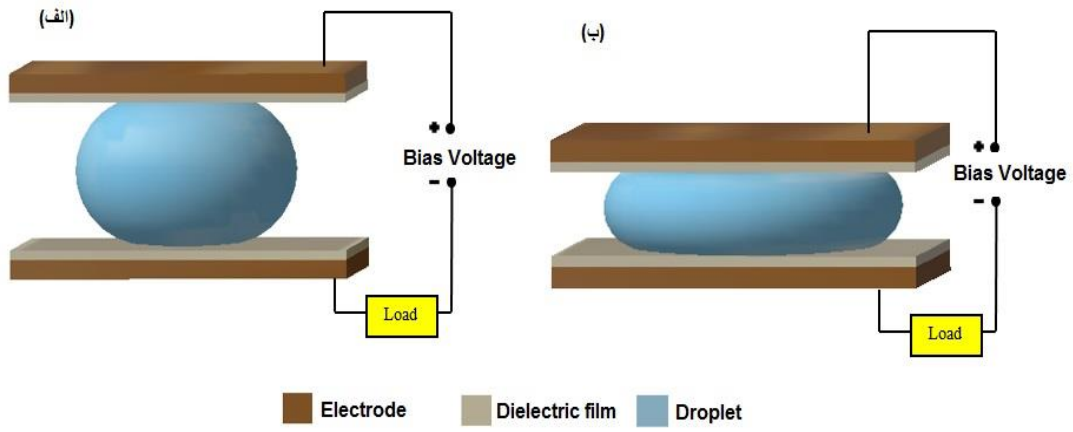
حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

نیستند، توانایی تولید مستقیم در دامنه وسیعی از جریان و ولتاژ، می‌باشد. هان و همکاران [۳] مطالعه پارامتری روی یک مولد توان بر اساس پدیده الکتروتینگ معکوس در یک میکروکانال انجام دادند. آن‌ها بر این باور بودند که درک پارامترهای مؤثر بر خروجی این نانوژنراتور، کلید افزایش توان خروجی آن است. آن‌ها در تلاش بودند تا این نانوژنراتورها بر معایبی مانند خروجی پایین و ضریب تبدیل کم مبدل‌های انرژی سنتی غلبه کنند. نتایج آنها نشان داد که عملکرد امیدبخش مولد توان میکروفلویدیک، بر اساس پدیده الکتروتینگ معکوس، می‌تواند با انتخاب یک لایه دی‌الکتریک نازک با ثابت دی‌الکتریک بالا و استحکام شکست بالا به دست آید.

یانگ و همکاران [۵] بر روی لایه‌های دی‌الکتریک با چگالی بالا که با استفاده از روش لایه‌نشانی اتمی[1] شکل گرفته بودند پرداختند. از اکسید آلومینیوم که ماده‌ای در دسترس است برای لایه‌های دی‌الکتریک استفاده شد. حداکثر چگالی توان $5/59\ mW/cm^2$ با استفاده از نمونه لایه‌نشانی‌شده باضخامت ۴۵ نانومتر در یک ولتاژ بایاس مستقیم معادل ۱۳/۵ ولت حاصل شد. علاوه بر این، برای نمونه لایه‌نشانی‌شده باضخامت ۱۴۰ نانومتر که می‌تواند در برابر ولتاژ بایاس بالاتر مقاومت کند، چگالی توان و چگالی انرژی به ترتیب حدود $11\ mW/cm^2$ و $22/24\ \mu J/cm^2$ بدست آمد. با توجه به کم بودن دامنه و فرکانس انرژی مکانیکی وارده، اما عملکرد به دست آمده مناسب بود. بر اساس این نتایج، لایه‌های حاصله از روش لایه‌نشانی اتمی برای استفاده در سیستم‌های مبتنی بر پدیده الکتروتینگ معکوس مناسب هستند. شیو و همکاران [۶] در یک مطالعه تحلیلی روش جدیدی برای برداشت انرژی مکانیکی مطرح کردند که در آن پدیده الکتروتینگ معکوس با یک فرایند خود نوسانی سریع رشد و فروپاشی حبابی ترکیب شده است. ترکیب دینامیک نوسان سریع حباب با فرآیند الکتروتینگ معکوس، پتانسیل افزایش بالای چگالی توان و همچنین امکان تولید انرژی از منابع انرژی مکانیکی با طیف بسیار گسترده‌ای از فرکانس‌های مشخصه حتی زیر یک هرتز را دارد. این مسئله پنجره‌ای را به سمت امکان استخراج انرژی مفید از منابعی که در همه‌جا وجود دارند اما استفاده از آن‌ها دشوار است همچون حرکت انسان و ماشین گشود. روسف و همکاران [۷] به پیش‌بینی بازده انرژی سیستم الکتروتینگ معکوس با استفاده از مواد مقرون‌به‌صرفه پرداختند. آن‌ها یک مدل ریاضی از سیستم الکتروتینگ معکوس با مواد مؤثر و ارزان ارائه دادند. ملاحظه گردید که در یک ولتاژ بایاس ثابت، انرژی تولیدشده زیرکونیوم تیتانات از باریم تیتانات بیشتر می‌باشد. چون چگالی انرژی الکتریکی به‌شدت وابسته به ظرفیت خازن بین دو الکترود و دی‌الکتریک است. ظرفیت خازنی به ناحیه تماس قطره وابسته بوده و با ضخامت لایه دی‌الکتریک متناسب است. افزایش ضخامت دی‌الکتریک انرژی تولیدشده را کاهش می‌دهد. با این‌حال، مدل ارائه‌شده به‌طور آشکار شامل رفتار فرکانسی نمی‌شود. یانگ و همکاران [۸] از یک ساختار مرکب متشکل از اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیم بعنوان لایه دی‌الکتریک استفاده نمودند. این ترکیب باعث کاهش نشت جریان گردید. آنها نشان دادند که در ولتاژ بایاس کم می‌توان به چگالی توان معادل $۱۵/۳۶\ mW/cm^2$ دست یافت. به‌طورکلی سه طرح اصلی برای سیستم الکتروتینگ معکوس گزارش‌شده است که در همه‌ی این موارد یک نیروی خارجی باعث حرکت قطره کوچک در فواصل معین می‌شود: قطره مابین صفحات نوسان دار، قطره مابین صفحات کشویی، قطره داخل یک میکرو کانال [۲،۴،۹]. نیکولوف و همکاران [۱۰] به مدل سازی یک برداشت‌کننده انرژی با استفاده از این پدیده پرداختند. مدل معرفی شده به‌خوبی تغییرات هندسه قطره، تغییرات میدان الکترواستاتیک، انرژی تولیدی را با توجه به محدودیت طول دبای نشان می‌دهد. شی و همکاران [۱۱] در بررسی خود برای تامین انرژی ربات‌ها، یکی از روش‌هایی که برای این منظور می‌تواند مورد توجه باشد را برداشت انرژی توسط پدیده الکتروتینگ معکوس در حین حرکت رباط معرفی نمودند. انعطاف‌پذیری این نانوژنراتورها از اهمیت ویژه‌ای در کاربردهای مختلف دارد. برای این منظور سن سبلی و همکاران [۱۲] ساخت تمام پلیمری این نانوژنراتورها را مطرح نمودند.

با توجه به کارهای انجام گرفته در این زمینه در کار حاضر از آب به جای جیوه و گالینستان (گران قیمت) که در اغلب کارها بکار گرفته شده استفاده می‌شود. در این کار از موادی به‌عنوان پوشش استفاده گردیده که هم بتواند به عنوان دی‌الکتریک و هم به عنوان آب‌گریز از آن‌ها استفاده کرد. بعلاوه در این تحقیق هر الکترود با لایه دی‌الکتریک جهت عملکرد بهتر پوشش داده شده است. در این مقاله به جزییات طراحی و ساخت یک نانوژنراتور، متشکل از قطره

1 Atomic Layer Deposition




شکل ۱. طرحواره قطره مابین صفحات نوسان دار نانوژنراتور. الف) قبل از اعمال نیرو. ب) بعد از اعمال نیرو

**Fig. 1. Schematic of droplet position a) before exerting force b) after exerting force**

آب بین دو لایه دی‌الکتریک پلیمری (پلی دی متیل سیلوکسان[1] )، که دراثر یک نیروی خارجی در نوسان است پرداخته می‌شود. شکل ۱ طرحواره‌ای از ژنراتور مد نظر را نشان می‌دهد. اثر پارامترهایی همچون فرکانس نیروی ورودی، ولتاژ بایاس، و مقدار مقاومت خارجی بر روی عملکرد این نانوژنراتور مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-طراحی و ساخت نانوژنراتور الکتروووتینگ معکوس

فرآیند طراحی و ساخت نانوژنراتور الکتروووتینگ معکوس با انتخاب سه پارامتر اصلی و بررسی چگونگی پلاریزه شدن مایع دی‌الکتریک محصور بین دو الکترود، تحت اعمال ولتاژ مستقیم و نیروی اعمالی خارجی آغاز می‌شود. برای دستیابی به ساختاری انعطاف پذیر و ساده پلیمری با آب‌گریزی و انعطاف‌پذیری مناسب مد نظر قرار گرفت. همچنین قطره مایع محصور بایستی دوقطبی خوبی بوده و در اثر اعمال ولتاژ به الکترودها پلاریزه شود. ماده دوقطبی محصور پس از اعمال نیرو و تغییر سطح تماس و همچنین زاویه تماس آن با الکترود، بیشتر پلاریزه شده و در نتیجه بارهای بیشتری در الکترودهای خارجی القا می‌شود. ساختار خازنی نانوژنراتور، در این حالت، مانند یک باتری، در مدار خروجی جریان بوجود خواهد آورد. مواد انتخاب‌شده در این کار، پلیمر پلی دی متیل سیلوکسان و آب مقطر می‌باشند. این پلیمر از خاصیت آب‌گریزی فوق‌العاده و انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار است لذا از آن به‌عنوان لایه دی‌الکتریک و آبگریز استفاده شده تا آب که یک مایع دوقطبی خوبی است $\left(۶/۱۷\times۱۰^{-۳۰}\,\mathrm{C\cdot m}\right)$ در تماس با آن زاویه تماس بیشتری داشته باشد [۱۳].

مشخصات مواد مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. برای ساخت نانوژنراتور، ابتدا لایه نازکی از پلیمر بر روی صفحه مسی به روش لایه‌نشانی چرخشی ایجاد می‌شود. این لایه در کوره با حرارت ۸۰ درجه سانتی‌گراد و بمدت ۲ ساعت حرارت داده می‌شود تا محکم و یکنواخت شود. سپس با استفاده از یک قالب، چهار محفظه‌ی دایروی با استفاده از پلیمر، روی زیر لایه مسی ساخته شده و حرارت داده می‌شود. پس از محکم شدن محفظه، یک قطره آب به حجم های مشخص در طی هر مرحله در هر محفظه قرار داده می‌شود (شکل ۲). پس از آن با لایه نازک دی‌الکتریک نشانده شده بر روی الکترود مسی، محفظه پوشانده شده و مجددا در کوره با حرارت ۸۰ درجه سانتی‌گراد بمدت ۴ ساعت قرار می‌گیرد. به این ترتیب نانوژنراتور

شکل ۲. تصویر قسمت زیرین نانوژنراتور متشکل از چهار محفظه پلیمری و مایع محصور در آن.

**Fig. 2. Image of the bottom part with water droplet in the cavities**

1 PDMS

جدول ۱. مشخصات مواد مورد استفاده در ساخت نانوژنراتور

**Table 1. Physical properties**

| خاصیت | ماده | |
|---|---|---|
| | PDMS | آب |
| ضریب دی‌الکتریک | ۲/۳-۲/۸ | ۸۰ |
| چگالی ($kg/m^3$) | ۰/۹۷ | ۹۹۸ |
| استحکام کششی (MPa) | ۲/۲۳ | - |
| ضریب هدایت الکتریکی ($\mu S/cm$) | - | ۰/۰۵۵ |

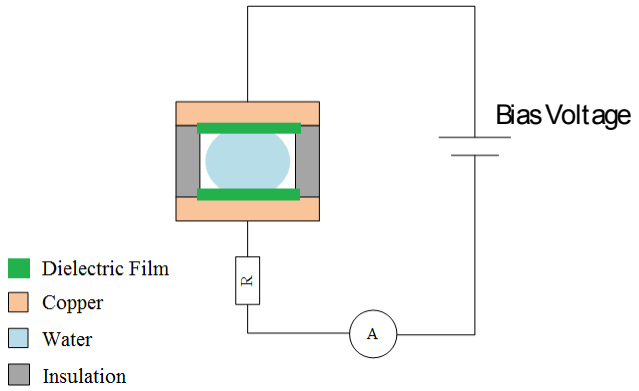
الکتروووتینگ معکوس، با چهار محفظه ساخته می‌شود. طرح کلی نانوژنراتور ساخته‌شده در شکل ۳ نمایش داده‌شده است.

## ۳- روش انجام آزمایش

نانوژنراتور ساخته شده در مداری مطابق شکل ۳ جهت اعمال ولتاژ بایاس (توسط منبع تغذیه) و اندازه‌گیری عملکرد آن (توسط مولتی-متر) قرار می‌گیرد. جهت اعمال نیرو به ژنراتور از یک مولد حرکت خطی با فرکانس متغییر استفاده می‌شود. این مولد که در این آزمایشگاه تحقیقاتی ساخته شده است در شکل ۴ نشان داده می‌شود.

نانوژنراتور در زیر فک متحرک دستگاه قرار گرفته و با توجه به فرکانس حرکت بازو، تحریک شده و عملکرد آن با توجه به تجهیزات مورد استفاده اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. لذا اطلاع از دقت وسایل اندازه‌گیری استفاده شده و میزان عدم قطعیت نتایج حاصله در تجزیه و تحلیل نتایج امری اجتناب‌ناپذیر است. جدول‌های ۲ و ۳ دقت تجهیزات اندازه‌گیری و عدم قطعیت نتایج را نشان می دهند.

نانوژنراتور ساخته شده در مداری مطابق شکل ۳ جهت اعمال ولتاژ بایاس (توسط منبع تغذیه) و اندازه‌گیری عملکرد آن (توسط مولتی‌متر) قرار می‌گیرد. جهت اعمال نیرو به ژنراتور از یک مولد حرکت خطی با فرکانس متغیر استفاده می‌شود. این مولد که در این آزمایشگاه تحقیقاتی ساخته شده است در شکل ۴ نشان داده می‌شود. نانوژنراتور در زیر فک متحرک دستگاه قرار گرفته و با توجه به فرکانس حرکت بازو، تحریک شده و عملکرد آن با توجه به تجهیزات مورد استفاده اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. لذا اطلاع از دقت




شکل ۳. طرحواره مدار اندازه‌گیری نانوژنراتور

**Fig. 3. Schematic of the experimental setup**

شکل ۴. مولد حرک خطی

**Fig. 4. Linear force generator**

**جدول ۲. دقت وسیله اندازه‌گیری**
**Table 2. Accuracy of the measurement instruments**

| ردیف | نام دستگاه | مدل دستگاه | شرکت سازنده | دقت اندازه‌گیری |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | منبع تغذیه | MP-3003D | MEGATEK | ±۰/۰۰۰۳ mV |
| ۲ | دیجیتال متر مولتی | GDM-8261A | GW INSTEK | ±۱ pA |
| ۳ | خطی موتور | * | ایران | ±۰/۱ Hz |
| ۴ | میکرو پیپت | - | - | ±۰/۵ µL |

*: طراحی و ساخت در دانشگاه سیستان و بلوچستان

**جدول ۳. عدم قطعیت بسط یافته اندازه‌گیری توان خروجی**
**Table 3. Uncertainty of power output measurement**

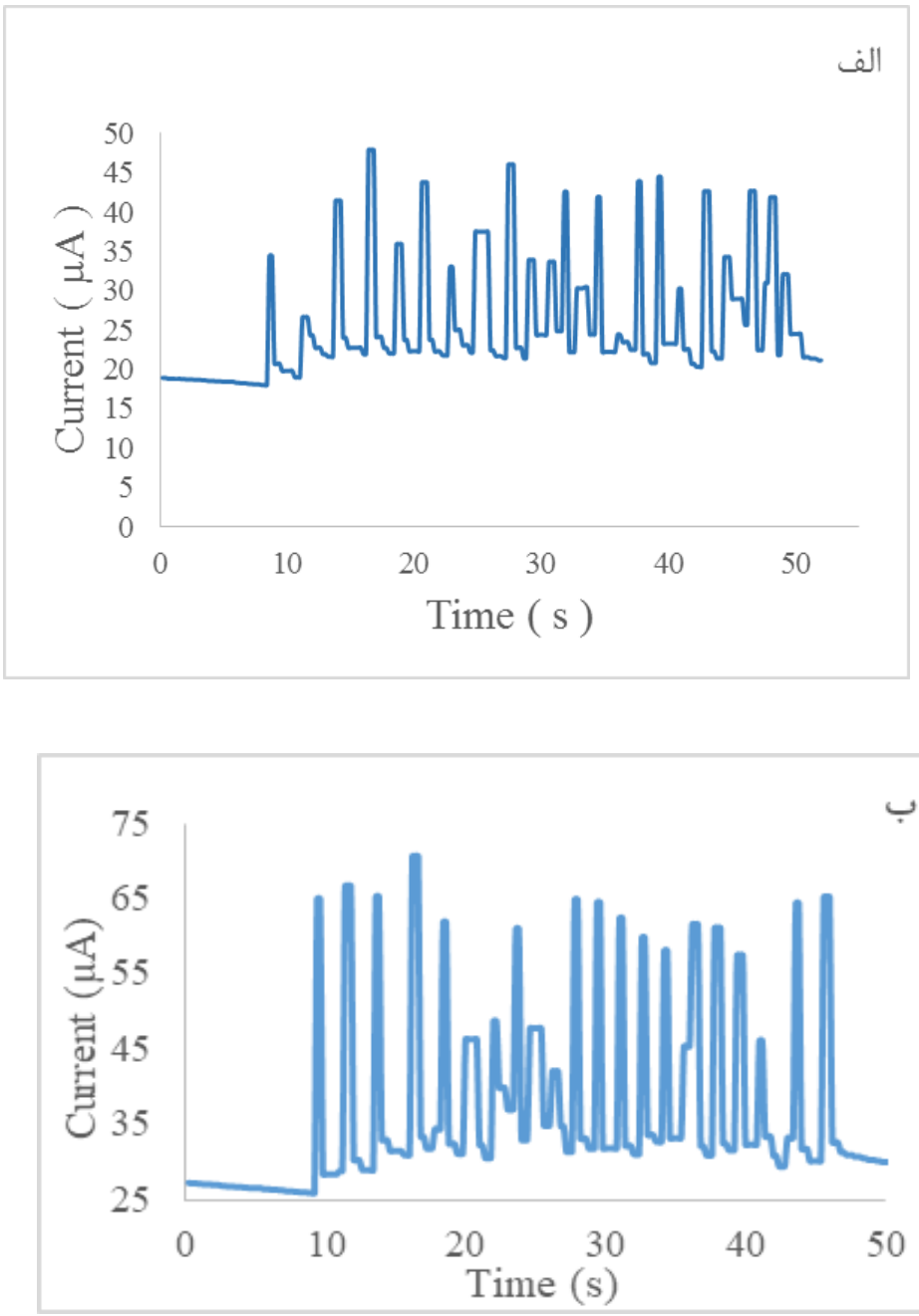
| عدم قطعیت | توان خروجی (W) | مشخصات نمونه در فرکانس ۶/۵ هرتز |
|---|---|---|
| $\pm ۶/۴۵\times ۱۰^{-۸}$ | $۲/۲۳\times ۱۰^{-۶}$ | $R$= ۲۲۰۰۰, $v$= ۲۷ µl, $V$=۷/۵ V |
| $\pm ۵/۰۴\times ۱۰^{-۸}$ | $۸/۷۲\times ۱۰^{-۷}$ | $R$= ۵۱۰۰۰, $v$= ۵µl , $V$=۷/۵ V |
| $\pm ۱/۰۱\times ۱۰^{-۹}$ | $۳/۵۱\times ۱۰^{-۸}$ | $R$= ۱۰۰۰, $v$= ۵۰µl , $V$=۷/۵ V |
| $\pm ۲/۷۱\times ۱۰^{-۸}$ | $۹/۳۹\times ۱۰^{-۷}$ | $R$= ۲۲۰۰۰, $v$= ۵۰µl , $V$=۵ V |
| $\pm ۱/۷۶\times ۱۰^{-۸}$ | $۳/۰۴\times ۱۰^{-۷}$ | $R$= ۵۱۰۰۰, v= ۲۷µl, $V$=۵ V |
| $\pm ۵/۴۸\times ۱۰^{-۱۰}$ | $۱/۸۹\times ۱۰^{-۸}$ | $R$= ۱۰۰۰, $v$= ۵µl , $V$=۷/۵ V |

وسایل اندازه‌گیری استفاده شده و میزان عدم قطعیت نتایج حاصله در تجزیه و تحلیل نتایج امری اجتناب‌ناپذیر است. جدول‌های ۲ و ۳ دقت تجهیزات اندازه‌گیری و عدم قطعیت نتایج را نشان می‌دهند.

## ۴- بحث و بررسی نتایج مشخصه‌یابی

با اعمال نیروی مکانیکی خارجی با فرکانس‌های مختلف عملکرد نانوژنراتور مورد مطالعه قرار گرفته است. عملکرد نانوژنراتور، در سه ولتاژ مستقیم ۵، ۷ و ۱۰ ولت و مقاومت بارخارجی ۱ و ۵۱ کیلو اهم و فرکانس ۴، ۶/۵ و ۹ هرتز اندازه‌گیری و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

با اعمال ولتاژ بایاس مستقیم و باردار شدن الکترودها، مایع دی‌الکتریک محصور بین الکترودها پلاریزه می‌شود. سپس در اثر اعمال نیروی مکانیکی فاصله بین دو الکترود کم شده و سطح تماس بین آب و الکترود افزایش می‌یابد و در نتیجه تحت تاثیر میدان الکتریکی، قطره بیشتر پلاریزه می‌شود. پلاریزه شدن بیشتر قطره باعث القای بار الکتریکی بیشتر در الکترودها شده و خازن را به یک باتری تبدیل می‌کند که قابلیت تولید جریان در مدار خارجی را دارد. مقادیر جریان لحظه‌ای خروجی در شکل ۵ نشان داده شده است. نمونه‌ی ساخته‌شده با ولتاژ های ۵ و ۷ ولت برای قطره به حجم یک میکرولیتر در مقاومت بار یک کیلو اهم و فرکانس یک هرتز به ترتیب دارای جریان پیک تا پیکی حدود ۲۵ و ۴۰ میکرو آمپر می‌باشد که در هر اعمال نیرو و حذف نیرو یک پیک جریان تولید می‌شود. لازم

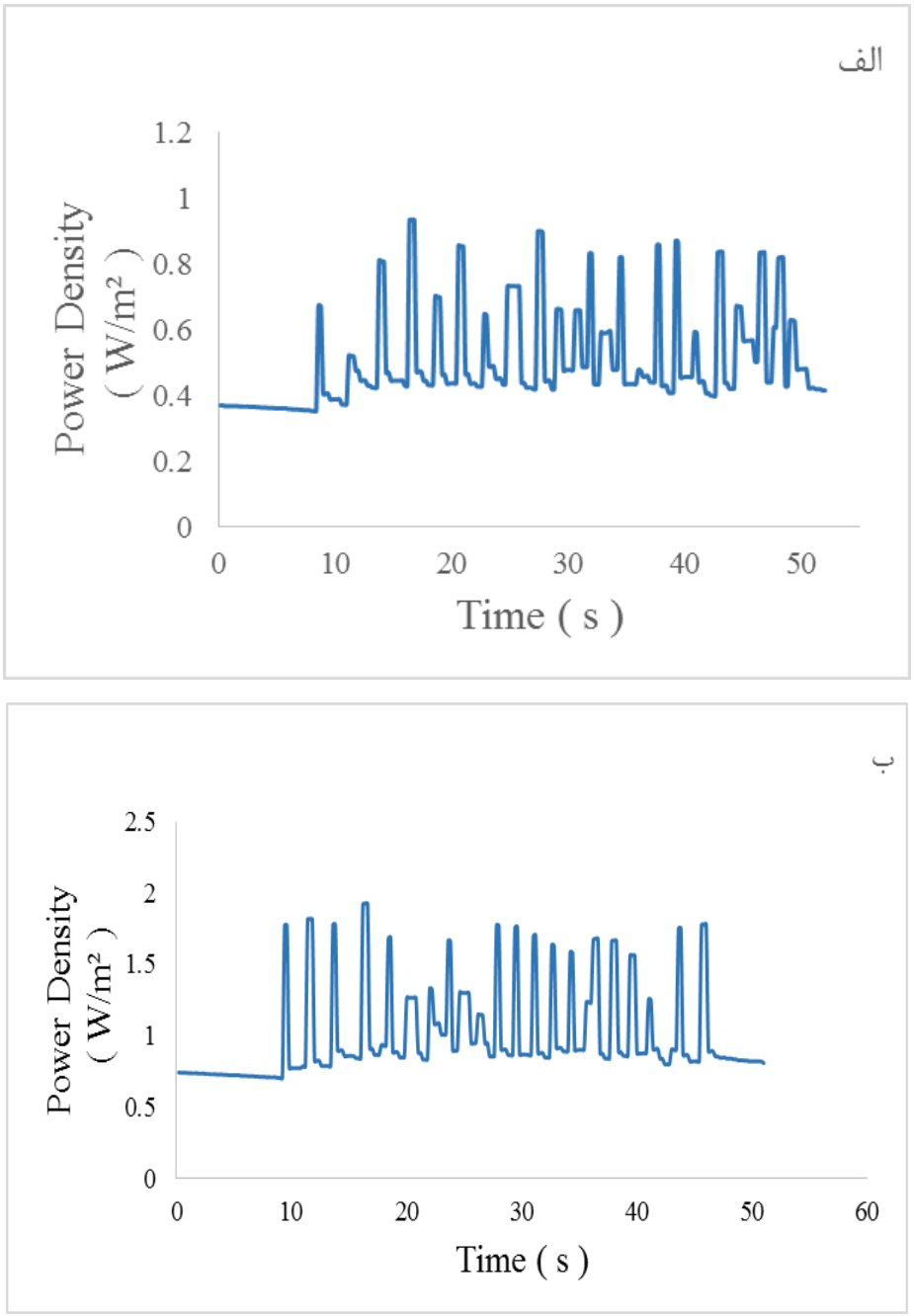



شکل ۵. مقادیر لحظه‌ای جریان خروجی نانوژنراتور الکتروو‌تینگ معکوس، الف) ولتاژ بایاس ۵ ولت، ب) ولتاژ بایاس ۷ ولت

**Fig. 5. Nanogenerator instantaneous current output a) bias voltage 5V b) bias voltage 7V**

به ذکر است که چون نرخ نمونه‌برداری دستگاه به اندازه کافی زیاد نبوده، بعضی از داده ها در عدم هماهنگی زمان نمونه‌برداری دستگاه و زمان زیاد شدن خروجی در اثر اعمال نیرو، ثبت نشده و در شکل دیده نمی‌شوند. متوسط چگالی توان داده شده به بار خروجی نیز به ترتیب ۰/۵۱ و ۱/۰۸ وات بر مترمربع، برای ولتاژهای اعمالی ۵ و ۷ ولت، می‌باشد. منحنی توان لحظه ای نانوژنراتور، برای هر دو ولتاژ اعمالی، در شکل ۶ رسم شده است. جهت بررسی نتایج و مقایسه بهتر، در جدول ۴ مقایسه دو ولتاژ بایاس استفاده شده، از نظر مقدار توان و جریان صورت گرفته است.

مشاهده می شود با افزایش ولتاژ از ۵ ولت به ۷ ولت توان خروجی نانوژنراتور حدود ۳برابر افزایش می یابد و چگالی توان در ۷ولت ۰,۹۸۷ می‌باشد. در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد که با ثابت بودن دیگر پارامترها (ولتاژ بایاس ۱۰ ولت با حجم ثابت ۲۷ میکرو لیتر و مقاومت۲۲ کیلو اهم) و افزایش فرکانس از ۴ به ۶/۵ هرتز، جریان افزایش می‌یابد و

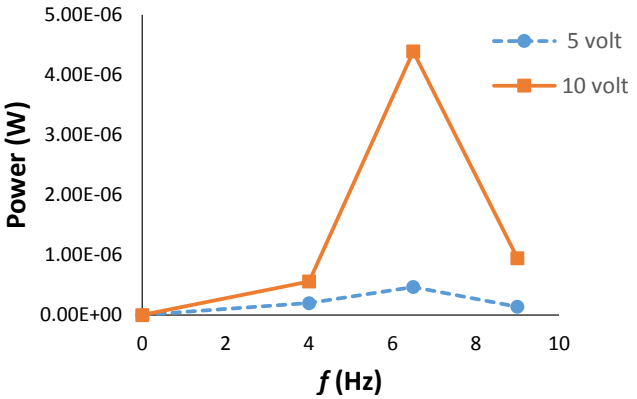



شکل ۶. چگالی توان لحظه ای خروجی نانوژنراتور الکتروتینگ معکوس، الف) ولتاژ بایاس ۵ ولت، ب) ولتاژ بایاس ۷ ولت

**Fig. 6. Nanogenerator instantaneous power density output a) bias voltage 5V b) bias voltage 7V**

تعداد پیک‌های خروجی نیز افزایش‌یافته است. با افزایش فرکانس اعمالی، بار الکتریکی بیشتری به مدار باز می‌گردد و خازن سریع‌تر تخلیه می‌شود. افزایش فرکانس اعمالی تا جایی می‌تواند باعث افزایش جریان و توان خروجی شود که قطره متلاشی و خازن به‌طور کامل تخلیه نشود. با افزایش فرکانس اعمالی، انرژی تولید در واحد زمان بیشتر شده و باعث افزایش توان خروجی در نانوژنراتور می‌شود.

تغییرات توان متوسط بر حسب فرکانس در دو ولتاژ بایاس مختلف ۵ و ۱۰ ولت با حجم ثابت ۲۷ میکرو لیتر و مقاومت۲۲ کیلو اهم در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ولتاژهای بیشتر مانند ۱۰ ولت و در فرکانس‌های بالاتر تا ۶/۵ هرتز، توان افزایش بیشتری دارد. این به‌علت بیشتر پلاریزه شدن قطره می‌باشد، بار الکتریکی سریع‌تر در خروجی تخلیه شده و در نتیجه جریان افزایش یافته است. اما مشاهده می‌شود که در فرکانس ۹ هرتز توان کاهش یافته است و با افزایش فرکانس تخلیه بار فرصت تبعیت



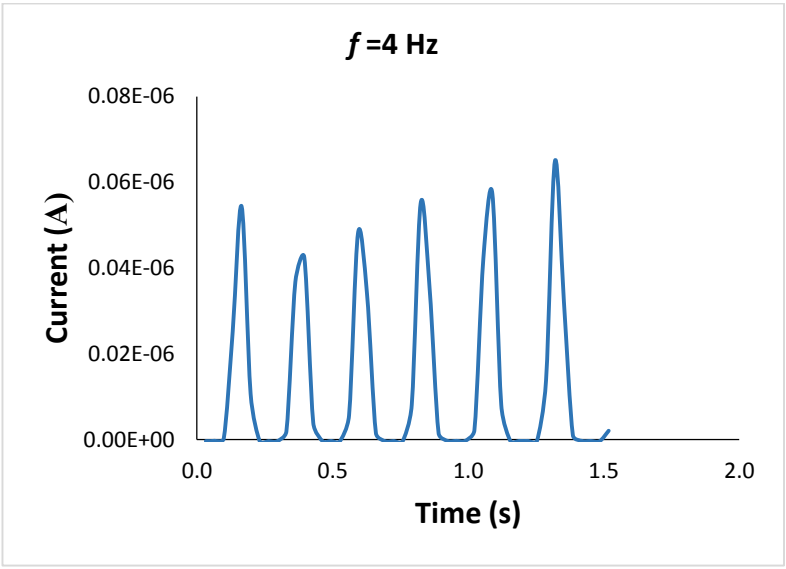

شکل۸. اثر فرکانس نیروی اعمالی بر روی توان خروجی در ولتاژ های بایاس مختلف (حجم قطره ۲۷ میکرولیتر و مقاومت خارجی ۲۲ کیلواهم)

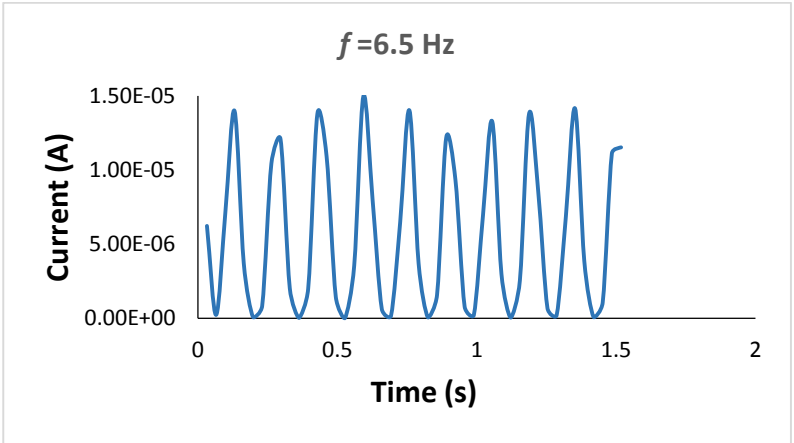
**Fig. 8. The effects of frequency of exerted force on the power output for different bias voltages (27µl droplet (volume, and 22kΩ external resistance**

جدول ۴. متوسط جریان و توان خروجی از نانوژنراتور به‌ازای دو ولتاژ بایاس مختلف، در مقاومت بار ۱ کیلواهم

**Table 4 Average current and power output for two different bias voltages, 1kΩ external load**

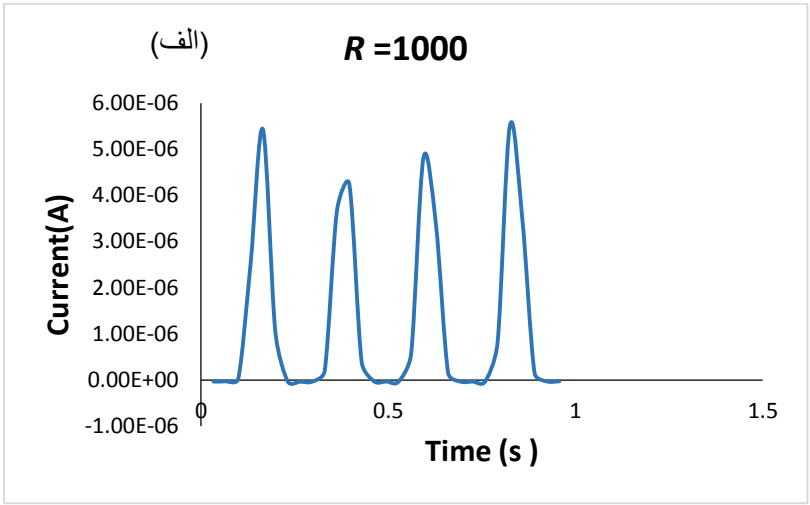
| ولتاژ(V) / نتایج | ۵ | ۷ |
|---|---|---|
| جریان(µA) | ۱۵/۵ | ۳۶/۵ |
| چگالی توان($W/m^2$) | ۰/۳۳ | ۰/۹۸۷ |

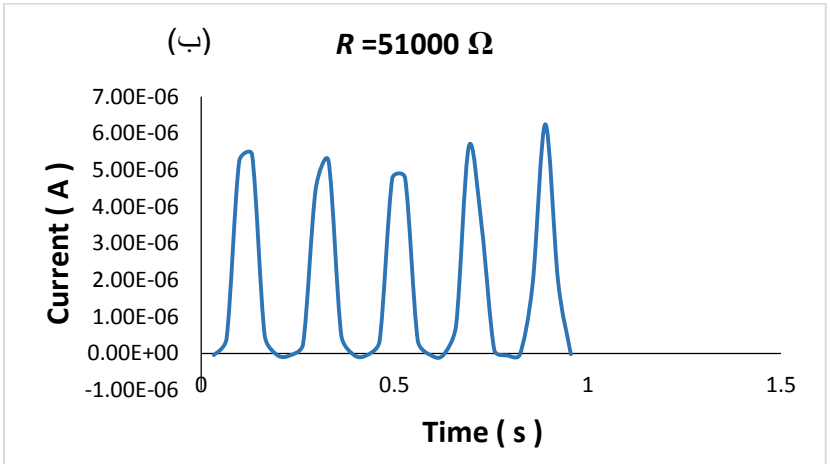



شکل۷. مقادیر لحظه‌ای جریان خروجی نانوژنراتور الکتروتینگ معکوس الف) فرکانس ۴ هرتز ب) فرکانس ۵/۶ هرتز

**Fig. 7. Nanogenerator instantaneous current output a) f =4Hz b) f =6.5Hz**



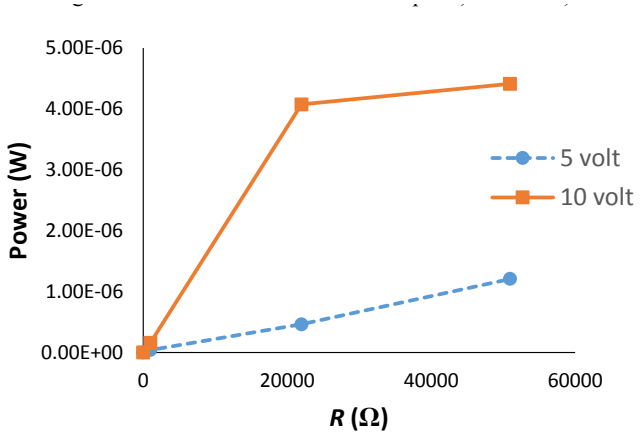

شکل۹. مقادیر لحظه‌ای جریان خروجی نانوژنراتور الکتروونتینگ معکوس(الف ) $R$-1kΩ ب) $R$-5.1kΩ

**Fig. 9. Nanogenerator instantaneous current output** $R$=1kΩ b) $R$=5.1kΩ

از پلاریزه شدن قطره را نداشته و جریان کاهش می‌یابد.

در نتیجه با کاهش جریان، توان خروجی نیز کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می شود بهترین فرکانس برای نمونه با حجم ۲۷ میکرو لیتر و مقاومت ۲۲ کیلو اهم ۶/۵ هرتز می‌باشد. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که با ثابت بودن دیگر پارامترها (قطره به حجم ۲۷ میکرولیتر و ولتاژ بایاس۵ ولت)، افزایش مقاومت خارجی از یک کیلو اهم به ۵۱ کیلو اهم، جریان خروجی کاهش است.

در شکل ۱۰ تغییرات توان متوسط بر حسب مقاومت در ۲ ولتاژ بایاس مختلف ۵ و ۱۰ ولت نشان داده‌شده است. تغییرات توان با افزایش ولتاژ پلاریزه کننده قطره در مقاومت های زیاد، بیشتر می‌شود. به این معنا که توان خروجی به شدت به مقاومت بار حساس می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود افزایش بیش از حد بار مقاومتی هم نمی‌تواند مناسب باشد. مشاهده می‌شود برای بار مقاومتی ۲۱




شکل ۱۰. نمودار تغییرات توان بر حسب مقاومت در ولتاژ های مختلف با حجم ۲۷ میکرو لیتر و فرکانس ۵/۶ هرتز

**Fig. 10. The effects of external resistance on the power output (27µl, 6.5Hz)**

کیلواهم تا ۵۰ کیلو اهم دو منحنی در ولتاژ بایاس ۵ و ۱۰ ولت در حال نزدیک شدن به یکدیگر هستند. اثر ولتاژ بایاس با افزایش مقاومت بار، کمتر می‌شود. این رفتار به‌علت رسیدن مقاومت بار به مقاومت درونی نانوژنراتور می‌باشد که به اصطلاح امپدانس سازگار رخ می‌دهد. در حالی‌که در بار مقاومتی با رنج کم حدود یک تا ۲۱ کیلواهم تغییرات منحنی ولتاژهای ۵ و ۱۰ بیشتر می‌باشد.

برای داشتن توان‌های بیشتر باید ظرفیت خازن را افزایش داد. برای این منظور می‌توان از موادی که ثابت دی‌الکتریک بالایی دارند استفاده نمود تا شکست جریان ایجاد نشود و همچنین می‌توان ضخامت فیلم دی‌الکتریک استفاده‌شده را کاهش داد. اما به‌هرحال نازک‌تر کردن دی‌الکتریک باعث محدودیت در اعمال ولتاژ و تونل زنی و یا حتی سوختن نانو ژنراتور خواهد شد.

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، نانو ژنراتور الکتروتینگ معکوس با استفاده یک ماده پلیمری، آب به‌عنوان یک مایع دوقطبی و الکترودهای مسی در بالا و پایین، ساخته‌شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. جریان خروجی نانو ژنراتور و توان تولیدی ناشی از اعمال یک نیروی مکانیکی ضربه‌ای به ازای مقادیر مختلفی از ولتاژ بایاس مستقیم، مقاومت بار خارجی و فرکانس اعمال نیرو ارایه گردید. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، نتایج مشخصه‌های خروجی نشان می‌دهد که در نانوژنراتور با افزایش حجم قطره آب، جریان و توان خروجی افزایش می‌یابد. نحوه اعمال نیروی مکانیکی باعث تغییر در شکل خازن و تغییر در سطح تماس قطره با لایه دی‌الکتریک می‌شود. متناسب با این افزایش و کاهش سطح تماس ظرفیت خازنی نیز تغییر می‌کند و در نتیجه باعث تولید جریان و توان در مدار خروجی می‌شود. با افزایش ولتاژ بایاس، قطره بیشتر دوقطبی شده و باعث ایجاد جریان بیشتر در خروجی می‌شود. با افزایش فرکانس اعمالی، بار الکتریکی بیشتری به مدار باز می‌گردد و خازن سریع‌تر تخلیه می‌شود. افزایش فرکانس اعمالی تا جایی می‌تواند باعث افزایش جریان و توان خروجی شود که قطره متلاشی و خازن به‌طور کامل تخلیه نشود. ملاحظه می‌گردد که با افزایش مقاومت بار خارجی، توان خروجی در نانوژنراتور افزایش می‌یابد. این مهم تا جایی ادامه می‌یابد که مقدار بار مقاومتی برابر با مقاومت درونی نانوژنراتور باشد و امپدانس سازگار اتفاق بیفتد. نتایج نشان می‌دهد نازک‌تر کردن دی‌الکتریک باعث محدودیت در اعمال ولتاژ بایاس و تونل زنی و یا حتی سوختن نانو ژنراتور خواهد شد. نانو ژنراتور ساخته‌شده با اعمال ولتاژ بایاس مستقیم ۷ ولت، توانایی تولید جریان ۴۰ میکرو آمپر و چگالی توان ۱/۰۸ وات بر مترمربع را دارد.

## مراجع


[1] S.P. Beeby, M.J. Tudor, N.M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, Measurement Science and Technology 17(12) (2006) R175.

[2] T. Krupenkin and J. A. Taylor, Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting, Nature Communications 2(1) (2011) 447–448.

[3] W. C. Han, D. S. Wang, L. P. Xiang, Y. D. Wang, Z. Q. Huang, and A. F. Li, A parametric study of microfluidic power generator based on reverse electrowetting in a microchannel geometry, Advance Materials Research 986–987 (2014) 1159–1162.

[4] F. Invernizzi, S. Dulio, M. Patrini, G. Guizzetti, and P. Mustarelli, Energy harvesting from human motion: materials and techniques, Chemical Society Reviews 45(20) (2016) 5455–5473.

[5] H. Yang, S. Hong, B. Koo, D. Lee, and Y.-B. Kim, "High-performance reverse electrowetting energy harvesting using atomic-layer-deposited dielectric film, Nano Energy 31 (2017) 450–455.

[6] T. H. Hsu, S. Manakasettharn, J. A. Taylor, and T. Krupenkin, Bubbler: A Novel Ultra-High Power Density Energy Harvesting Method Based on Reverse Electrowetting, Scientific Reports 5 (2015) 1–13.

[7] R. Rusev, G. Angelov, K. Angelov, and D. Nikolov, A model for reverse electrowetting with cost-effective materials, Proc. 26th International Scientific Conference Electronics (2017) 1–4.

[8] H. Yang, H. Lee, Y. Lim, M. Christy, and Y.-B. Kim, Laminated Structure of Al2O3 and TiO2 for Enhancing Performance of Reverse Electrowetting-On-Dielectric Energy Harvesting, International Journal of Precision Engineering and

Manufacturing-Green Technology (2019).

[9] T.-H. Hsu, J. A. Taylor, and T. N. Krupenkin, Energy harvesting from aperiodic low-frequency motion using reverse electrowetting, Faraday Discussions 199 (2017) 377–392.

[10] D. Nikolov, R. Rusev, G. Angelov, M. Spasova, Energy Harvesting System Model Based on Reverse Electrowetting, 2019 MIXDES - 26th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE, 2019, Rzeszów, Poland.

[11] H. Shi, Z. Liu, and X. Mei, Overview of Human Walking Induced Energy Harvesting Technologies and Its Possibility for Walking Robotics, Energy 13 (2020) 86.

[12] M. Sansebli, Y. Gorgich, A. Behzadmehr, and T. Fanaei Sheikholeslami, Fabrication and Characterization of an All-Polymer Nanogenerator using Effect of Reverse Electrowetting, Proc. 6th Annual Clean Energy Conference, 2018, Shiraz Iran (In Persian).

[13] Y. Y. Lin, R. D. Evans, E. Welch, B. N. Hsu, A. C. Madison, and R. B. Fair, Low voltage electrowetting-on-dielectric platform using multi-layer insulators, Sensors Actuators, B Chemical 150(1) (2010) 465–470.

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:**

*M. Sansebli, Y. Gorgij, A. Behzadmehr, T. Fanaei Sheikholeslami, Fabrication and Characterization of a Flexible Nanogenerator Using Reverse Electrowetting Concept, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(5) (2021) 3023- 3034.*

DOI: 10.22060/mej.2020.17624.6629

این صفحه عمداً خالی است