



Fabrication and Characterization of a Flexible Nanogenerator Using Reverse Electrowetting Concept

M. Sanebli¹, Y. Gorgij², A. Behzadmehr^{2,*}, T. Fanaei Sheikholeslami³

¹ Nanotechnology Research Institute, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

³ Mechanical Engineering-Mechatronics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT: Many researchers are interested in powering sensors and electrical circuits in wireless networks through energy harvesting from environmental waste energies. In this study, a flexible nanogenerator is designed and fabricated based on the reverse electrowetting concept. The performance of the nanogenerator has been investigated in different conditions including various bias voltage, different excitation frequency, and several external loads. The nanogenerator comprises of water droplets, as a strong dipole fluid, and two dielectric layers; polymethylsiloxane polymer. The latter has good hydrophobicity and flexibility. These two dielectric layers are formed on the surface of copper electrodes by using a spin coater. It is shown that increasing the excitation frequency augments the generated power to some extent that the capacitor is not fully discharged. The nanogenerator power output increases with the external load up to equality between the external load and the nanogenerator's internal resistance. The results show that the fabricated nanogenerator can generate a power density equal to 1.08 W/m² using 1 μ l water droplet, 7V bias voltage, and an excitation frequency of 1 Hz.

Review History:

Received: Dec. 29, 2019

Revised: Mar. 30, 2020

Accepted: May, 03, 2020

Available Online: May, 18, 2020

Keywords:

Nanogenerator

Reverse electrowetting

Flexible

PDMS

1. Introduction

Direct conversion of wasted mechanical energy into electrical energy has been interesting either from the environmental viewpoint or in terms of various applications such as self-powering sensors and electrical circuits in wireless networks. Among the devices for such a direct conversion, a power generator based on the reverse electrowetting concept has been recently presented and studied by researchers [1-2].

Hsu et al. [3] presented a new method for mechanical energy harvesting using a combination of reverse electrowetting methods with the fast self-oscillating process of bubble growth and collapse. They obtained 10W as power output with power cell arrays. Yang et al. [4] show that using the atomic layer deposition method for preparing Al₂O₃ thin film of a reverse electrowetting-on-dielectric energy harvester (REMOD), significantly augments the performance of the device. Yang et al. [5] showed that minimizing the current leakage can maximize power output. They used TiO₂ (a high-k dielectric material) with Al₂O₃ (as a leakage barrier layer) as a lamination. They demonstrated that using the laminated structure decreases the current leakage and augments the capacitance compare to the monolayer of TiO₂ or Al₂O₃. They demonstrated that an enhanced power density of 15.36 mW cm² at a low bias voltage using laminated REWOD energy harvesting device.

In this work, a flexible nanogenerator is designed and fabricated based on the reverse electrowetting concept. The nanogenerator includes water droplets, as a strong dipole

fluid, and two flexible dielectric layers; Polymethylsiloxane (PDMS) polymer.

2. Fabrication of REWOD

To fabricate the REWOD nanogenerator, polymethylsiloxane polymer is used as a dielectric layer and a water droplet is selected as a conductive liquid. PDMS is flexible and also is a hydrophobic polymer. These two characteristics of the PDMS polymer are very important in the nanogenerator performance. The physical properties of the materials are shown in Table 1.

A thin layer of PDMS is coated on a copper substrate using a spin coater as a top layer. It is heated for two hours in the oven at 80 oC. Then four spherical cavities were formed on a polymeric frame as the bottom part (see Fig. 1). A water droplet was added to each cavity and then was covered with the top layer. Then the device was put in the oven at 80 oC for four hours. The schematic of the experimental setup is shown in Fig. 2. It includes a digital multimeter (GDM-8261A, GW INSTRON), a power supply (MP-3003D, GW INSTRON), and external resistance. The external forces are created using a homemade mechanism for generating

3. Results and Discussion

The effects of different bias voltages (5,7, and 9V), external loads (1 and 51 k Ω), and frequency of exerted forces (4, 6.5 and 9 Hz) on the nanogenerator performance

*Corresponding author's email: amin.behzadmehr@eng.usb.ac.ir



Table 1. Physical properties

Properties	Material	
	Water	PDMS
Dielectric constant	80	2.2–2.8
Density (kg/m ³)	998	0.97
Tensile strength (MPa)	-	2.23
Electrical conductivity (μS/cm)	0.055	-



Fig. 1. Image of the bottom part with water droplet in the cavities

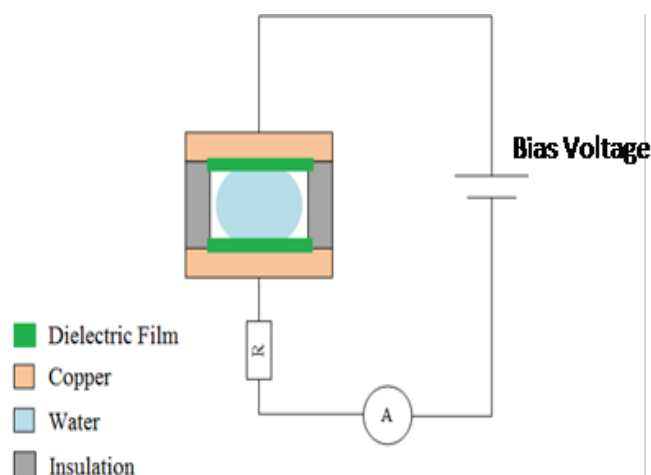


Fig. 2. Schematic of the experimental setup

are presented and discussed. For instance, the effect of the frequency of exerted forces and external loads on the output power are presented in Figs. 3 and 4.

As seen in Fig. 3 for a given configuration (27 μl droplet volume, and 22 kΩ external load) there is an optimum frequency for which the power output is maximized. Polarized droplet deforms with the external mechanical forces and thus the interfacial area with the layer is changed. The latter changes the device’s capacitance. Increasing the exerted frequency increases the power output up to 6.5Hz. Further increase in frequency the capacitance discharge current does not match with the droplet polarization time and consequently, the power output decreases. Fig. 4 shows the variation of the power output with the external load. For a given bias voltage, increasing the external load augments the power output. However, this augmentation on the power

output with external load is limited with the internal resistance of the nanogenerator; equality between the internal resistance and external load.

4. Conclusions

A flexible nanogenerator based on the reverse electrowetting phenomena is designed and fabricated. It is shown that for a given configuration there is an optimum frequency for which the power output is maximized. Increasing the frequency of exerted forces augments the power output until the capacitor is not fully discharged. The nanogenerator power output augments with the external load. It is limited by the internal resistance of the nanogenerator. A power density equal to 1.08 W/m² using one μl water droplet, 7V bias voltage, and an excitation frequency of one Hz is generated with the REWOD nanogenerator.

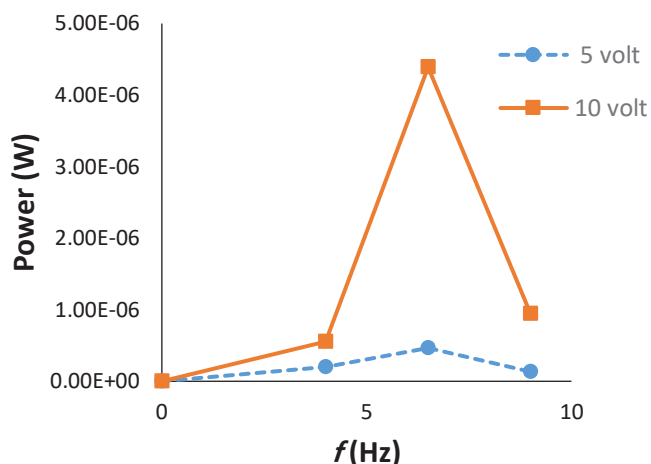


Fig. 3. The effects of frequency of exerted force on the power output for different bias voltages (27 μ l droplet volume, and 22k Ω external resistance)

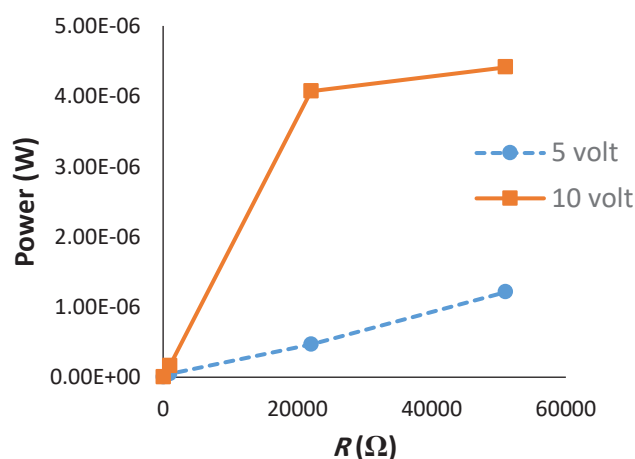


Fig. 4. The effects of external resistance on the power output (27 μ l, 6.5Hz)

References

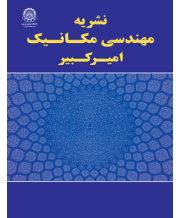
- [1] T. Krupenkin and J. A. Taylor, Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting, *Nature Communications* 2(1) (2011) 447–448.
- [2] T. H. Hsu, S. Manakasettharn, J. A. Taylor, and T. Krupenkin, Bubbler: A Novel Ultra-High Power Density Energy Harvesting Method Based on Reverse Electrowetting, *Scientific Reports* 5 (2015) 1–13.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 713-716.

DOI: [10.22060/mej.2020.17624.6629](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17624.6629)





ساخت و مشخصه‌یابی نانوژنراتور انعطاف‌پذیر با استفاده از پدیده الکترووتینگ معکوس

مهدی سن سبلی^۱، یگانه گرگیچ^۲، امین بهزادمهر^{۳*}، 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 - مکترونیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

کلمات کلیدی:

نانوژنراتور

الکترووتینگ معکوس

انعطاف‌پذیر

پلی دی متیل سیلوکسان

خلاصه: برداشت انرژی‌های تلف‌شونده محیطی، به‌منظور تغذیه سنسورها و مدارها در شبکه‌های بی‌سیم مورد توجه بسیاری از محققان قرار دارد. کار حاضر به طراحی و ساخت نوعی برداشت‌کننده انرژی برای تولید انرژی الکتریکی به روش الکترووتینگ 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 الکتروود 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 می‌دهد که نانوژنراتور ساخته شده قادر به تولید چگالی توان ۱/۰۸ وات بر متر مربع از نوسانات مکانیکی با فرکانس یک هرتز با استفاده از قطره آب به حجم یک میکرولیتری محصور شده در میان صفحات خازنی و باردار شده با ولتاژ ۷ ولت می‌باشد.

۱- مقدمه

یک الکتروود و یک لایه دی‌الکتریک می‌باشد. مایع رسانا بین دو زیر لایه پوشش داده‌شده با لایه الکتروود قرار دارد، الکتروودها به یک منبع ولتاژ خارجی متصل شده و پلاریزاسیون بین هر قطره و الکتروود 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 الکترووتینگ 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 الکترووتینگ معکوس را معرفی کردند. آنها معتقد بودند که این روش دارای مزایای مهمی، از جمله چگالی توان بسیار بالا، توانایی برای استفاده از طیف گسترده‌ای از نیروهای مکانیکی و حرکات مکانیکی که به‌وسیله سیستم‌های پیزوالکتریک یا روش‌های الکترومغناطیسی قابل دسترس

با توجه به گسترش فناوری‌های جدید در حوزه‌هایی نظیر افزاره‌های الکترونیکی همراه، مخابرات و اخیراً 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 قرار گرفته 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 الکترووتینگ معکوس^۱ است [۲-۴]. سیستم الکترووتینگ معکوس شامل یک مایع دو قطبی، یک زیر لایه پوشش داده‌شده با

1 Reverse Electrowetting

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

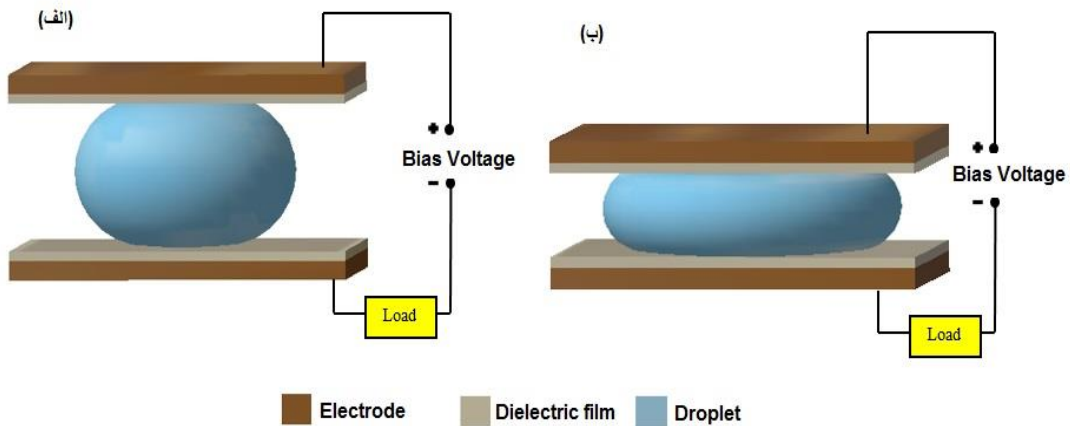


نیستند، توانایی تولید مستقیم در دامنه وسیعی از جریان و ولتاژ، می‌باشد. هان و همکاران [۳] مطالعه پارامتری روی یک مولد توان بر اساس پدیده الکترووتینگ معکوس در یک میکروکانال انجام دادند. آن‌ها بر این باور بودند که درک پارامترهای مؤثر بر خروجی این نانوژنراتور، کلید افزایش توان خروجی آن است. آن‌ها در تلاش بودند تا این نانوژنراتورها بر معیایی مانند خروجی پایین و ضریب تبدیل کم مبدل‌های انرژی سنتی غلبه کنند. نتایج آنها نشان داد که عملکرد امیدبخش مولد توان میکروفلوئیدیک، بر اساس پدیده الکترووتینگ 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^۱ شکل گرفته بودند پرداختند. از اکسید آلومینیوم که ماده‌ای در دسترس است برای لایه‌های دی‌الکتریک استفاده شد. حداکثر چگالی توان $5/59 \text{ mW/cm}^2$ با استفاده از نمونه لایه‌نشانی‌شده با ضخامت ۴۵ نانومتر در یک ولتاژ بایاس مستقیم معادل $13/5$ ولت حاصل شد. علاوه بر این، برای نمونه لایه‌نشانی‌شده با ضخامت ۱۴۰ نانومتر که می‌تواند در برابر ولتاژ بایاس بالاتر مقاومت کند، چگالی توان و چگالی انرژی به ترتیب حدود 11 mW/cm^2 و $22/24 \mu\text{J/cm}^2$ 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 الکترووتینگ معکوس مناسب هستند. شیو و همکاران [۶] در یک مطالعه تحلیلی روش جدیدی برای برداشت انرژی مکانیکی مطرح کردند که در آن پدیده الکترووتینگ معکوس با یک فرایند خود نوسانی سریع رشد و فروپاشی حبابی ترکیب شده است. ترکیب دینامیک نوسان سریع حباب با فرآیند الکترووتینگ 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 الکترووتینگ معکوس با استفاده از مواد

مقرون‌به‌صرفه پرداختند. آن‌ها یک مدل ریاضی از سیستم الکترووتینگ معکوس با مواد مؤثر و ارزان ارائه دادند. ملاحظه گردید که در یک ولتاژ بایاس ثابت، انرژی تولیدشده زیرکونیوم تیتانات از باریوم تیتانات بیشتر می‌باشد. چون چگالی انرژی الکتریکی به شدت وابسته به ظرفیت خازن بین دو الکتروود 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 این حال، مدل ارائه‌شده به‌طور آشکار شامل رفتار فرکانسی نمی‌شود. یانگ و همکاران [۸] از یک ساختار مرکب متشکل از اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم 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 $15/36 \text{ mW/cm}^2$ دست یافت. به‌طور کلی سه طرح اصلی برای سیستم الکترووتینگ معکوس گزارش شده 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 دمای 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 الکترووتینگ 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 گیوه 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 الکتروود با لایه دی‌الکتریک جهت عملکرد بهتر پوشش داده شده است. در این مقاله به جزییات طراحی و ساخت یک نانوژنراتور، متشکل از قطره



شکل ۱. طرح‌واره قطره مابین صفحات نوسان دار نانوذراتور. (الف) قبل از اعمال نیرو. (ب) بعد از اعمال نیرو
Fig. 1. Schematic of droplet position a) before exerting force b) after exerting force

آن زاویه تماس بیشتری داشته باشد [۱۳].
 مشخصات مواد مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. برای ساخت نانوذراتور، 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 حجم‌های مشخص در طی هر مرحله در هر محفظه قرار داده می‌شود (شکل ۲). پس از آن با لایه نازک دی‌الکتریک نشاندن شده بر روی الکتروود مسی، محفظه پوشانده شده و مجدداً در کوره با حرارت ۸۰ درجه سانتی‌گراد بمدت ۴ ساعت قرار می‌گیرد. به این ترتیب نانوذراتور



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

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

آب بین دو لایه دی‌الکتریک پلیمری (پلی دی متیل سیلوکسان^۱)، که در اثر 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 نانوذراتور مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- طراحی و ساخت نانوذراتور الکترووتینگ معکوس

فرآیند طراحی و ساخت نانوذراتور الکترووتینگ معکوس با انتخاب سه پارامتر اصلی و بررسی چگونگی پلاریزه شدن مایع دی‌الکتریک محصور بین دو الکتروود، 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 الکتروودها پلاریزه شود. ماده دوقطبی محصور پس از اعمال نیرو و تغییر سطح تماس و همچنین زاویه تماس آن با الکتروود، بیشتر پلاریزه شده و در نتیجه بارهای بیشتری در الکتروودهای خارجی القا می‌شود. ساختار خازنی نانوذراتور، 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 ($\epsilon/17 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$) در تماس با

جدول ۱. مشخصات مواد مورد استفاده در ساخت نانوژنراتور

Table 1. Physical properties

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

و تحلیل نتایج امری اجتناب ناپذیر است. جدول‌های ۲ و ۳ دقت تجهیزات اندازه‌گیری و عدم قطعیت نتایج را نشان می‌دهند.

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

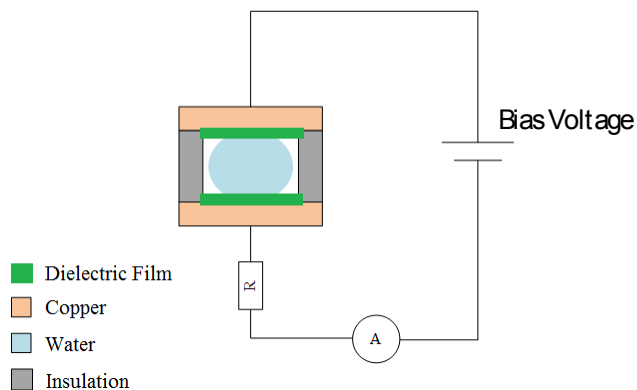


شکل ۴. مولد حرکت خطی
Fig. 4. Linear force generator

الکترووتینگ معکوس، با چهار محفظه ساخته می‌شود. طرح کلی نانوژنراتور ساخته شده در شکل ۳ نمایش داده شده 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 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 وسایل اندازه‌گیری استفاده شده و میزان عدم قطعیت نتایج حاصله در تجزیه



شکل ۳. طرح‌واره مدار اندازه‌گیری نانوژنراتور
Fig. 3. Schematic of the experimental setup

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	± 0.003 mV
۲	دیجیتال متر مولتی	GDM-8261A	GW INSTEK	± 1 pA
۳	خطی موتور	*	ایران	± 0.1 Hz
۴	میکرو پیپت	-	-	± 0.5 μ L

*: طراحی و ساخت در دانشگاه سیستان و بلوچستان

جدول ۳. عدم قطعیت بسط یافته اندازه‌گیری توان خروجی

Table 3. Uncertainty of power output measurement

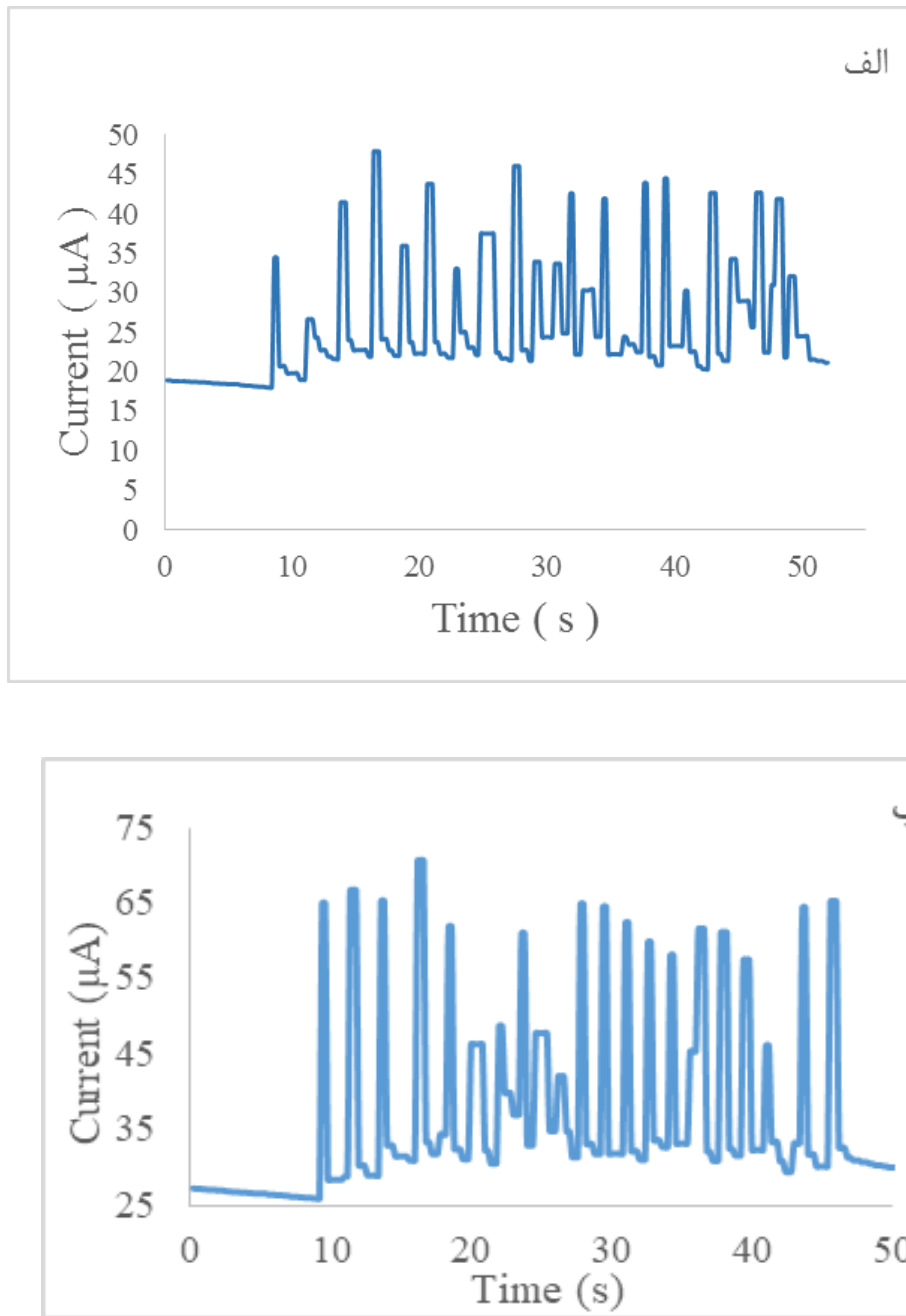
عدم قطعیت	توان خروجی (W)	مشخصات نمونه در فرکانس ۶/۵ هرتز
$\pm 6/45 \times 10^{-8}$	$2/23 \times 10^{-6}$	$R=22000, v=27 \mu\text{l}, V=7/5 \text{ V}$
$\pm 5/04 \times 10^{-8}$	$8/72 \times 10^{-7}$	$R=51000, v=5 \mu\text{l}, V=7/5 \text{ V}$
$\pm 1/01 \times 10^{-9}$	$3/51 \times 10^{-8}$	$R=1000, v=50 \mu\text{l}, V=7/5 \text{ V}$
$\pm 2/71 \times 10^{-8}$	$9/39 \times 10^{-7}$	$R=22000, v=50 \mu\text{l}, V=5 \text{ V}$
$\pm 1/76 \times 10^{-8}$	$3/04 \times 10^{-7}$	$R=51000, v=27 \mu\text{l}, V=5 \text{ V}$
$\pm 5/48 \times 10^{-10}$	$1/89 \times 10^{-8}$	$R=1000, v=5 \mu\text{l}, V=7/5 \text{ V}$

دیی الکتریک محصور بین الکترودها پلاریزه می‌شود. سپس در اثر اعمال نیروی مکانیکی فاصله بین دو الکتروده کم شده و سطح تماس بین آب و الکتروده 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 ولتاژهای 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

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 ۷، ۵ و ۱۰ ولت و مقاومت بار خارجی 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



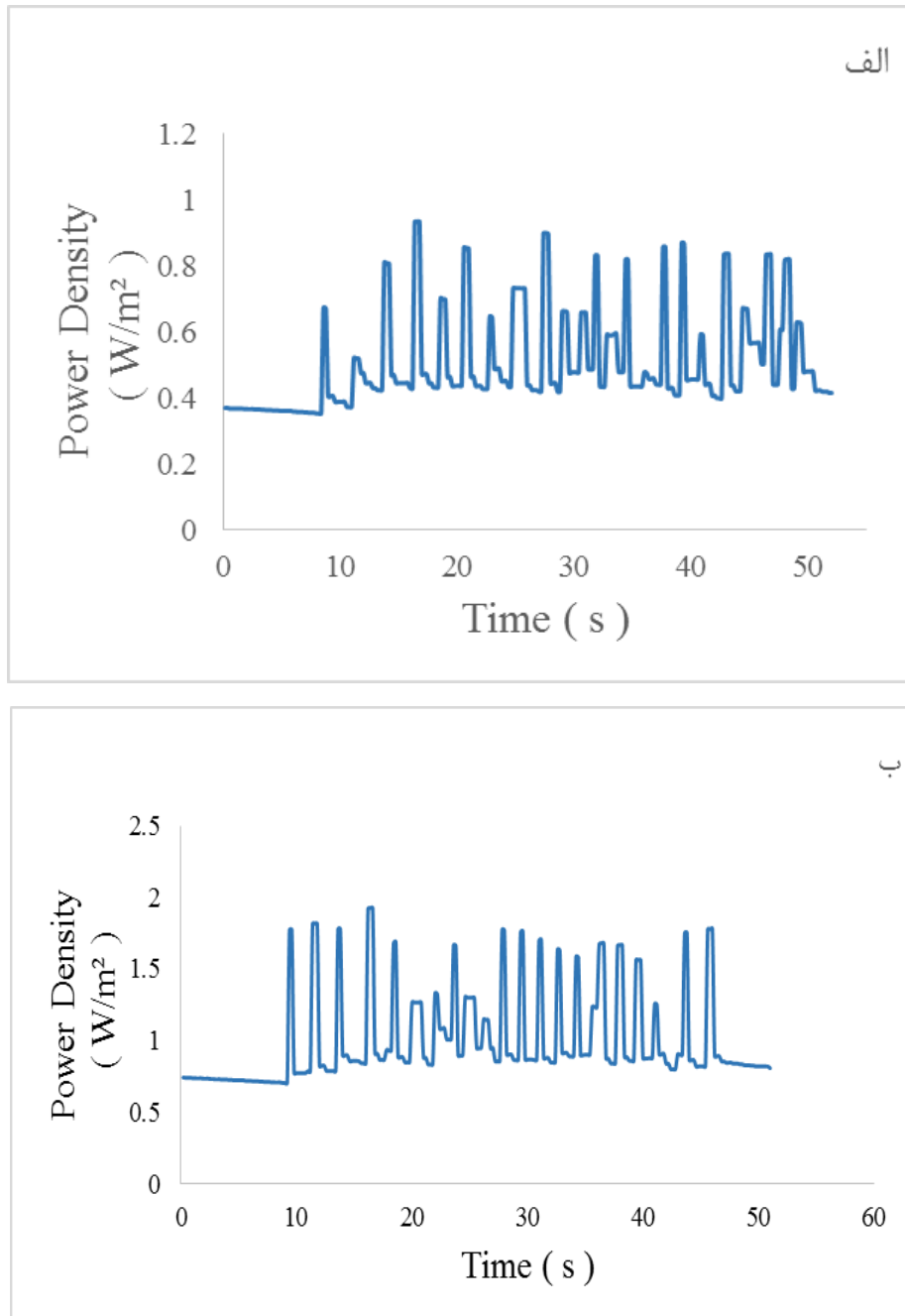
شکل ۵. مقادیر لحظه‌ای جریان خروجی نانوزنراتور الکتروآینگ معکوس، الف) ولتاژ بایاس ۵ ولت، ب) ولتاژ بایاس ۷ ولت

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

بهرتر، 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 نانوزنراتور حدود ۳ برابر افزایش می یابد و چگالی توان در ۷ ولت 0.987 می باشد. در شکل ۷ ملاحظه می گردد که با ثابت بودن دیگر پارامترها (ولتاژ بایاس ۱۰ ولت با حجم ثابت ۲۷ میکرو لیتر و مقاومت ۲۲ کیلو اهم) و افزایش فرکانس از ۴ به $6/5$ هرتز، جریان افزایش می یابد و

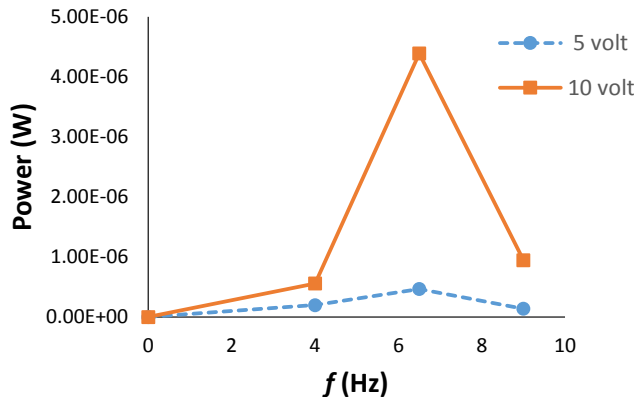
به ذکر است که چون نرخ نمونه برداری دستگاه به اندازه کافی زیاد نبوده، بعضی از داده ها در عدم هماهنگی زمان نمونه برداری دستگاه و زمان زیاد شدن خروجی در اثر اعمال نیرو، ثبت نشده و در شکل دیده نمی شوند. متوسط چگالی توان داده شده به بار خروجی نیز به ترتیب $0/51$ و $1/08$ وات بر مترمربع، برای ولتاژهای اعمالی ۵ و ۷ ولت، می باشد. منحنی توان لحظه ای نانوزنراتور، برای هر دو ولتاژ اعمالی، در شکل ۶ رسم شده است. جهت بررسی نتایج و مقایسه



شکل ۶. چگالی توان لحظه ای خروجی نانوجنراتور الکتروژنیک 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

۵ و ۱۰ ولت با حجم ثابت ۲۷ میکرو لیتر و مقاومت ۲۲ کیلو اهم در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در ولتاژهای بیشتر مانند ۱۰ ولت و در فرکانس های بالاتر تا ۶/۵ هرتز، توان افزایش بیشتری دارد. این به علت بیشتر پلاریزه شدن قطره می باشد، بار الکتریکی سریع تر در خروجی تخلیه شده و در نتیجه جریان افزایش یافته است. اما مشاهده می شود که در فرکانس ۹ هرتز توان کاهش یافته است و با افزایش فرکانس تخلیه بار فرصت تبعیت

تعداد پیک های خروجی نیز افزایش یافته است. با افزایش فرکانس اعمالی، بار الکتریکی بیشتری به مدار باز می گردد و خازن سریع تر تخلیه می شود. افزایش فرکانس اعمالی تا جایی می تواند باعث افزایش جریان و توان خروجی شود که قطره متلاشی و خازن به طور کامل تخلیه نشود. با افزایش فرکانس اعمالی، انرژی تولید در واحد زمان بیشتر شده و باعث افزایش توان خروجی در نانوجنراتور می شود. تغییرات توان متوسط بر حسب فرکانس در دو ولتاژ بایاس مختلف



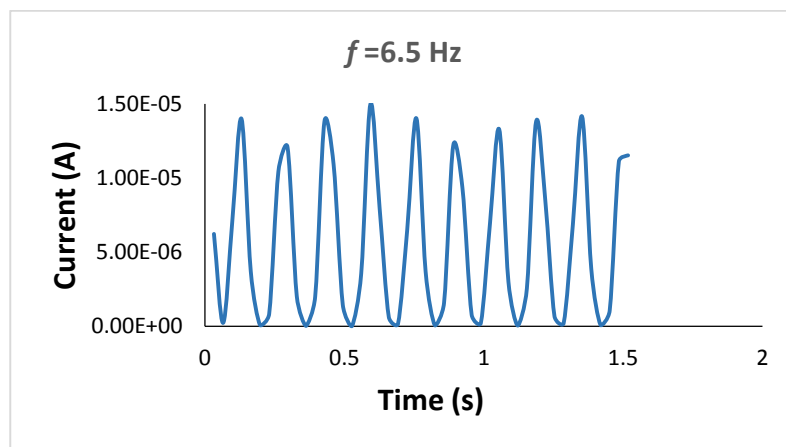
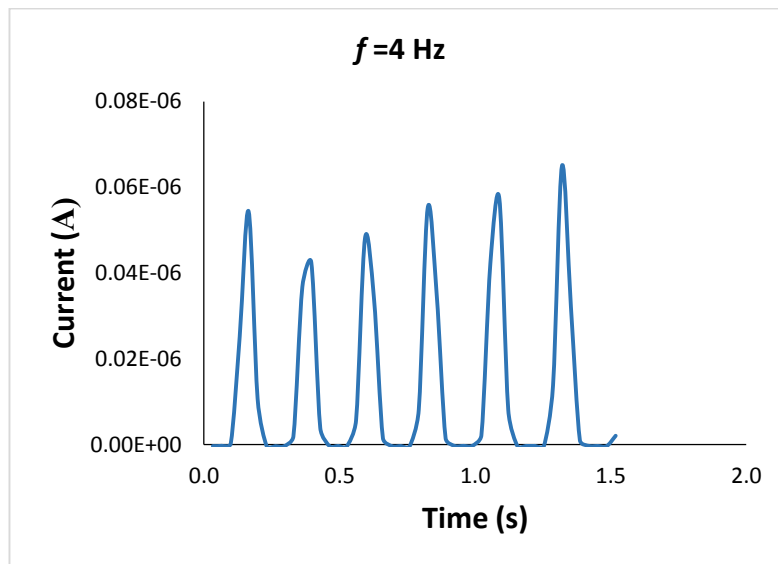
شکل ۸. اثر فرکانس نیروی اعمالی بر روی توان خروجی در ولتاژهای بایاس مختلف (حجم قطره ۲۷ میکرولیتر و مقاومت خارجی ۲۲ کیلو اهم)

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

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

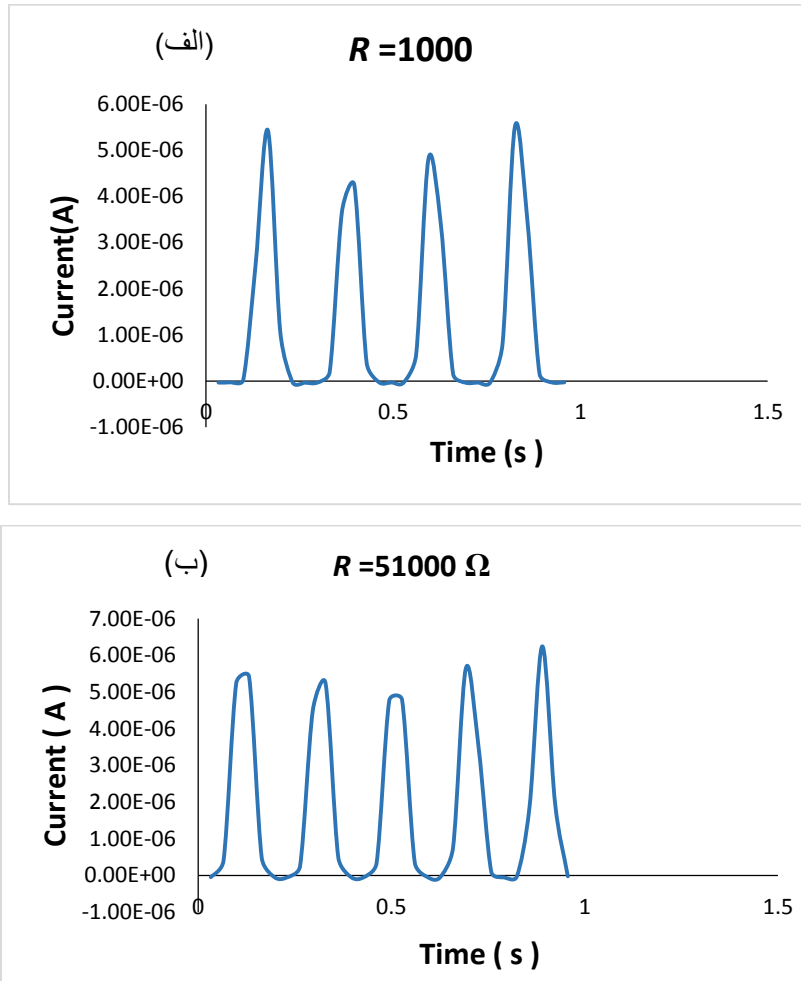
ولتاژ (V)	۷	۵	نتایج
جریان (μA)	۳۶/۵	۱۵/۵	
چگالی توان (W/m ²)	۰/۹۸۷	۰/۳۳	

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



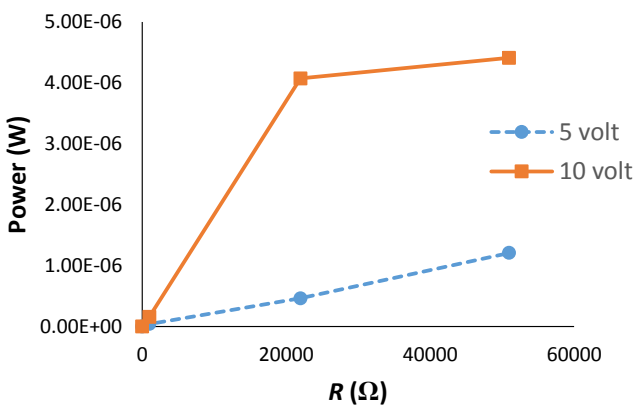
شکل ۷. مقادیر لحظه‌ای جریان خروجی نانوژنراتور الکتروپینینگ معکوس الف) فرکانس ۴ هرتز ب) فرکانس ۵/۶ هرتز

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



شکل ۹. مقادیر لحظه‌ای جریان خروجی نانوجنراتور الکتروآیند معکوس الف) $R=1k\Omega$ ب) $R=5.1k\Omega$

Fig. 9. Nanogenerator instantaneous current output $R=1k\Omega$ b) $R=5.1k\Omega$



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

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

از پلاریزه شدن قطره را نداشته و جریان کاهش می‌یابد.

در نتیجه با کاهش جریان، توان خروجی نیز کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود 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 میکرو لیتر و ولتاژ بایاس ۵ 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 داده شده 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

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*

کیلو اهم 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 به علت رسیدن مقاومت بار به مقاومت درونی نانوژنراتور می‌باشد که به اصطلاح امپدانس سازگار رخ می‌دهد. در حالی که در بار مقاومتی با رنج کم حدود یک تا ۲۱ کیلو اهم 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 به هر حال 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 الکترووِتینگ 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

- (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.
- 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

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](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17624.6629)



