

Performance Investigation of Piezo/Triboelectric Hybrid Nanogenerator based on Zinc Oxide Composite: Copper and Aluminum Effect

Pouya Paydari ¹, Negin Manavizadeh ^{2*}, Alireza Hadi ³, Javad Karamdel ³

¹ PhD Student, Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Azad University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding Author's Email: manavizadeh@kntu.ac.ir

Paper History:

Received: 2023-04-26

Revised in revised form: 2023-06-03

Scientific Accepted: 2023-10-15

Keywords:

Hybrid Nanogenerator
Piezoelectric
Triboelectric
ZnO Nanostructure
PDMS Composite

Abstract: Energy harvester devices have garnered enormous attention in various technologies, such as wearing and portable devices. The current study aims to design and fabricate tribo/piezoelectric hybrid nanogenerators with electrodes made of Aluminum and Copper and Zinc Oxide nanostructures composite embedded in the PDMS. According to the morphology studies, Zinc Oxide nanosheets grew uniformly in the (103) crystal direction on the Aluminum substrate. In contrast, the nanorods that grew on the Copper substrate were disorderly with a large angle to the surface. The results indicate that the 1000 rpm deposition PDMS layer sample with Aluminum electrodes and Zinc Oxide nanosheets generated the highest voltage and current equal to 120 V and 24 μ A, respectively. Both Copper and Aluminum electrodes coupled with ZnO nanosheets nanogenerator had the lowest voltage, current, and power generation. The hybrid nanogenerator with two aluminum electrodes and Zinc Oxide nanosheets generated the highest power equal to 0.97 Wm⁻². According to the obtained results from the characterization of hybrid piezo/triboelectric nanogenerators, Aluminum electrodes with Zinc Oxide nanosheets embedded in PDMS exhibited better performance, hence a suitable option for harvesting mechanical energy for self-charging devices.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2023.392805.1273>

URL: https://www.jamt.ir/article_186606.html

1. INTRODUCTION

Economic and technological developments are the outcomes of global industrial revolution. The globalization procedure raises the problem of electrical energy consumption which is the main source of different industries. Owing to the reduction in fossil fuels resources, as the main energy resources, harvesting energy from renewable resources is a valuable approach to meet the global energy demands (Olabi & Abdelkareem, 2022; Sen & Ganguly, 2017). Exploiting energy harvesting devices not only offers a solution to energy crisis but also plays a considerable role in human survival. Mechanical Energy is the most abundant and accessible energy in human environment and daily activities that can be harvested by nanogenerators. Amongst all types of nanogenerators, Triboelectric and piezoelectric nanogenerators exhibit significant potential due to their unique advantageous characteristics. Triboelectric nanogenerators function based on electrostatic induction principles (Deng et al.,

2022; Luo et al., 2021; Pyo et al., 2021). They can effectively aggregate ambient mechanical energy and convert it into electricity endlessly. Some of their advantages such as broad material availability, small volume, low cost, low-frequency response, and relatively high electrical output make them appropriate for powering self-powered sensors (Kim et al., 2021; Tan et al., 2020). On the other hand, piezoelectric nanogenerators are introduced as one of the important techniques for environmental mechanical vibration, stress, and strain. Thanks to the electromechanically coupling effect in inherent piezoelectric material, nanogenerator based on piezoelectric materials can convert vibration into electricity. Piezoelectricity exists in different material categories such as in ceramics, single crystals, and polymers. Piezoelectric ceramics including ZnO, BaTiO₃ (BTO), and PZT have attracted interest in piezoelectric-based generators (Azimi et al., 2021; Pusty & Shirage, 2022; Zaszczynska, Gradys, & Sajkiewicz, 2020).

Please cite this article as: Paydari, P., Manavizadeh, N., Hadi, A.R., Karamdel, J., "Performance Investigation of Piezo/Triboelectric Hybrid Nanogenerator based on Zinc Oxide Composite: Copper and Aluminum Effect", *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 12, No. 3, (2023), 15-30. <https://doi.org/10.30501/jamt.2023.392805.1273>

2783-0829/© 2023 The Author(s). Published by MERC.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Zinc Oxide (ZnO) is a non-ferroelectric material with a wurtzite crystal structure and polarization along the c-axis [35, 36]. Although Zinc Oxide has a lower piezo-electric constant than those of PZT and BTO, its low dielectric (ϵ_r) and moderate piezoelectric strain constant (e) result in a higher piezoelectric voltage constant. Additionally, ZnO can be synthesized through various methods to form different nanostructures, making it a feasible material for piezoelectric nanogenerators. It is noteworthy that in addition to its high piezoelectricity, ZnO stands out for wearable and implantable energy harvesting devices due to its low cost, abundance, tunability, ease of fabrication, and nontoxicity (Afshari, Golshan Bafghi, & Manavizadeh, 2022; Bafghi & Manavizadeh, 2020; Y.-G. Kim et al., 2022; Vallem et al., 2021). Unlike other piezo-ceramics that contain toxic elements like lead, different forms of Zinc oxide including nanoarrays and nanoparticles are particularly noted for their excellent biocompatible material. Materials biocompatibility is a key factor in wearable electronics. Polydimethylsiloxane (PDMS) is considered an ideal biocompatible material for flexible wearable electrical sensors and energy harvesters. Its inherent elasticity allows PDMS to be twisted, rolled, folded, compressed, and stretched (Kim, Dudem, & Yu, 2018; Paydari et al., 2023). Tribo-piezoelectric hybrid nanogenerators (HNG) can overcome the challenge of high electrical output performance of nanogenerators. Hybrid nanogenerators offer a promising approach for high-power flexible wearable devices (Dong, Peng, & Wang, 2020; Shakhthivel et al., 2021).

2. Experimental Methods

ZnO/PDMS composite was fabricated on different substrates. Pieces of 2x2 cm² Aluminum and copper tape were utilized as the substrates. Followed by the deposition of Zinc oxide seed layer on the substrates through the spin coating method and subsequent annealing process, ZnO nanostructures were synthesized through the hydrothermal method. The growth process was carried out at 90 °C for 2.5 h. In the next step, the PDMS matrix, with a proportion of 1:10 for silicon elastomer curing and base, was deposited onto the as-grown nanostructures using the spin coating method to achieve a uniform layer. While fabricating hybrid tribo/piezo nanogenerator, Aluminum and copper tape were utilized due to their ease of access, fabrication, and cost-effectiveness. Finally, a PET band was used to place two parts of the nanogenerator in front

of each other (Figure 1). To investigate the performance of hybrid nanogenerators, four nanogenerators with different electrodes were fabricated. Additionally, the effect of PDMS thickness on the performance of triboelectric nanogenerators was studied. The samples were tested under the force and frequency of 5N and 4 Hz, respectively.

S1: Both electrodes were made of Aluminum. ZnO nanosheets were synthesized on one of the electrodes, and the PDMS layer was deposited with 1000 and 2000 rpm, each for 10s using a spin coater.

S2: Both electrodes were made of Aluminum. ZnO nanosheets were synthesized on one of the electrodes, and the PDMS layer was spin-coated with 1000 rpm and 10s.

S3: Electrodes were made of Aluminum and Copper. ZnO nanosheets were synthesized on the Aluminum electrode and PDMS layer was spin-coated with 1000 rpm and 10s.

S4: Both electrodes were made of Copper. ZnO nanorods were synthesized on one of the electrodes, and the PDMS layer was spin-coated with 1000 rpm and 10s.

3. Results

The structural and morphological properties of ZnO nanostructure synthesized on Aluminum and Copper were studied using XRD and FESEM analyses. The results show that the nanostructures grown on Aluminum were in nanosheet forms, and most of them were oriented along the (103) crystal direction. On the contrary, ZnO nanorods growing on Copper tape were oriented along the (102), (101), and (002) crystal direction. According to the results of voltage and current analyses, Sample S2 with a thicker PDMS layer generated a voltage and current of 120 V and 24 μ A, respectively. Sample S1, with thinner PDMS and Aluminum electrodes, produced the voltage and current of 65v and 22 μ A, respectively. Sample S3, with Aluminum and Copper electrodes, had the lowest generated voltage and current of about 58V and 8 μ A, respectively. Sample S4, with two copper electrodes, generated the voltage and current of 81V and 15 μ A, respectively. Moreover, the maximum generated power of the Samples S2, S3, and S4 under different resistance loads was approximately 0.97, 0.28, and 0.8 Wm⁻², respectively. Of note, Sample S2 charges a 0.5 μ F capacitance to 5.5V in 30s.

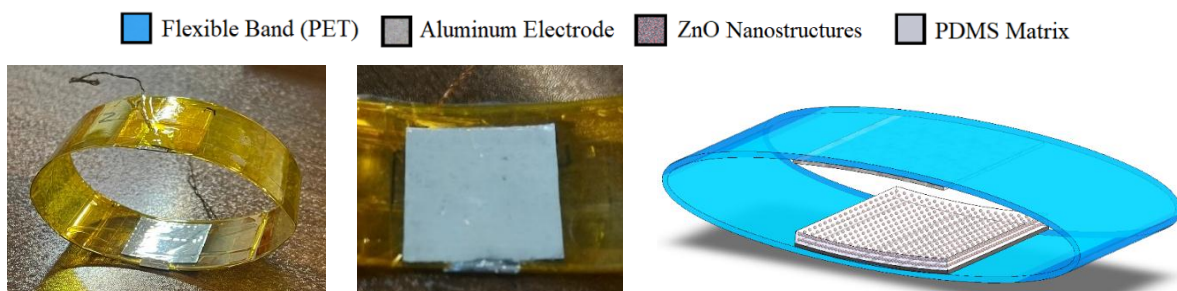


Figure 1. Schematic image and sample image of hybrid tribo/piezoelectric nanogenerator based on ZnO/PDMS composite.

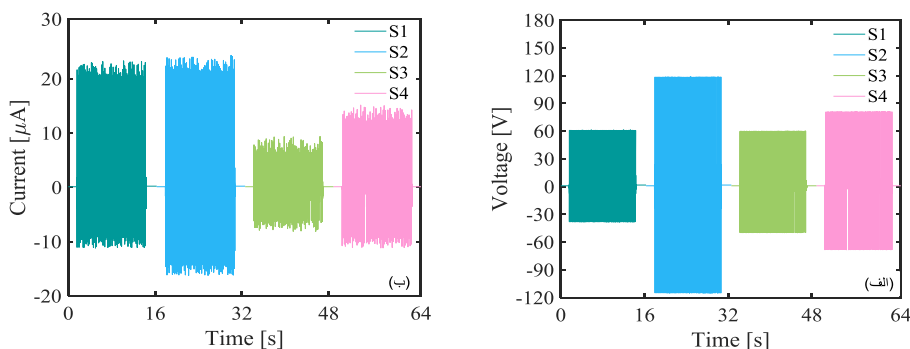


Figure 2. Voltage and Current generated by hybrid piezo/triboelectric nanogenerators with different electrodes and composite thickness.

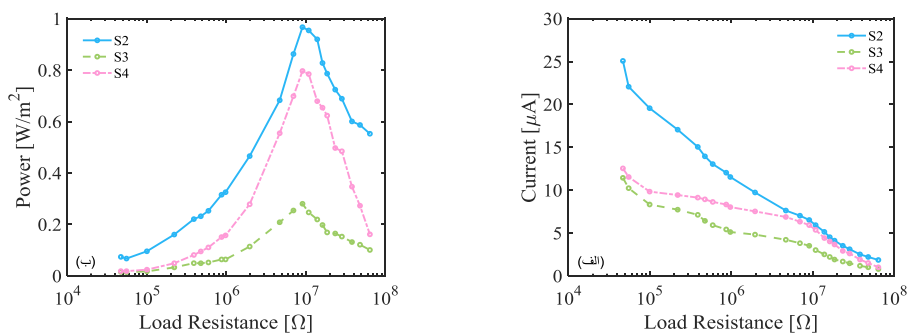


Figure 3. Power and current generated by hybrid piezo/triboelectric nanogenerators under different load resistances.

4. REFERENCES

- Afshari, F., Golshan Bafghi, Z., & Manavizadeh, N. (2022). Unsophisticated one-step synthesis super hydrophilic self-cleaning coating based on ZnO nanosheets. *Applied Physics A*, 128(1), 75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00339-021-05222-0>
- Azimi, S., Golabchi, A., Nekookar, A., Rabbani, S., Amiri, M. H., Asadi, K., & Abolhasani, M. M. (2021). Self-powered cardiac pacemaker by piezoelectric polymer nanogenerator implant. *Nano Energy*, 83, 105781. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105781>
- Bafghi, Z. G., & Manavizadeh, N. (2020). Low power ZnO nanorod-based ultraviolet photodetector: effect of alcoholic growth precursor. *Optics & Laser Technology*, 129, 106310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106310>
- Deng, W., Zhou, Y., Libanori, A., Chen, G., Yang, W., & Chen, J. (2022). Piezoelectric nanogenerators for personalized healthcare. *Chem Soc Rev*, 51(9), 3380-3435. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d1cs00858g>
- Dong, K., Peng, X., & Wang, Z. L. (2020). Fiber/Fabric-Based Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators for Flexible/Stretchable and Wearable Electronics and Artificial Intelligence. *Adv Mater*, 32(5), e1902549. <https://doi.org/10.1002/adma.201902549>
- Kim, D. H., Dudem, B., & Yu, J. S. (2018). High-performance flexible piezoelectric-assisted triboelectric hybrid nanogenerator via polydimethylsiloxane-encapsulated nanoflower-like ZnO composite films for scavenging energy from daily human activities. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(7), 8525-8535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00834>
- Kim, J.-N., Lee, J., Lee, H., & Oh, I.-K. (2021). Stretchable and self-healable catechol-chitosan-diatom hydrogel for triboelectric generator and self-powered tremor sensor targeting at Parkinson disease. *Nano Energy*, 82, 105705. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105705>
- Kim, Y.-G., Song, J.-H., Hong, S., & Ahn, S.-H. (2022). Piezoelectric strain sensor with high sensitivity and high stretchability based on kirigami design cutting. *npj Flexible Electronics*, 6(1), 52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41528-022-00186-4>
- Luo, X., Zhu, L., Wang, Y. C., Li, J., Nie, J., & Wang, Z. L. (2021). A flexible multifunctional triboelectric nanogenerator based on MXene/PVA hydrogel. *Advanced Functional Materials*, 31(38), 2104928. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202104928>
- Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111>
- Paydari, P., Manavizadeh, N., Hadi, A., & Karamdel, J. (2023). The morphology effect of embedded ZnO particles-based composite on flexible hybrid piezoelectric triboelectric nanogenerators for harvesting biomechanical energy. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 105(2), 337-347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10971-022-06019-0>
- Pusty, M., & Shirage, P. M. (2022). Insights and perspectives on graphene-PVDF based nanocomposite materials for harvesting mechanical energy. *Journal of Alloys and Compounds*, 164060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164060>
- Pyo, S., Lee, J., Bae, K., Sim, S., & Kim, J. (2021). Recent Progress in Flexible Tactile Sensors for Human-Interactive Systems: From Sensors to Advanced Applications. *Adv Mater*, 33(47), e2005902. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202005902>
- Sen, S., & Ganguly, S. (2017). Opportunities, barriers and issues with renewable energy development—A discussion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1170-1181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.137>
- Shakthivel, D., Dahiya, A. S., Mukherjee, R., & Dahiya, R. (2021). Inorganic semiconducting nanowires for green energy solutions. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 34, 100753. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100753>
- Tan, C., Dong, Z., Li, Y., Zhao, H., Huang, X., Zhou, Z., Jiang, J. W., Long, Y. Z., Jiang, P., Zhang, T. Y., & Sun, B. (2020). A high performance wearable strain sensor with advanced thermal management for motion monitoring. *Nat Commun*, 11(1), 3530. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17301-6>
- Vallem, V., Sargolzaeiaval, Y., Ozturk, M., Lai, Y. C., & Dickey, M. D. (2021). Energy Harvesting and Storage with Soft and Stretchable Materials. *Adv Mater*, 33(19), e2004832. <https://doi.org/10.1002/adma.202004832>
- Zaszczyńska, A., Gradyś, A., & Sajakiewicz, P. (2020). Progress in the Applications of Smart Piezoelectric Materials for Medical Devices. *Polymers (Basel)*, 12(11), 2754. <https://doi.org/10.3390/polym12112754>



مقاله کامل پژوهشی

بررسی عملکرد نانوژنراتور هیبریدی پیزو/تریپوالکتریک مبتنی بر کامپوزیت اکسید روی: تأثیر الکترودهای مس و آلومینیوم

پویا پایداری^۱، نگین معنوی‌زاده^{۲*}، علیرضا هادی^۳، جواد کرمدل^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

چکیده ذخیره‌سازهای انرژی در بسیاری از فناوری‌ها نظیر افزاره‌های پوشیدنی و قابل حمل، مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. در این مطالعه نانوژنراتورهای هیبریدی پیزو/تریپوالکتریک با الکترودهایی از جنس آلومینیوم و مس مبتنی بر کامپوزیت نانوساختارهای اکسید روی نهفته در پلی‌دی‌متیل سیلوکسان، ساخته شده‌اند. مطابق بررسی‌های ریخت‌شناسی، نانوصفحات اکسید روی به‌طور یکنواخت در جهت (۱۰۳) روی بستر آلومینیوم رشد کرده‌اند؛ درمقابل، نانومیله‌های رشد کرده بر بستر مس، یکنواخت نبوده و زاویه زیادی نسبت به سطح دارند. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌ای که از لایه پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (با سرعت لایه‌نشانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه)، الکترودهای آلومینیوم و نانوصفحه اکسیدروی تشکیل شده است، بیشترین میزان ولتاژ و جریان را به‌ترتیب برابر با ۱۲۰ ولت و ۲۴ میکروآمپر، تولید می‌کند. نانوژنراتور ساخته‌شده با الکترودهایی از جنس مس و آلومینیوم همراه با نانوصفحه اکسیدروی، کمترین میزان ولتاژ، جریان و توان تولیدی را دارد. نانوژنراتور هیبریدی با دو الکترودهی آلومینیوم و نانوصفحات اکسیدروی، بیشترین توان را که برابر با 0.97Wm^{-2} است، تولید می‌کند. براساس نتایج به‌دست آمده از مشخصه‌یابی نانوژنراتورهای هیبریدی پیزو/تریپوالکتریک ساخته‌شده، الکترودهای آلومینیومی که نانوصفحات اکسید روی نهفته در پلی‌دی‌متیل سیلوکسان را دارند، عملکرد بهتری را نشان می‌دهند و می‌توانند گزینه مناسبی برای برداشت انرژی مکانیکی برای دستگاه‌های خودشارژ باشند.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

دریافت نسخه اصلاح‌شده: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳

پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳

کلیدواژه‌ها:

نانوژنراتور هیبریدی،
تریپوالکتریک،
پیزوالکتریک،
نانوصفحه اکسید روی،
کامپوزیت PDMS.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2023.392805.1273>

URL: https://www.jamt.ir/article_186606.html

۱- مقدمه

ارزشمند برای تامین انرژی موردنیاز جهان است (Rahimzadeh, Samadi, & Shams Mohammadi, 2023; Rangel-Martinez, Nigam, & Ricardez-Sandoval, 2021). استفاده از دستگاه‌های برداشت انرژی، نه تنها راه‌حلی برای مسئله بحران انرژی است؛ بلکه نقش مهمی در فقرزدایی و بقای انسان دارد (Khatua & Kim, 2022; H. Kim et al., 2022; Panda et al., 2022). زندگی روزمره در مسیر رسیدن به جامعه مدرن، در بسیاری از جنبه‌ها مبتنی بر تعامل بین انسان و

پیشرفت‌های فناوری و اقتصادی یکی از پیامدهای مهم انقلاب صنعتی است. فرایند جهانی شدن، تقاضا را برای انرژی الکتریسیته به‌عنوان منبع انرژی صنایع مختلف افزایش داده است (Olabi & Abdelkareem, 2022; Sen & Ganguly, 2017; Zobaa & Bansal, 2011). باتوجه به کاهش سریع منابع محدود سوخت فسیلی به‌عنوان منبع اصلی انرژی، برداشت انرژی از منابع تجدیدپذیر مانند خورشید، باد و آب یک رویکرد

*عهده‌دار مکاتبات: نگین معنوی‌زاده

نشانی: ایران، تهران، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پیام نگار: manavizadeh@kntu.ac.ir

کم‌بیش بالا، نانوذرات‌های تریبولکتریک را به‌طور ایده‌آل برای تامین انرژی اینترنت اشیاء و سایر حسگرهای خودتوان با استفاده از انرژی بیومکانیکی، مناسب می‌سازد (Cho et al., 2020; Dong, Peng, & Wang, 2020; Libanori et al., 2022; Wang et al., 2021). از سوی دیگر، نانوذرات‌های پیزوالکتریک به‌عنوان یکی از رویکردهای امیدوارکننده برای برداشت ارتعاش، تنش یا کرنش مکانیکی محیط، با در نظر گرفتن مزایایی همچون اثر جفت الکترومکانیکی در مواد پیزوالکتریک ذاتی، معرفی می‌شوند (Pusty & Shirage, 2022; Singh, Kumar, & Khare, 2021). اگرچه نانوذرات پیزوالکتریک برای یک نیروی بزرگ با تغییر شکل کوچک، مناسب است؛ اما سبکی، هزینه کم و ساخت آسان، آن را به گزینه مناسبی برای تبدیل ارتعاش به الکتریسته تبدیل کرده است. پیزوالکتریک را می‌توان در دسته‌های مختلف مواد مانند سرامیک‌ها، تک‌کریستال‌ها و پلیمرها مشاهده کرد. سرامیک‌های پیزوالکتریک از جمله اکسیدروی (ZnO)، تیتانات باریم BaTiO_3 (BTO) و تیتانات زیرکونات سرب (PZT) برای استفاده در نانوذرات‌های پیزوالکتریک، توجه و علاقه بسیاری را به‌خود جلب کرده‌اند (Azimi et al., 2021; Shi et al., 2019; Zaszczynska, Gradys, & Sajkiewicz, 2020).

اکسیدروی (ZnO) یک ماده غیرفروالکتریک از نوع کریستالی ورتزایت است که در امتداد محور c قطبیده می‌شود (Afshari, Golshan Bafghi, & Manavizadeh, 2022; Bafghi & Manavizadeh, 2020; Tsai et al., 2021). اگرچه اکسیدروی نسبت به PZT و BTO (باریوم تیتانات) دارای ثابت پیزوالکتریک پایین است، ولی ثابت دی‌الکتریک پایین (ϵ_r) و کرنش پیزوالکتریک متوسط (e) آن، منجر به ولتاژ پیزوالکتریک بالاتر می‌شود (Chowdhury et al., 2019; Y.-G. Kim et al., 2022; Vallem et al., 2021). علاوه بر این، اکسیدروی می‌تواند در نانوساختارهای متنوعی سنتز شود که استفاده از آن را برای افزاره‌ها و حسگرهای برداشت پیزوالکتریک انعطاف‌پذیر، امکان‌پذیر می‌کند (Farajollahi et al., 2020; Le, Ahmadipour, & Pung., 2020; Rezaie et al., 2021). در روش سنتز هیدروترمال، نانوسیم‌های عمودی اکسیدروی به‌طور معمول در امتداد محور c رشد می‌کنند که همان جهت قطبش است؛ در نتیجه عملکرد خروجی نانوذرات‌های پیزوالکتریک مبتنی بر اکسیدروی را

دستگاه‌های هوشمند است. به‌لطف فناوری اینترنت اشیاء، دستگاه‌های هوشمند می‌توانند علاوه بر انسان، با یکدیگر نیز مرتبط باشند تا زندگی روزمره را تسهیل کنند (Liu, Guo, & Lee, 2021; Zhu et al., 2021). استفاده گسترده از دستگاه‌ها و حسگرهای قابل حمل شخصی، توجه به دستگاه‌های خودتوان پایدار را برای شخصی‌سازی نظارت بر سلامت پزشکی، سنجش حرکت انسان و ربات‌های انسان‌نما افزایش داده است؛ بنابراین، طراحی دستگاه‌های خودشارژ که انرژی موردنیاز را از حرکات و ارتعاشات بدن انسان برداشت کنند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از تحقیقات به تولید دستگاه‌های نظارتی زیست‌پزشکی که عملکرد بلندمدت پایدار دارند، معطوف شده است (Chen et al., 2020; Luo et al., 2021; Pyo et al., 2021). برداشت انرژی بیومکانیکی از بدن انسان به‌دلیل پایداری و سازگاری با محیط‌زیست، در مطالعات انرژی مورد توجه قرار گرفته است. برداشت‌کننده انرژی پوشیدنی مطلوب، یک دستگاه انعطاف‌پذیر و کم‌وزن است که طیف وسیعی از حرکات مانند ضربه زدن با انگشت، تنفس و حرکت بدن را برای تامین انرژی دستگاه‌های الکترونیکی یا استفاده در شبکه‌های حسگر، ثبت می‌کند (Deng et al., 2022; Kim et al., 2021; Shi, He, & Lee, 2019; Tan et al., 2020; Zou, Raveendran, & Chen, 2020).

برداشت کارآمد انواع مختلف انرژی مکانیکی که به‌عنوان فراوان‌ترین و در دسترس‌ترین انرژی شناخته شده در فعالیت‌های روزانه ما است؛ توسط نانوذرات‌ها انجام می‌شود (Duan et al., 2022). در میان انواع نانوذرات‌ها، نانوذرات‌های تریبولکتریک و پیزوالکتریک به‌دلیل مزایای منحصر به فردشان پتانسیل قابل توجهی دارند (Asna Ashary & Zhao et al., 2021; Hashemi, 2021). نانوذرات‌های تریبولکتریک بر اساس باردار شدن بر پایه اثر تریبولکتریک و اصول القای الکترواستاتیک کار می‌کنند (Mariello, 2022; Tat et al., 2021). به‌عنوان مثال از طریق جفت شدن این اصول، می‌توان انرژی مکانیکی محیط مانند انرژی بیومکانیکی، انرژی باد و انرژی موج آب را به‌طور مؤثر و پیوسته توسط نانوذرات‌های تریبولکتریک به الکتریسته تبدیل کرد (Shi et al., 2023; Wang et al., 2022; Wang et al., 2020; Ye et al., 2021). مزیت‌هایی مانند در دسترس بودن، تنوع مواد، اندازه کوچک و هزینه کم، پاسخ به بسامد پایین و خروجی الکتریکی

شرایط خارجی مانند رطوبت و دما اعمال کرد (Shakthivel et al., 2021). از جنبه دیگر، عملکرد ولتاژ خروجی پایدار نانوذراتورهای تریبو الکتریک را می‌توان تحت تغییر شکل‌های مختلف حفظ کرد؛ در حالی که جریان خروجی پایین آن یک چالش بزرگ برای بهره‌برداری گسترده از آن بوده است (Wang et al., 2019). نانوذراتورهای هیبریدی می‌توانند یک راهبرد برای دستگاه‌های پوشیدنی انعطاف‌پذیر با توان بالا باشند. در کنار هم قرار دادن اثر تریبو الکتریک و پیزو الکتریک با استفاده از یک فیلم کامپوزیت، عملکرد کلی خروجی را به دلیل بهبود انتقال الکترون و القای بار اضافی در سراسر ماده فعال که به‌عنوان نانوذراتور هیبریدی نامیده می‌شود، افزایش می‌دهد (Dong, Peng, & Wang, 2020). در این پژوهش چهار نانوذراتور هیبریدی با نوساختارهای رشد داده شده بر روی سطح که فواصل آن‌ها با پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان پر شده، مورد بررسی قرار گرفته است. نوساختارهای اکسیدروی بر روی دو بستر متفاوت آلومینیوم و مس رشد داده شده‌اند. این دو بستر به‌عنوان الکتروود هم، در نظر گرفته می‌شوند. در این بخش به بررسی تأثیر جنس الکتروود و همچنین اثر نوع و محور قرارگیری نوساختار پیزو الکتریک بر روی عملکرد نانوذراتور هیبریدی تریبو/پیزو الکتریک پرداخته خواهد شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۲ (FESEM) و تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس برای مطالعه خواص ساختاری و ریخت‌شناسی نوساختار استفاده شده است. اثر نوع نوساختار اکسیدروی در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و همچنین ضخامت لایه بر ولتاژ خروجی و عملکرد جریان نانوذراتورها بررسی شده است. علاوه بر این، توان خروجی نانوذراتورها در مقاومت بارهای مختلف و نحوه شارژ خازن مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

کامپوزیت اکسیدروی / پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (ZnO/PDMS) بر روی بسترهای متفاوت که به روش لایه‌نشانی هیدروترمال تولید شده، ساخته شد. از موادی با درجه خلوص بالا همچون روی استات دوآبه ($Zn(CH_3CO_2)_2 \cdot 2H_2O$)، روی

بهبود می‌بخشد (Pan et al., 2020; Tu et al., 2020). شایان ذکر است که اکسیدروی علاوه بر خاصیت پیزو الکتریک بالا به دلیل هزینه کم، فراوانی، قابلیت مقیاس‌پذیری، سهولت ساخت و غیرسمی بودن، برای استفاده در دستگاه‌های برداشت انرژی قابل-پوشیدن و کاشت، متمایز است (Rao et al., 2019; Rezaie, 2020). در حالی که سایر پیزوسرامیک‌ها به دلیل محتوای سرب، سمی هستند. اشکال مختلف اکسیدروی از جمله نانوآرایه‌ها و نانوذرات به‌ویژه به‌عنوان یک ماده زیست‌سازگار عالی شناخته می‌شوند (Hamid & Çelik-Butler, 2018; Hao et al., 2019; Shirmohammadli, 2019; Manavizadeh, & Bafghi, 2019).

زیست‌سازگاری مواد یکی از عوامل کلیدی در لوازم الکترونیکی پوشیدنی است. پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) به‌عنوان یک ماده زیست‌سازگار ایده‌آل برای سنسورهای الکترونیکی پوشیدنی انعطاف‌پذیر و برداشت‌کننده‌های انرژی، معرفی شده است. خاصیت ارتجاعی ذاتی باعث می‌شود که پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به‌طور اختیاری پیچ خورده، لوله شده، تا شده، فشرده یا کشیده شود (Kim, Dudem, & Yu, 2018). در حالی که اکسیدروی ویژگی‌های شکننده و غیرقابل تغییر دارد. ترکیبی از اکسیدروی با یک ماده آلی انعطاف‌پذیر مانند پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، توجه فزاینده‌ای را در دستگاه‌های زیست‌سازگار انعطاف‌پذیر به‌خود جلب کرده است. جاسازی پرکننده معدنی در یک پلیمر، یک رویکرد ویژه برای تهیه یک دسته کامپوزیت جدید برای افزایش عملکرد با کاربردهای گسترده است. این راهبرد، خواص منحصر به فرد الکتریکی، مغناطیسی، نوری، حرارتی و پیزو الکتریکی ذرات معدنی را در مقیاس میکرو یا نانو با ویژگی‌های ماتریس پلیمری (از جمله فرایندپذیری، انعطاف‌پذیری و پایداری) ادغام می‌کند و همچنین مانع از شکنندگی پیزوسرامیک می‌شود (Paydari et al., 2023).

نانوذراتورهای هیبریدی تریبو/پیزو الکتریک می‌توانند بر چالش عملکرد خروجی الکتریکی پایین نانوذراتورها غلبه کنند (Mariello, 2022). اگرچه نانوذراتورهای پیزو الکتریک دارای ولتاژ خروجی پایینی هستند؛ با این حال، روش برداشت پیزو الکتریک را می‌توان در مکان‌های مختلف با تأثیر کمتری از

¹ Polydimethylsiloxane

² Field emission scanning electron microscopy

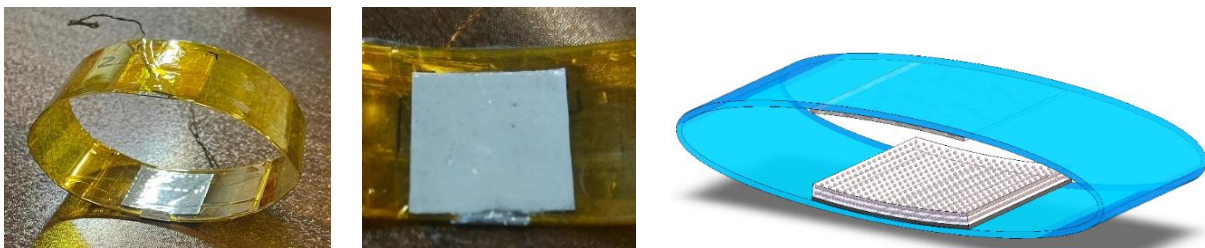
پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، با مخلوط کردن یک پایه الاستومری سیلیکونی و یک عامل پخت الاستومری سیلیکونی به نسبت ۱:۱۰، ساخته می‌شود. پس از سنتز نانوساختار و گرما دیدن نمونه‌ها، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با استفاده از لایه‌نشانی دورانی بر روی نمونه‌های سنتز شده، لایه‌نشانی می‌شود تا لایه یکنواختی از آن بر سطح و همچنین لایه‌های نانوساختارهای اکسیدروی قرار گیرد. برای ساخت نانوزنراتورهای هیبریدی تریبو/پیزوالکتریک، چسب‌های آلومینیوم و مس به دلیل دسترسی آسان، مقرون به صرفه بودن و سادگی در ساخت، به عنوان الکترود انتخاب شده اند. لایه کامپوزیت اکسیدروی/پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به عنوان یک ماده تریبو الکتریک با پلاریته منفی عمل می‌کند؛ در حالی که لایه چسب آلومینیوم به عنوان یک ماده تریبو الکتریک با پلاریته مثبت و همچنین به عنوان یک الکترود در نظر گرفته می‌شود. لایه‌های کامپوزیتی به الکترودهای آلومینیومی پایینی متصل می‌شوند و در نهایت نانوزنراتورهای هیبریدی مربع شکل با چسباندن دو الکترود در مقابل یکدیگر و با به کارگیری یک نوار از جنس PET^۲ (پلی اتیلن ترفتالات) که ماده مناسبی برای نانوزنراتورهای مکانیکی انعطاف پذیر است، آماده می‌شوند. طرحواره نانوزنراتور هیبریدی پیزو/تریبو الکتریک مبتنی بر نانوساختارهای اکسید روی نهفته در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، در شکل (۱) نشان داده شده است.

نیترات شش‌آبه ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)، هگزامتیلن‌ترامین ($C_6H_{12}N_4$) و اتانول استفاده شده است. در ابتدا نمونه‌هایی از چسب مس و آلومینیوم به اندازه 2×2 سانتی‌متر در محلولی از آب دیونیزه، استون و اتانول که به نسبت مساوی با هم ترکیب شده‌اند، در دستگاه فراصوت^۱ شسته می‌شوند. پیش از رشد نانوساختارهای اکسیدروی نیاز است تا بر روی زیرلایه، بستری از اکسیدروی لایه‌نشانی شود. برای این منظور از محلول حاوی زینک‌استات و اتانول استفاده می‌شود. این محلول به مدت ۲ ساعت به وسیله همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود. سپس با سرعت 3000 دور بر دقیقه به مدت 30 ثانیه به وسیله لایه‌نشانی دورانی، روی بستر لایه‌نشانی می‌شود. در نهایت، زیرلایه اکسیدروی لایه‌نشانی شده در کوره با دمای 250 درجه سلسیوس به مدت 6 ساعت قرار داده می‌شود.

پس از آماده‌سازی بستر اکسیدروی، به رشد نانوساختارها پرداخته می‌شود. برای رشد نانومیل به روش حمام شیمیایی، از دو ماده زینک نیترات شش‌آبه ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) و هگزامتیلن‌تترا آمین ($C_6H_{12}N_4$) استفاده می‌شود. این دو ماده با غلظت‌های مساوی در آب دیونیزه حل می‌شوند. تفلون نگهدارنده زیرلایه اکسیدروی به مدت $2/5$ ساعت در دمای 90 درجه سلسیوس، در محلول غوطه‌ور می‌شود.

پس از سنتز نانوساختار اکسیدروی، کامپوزیت پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ساخته شده است. در ابتدا، پلیمر

Flexible Band (PET) Aluminum Electrode ZnO Nanostructures PDMS Matrix



شکل ۱. طرحواره ساختار نانوزنراتور هیبریدی تریبو/پیزوالکتریک بر پایه کامپوزیت ZnO/PDMS

ابتدا باید ضخامت مناسب پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان مشخص شود. برای این منظور، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با دو ضخامت مختلف

برای بررسی نحوه عملکرد نانوزنراتورهای هیبریدی پیزو/تریبو الکتریک با نانوساختارهای رشد یافته بر روی سطح،

¹ Ultrasonic

² Polyethylene terephthalate

هیدروترمال، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با استفاده از Hitachi S-4160 (۲۰ کیلوولت، ساخت کشور ژاپن) و تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) توسط Philips Expert و با تابش Cu- α (آنگستروم $\lambda=1/5418$) مورد استفاده قرار گرفت.

برای مقایسه تأثیر جنس الکترودها و نوع نانو ساختار، از دو الکتروده مس و آلومینیوم و همچنین نانو ساختارهای نانوصفحه و نانومیله استفاده شد. عملکرد نانوژنراتورهای هیبریدی تریبو/پیزوالکتریک تحت نیروی اعمالی ۵ نیوتن و بسامد ۴ هرتز مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این، مشخصات الکتریکی نانوژنراتورهای هیبریدی تریبو/پیزوالکتریک توسط یک اسپلوسکوپ دیجیتال (MEGATEK، DSO 2100) بررسی شد.

۳- نتایج

نانو ساختارهای اکسیدروی یکی از مواد پیزوالکتریک مهم هستند که به دلیل روش سنتز ساده و مقرون به صرفه، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعه نانو ساختار اکسیدروی در کاربردهای متفاوت، بررسی ساختار کریستالی آن است. ساختار کریستالی نانوصفحات و نانومیله‌های اکسیدروی که به ترتیب بر روی آلومینیوم و مس رشد داده شده‌اند، در شکل (۲) قابل بررسی است. قله‌های الگوی پراش اشعه ایکس در زاویه‌های $34/5$ ، $60/8$ و $65/3$ درجه قرار دارند که به ترتیب جهت‌های کریستالی (۰۰۲)، (۱۱۰) و (۱۰۳) را نشان می‌دهند. یک قله اصلی در جهت کریستالی (۱۰۳) قرار دارد که نشان می‌دهد نانوصفحات اکسید روی بر روی آلومینیوم، بیشتر در این جهت رشد کرده‌اند (شکل ۲-الف). نانوصفحات اکسیدروی بر روی بستر آلومینیوم به طور یکنواخت رشد کرده‌اند. همچنین دو قله دیگر در $38/5$ و 45 درجه مشاهده می‌شوند که مربوط به بستر آلومینیومی است. قله‌هایی با شدت کم به زوایای شیب اضافی نانوصفحات سنتز شده دلالت دارند. شکل (۲-ب) آنالیز پراش اشعه ایکس نانومیله‌های اکسیدروی بر روی بستر مس را نشان می‌دهد. نانومیله‌های اکسیدروی در راستاهای (۰۰۲)، (۱۰۱) و (۱۰۲)

با استفاده از دستگاه لایه‌نشانی دورانی، بر روی الکتروده آلومینیوم لایه‌نشانی شده و مشخصات الکتریکی نانوژنراتور تریبو/الکتریک بر پایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان بررسی گردیده است. در نمونه اول، محلول پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان آماده شده (به نسبت ۱:۱۰)، در ابتدا به مدت ۱۰ ثانیه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و بلافاصله بعد از آن، با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ ثانیه روی آلومینیوم لایه‌نشانی می‌شود. برای نمونه دوم، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ ثانیه با یک بار لایه‌نشانی، روی آلومینیوم قرار می‌گیرد. برای بررسی عملکرد نانوژنراتور هیبریدی تریبو/پیزوالکتریک با الکترودهای متفاوت، ۴ نمونه نانوژنراتور به شرح زیر ساخته شده است.

S1: دو الکتروده از جنس آلومینیوم که روی یکی از الکترودها، نانوصفحه اکسیدروی رشد داده شده و لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به روش لایه‌نشانی دورانی، ۱۰ ثانیه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و ۱۰ ثانیه با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی شده است. این نمونه دارای لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان نازک‌تر است.

S2: دو الکتروده از جنس آلومینیوم که روی یکی از الکترودها، نانوصفحه اکسیدروی رشد داده شده و لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به روش لایه‌نشانی دورانی، ۱۰ ثانیه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی شده است. این نمونه دارای لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ضخیم‌تر است.

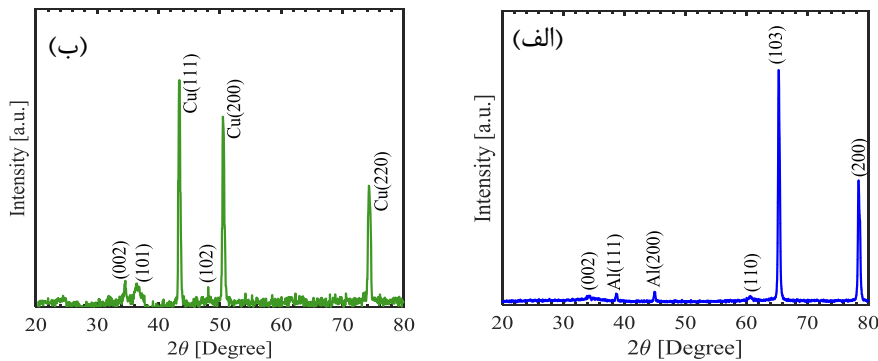
S3: یک الکتروده از جنس مس و الکتروده دیگر از جنس آلومینیوم است که روی الکتروده آلومینیومی نانوصفحه اکسیدروی رشد داده شده و لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با روش لایه‌نشانی دورانی ۱۰ ثانیه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی شده است.

S4: دو الکتروده از جنس مس که روی یکی از الکترودها، نانومیله اکسیدروی رشد داده شده و لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با روش لایه‌نشانی دورانی ۱۰ ثانیه با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی شده است.

برای بررسی خصوصیات ریخت‌شناسی و ساختاری اشکال مختلف نانو ساختارهای اکسیدروی سنتز شده به روش

به صورت یکنواخت و متراکم رشد نکرده‌اند؛ در آنالیز پراش اشعه ایکس، قله‌های مربوط به مس با شدت زیاد ظاهر شده‌اند.

قرار دارند که قله‌های آنها به ترتیب در زوایای $34/5$ ، $36/5$ و 48 درجه، واقع شده‌اند. به دلیل آنکه نانومیله‌های اکسیدروی

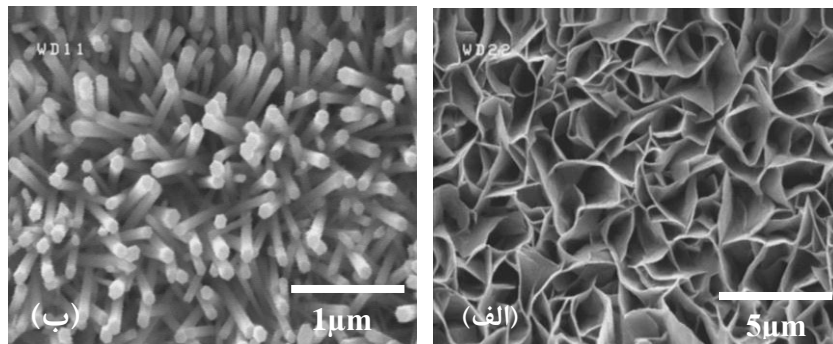


شکل ۲. نمودار پراش اشعه ایکس (الف) نانوصفحات اکسیدروی بر روی زیرلایه آلومینیوم، و (ب) نانومیله‌های اکسیدروی بر روی مس.

مشخص می‌شود (Wang et al., 2013).

شکل (۳-الف) ریخت‌شناسی نانوصفحات اکسیدروی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، نانوصفحات اکسیدروی به طور یکنواخت با ضخامت ۱۵ تا ۴۵ نانومتر و طول ۱ تا ۱/۷ میکرومتر، روی بستر رشد کرده‌اند. از آنجایی که بستر آلومینیومی است، ریخت‌شناسی پوسته‌مانند کریستال اکسیدروی رشد می‌کند؛ در نتیجه آلومینیوم باید مسئول اثر سرکوب در جهت (۰۰۱) باشد. با توجه به سازوکار رشد نانوساختارهای دوبعدی اکسیدروی، بارهای سطحی قطبی (۰۰۱) را می‌توان با عوامل غیرفعال جبران کرد. یک مثال معروف، کمک اسیدسیتریک است که روی سطح (۰۰۱) اکسیدروی جذب می‌شود و سپس رشد در امتداد محور c را کند می‌کند.

از آنجایی که شعاع یونی روی (0.72 آنگستروم) و آلومینیوم (0.54 آنگستروم) به یکدیگر نزدیک هستند، آلومینیوم به خوبی در شبکه اکسیدروی جذب می‌شود. به طور دقیق‌تر، قله مربوط به صفحه (۱۰۳) به یک لایه سطحی توسعه یافته توسط یک منطقه بسیار فعال رشد هنگام لایه‌نشانی زیرلایه اکسیدروی اختصاص داده می‌شود، که در آن مهاجرت یا انتشار عناصر در مقایسه با لایه‌های زیرین مستقل‌تر است. سطوح انرژی متناظر این حالت موضعی، در ناحیه نوار ممنوعه قرار دارد. مطابق سطوح انرژی، این حالت‌ها قادر به تبادل بار با نوار هدایت نانوصفحات اکسیدروی و یا محلول آبی هستند. بنابراین، شرایط رشد در لایه سطحی که در مراحل اولیه رشد شکل می‌گیرد، در درجه اول توسط ماهیت بستر یعنی آلومینیوم



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) نانوصفحه اکسیدروی بر روی بستر آلومینیوم و

(ب) نانومیله‌های اکسیدروی بر روی بستر مس.

یون‌های $Zn(OH)_4^{2-}$ جلوگیری کند و رشد کریستال را در

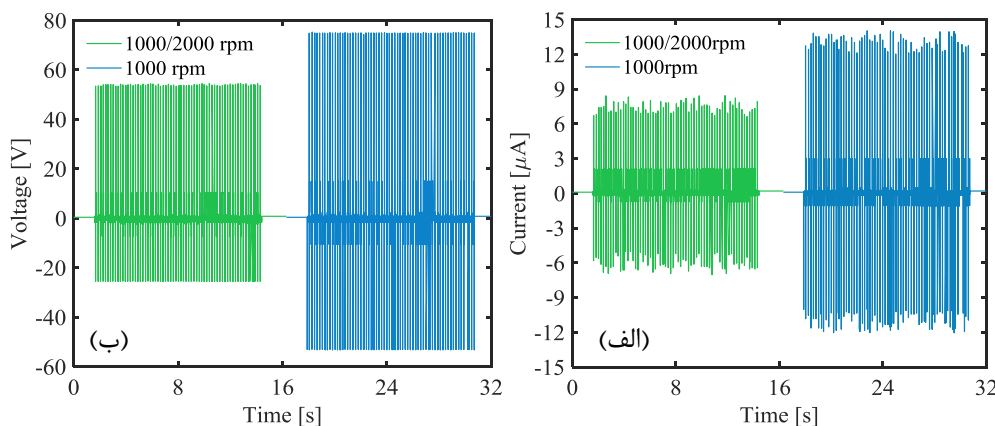
افزایش غلظت OH- در محلول می‌تواند از ترکیب مؤثر

به صورت عمود بر سطح هستند.

برای بررسی نحوه عملکرد نانوذراتورهای هیبریدی پیزو/تریوالکتریک با نانوساختارهای رشدیافته بر روی سطح، ابتدا باید ضخامت مناسب پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) مشخص شود. شکل (۴) ولتاژ و جریان دو نانوذراتور تریوالکتریک بر پایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان را نشان می‌دهد. در این شکل نشان داده شده است که نانوذراتور تریوالکتریک با لایه ضخیم‌تر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، ولتاژ مدارباز ۷۸ ولت و نانوذراتور با پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان نازک‌تر، مقدار کمتری حدود ۵۵ ولت را تولید می‌کند. همان‌طور که در شکل (۴-الف) مشخص است، نانوذراتور با لایه ضخیم‌تر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، جریان بیشتری حدود ۱۳ میکروآمپر و نانوذراتور با پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان نازک‌تر، جریانی حدود ۷ میکروآمپر را تولید می‌نماید؛ در نتیجه، نانوذراتور تریوالکتریک با پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان نازک‌تر عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. حال به بررسی عملکرد ۴ نمونه نانوذراتور هیبریدی تریو/پیزووالکتریک ساخته شده با الکترودهای متفاوت پرداخته می‌شود.

جهت (۰۰۱) سرکوب کند. در این حالت، عامل غیرفعال‌کننده برای کنترل رشد آرایه‌های نانوصفحات دوبعدی اکسیدروی باید $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ باشد که از واکنش شیمیایی بین OH^- و بستر آلومینیوم تشکیل می‌شود و شاید به یون Zn^{2+} می‌چسبد و مانع از رشد در جهت (۰۰۱) می‌شود (Thi & Lee, 2017).

شکل (۳-ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نانومیله‌های اکسیدروی بر روی بستر مس را نشان می‌دهد. نانوساختارهای اکسیدروی بر روی بسترهای آلومینیوم و مس به روش حمام شیمیایی و تحت یک محلول رشد و با شرایط یکسان، رشد داده شده‌اند؛ اما وجود بستر آلومینیوم باعث رشد نانوصفحات اکسیدروی شده است؛ در حالی که بر روی بستر مس، نانومیله‌های اکسیدروی به ضخامت ۵۰ تا ۱۵۰ نانومتر و طول ۱ تا ۱/۵ میکرومتر رشد کرده‌اند. همان‌طور که در تصویر FESEM مشخص است، نانومیله‌های اکسیدروی بر روی بستر مس با زیرلایه لایه‌نشانی شده به روش شیمیایی، بسیار نامنظم و با زاویه‌های متفاوت رشد کرده‌اند. این شیوه رشد نانومیله‌ها، باعث کاهش اثر پیزوالکتریک نانومیله‌های اکسیدروی می‌شود؛ زیرا بیشترین ضریب پیزوالکتریک متعلق به نانومیله‌های اکسیدروی رشدیافته در جهت محور c است که



شکل ۴. مشخصات الکتریکی نانوذراتور تریوالکتریک بر پایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (الف) جریان اتصال کوتاه و (ب) ولتاژ مدارباز

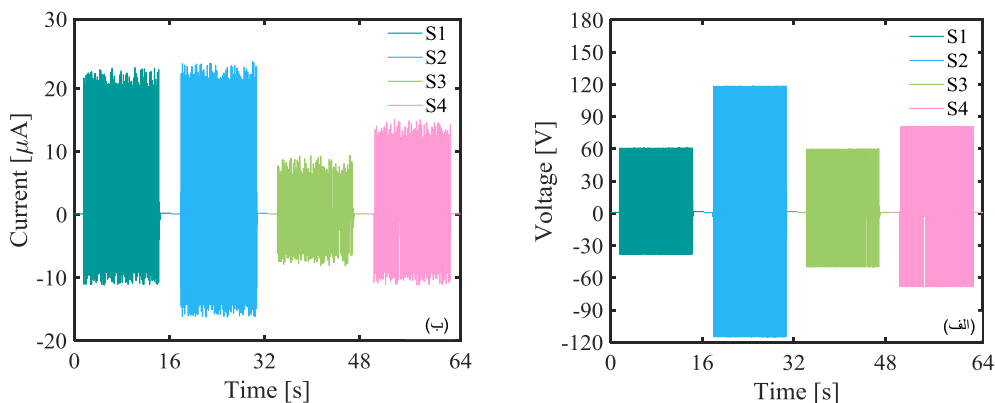
نمونه‌های نانوذراتور هیبریدی پیزو/تریوالکتریک مبتنی بر کامپوزیت نانوصفحه اکسیدروی/پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با دو ضخامت متفاوت لایه کامپوزیت لایه‌نشانی شده، بررسی شده است (نمونه S1 و S2). اولین پارامتر برای بررسی عملکرد نانوذراتورهای هیبریدی ساخته شده، اندازه‌گیری ولتاژ مدارباز این نانوذراتورهاست. شکل (۵-الف) ولتاژ مدارباز

نمونه‌های نانوذراتور هیبریدی پیزو/تریوالکتریک مبتنی بر کامپوزیت نانوصفحه اکسیدروی/پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با دو ضخامت متفاوت لایه کامپوزیت لایه‌نشانی شده، بررسی شده است (نمونه S1 و S2). اولین پارامتر برای بررسی عملکرد نانوذراتورهای هیبریدی ساخته شده، اندازه‌گیری ولتاژ مدارباز این نانوذراتورهاست. شکل (۵-الف) ولتاژ مدارباز

سرعت های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه، هر کدام به مدت ۱۰ ثانیه لایه‌نشانی شده است، بیشترین میزان جریان اتصال کوتاه را دارد که برابر با ۲۴ میکروآمپر است. نمونه S1 که ساختاری مانند نمونه S2 دارد اما لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان پرکننده آن نازک‌تر است و با دو سرعت ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه به‌طور متوالی لایه‌نشانی شده است، جریان اتصال کوتاه کمی کمتر، به مقدار میانگین ۲۲ میکروآمپر تولید می‌کند. در نمونه S3 که یکی از الکترودهای آن آلومینیوم و دیگری مس است، کمترین میزان جریان به‌اندازه ۸ میکروآمپر تولید می‌شود. نمونه S4 نیز جریان اتصال کوتاهی برابر با ۱۵ میکروآمپر را تولید می‌کند. مطابق نتایج به‌دست آمده، نمونه S2 بهترین عملکرد را از نظر تولید ولتاژ و جریان دارد؛ زیرا علاوه بر تک‌کریستال بودن ساختار نانوصفحه اکسیدروی (مطابق با نتایج XRD)، این نانوساختار براساس تصاویر SEM، به‌طور یکنواخت بر روی سطح رشد کرده است؛ بنابراین میزان بار تولیدشده سطحی به‌دلیل غیریکنواختی سطح عایق که منجر به افزایش ولتاژ مدارباز می‌شود و همچنین افزایش بار تولیدشده در نانوساختار به‌دلیل ضریب تریبولکتریک بالا در نانوساختار با لبه تیز، جریان اتصال کوتاه افزایش می‌یابد. در مورد نمونه S4 که هر دو الکتروود از جنس مس هستند، به‌دلیل زاویه زیاد نانومیله‌ها، عدم یکنواختی در رشد نانوساختار در تمام سطح الکتروود و وجود زبری سطح ماده تریبوی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان نسبت به حالت الکتروود آلومینیوم و نانوصفحه اکسیدروی، ولتاژ مدارباز و جریان اتصال کوتاه کمتری تولید می‌شود.

سرعت‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه، ولتاژ مداربازی در حدود ۶۵ ولت تولید می‌کند؛ بنابراین با توجه به داده‌های بالا، نمونه‌های S3 و S4 با لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسانی که با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ ثانیه با دستگاه لایه‌نشانی دورانی، لایه‌نشانی شده‌اند، ساخته می‌شود. نمونه S3 با لایه اکسیدروی/پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با دو الکتروود متفاوت مس و آلومینیوم ساخته شده است. الکتروود آلومینیوم که روی آن کامپوزیت نانوصفحه اکسیدروی رشد داده شده، به‌همراه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان که لابه‌لای نانوساختارها نیز قرار گرفته است، به‌عنوان تریبوی منفی و الکتروود مس به‌عنوان لایه تریبوی مثبت در نظر گرفته می‌شود. این نمونه، ولتاژی برابر با ۵۸ ولت را تولید می‌کند. در نمونه S4، هر دو الکتروود از جنس مس هستند که روی یکی از آن‌ها نانومیله‌های اکسیدروی رشد داده شده است. پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، لایه تریبوی منفی است که با لایه‌نشانی دورانی روی نانوساختار اکسید با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه لایه‌نشانی شده است. در این حالت نانومیله‌های اکسیدروی در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان نهفته شده است. این نمونه تحت نیروی ۵ نیوتن و بسامد ۴ هرتز، ولتاژی برابر با ۸۱ ولت را تولید می‌کند.

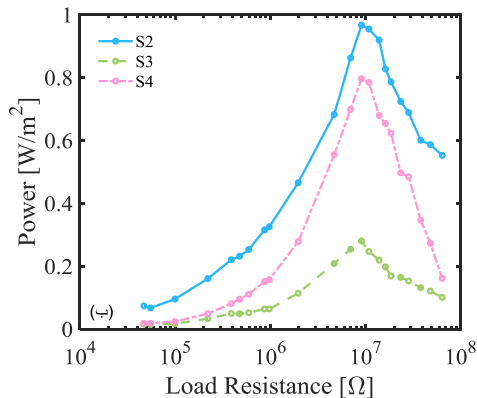
همچنین مطابق شکل (۵-ب) که جریان اتصال کوتاه نانوذراتورهای هیبریدی پیزو/تریبولکتریک را نشان می‌دهد، نمونه S2 که هر دو الکتروود آن از جنس آلومینیوم است و لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان پرکننده بین نانوصفحات اکسیدروی با



شکل ۵. (الف) ولتاژ مدارباز و (ب) جریان اتصال کوتاه نانوذراتورهای هیبریدی تریبولکتریک

با الکترودهای مختلف و ضخامت متفاوت لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان.

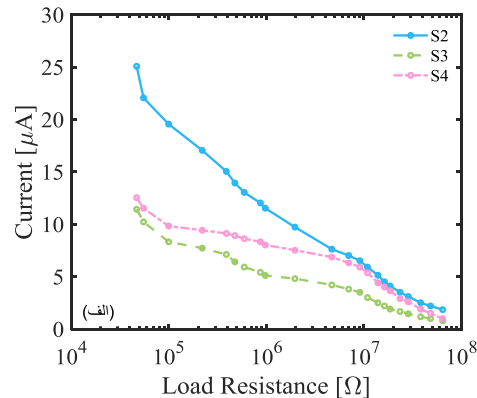
مقاومت و A مساحت کامپوزیت است. بیشینه توان خروجی همه نانوذراتورهای هیبریدی، در مقاومت ۱۰ مگا اهم، تولید شده است. بیشترین توان تولیدی، مربوط به لبه نمونه S2 است که هر دو الکتروود آن از جنس آلومینیوم بوده و از کامپوزیت نانوصفحه اکسیدروی در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان استفاده شده است. توان این نانوذراتور برابر با 0.97 Wm^{-2} است. توان تولیدشده در نمونه‌های S3 و S4 به ترتیب برابر با 0.28 Wm^{-2} و 0.8 Wm^{-2} است. با توجه به اینکه نانوذراتور نمونه S3 یکی از الکتروودهای آن از جنس آلومینیوم و دیگری از جنس مس است، ولتاژ و جریان کمی دارد، بنابراین کمترین توان تولیدشده را دارد.



توان خروجی در مقاومت بارهای مختلف، یک پارامتر مهم برای ارزیابی عملی نانوذراتور است. چگالی توان نانوذراتورهای هیبریدی براساس الکتروودها و نانوساختارهای مختلف اکسیدروی تحت مقاومت بارهای مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است. جریان خروجی همه نانوذراتورهای هیبریدی ساخته‌شده، با افزایش مقاومت بار خارجی از ۱۰ کیلو اهم به ۶۵ مگا اهم، کاهش یافت. بیشینه چگالی توان خروجی با استفاده از معادله (۱) به دست می‌آید.

$$w = \frac{R_L I^2}{A} \quad (\text{معادله ۱})$$

در این فرمول R_L مقاومت بار، I جریان گذرنده از



شکل ۶. نمودار (الف) جریان و (ب) توان تولیدشده در مقاومت بارهای متفاوت توسط نانوذراتورهای هیبریدی تریبو/پیزوالکتریک.

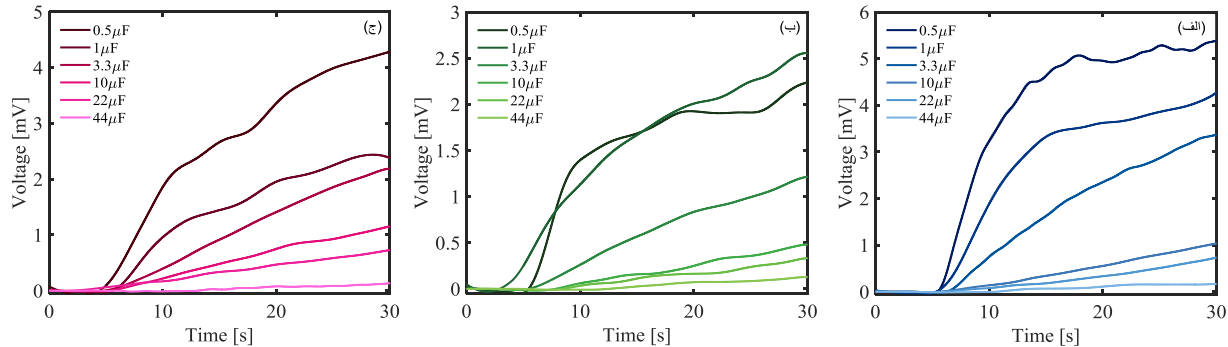
خودتوان برای لوازم الکترونیکی قابل حمل استفاده شود. از آنجایی که نانوذراتورهای هیبریدی پیشنهادی می‌توانند سیگنال الکتریکی را در پاسخ به نیروهای مکانیکی واردشده، تولید کنند؛ از این رو، از این نانوذراتورهای هیبریدی نیز می‌توان جهت ساخت سنسورهای خودتوان، استفاده کرد.

براساس نتایج به دست آمده از مشخصه‌یابی نانوذراتورهای هیبریدی پیزو/تریبو الکتریک ساخته شده، الکترودهایی از جنس آلومینیوم عملکرد بهتری را نشان می‌دهند. در جدول (۱)، نانوذراتورهای هیبریدی مبتنی بر کامپوزیت پیزوالکتریک/تریبو الکتریک گزارش شده توسط دیگر گروه‌های پژوهشی با نانوذراتورهای پیشنهادی مقایسه شده‌اند. در این کار تحقیقی، انتخاب ماده‌ای با ضریب پیزوالکتریک بالا و به کارگیری مواد با اختلاف الکترون‌خواهی قابل توجه، منجر

شکل (۷) منحنی‌های شارژ خازن به دست آمده را نشان می‌دهد. نانوذراتورهای هیبریدی ساخته شده می‌توانند خازن‌ها را به طور مؤثر شارژ کنند. فرایند شارژ خازن‌ها به مدت ۳۰ ثانیه بررسی شده است. در این بازه زمانی، نانوذراتور هیبریدی مبتنی بر کامپوزیت پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان/نانوساختار اکسیدروی (نمونه S2)، خازن ۰/۵ میکروفاراد دارای ولتاژ ذخیره شده بیشتری حدود ۵/۵ ولت است که به دلیل تولید ولتاژ بالاتر، بیشتر مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷-الف). در نمونه S3، خازن ۰/۵ میکروفاراد دارای ولتاژ ذخیره شده‌ای حدود ۲/۶ ولت است (شکل ۷-ب) که این مقدار برای نمونه S4 برابر با ۴/۳ ولت است (شکل ۷-ج). منحنی‌های شارژ خازن تأیید می‌کنند که نانوذراتور هیبریدی مبتنی بر اکسیدروی/پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان در نمونه S2 می‌تواند به عنوان منبع انرژی

علاوه بر مقرون به صرفه بودن، فرایند ساخت راحت تر و در نتیجه هزینه کمتری را در بر دارد؛ در نتیجه می‌تواند پیشنهاد مناسبی جهت بهره‌برداری از انرژی مکانیکی باشد.

به افزایش جریان و در نتیجه توان تولیدی شده است. بنابراین در سطح کوچک و نیروی اعمالی استاندارد، عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین، ساخت این نوع نانوژنراتور



شکل ۷. نمودار شارژ خازن‌ها با نانوژنراتورهای هیبریدی تریبو/پیزوالکتریک (الف) S2، (ب) S3، (ج) S4.

جدول ۱. مقایسه نانوژنراتورهای هیبریدی مبتنی بر کامپوزیت پیزو الکتریک تریبو الکتریک با نانوژنراتورهای پیشنهادی.

مرجع	ساختار	Voc [V]	Isc [μA]	توان خروجی [Wm ⁻²]
(He et al., 2019)	پودر PZT / سیلیکون رابر با ذرات PTFE	۶۰	۱۷	۰/۱۱
(Sahatiya, Kannan, & Badhulika, 2018)	نانوفیبر PVDF / کاغذ سلولزی و نانوصفحات MOS ₂	۵۰	۰/۰۳	۰/۱۸
(Lee et al., 2020)	لایه PVDF / پلی ایمید	۱۸۰	۳/۵	۱/۰۸
(Paydari et al., 2023)	ذرات میله‌ای اکسیدروی / PDMS	۱۰۶	۱۸/۹	۰/۷۵
پیشنهادی	نانوساختار صفحه‌ای اکسیدروی / PDMS / آلومینیوم	۱۲۰	۲۴	۰/۹۷
پیشنهادی	نانوساختار میله‌ای اکسیدروی / PDMS / مس	۸۱	۱۵	۰/۸

۴- نتیجه‌گیری

آلومینیوم و مس، غالب نانوصفحات رشد کرده بر بستر آلومینیوم، در راستای (۱۰۳) بوده و لبه تیز با ضخامت ۱۵ تا ۴۵ نانومتر و طول ۱ تا ۱/۷ میکرومتر دارند؛ در مقابل، نانومیله‌های رشد کرده بر بستر مس، یکنواخت نیستند و زاویه زیادی نسبت به سطح دارند. در این بررسی، لایه ضخیم‌تر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان که با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ ثانیه لایه‌نشانی دورانی شده است، ولتاژ بیشتری را در نانوژنراتور تریبو الکتریک تولید کرده است. همچنین نمونه S2 که از لایه ضخیم‌تر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و الکترودهای آلومینیوم و نانوصفحه اکسیدروی تشکیل شده است، بیشترین میزان ولتاژ و جریان را به ترتیب برابر با ۱۲۰ ولت و ۲۴ میکروآمپر تولید می‌کند. نانوژنراتور ساخته شده با الکترودهایی

در این مقاله به طراحی، ساخت و مشخصه‌یابی نانوژنراتورهای هیبریدی تریبو/پیزوالکتریک پرداخته شده است. تعبیه مواد پیزوالکتریک در یک ماتریس عایق، یک رویکرد عالی برای افزایش ضریب پیزوالکتریک عایق و ساخت نانوژنراتورهای هیبریدی پیزو/تریبو الکتریک است. در این نانوژنراتورها به بررسی تأثیر جنس الکترودها پرداخته شده است. ۴ نوع نانوژنراتور از جنس الکترودهای آلومینیوم و مس مبتنی بر نانوساختارهای مختلف اکسیدروی و دو ضخامت متفاوت لایه پرکننده، ساخته شدند. مطابق بررسی‌های ساختار کریستالی (آنالیز XRD) و ریخت‌شناسی (آنالیز FESEM) نانوساختارهای رشد داده شده اکسیدروی بر روی بستر

2. Asna Ashary, M., & Hashemi, B. (2021). Fabrication of a Converter for Converting of Vibrational Energy to Electrical Energy Using Fe₃O₄ Ferrofluid. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 10(1), 65-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.30501/jamt.2021.178254.1019>
3. Azimi, S., Golabchi, A., Nekookar, A., Rabbani, S., Amiri, M. H., Asadi, K., & Abolhasani, M. M. (2021). Self-powered cardiac pacemaker by piezoelectric polymer nanogenerator implant. *Nano Energy*, 83, 105781. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105781>
4. Bafghi, Z. G., & Manavizadeh, N. (2020). Low power ZnO nanorod-based ultraviolet photodetector: effect of alcoholic growth precursor. *Optics & Laser Technology*, 129, 106310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106310>
5. Chen, G., Li, Y., Bick, M., & Chen, J. (2020). Smart Textiles for Electricity Generation. *Chem Rev*, 120(8), 3668-3720. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00821>
6. Cho, S., Yun, Y., Jang, S., Ra, Y., Choi, J. H., Hwang, H. J., Choi, D., & Choi, D. (2020). Universal biomechanical energy harvesting from joint movements using a direction-switchable triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 71, 104584. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104584>
7. Chowdhury, A. R., Abdullah, A. M., Hussain, I., Lopez, J., Cantu, D., Gupta, S. K., Mao, Y., Danti, S., & Uddin, M. J. (2019). Lithium doped zinc oxide based flexible piezoelectric-triboelectric hybrid nanogenerator. *Nano Energy*, 61, 327-336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.04.085>
8. Deng, W., Zhou, Y., Libanori, A., Chen, G., Yang, W., & Chen, J. (2022). Piezoelectric nanogenerators for personalized healthcare. *Chem Soc Rev*, 51(9), 3380-3435. <https://doi.org/10.1039/d1cs00858g>
9. Dong, K., Peng, X., & Wang, Z. L. (2020). Fiber/Fabric-Based Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators for Flexible/Stretchable and Wearable Electronics and Artificial Intelligence. *Adv Mater*, 32(5), e1902549. <https://doi.org/10.1002/adma.201902549>
10. Duan, S., Wu, R., Xiong, Y.-H., Ren, H.-M., Lei, C., Zhao, Y.-Q., Zhang, X.-Y., & Xu, F.-J. (2022). Multifunctional antimicrobial materials: From rational design to biomedical applications. *Progress in Materials Science*, 125, 100887. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100887>
11. Farajollahi, H., Bafghi, Z. G., Mohammadi, E., Manavizadeh, N., & Salehi, A. (2020). Sensitivity enhancement of AZO-based ethanol sensor decorated by Au nano-islands. *Current Applied Physics*, 20(8), 917-924. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cap.2020.05.007>
12. Hamid, H. M. A., & Çelik-Butler, Z. (2018). Characterization and performance analysis of Li-doped ZnO nanowire as a nano-sensor and nano-energy harvesting element. *Nano Energy*, 50, 159-168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.05.023>
13. Hao, N., Xu, Z., Nie, Y., Jin, C., Closson, A. B., Zhang, M., & Zhang, J. X. J. (2019). Microfluidics-enabled rational design of ZnO micro-/nanoparticles with enhanced photocatalysis, cytotoxicity, and piezoelectric properties. *Chem Eng J*, 378, 122222. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122222>
14. He, J., Qian, S., Niu, X., Zhang, N., Qian, J., Hou, X., Mu, J., Geng, W., & Chou, X. (2019). Piezoelectric-enhanced triboelectric nanogenerator fabric for biomechanical energy harvesting. *Nano Energy*, 64, 103933. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103933>
15. Khatua, D. K., & Kim, S.-J. (2022). Perspective on the development of high performance flexible piezoelectric energy harvesters. *Journal of Materials Chemistry C*, 10(8), 2905-2924. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/D1TC06089A>
16. Kim, D. H., Dudem, B., & Yu, J. S. (2018). High-performance flexible piezoelectric-assisted triboelectric hybrid nanogenerator via polydimethylsiloxane-encapsulated nanoflower-like ZnO composite films for scavenging energy from daily human activities. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(7), 8525-8535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00834>
17. Kim, H., Pyun, K. R., Lee, M. T., Lee, H. B., & Ko, S. H. (2022). Recent advances in sustainable wearable energy devices with nanoscale materials and macroscale structures. *Advanced Functional Materials*, 32(16), 2110535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202110535>

از جنس مس و آلومینیوم که پوشیده با نانوصفحه اکسیدروی است، کمترین میزان ولتاژ، جریان و توان تولیدی را دارد. همچنین نمونه نانوزنراتور ساخته شده با الکترودهای مسی و نانومیله‌های اکسیدروی، ولتاژ و جریان به ترتیب ۸۱ ولت و ۲۲ میکروآمپر را تولید می‌کند. تمامی نانوزنراتورهای ساخته شده در این بخش در بار مقاومتی ۱۰ مگا اهم، بیشینه توان را تولید می‌کنند. نانوزنراتور هیبریدی با دو الکتروده آلومینیم به همراه نانوصفحات اکسیدروی، بیشترین توان را که برابر با Wm^{-2} ۰/۹۷ است، تولید می‌کند. علاوه بر این، خازن‌های مختلفی توسط یکسوکننده تمام موج متصل به نانوزنراتورهای هیبریدی، شارژ شده‌اند.

نانوزنراتورهای هیبریدی مبتنی بر نانوصفحات اکسیدروی و الکترودهای آلومینیومی با لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان لایه‌نشانی شده با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه، خازن ۰/۵ میکروفاراد را در مدت ۳۰ ثانیه تا ۵/۵ ولت شارژ کرده‌اند. براساس نتایج به دست آمده از مشخصه‌یابی نانوزنراتورهای هیبریدی پی‌زو/تریبولکتريکی ساخته شده، الکترودهای آلومینیومی که نانوصفحات اکسیدروی نهفته در پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان را دارند، عملکرد بهتری را نشان می‌دهند و در نتیجه، این نانوزنراتورهای هیبریدی می‌توانند گزینه مناسبی برای برداشت انرژی مکانیکی برای دستگاه‌های خودشارژ باشند.

۵- سپاسگزاری

پژوهش حاضر بخشی از رساله دکتری نویسنده اول است که در آزمایشگاه پژوهشی ادوات نانو ساختار الکترونیکی، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده است. شایسته است ضمن سپاس از حمایت‌های مالی و معنوی آزمایشگاه نام‌برده، از همکاری دلسوزانه خانم مهندس زهره گلشن بافقی تشکر و قدردانی شود.

مراجع

1. Afshari, F., Golshan Bafghi, Z., & Manavizadeh, N. (2022). Unsophisticated one-step synthesis super hydrophilic self-cleaning coating based on ZnO nanosheets. *Applied Physics A*, 128(1), 75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00339-021-05222-0>

18. Kim, J.-N., Lee, J., Lee, H., & Oh, I.-K. (2021). Stretchable and self-healable catechol-chitosan-diatom hydrogel for triboelectric generator and self-powered tremor sensor targeting at Parkinson disease. *Nano Energy*, 82, 105705. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105705>
19. Kim, Y.-G., Song, J.-H., Hong, S., & Ahn, S.-H. (2022). Piezoelectric strain sensor with high sensitivity and high stretchability based on kirigami design cutting. *npj Flexible Electronics*, 6(1), 52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41528-022-00186-4>
20. Le, A. T., Ahmadipour, M., & Pung, S.-Y. (2020). A review on ZnO-based piezoelectric nanogenerators: Synthesis, characterization techniques, performance enhancement and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 844, 156172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156172>
21. Lee, D. W., Jeong, D. G., Kim, J. H., Kim, H. S., Murillo, G., Lee, G.-H., Song, H.-C., & Jung, J. H. (2020). Polarization-controlled PVDF-based hybrid nanogenerator for an effective vibrational energy harvesting from human foot. *Nano Energy*, 76, 105066. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105066>
22. Libanori, A., Chen, G., Zhao, X., Zhou, Y., & Chen, J. (2022). Smart textiles for personalized healthcare. *Nature Electronics*, 5(3), 142-156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41928-022-00723-z>
23. Liu, L., Guo, X., & Lee, C. (2021). Promoting smart cities into the 5G era with multi-field Internet of Things (IoT) applications powered with advanced mechanical energy harvesters. *Nano Energy*, 88, 106304. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106304>
24. Luo, X., Zhu, L., Wang, Y. C., Li, J., Nie, J., & Wang, Z. L. (2021). A flexible multifunctional triboelectric nanogenerator based on MXene/PVA hydrogel. *Advanced Functional Materials*, 31(38), 2104928. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202104928>
25. Mariello, M. (2022). Recent Advances on hybrid piezo-triboelectric bio-nanogenerators: Materials, architectures and circuitry. *Nanoenergy Advances*, 2(1), 64-109. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nanoenergyadv2010004>
26. Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111>
27. Pan, L., Sun, S., Chen, Y., Wang, P., Wang, J., Zhang, X., Zou, J. J., & Wang, Z. L. (2020). Advances in piezo-phototronic effect enhanced photocatalysis and photoelectrocatalysis. *Advanced Energy Materials*, 10(15), 2000214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aenm.202000214>
28. Panda, S., Hajra, S., Mistewicz, K., In-na, P., Sahu, M., Rajaiitha, P. M., & Kim, H. J. (2022). Piezoelectric energy harvesting systems for biomedical applications. *Nano Energy*, 107514. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107514>
29. Paydari, P., Manavizadeh, N., Hadi, A., & Karamdel, J. (2023). The morphology effect of embedded ZnO particles-based composite on flexible hybrid piezoelectric triboelectric nanogenerators for harvesting biomechanical energy. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 105(2), 337-347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10971-022-06019-0>
30. Pusty, M., & Shirage, P. M. (2022). Insights and perspectives on graphene-PVDF based nanocomposite materials for harvesting mechanical energy. *Journal of Alloys and Compounds*, 164060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164060>
31. Pyo, S., Lee, J., Bae, K., Sim, S., & Kim, J. (2021). Recent Progress in Flexible Tactile Sensors for Human-Interactive Systems: From Sensors to Advanced Applications. *Adv Mater*, 33(47), e2005902. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202005902>
32. Rahimzadeh, M., Samadi, H., & Shams Mohammadi, N. (2023). Improving the Efficiency of a Cantilever Energy Scavenger. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 10(1), 59-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.30501/jree.2022.320113.1300>
33. Rangel-Martinez, D., Nigam, K. D. P., & Ricardez-Sandoval, L. A. (2021). Machine learning on sustainable energy: A review and outlook on renewable energy systems, catalysis, smart grid and energy storage. *Chemical Engineering Research and Design*, 174, 414-441. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.08.013>
34. Rao, J., Chen, Z., Zhao, D., Yin, Y., Wang, X., & Yi, F. (2019). Recent Progress in Self-Powered Skin Sensors. *Sensors (Basel)*, 19(12), 2763. <https://doi.org/10.3390/s19122763>
35. Rezaie, S., Bafghi, Z. G., & Manavizadeh, N. (2020). Carbon-doped ZnO nanotube-based highly effective hydrogen gas sensor: a first-principles study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 14174-14182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.050>
36. Rezaie, S., Bafghi, Z. G., Manavizadeh, N., & Kordmahale, S. B. (2021). Highly sensitive detection of dissolved gases in transformer oil with carbon-doped ZnO nanotube: A DFT study. *IEEE Sensors Journal*, 22(1), 82-89. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3126654>
37. Sahatiya, P., Kannan, S., & Badhulika, S. (2018). Few layer MoS2 and in situ poled PVDF nanofibers on low cost paper substrate as high performance piezo-triboelectric hybrid nanogenerator: energy harvesting from handwriting and human touch. *Applied Materials Today*, 13, 91-99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.08.009>
38. Sen, S., & Ganguly, S. (2017). Opportunities, barriers and issues with renewable energy development—A discussion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1170-1181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.137>
39. Shakthivel, D., Dahiya, A. S., Mukherjee, R., & Dahiya, R. (2021). Inorganic semiconducting nanowires for green energy solutions. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 34, 100753. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100753>
40. Shi, K., Huang, X., Sun, B., Wu, Z., He, J., & Jiang, P. (2019). Cellulose/BaTiO3 aerogel paper based flexible piezoelectric nanogenerators and the electric coupling with triboelectricity. *Nano Energy*, 57, 450-458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.12.076>
41. Shi, Q., He, T., & Lee, C. (2019). More than energy harvesting—Combining triboelectric nanogenerator and flexible electronics technology for enabling novel micro-/nano-systems. *Nano Energy*, 57, 851-871. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.002>
42. Shi, X., Wei, Y., Yan, R., Hu, L., Zhi, J., Tang, B., Li, Y., Yao, Z., Shi, C., & Yu, H.-D. (2023). Leaf surface-microstructure inspired fabrication of fish gelatin-based triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 109, 108231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108231>
43. Shirmohammadi, V., Manavizadeh, N., & Bafghi, Z. G. (2019). Efficient Capture of Circulating Tumor Cells Using Patterned ZnO Nanorod Arrays. *IEEE Sensors Journal*, 20(2), 591-598. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2943386>
44. Singh, H. H., Kumar, D., & Khare, N. (2021). A synchronous piezoelectric-triboelectric-electromagnetic hybrid generator for harvesting vibration energy. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(1), 212-218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/D0SE01201G>
45. Tan, C., Dong, Z., Li, Y., Zhao, H., Huang, X., Zhou, Z., Jiang, J. W., Long, Y. Z., Jiang, P., Zhang, T. Y., & Sun, B. (2020). A high performance wearable strain sensor with advanced thermal management for motion monitoring. *Nat Commun*, 11(1), 3530. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17301-6>
46. Tat, T., Libanori, A., Au, C., Yau, A., & Chen, J. (2021). Advances in triboelectric nanogenerators for biomedical sensing. *Biosens Bioelectron*, 171, 112714. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112714>
47. Thi, V. H. T., & Lee, B.-K. (2017). Great improvement on tetracycline removal using ZnO rod-activated carbon fiber composite prepared with a facile microwave method. *Journal of hazardous materials*, 324, 329-339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.066>
48. Tsai, S. Y., Chen, C. C., Huang, J.-M., Lai, Y.-S., Ku, C.-S., Lin, C.-M., & Ko, F.-H. (2021). Piezo-enhanced Thermoelectric Properties of Highly Preferred c-Axis ZnO Nanocrystal Films: Implications for Energy Harvesting. *ACS Applied Nano Materials*, 4(9), 9430-9439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsanm.1c01915>
49. Tu, S., Guo, Y., Zhang, Y., Hu, C., Zhang, T., Ma, T., & Huang, H. (2020). Piezocatalysis and piezo-photocatalysis: catalysts classification and modification strategy, reaction mechanism, and practical application. *Advanced Functional Materials*, 30(48), 2005158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202005158>
50. Vallem, V., Sargolzaeiaval, Y., Ozturk, M., Lai, Y. C., & Dickey, M. D. (2021). Energy Harvesting and Storage with Soft and Stretchable Materials. *Adv Mater*, 33(19), e2004832. <https://doi.org/10.1002/adma.202004832>

51. Wang, H. L., Guo, Z. H., Zhu, G., Pu, X., & Wang, Z. L. (2021). Boosting the power and lowering the impedance of triboelectric nanogenerators through manipulating the permittivity for wearable energy harvesting. *ACS nano*, *15*(4), 7513-7521. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00914>
52. Wang, J., Jiang, Z., Sun, W., Xu, X., Han, Q., & Chu, F. (2022). Yoyo-ball inspired triboelectric nanogenerators for harvesting biomechanical energy. *Applied Energy*, *308*, 118322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118322>
53. Wang, J., Qian, S., Yu, J., Zhang, Q., Yuan, Z., Sang, S., Zhou, X., & Sun, L. (2019). Flexible and Wearable PDMS-Based Triboelectric Nanogenerator for Self-Powered Tactile Sensing. *Nanomaterials (Basel)*, *9*(9), 1304. <https://doi.org/10.3390/nano9091304>
54. Wang, Y., Li, X., Jiang, G., Liu, W., & Zhu, C. (2013). Origin of (103) plane of ZnO films deposited by RF magnetron sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *24*, 3764-3767. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10854-013-1315-y>
55. Wang, Y., Yang, E., Chen, T., Wang, J., Hu, Z., Mi, J., Pan, X., & Xu, M. (2020). A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing. *Nano Energy*, *78*, 105279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105279>
56. Ye, C., Dong, K., An, J., Yi, J., Peng, X., Ning, C., & Wang, Z. L. (2021). A triboelectric–electromagnetic hybrid nanogenerator with broadband working range for wind energy harvesting and a self-powered wind speed sensor. *ACS Energy Letters*, *6*(4), 1443-1452. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.1c00244>
57. Zaszczynska, A., Gradys, A., & Sajkiewicz, P. (2020). Progress in the Applications of Smart Piezoelectric Materials for Medical Devices. *Polymers (Basel)*, *12*(11), 2754. <https://doi.org/10.3390/polym12112754>
58. Zhao, Z., Dai, Y., Dou, S. X., & Liang, J. (2021). Flexible nanogenerators for wearable electronic applications based on piezoelectric materials. *Materials Today Energy*, *20*, 100690. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100690>
59. Zhu, M., Yi, Z., Yang, B., & Lee, C. (2021). Making use of nanoenergy from human–Nanogenerator and self-powered sensor enabled sustainable wireless IoT sensory systems. *Nano Today*, *36*, 101016. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.101016>
60. Zobaa, A. F., & Bansal, R. C. (2011). *Handbook of renewable energy technology*. World Scientific. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-39487-4>
61. Zou, Y., Raveendran, V., & Chen, J. (2020). Wearable triboelectric nanogenerators for biomechanical energy harvesting. *Nano Energy*, *77*, 105303. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-39487-4>