

تولید انرژی برقی از امواج صوتی با استفاده از نانومولد تریبوبرقی

اکبر قاسمی یک‌لنگی^{۱*}، سیامک اسماعیل‌زاده خادم^۲

۱. گروه نانومواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

چکیده

نانومولدهای تریبوبرقی نسل جدیدی از تراگذارهای انرژی مکانیکی به انرژی برقی هستند که به دلیل عملکرد بالا توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. در این پژوهش نوع جدیدی از نانومولدهای تریبوبرقی با ساختاری منحصر به فرد ساخته شده است. این ساختار می‌تواند نوفه صوتی موجود در محیط را به انرژی برقی تبدیل کند. ساختار این نانومولد توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و وجود نانوالیاف‌های پلی‌وینیلیدن فلوراید تایید شد. علاوه، این نانومولد قابلیت استفاده به عنوان یک میکروفون خود توان را دارد. نتایج آزمون‌های صوتی نشان دادند که با قرار دادن این نانومولد در یک میدان فشار صوتی با شدت ۹۰ دسی‌بل و بسامد ۹۰ هرتز، می‌تواند ولتاژ مدار باز اوج به اوج ۷۰ ولتی تولید کند.

کلیدواژه‌ها: نانومولد تریبوبرقی، امواج صوتی، برقراری، نانوالیاف، پلی‌وینیلیدن فلوراید.

۱. مقدمه

پیشرفت‌های مدارهای مجتمع در دهه‌های گذشته باعث به وجود آمدن ابزارهای الکترونیکی بسیار کوچکی شده است. ویژگی‌هایی مانند قابل حمل بودن، قابل پوشیدن بودن، مستقل بودن و حتی قابل کاشت در بدن بودن در این وسایل به طرز بی‌سابقه‌ای در حال افزایش است. در نتیجه این ابزارها به منابعی از انرژی احتیاج دارند که نیاز به نگهداری و تعویض نداشته باشند و استفاده از منابع انرژی معمول مثل باتری‌ها مناسب نیست. با توجه به این موضوع استفاده از روش‌های ذخیره انرژی که انرژی‌های موجود در محیط را جمع‌آوری و تبدیل کنند می‌تواند به عنوان یک راه‌حل جایگزین شناخته شود. انرژی مکانیکی به دلیل در دسترس بودن به وفور، منبعی آرمانی برای ذخیره انرژی محسوب می‌شود.

در چند سال اخیر نوع جدیدی از فن‌آوری ذخیره انرژی با نام نانومولد تریبوبرقی (تنگ)^۱ به وجود آمده است که انرژی امواج مکانیکی موجود در محیط را جمع‌آوری

می‌کند. نانومولد سازوکاری جدید و منحصر به فرد دارد که از دو اثر تریبوبرقی و القای برآیستاتی^۲ استفاده می‌کند. این وسیله امتیازات بی‌همتایی در مقابل فن‌آوری‌های موجود و توسعه داده شده دارد که شامل چگالی توان بالا، وزن کم، اندازه کوچک، قیمت کم، انعطاف‌پذیری و حتی در مواردی شفافیت هم می‌شود. از زمان اولین گزارش آن در سال ۲۰۱۲، این فن‌آوری به سرعت توسعه پیدا کرده و تحقیقات بسیاری را در مقیاس جهانی به خود اختصاص داده است. اصول اولیه و حالت‌های کارکرد تشریح شده‌اند. هم‌چنین ساختارهای متنوع برای ذخیره‌سازی گسترده وسیعی از انرژی‌های مکانیکی گزارش شده است. توان خروجی به وسیله طراحی پیشرفته ساختارهای این مولدها به شدت افزایش یافته و کاربردهای قابل توجهی برای آن‌ها در زمینه انرژی و ساخت حسگر نشان داده شده است [۱-۳].

در سال‌های اخیر نانومولدهای صوتی مختلفی در پژوهشگاه‌های مختلف جهان معرفی شده‌اند که تمامی آن‌ها از یک صفحه‌ی مرتعش برای جذب امواج صوتی

* نویسنده پاسخگو: akbarghasemi2@gmail.com

^۱ TENG; Triboelectric Nanogenerator^۲ Electrostatic induction

از توری‌های فولاد (و پوشش الیاف پی‌وی‌دی‌اف^۱) عبور کرده و به صفحه‌ی متحرک برخورد می‌کنند. این صفحه در اثر فشار متغییر امواج صوتی به ارتعاش در آمده و به توری‌های بالا و پایین برخورد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ نیز مشاهده می‌شود، پوشش آلومینیومی صفحه متحرک در حین ارتعاشات به الیافی که روی توری فولادی ریسیده شده برخورد می‌کند و در طرف دیگر صفحه‌ی متحرک، الیاف پی‌وی‌دی‌اف به توری فولادی با پوشش آلومینیوم برخورد می‌کند.

در این جا لازم به ذکر است که دو ماده‌ی آلومینیوم و بسیار پی‌وی‌دی‌اف در سری‌های تریبوبرقی فاصله بسیار زیادی از یکدیگر دارند به این معنی که آلومینیوم یک ماده‌ی الکترون‌دهنده‌ی بسیار خوب در سری تریبوبرقی و پی‌وی‌دی‌اف یک ماده‌ی الکترون‌گیرنده‌ی بسیار قوی است. در نتیجه با تماس مکرر این دو ماده بارهای برق‌ایستایی بسیار زیادی روی آن‌ها شکل می‌گیرد که روند تولید انرژی در نانومولد براساس این بارهای شکل گرفته روی لایه‌ها است.

۲-۱. روند ساخت اجزای مختلف تشکیل‌دهنده نانومولد

اجزا و فرآیندهای مختلفی که برای ساخت نانومولد نیاز است را می‌توان به قسمت‌های زیر تقسیم کرد:

- توری‌های فولادی،
- پوشش آلومینیوم،
- برقاریسی الیاف پی‌وی‌دی‌اف،
- صفحه بسپاری (پلی‌اتیلن)،
- چسب و فضا ساز^۲ بین صفحات،
- نصب اجزای مختلف روی یکدیگر،

توری‌های فولادی موجود در بازار با مش ۴۰۰ برای این پروژه تهیه شد. پوشش آلومینیوم در دستگاه‌های پی‌وی‌دی موجود در آزمایشگاه اپتوالکترونیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. ضخامت لایه‌های نازک ایجاد شده در حدود ۱۰۰ نانومتر است.

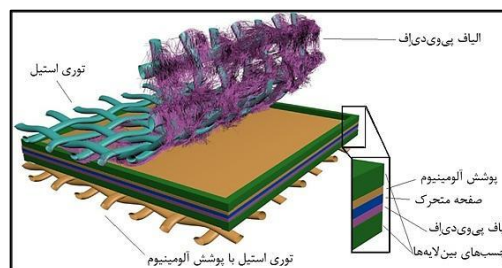
برای برقاریسی الیاف بسیار پلی‌وینیلیدن فلوراید با انجام آزمایش‌های متعدد شرایط بهینه برای الیافی یک‌دست و

استفاده می‌کنند و درصد کمی از انرژی صوتی موجود در محیط را جذب می‌کنند [۴-۹]. با این حال به دلیل وجود نداشتن سازوکارهای رقیب برای تبدیل این انرژی به برق، این نانومولدها باز هم مورد توجه هستند [۱۰-۱۱].

در این مقاله در مورد ساخت نوع خاصی از این نانومولدها صحبت شده است که از منبع انرژی صوتی برای تولید برق استفاده می‌کنند. ساختار این نانومولد به شکلی است که امواج صوتی موجود در محیط را جذب کرده و با به ارتعاش در آمدن ساختار آن اتفاقاتی رخ می‌دهد که نهایت منجر به تولید انرژی برقی می‌گردد. در ساختار این نانومولد صوتی تلاش شده که با استفاده از نانوالیاف بسیار پلی‌وینیلیدن فلوراید درصد بیش‌تری از امواج صوتی به دام بیافتند و به برق تبدیل شوند.

۲. مواد و روش‌ها

در شکل ۱ نمای کلی نانومولد به همراه قطعات مختلف آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساختار کلی نانومولد از دو توری فولادی که یکی دارای پوشش آلومینیوم است، به همراه یک صفحه‌ی متحرک میان این دو توری تشکیل شده است. صفحه‌ی متحرک خود از یک صفحه‌ی پلی‌اتیلنی که در یک طرف با الیاف پی‌وی‌دی‌اف پوشانده شده و در طرف دیگر دارای پوشش آلومینیومی می‌باشد، تشکیل شده است. قسمت‌هایی که در شکل ۱ به رنگ سبز نشان داده شده‌اند، وظیفه‌ی چسباندن و ایجاد فضا را در بین لایه‌ها دارند.



شکل ۱ ساختار کلی نانومولد به همراه اجزای تشکیل‌دهنده.

نحوه‌ی عملکرد نانومولد با توجه به توضیحاتی که در پاراگراف قبل داده شد به این شکل است که امواج صوتی

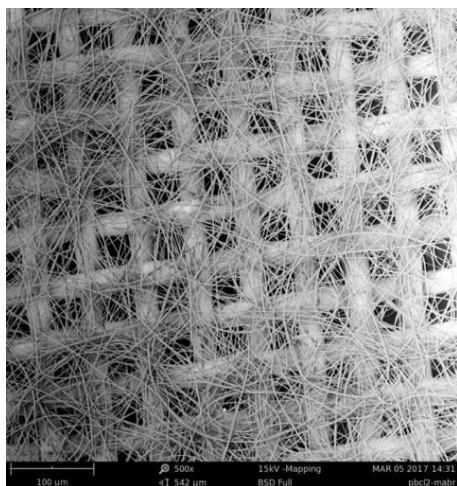
^۱ PVDF: Poly Vinylidene Fluoride

^۲ Spacers

جدول ۱ شرایط استفاده شده در آزمون‌های مختلف برقراری.

شماره	درصد وزنی بسپار	ولتاژ	دبی (میلی لیتر بر ساعت)	فاصله سوزن تا صفحه (سانتی متر)	نوع سوزن	نسبت جرمی حلال‌ها (استون/دی‌متیل فرمامید)
۱	۱۲	۱۵	۳	۱۲	۲۳	۲/۳
۲	۱۲	۱۶	۱	۱۲	۲۳	۲/۳
۳	۱۵	۱۵	۳	۱۶	۲۳	۲/۳
۴	۱۵	۱۵	۳	۲۰	۲۱	۲/۳
۵	۱۴/۴	۱۵	۱/۵	۱۵	۲۱	۷/۳
۶	۱۵	۱۵	۳	۲۰	۲۱	۱/۲

ساختاری یک‌دست و بدون گره دارند و به خوبی سطح توری فولادی را پوشانده‌اند و در عین حال فضای لازم برای عبور هوا و امواج صوتی در بین آن‌ها وجود دارد.



شکل ۲ الیاف پلی‌وینیلیدن فلوراید رسیده‌شده روی توری فولادی.

پس از آماده‌سازی قسمت‌های مختلف نانومولد باید آن‌ها را به صورت لایه لایه به یکدیگر متصل کرد. برای اتصال قسمت‌های مختلف نانومولد می‌توان از نوارهایی که در دو طرف خود، ماده‌ی چسبنده دارند استفاده کرد. این نوار چسب باید دارای ضخامتی در حدود ۵۰ میکرومتر و عرضی در حدود ۵ میلی‌متر باشد. یکی دیگر از ویژگی‌های این ماده‌ی متصل‌کننده، عایق برق بودن آن است. زیرا بین لایه‌های مختلف نباید تخلیه برقی صورت بگیرد. برای این کار چسب‌های مختلفی که در بازار وجود دارد مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت از یک نمونه‌ی مناسب چسب دوطرفه استفاده شد.

بدون گره^۱ به دست آمد. جدول ۱ شرایط آزمون‌های متعدد برقراری انجام‌شده به منظور دستیابی به شرایط بهینه برقراری را نشان می‌دهد. در نهایت شرایط به دست‌آمده برای نمونه‌ی ششم شرایط بهینه‌ای هستند که با استفاده از این مقادیر می‌توان الیافی یک‌دست با قطر ثابت به دست آورد.

در فرآیند ساخت نانومولد در دو محل نیاز به استفاده از برقراری و الیاف پی‌وی‌دی‌اف است. یکی روی صفحه‌ی متحرک (لایه‌ی نازک بسپاری) و دیگری روی یکی از توری‌های فولادی. برای برقراری روی صفحه‌ی متحرک باید در ابتدا پوشش آلومینیوم توسط دستگاه اسپراترینگ بر طرف دیگر آن ایجاد شود تا رسانایی برقی پیدا کند و امکان قرار گرفتن به عنوان یکی از الکترودهای برقراری را بیابد. ضخامت لایه‌ی الیاف ایجادشده روی این صفحه نباید از چند میکرومتر زیادتر شود چون ضخامت زیاد مانع از ارتعاشات این صفحه با نیروی اندک امواج صوتی می‌شود.

برای ایجاد الیاف روی توری فولادی، کافیسست که آن به عنوان الکتروند منفی دستگاه برقراری در مقابل سرنگ تزریق‌کننده بسپار وصل شود. در اینجا نیز ضخامت لایه‌ی الیاف نباید از چند میکرومتر بیش‌تر باشد، چون مانع از عبور هوا و امواج صوتی از بین سوراخ‌های توری فولادی می‌شود.

در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی الیاف بسپار پی‌وی‌دی‌اف روی توری فولادی با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود الیاف

¹ Bead

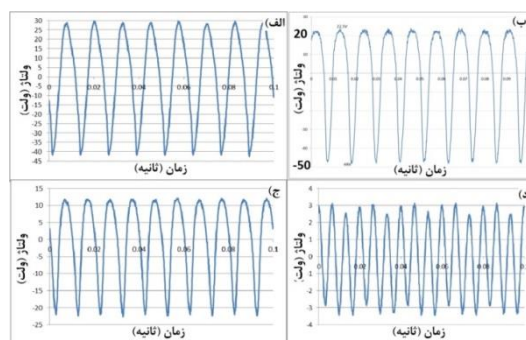
۳. نتایج

تجهیزات استفاده‌شده برای بررسی نانومولد صوتی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نانومولد با قرار گرفتن در معرض امواج صوتی می‌تواند دیودهای نورافشان را روشن کند. برای بررسی نانومولد از بسامدهای صوتی مختلفی استفاده شد.



شکل ۳ سامانه استفاده‌شده برای آزمون نانومولد صوتی.

خروجی برقی تولید شده توسط نانومولد در بسامدهای مختلف صوتی در شکل ۴ نشان داده شده است. قسمت‌های مختلف شکل به ترتیب نشان‌دهنده خروجی در بسامدهای (الف) ۸۰ هرتز، (ب) ۹۰ هرتز، (ج) ۱۰۰ هرتز و (د) ۱۵۰ هرتز هستند.



شکل ۴ ولتاژ خروجی نانومولد در بسامدهای (الف) ۸۰ هرتز، (ب) ۹۰ هرتز، (ج) ۱۰۰ هرتز و (د) ۱۵۰ هرتز.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بسامد ۹۰ هرتز که برابر با بسامد بازآوایش (تشدید) صفحه‌ی متحرک نانومولد است خروجی به میزان حداکثر خود یعنی ۷۰ ولت رسیده است. پتانسیل‌های خروجی بالا نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای نانومولد و قابلیت استفاده از آن به عنوان یک حسگر بسیار حساس است. به عنوان مثال از این نانومولد می‌توان به عنوان یک ماشه‌ی صوتی برای بسامد ۹۰ هرتز استفاده

کرد که در صورت وجود چنین بسامدی در محیط، علامت (سیگنال) خروجی ایجاد می‌گردد و می‌تواند فعالیت‌های بعدی را آغاز کند.

۴. بحث

با توجه به نتایج به دست‌آمده از خروجی نانومولد تحت فشارهای صوتی مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که امکان ساخت یک وسیله‌ی تامین انرژی برقی با استفاده از نوفه‌های صوتی موجود در محیط‌های شهری به خصوص در مکان‌های سرپشته مثل تونل‌ها که امکان استفاده از یاخته‌های خورشیدی نیست، وجود دارد. این وسایل می‌توانند دیودهای منتشرکننده نور (LED) برای علائم هشدار را روشن نگه دارند.

در مقایسه با تحقیقات مشابه انجام‌شده در این زمینه می‌توان به نتایج تحقیق مینگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ اشاره کرد [۲]. در فشارهای صوتی مشابه، خروجی این نانومولد به ۵۰ ولت اوج به اوج و جریان مدار بسته‌ی ۱۰ میکروآمپر رسیده است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر این نانومولد است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش چند نمونه نانومولد صوتی با توانایی تولید برق با ولتاژ قابل ملاحظه طراحی و ساخته شدند. در ابتدا ساختار مورد نظر با توجه به نیاز به استفاده از انرژی امواج صوتی و تحقیقات انجام‌شده قبلی در این زمینه انتخاب شد. سپس قطعات مورد نیاز تهیه و فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مورد نظر روی آن‌ها انجام شدند. در نهایت قطعات به یکدیگر متصل و نانومولد مورد نظر ساخته شد و مورد آزمون صوتی قرار گرفتند. آزمون‌ها نشان دادند که نانومولد در بسامد بازآوایش (تشدید) صفحه‌ی متحرک خود (۹۰ هرتز) قابلیت تولید پتانسیل برقی تا ولتاژ اوج به اوج ۷۰ ولت را داراست و با تغییر بسامد، این میزان کاهش می‌یابد. از این نانومولدها می‌توان به عنوان میکروفون‌های خودتوان نیز استفاده کرد.

۶. تقدیر و تشکر

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس جهت پیشبرد اهداف مورد نظر در پژوهش حاضر تقدیر و

تشکر به عمل می‌آید.

۷. تضاد منافع

این مطالعه تضاد منافع ندارد.

فهرست منابع

- recording,” ACSNano, vol. 9, pp. 4236-4243, 2015.
- [6] M. Kanik, M.G. Say, B. Daglar, A.F. Yavuz, M.H. Dolas, M.M. El-Ashry, M. Bayindir, “A motion- and sound-activated, 3d-printed, chalcogenide-based triboelectric nanogenerator,” Advanced Materials, vol. 27, pp. 2367-2376, 2015.
- [7] A.F. Yu, M. Song, Y. Zhang, Y. Zhang, L. Chen, J. Zhai, Z.L. Wang, “Self-powered acoustic source locator in underwater environment based on organic film triboelectric nanogenerator,” Nano Research, vol. 8, pp. 765-773, 2015.
- [8] S. Garain, S. Jana, T.K. Sinha, D. Mandal, “Design of in situ poled Ce³⁺-doped electrospun PVDF/graphene composite nanofibers for fabrication of nanopressure sensor and ultrasensitive acoustic nanogenerator,” ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 8, pp. 4532-4540, 2016.
- [9] J. Liu, N. Cui, L. Gu, X. Chen, S. Bai, Y. Zheng, C. Hu, Y. Qin, “A three-dimensional integrated nanogenerator for effectively harvesting sound energy from the environment,” Nanoscale, vol. 8, pp. 4938-4944, 2016.
- [10] W. Qiu, Y. Feng, N. Luo, S. Chen, D. Wang, “Sandwich-like sound-driven triboelectric nanogenerator for energy harvesting and electrochromic based on Cu foam,” Nano Energy, vol. 70, p. 104543, 2020.
- [11] C. Chen, Z. Wen, J. Shi, X. Jian, P. Li, J.T.W. Yeow, X. Sun, “Micro triboelectric ultrasonic device for acoustic energy transfer and signal communication,” Nature Communications, vol. 11, pp. 1-9, 2020.
- [1] G. Zhu, B. Peng, J. Chen, Q. Jing, Z.L. Wang, “Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications,” Nano Energy, vol. 14, pp. 126-138, 2015.
- [2] M. Yuan, C. Li, H. Liu, Q. Xu, Y. Xie, “A 3D-printed acoustic triboelectric nanogenerator for quarter-wavelength acoustic energy harvesting and self-powered edge sensing,” Nano Energy, vol. 85, pp. 105962, 2021.
- [3] F. Wang, Z. Wang, Y. Zhou, C. Fu, F. Chen, Y. Zhang, H. Lu, Y. Wu, L. Chen, H. Zhang, “Windmill-inspired hybridized triboelectric nanogenerators integrated with power management circuit for harvesting wind and acoustic energy,” Nano Energy, vol. 78, pp. 105244, 2020.
- [4] N. Cui, L. Gu, J. Liu, S. Bai, J. Qiu, J. Fu, X. Kou, H. Liu, Y. Qin, Z.L. Wang, “High performance sound driven triboelectric nanogenerator for harvesting noise energy,” Nano Energy, 2015.
- [5] X. Fan, J. Chen, J. Yang, P. Bai, Z. Li, Z.L. Wang, “Ultrathin, rollable, paper-based triboelectric nanogenerator for acoustic energy harvesting and self-powered sound

(Research Article)
**Electric energy generation from acoustic waves using triboelectric
nanogenerator**

A. Ghasemi Yeklangi^{1*}, S. Esmaealzadeh Khadem²

1. Nanomaterials Group, Material Engineering Department, Tarbiat Modares University

2. Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University

Received: 2021/06/15, Accepted: 2021/09/22

DOR 20.1001.1.23455748.1400.9.1.11.3

Abstract

Triboelectric nanogenerators are a new generation of transducers of mechanical energy to electric energy which have attracted great attention because of their high performance. In this research a new kind of triboelectric nanogenerators with a unique structure is fabricated. It can transform environment acoustic noise into electric energy. The structure of this nanogenerator is investigated with scanning electron microscopy and the existence of poly vinylidene fluoride nanofibers is verified. Furthermore, the nanogenerator has potential of use as a selfpowered microphone. Results of acoustic tests showed that putting the nanogenerator in a acoustic pressure field with 90 dB intensity and 90 Hz frequency can generate open circuit voltage of 70V peak to peak.

Keywords: Triboelectric Nanogenerator, Acoustic waves, Electrospinning, Nanofibers, Poly vinylidene fluoride.

pp. 100-104 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: akbarghasemi2@gmail.com