

مقاله علمی - پژوهشی

امکان‌سنجی کاربرد نانوذراتورهای پیزوالکتریک برای تأمین انرژی پیهاده‌ها با استفاده از ارتعاشات

نصراه آستان^۱، داود محمدزمانی^{۲*}، محمد غلامی پرشکوهی^۳ و ابراهیم ابراهیمی^۴

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ استادیار؛ و دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران
۴- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۷

چکیده

کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین نیازهای حال و آینده بسیار بااهمیت است. ارتعاشات منبع خوبی برای تأمین انرژی، به ویژه از طریق نانوذراتورهای پیزوالکتریک است. برای تأمین بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز پیهاده‌ها می‌توان از قابلیت مواد پیزوالکتریک سبک، نرم و قابل انعطاف از جمله PVDF بهره گرفت. این پژوهش به منظور بررسی امکان کاربرد نانو الیاف پلیمری پیزوالکتریک PVDF/ ZnO-RGO در تأمین انرژی مورد نیاز اجزای مختلف پیهاد اجرا شد. در این مطالعه ابتدا از طریق فرآیند الکتروریسی نانو الیاف پلیمری اقدام و پس از آن نانوذراتور پیزوالکتریک ساخته و سرانجام مقدار انرژی الکتریکی تولیدی و قابلیت استفاده از آن در پیهادهای چند محور ارزیابی شد. به منظور نصب نانوذراتور پیزوالکتریک روی بازوی پیهاد چند محور، طرحی ارائه شد. بیشترین ولتاژ تولیدی در یکی از نمونه نانوذراتورهای مورد بررسی ۵۶۰ میلی ولت و در نمونه بزرگ‌تر ۱۸۷۰ میلی ولت در شرایط آزمایشگاهی و در بسامد ۲۳ هرتز به مدت ۵ دقیقه بود. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد با کاربرد نانوذراتورهای پیزوالکتریک امکان تأمین بخشی از انرژی الکتریکی مورد استفاده پیهاده‌ها وجود دارد و می‌توان آن را ارتقا داد.

واژه‌های کلیدی

ارتعاشات، الکتروریسی، انرژی‌های تجدیدپذیر، نانو الیاف PVDF/ ZnO-RGO

مقدمه

ویژگی‌های مواد نانو، نسبت سطح به حجم بالای آنهاست. در این مواد تولید الکتریسیته با سطح مواد پیزوالکتریک نسبت مستقیمی دارد و از این‌رو قابلیت خوبی برای کاربرد در برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک خواهند داشت. همواره منابع انرژی نامحدودی در محیط وجود دارند که از جمله آنها ارتعاشات

امروزه برداشت انرژی از منابع طبیعی با کاربرد مواد هوشمند پیزوالکتریک، مهندسی سبز، مواد نانوپیزوالکتریک برای تولید انرژی‌های پاک از طریق فناوری نانو و کاهش ضایعات شیمیایی و اقتصادی مورد توجه است (Keshavarz Jaokar et al., 2019). یکی از

مکانیکی است (Maftuni & Kamali, 2018). ارتعاشات منبع خوبی برای تولید انرژی از طریق مواد نانو پیزوالکتریک هستند (Salek Soltani & Salek Soltani, 2013; Asgharzadeh *et al.*, 2015) که می‌توانند با اهداف مختلف به کار روند (Hosseini, 2017). ثابت شده است که از طریق برداشت انرژی در ساختارهای ارتعاشی میکرو می‌توان انرژی الکتریکی را در ابعاد میلی‌وات ایجاد کرد (Singh & Middleton, 2007).

پهپادها (پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور)^۱ هواپیماهای بدون سرنشینی هستند که با اهداف نظامی و غیرنظامی کاربردهای زیادی دارند. سیستم عامل پهپاد دارای مقدار محدودی الکتریسیته به منظور پرواز در طول زمان است. از طرفی، باتری بزرگ‌تر باعث افزایش جرم کل و مصرف بیشتر انرژی می‌شود. بر این اساس مطالعه روی منابع جدید تأمین انرژی پهپادها همواره از موضوعات اصلی پژوهش‌های مرتبط بوده است. در این میان قابلیت مواد نانو در ژنراتورهای پیزوالکتریک و تأمین بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز پهپاد برای افزایش زمان پرواز و شارژ باتری پهپادها حتی به مقدار کم، مورد توجه قرار گرفته است.

تغییر شکل در ساختار مواد پیزوالکتریک به تولید ولتاژ می‌انجامد. ارتعاشات مکانیکی می‌تواند منجر به تغییر شکل مواد پیزوالکتریک شود. اثر پیزوالکتریک پدیده‌ای است که بعضی از مواد در پاسخ به انرژی مکانیکی از خود ولتاژ الکتریکی تولید می‌کنند. مواد مختلفی در طبیعت و صنعت وجود دارند که خاصیت پیزوالکتریک دارند. پلی وینیلیدن فلئوراید (PVDF) پلیمری است نیمه بلوری با خواص فروالکتریک و پیزوالکتریک که انعطاف‌پذیر و پرکاربرد است

(Mahmoodi *et al.*, 2016; Ghahari *et al.*, 2021). مواد افزودنی به PVDF یکی از روش‌های افزایش فاز بتا (Thakur *et al.*, 2018) و خاصیت تولید ولتاژ بیشتر است که با افزودنی‌های آلی/غیرآلی به نانوذرات در فرآیند الکترورسی حاصل می‌شود. در سال ۲۰۰۶ تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی بر اساس نانوسیم‌های ZnO پیشنهاد شد و این مواد نانوذراتور پیزوالکتریک نامیده شدند (Wang & Song, 2006). از نانوالیاف الکترورسی شده ZnO/PVDF در نقش حسگر پیزوالکتریک با موفقیت استفاده شده است که در آن بیشترین میزان ولتاژ خروجی یک میلی‌ولت بود (Sharaf Khani & Kaukabi, 2018)، همچنین، حسگرهای فشار مبتنی بر لایه نازک پیزوالکتریک PVDF-TrFE (تری فلئورواتیلن- پلی وینیلیدن فلئوراید) ساخته شد (Singh & Sharma, 2013).

در زمینه کاربرد مواد پیزوالکتریک در پهپادها پژوهش‌های زیادی شده است. افزایش تعداد یا ظرفیت باتری برای افزایش مدت زمان عملیات پهپادها عملی نیست و استفاده از انرژی خورشیدی نیز محدودیت‌هایی دارد. در مقابل، کاربرد و توسعه نانوذراتورها به عنوان منبع تأمین انرژی در سیستم‌های کنترل هوشمند بررسی شده است (Jin *et al.*, 2019). به کارگیری مواد پیزوالکتریک در کاربردهای وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین پیشنهاد شده است (Erturk *et al.*, 2009). یک میکروژنراتور پیزوالکتریک برای تأمین انرژی بخش‌های الکترونیکی میکروپهپاد طراحی شده است (Yeganeh *et al.*, 2018). ماگوتاکس و همکاران (Magoteaux *et al.*, 2008) توانستند با به کارگیری دستگاه‌های پیزوالکتریک روی پهپادی کوچک

مکانیکی است (Maftuni & Kamali, 2018). ارتعاشات منبع خوبی برای تولید انرژی از طریق مواد نانو پیزوالکتریک هستند (Salek Soltani & Salek Soltani, 2013; Asgharzadeh *et al.*, 2015) که می‌توانند با اهداف مختلف به کار روند (Hosseini, 2017). ثابت شده است که از طریق برداشت انرژی در ساختارهای ارتعاشی میکرو می‌توان انرژی الکتریکی را در ابعاد میلی‌وات ایجاد کرد (Singh & Middleton, 2007).

پهپادها (پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور)^۱ هواپیماهای بدون سرنشینی هستند که با اهداف نظامی و غیرنظامی کاربردهای زیادی دارند. سیستم عامل پهپاد دارای مقدار محدودی الکتریسیته به منظور پرواز در طول زمان است. از طرفی، باتری بزرگ‌تر باعث افزایش جرم کل و مصرف بیشتر انرژی می‌شود. بر این اساس مطالعه روی منابع جدید تأمین انرژی پهپادها همواره از موضوعات اصلی پژوهش‌های مرتبط بوده است. در این میان قابلیت مواد نانو در ژنراتورهای پیزوالکتریک و تأمین بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز پهپاد برای افزایش زمان پرواز و شارژ باتری پهپادها حتی به مقدار کم، مورد توجه قرار گرفته است.

تغییر شکل در ساختار مواد پیزوالکتریک به تولید ولتاژ می‌انجامد. ارتعاشات مکانیکی می‌تواند منجر به تغییر شکل مواد پیزوالکتریک شود. اثر پیزوالکتریک پدیده‌ای است که بعضی از مواد در پاسخ به انرژی مکانیکی از خود ولتاژ الکتریکی تولید می‌کنند. مواد مختلفی در طبیعت و صنعت وجود دارند که خاصیت پیزوالکتریک دارند. پلی وینیلیدن فلئوراید (PVDF) پلیمری است نیمه بلوری با خواص فروالکتریک و پیزوالکتریک که انعطاف‌پذیر و پرکاربرد است

با بررسی مطالعات مشخص شد که افزایش طول عمر، استحکام و انعطاف‌پذیری حسگر در برابر شرایط مختلف ارتعاشی و عوامل محیطی، میزان انرژی تولیدی، انتخاب مواد، بستر و هندسه پیزوالکتریک از مواردی مهمی است که پژوهشگران پیشین برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد داده‌اند. در این مطالعه سعی شد کاربرد مواد نانوالیاف انعطاف‌پذیر با قابلیت بهبود خاصیت پیزوالکتریک و با کاربرد خاص برای مولتی‌روتورها به عنوان جنبه نوآوری پژوهش مورد توجه قرار گیرد. این پژوهش با هدف بررسی امکان کاربرد نانو الیاف پلیمری پیزوالکتریک PVDF/ZnO-RGO با رویکرد به کارگیری ارتعاشات بدنه پیهپاد در تأمین انرژی مورد نیاز اجزای مختلف پیهپاد اجرا شد.

مواد و روش‌ها

اولین گام در اجرای پژوهش حاضر ساخت نانوژنراتورهای انعطاف‌پذیر و سبک بر پایه نانوالیاف پلیمری PVDF/ZnO-RGO (Jaleh & Jabbari, 2014) بود. پس از آن، با بررسی میزان ولتاژ خروجی از نانوژنراتور، میزان برداشت انرژی و امکان‌سنجی کاربرد آن در پیهپادهای چند موتوره تجزیه و تحلیل شد.

فرآیند ساخت نانوالیاف PVDF/ZnO-RGO

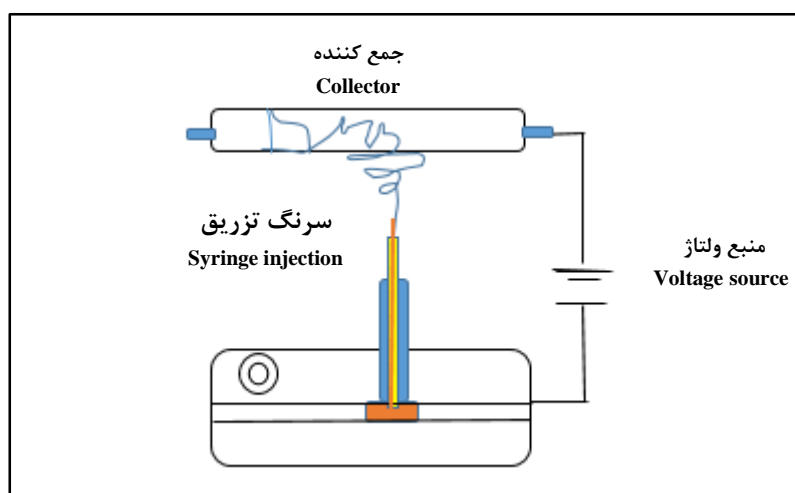
از آنجا که تهیه نانوژنراتوری نازک و با وزن کم برای کاربرد در پیهپاد مورد نظر بود، برای تولید الیاف بسیار نازک از محلول پلیمری روش الکتروریسی (شکل ۱) استفاده شد که روشی ارزان و ساده است. نانوالیاف پلیمری PVDF/ZnO-RGO از طریق فرآیند الکتروریسی تهیه شد. از ترکیبات پلی

نیروی اضافی برای پیهپاد تأمین کنند. برای بهینه‌سازی طراحی برداشت‌کننده انرژی ارتعاشات موتور پیهپاد بررسی‌هایی صورت گرفته است. در یک نمونه، از حسگر PVDF روی بال پیهپاد کوچک برای تنظیم عملکرد آیرودینامیک آن استفاده شد (Jieh Yang *et al.*, 2007). در پژوهشی دیگر، برای بررسی امکان برداشت انرژی الکتریکی از طریق ارتعاش و انرژی خورشیدی در یک مینی پیهپاد، از دو واحد پیزوالکتریک در ریشه بال‌ها و در بدنه برای برداشت انرژی از ارتعاشات بال و حرکات بدنه هواپیما با نصب یک بازوی پیزوالکتریک یکسرگردار^۱ استفاده شد (Anton, 2011). در نمونه دیگر، با کاربرد مواد پیزوالکتریک در یک پیهپاد در بسامد ارتعاشی ۲۸/۴ هرتز در پایه سازه، ۱/۵ میلی‌وات توان به طور مستقیم از لایه‌های پیزوالکتریک به باتری فیلم نازک منتقل شد و در نتیجه ۰/۳۶۲ میلی‌آمپر ساعت برق ذخیره شد (Anton *et al.*, 2012). در پژوهشی، یک نانوژنراتور تریبولکتریک الهام گرفته از لانه زنبور برای برداشت انرژی بال بیومکانیکی و پیهپاد استفاده شد (Tao *et al.*, 2021). همچنین از مواد مرکب هوشمند پیزوالکتریک (Kopsaftopoulos *et al.*, 2015) و از مواد PZT در ژنراتور پیزوالکتریک (Nyamayoka *et al.*, 2017) به منظور برداشت انرژی در پیهپادها استفاده شده است. در یک مطالعه، عملکرد سیستم برداشت انرژی در پیهپاد هگزاکوپتر ارزیابی شد. مواد پیزوالکتریک در یکی از بازوهای پیهپاد قرار گرفت و بسامد و دامنه سیگنال تولید شده آن به ترتیب ۵۰ هرتز و ۵ ولت تعیین شد (Koszewnik & Oldziej, 2019).

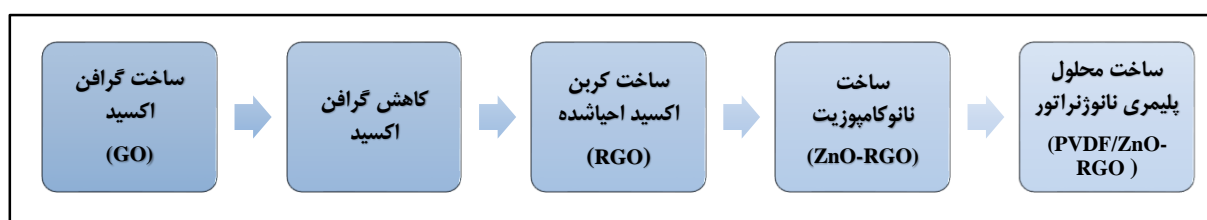
1- Cantilever Beam

برای ساخت نانو ذرات گرافن اکسید (GO)، گرافن اکسید احیا شده (RGO) و نانوکامپوزیت (ZnO-RGO)، از نانوذرات گرافن اکسید احیا شده (RGO) و اکسید روی (ZnO) استفاده شد. نانوکامپوزیت (ZnO-RGO) با پلیمر PVDF برای تهیهٔ محلول پلیمری به کار رفت. مراحل ساخت نانو پلیمر PVDF/ZnO-RGO در شکل ۲ نشان داده شده است.

وینیلیدن فلئوراید شرکت Kynar، نانوذرات اکسیدروی شرکت US Research Nanomaterials، دی‌متیل فرمامید (DMF)، استون (CH_3COCH_3)، اسکوربیک‌اسید ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$)، سدیم هیدروکسید (NaOH)، گرافیت، پتاسیم پرمنگنات (KMnO_4)، هیدروژن پراکسید (H_2O_2)، سولفوریک‌اسید (H_2SO_4)، نیتریک‌اسید (HNO_3) و هیدروکلرید اسید (HCl) ساخت شرکت Merck استفاده شد.



شکل ۱- طرح‌واره فرآیند الکترورسی
Fig. 1- Electrospinning process schematic



شکل ۲- ترتیب مراحل ساخت محلول پلیمری
Fig. 2- Steps of making a polymer solution

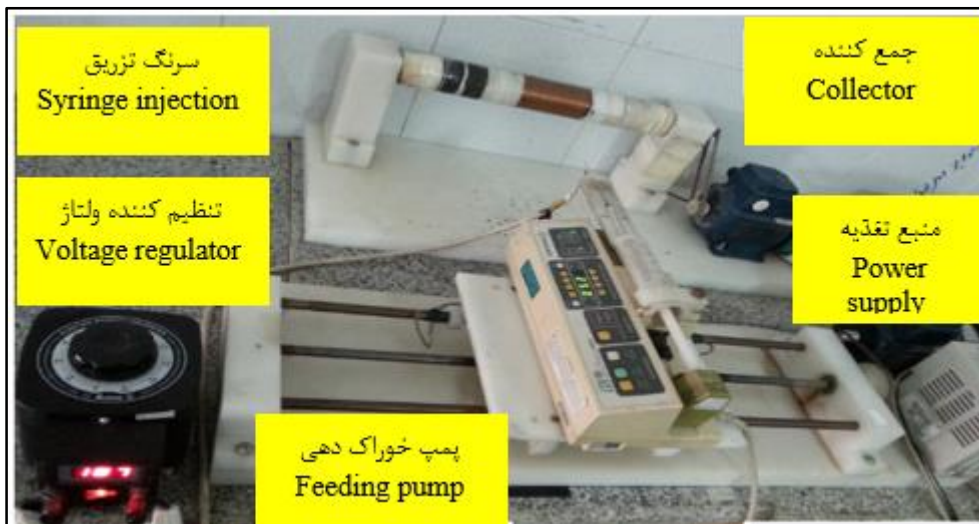
عامل احیاگر استفاده شد. پس از آن، RGO ساخته شد (Ashkaran & Amini, 2018). برای اندازه‌گیری‌های جرمی مواد از ترازوی دیجیتال با 0.0001 میلی‌گرم دقت بهره‌گیری شد. دستگاه گریز از مرکز مورد استفاده،

گرافن اکسید با روش اصلاح شده هامرز^۱ ساخته شد (Jaleh & Jabbari, 2014; Hajar *et al.*, 2018). کاهش GO به منظور از بین رفتن گروه‌های عملگر و کاهش عیوب ساختاری بود. از این‌رو، از اسکوربیک‌اسید برای احیا به عنوان

1- Hamerz

برای یکنواخت شدن محلول، از امواج فراصوت استفاده شد. برای ساخت PVDF/ZnO-RGO از تجهیزات نشان داده شده در شکل ۳ استفاده و مراحل الکترورسی نیز در شکل ۴ شرح داده شده است.

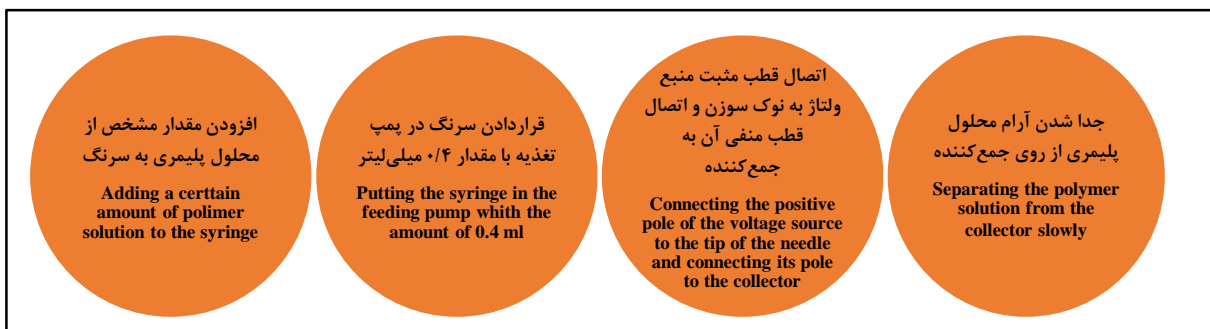
مدل Universal بود. برای هم‌زدن از هم‌زن مغناطیسی مدل آلمانی IKA RH basic برای تهیه نانوکامپوزیت (ZnO-RGO) استفاده شد. در تهیه نانو کامپوزیت، دمای خشک کردن ۱۰۰ درجه سلسیوس از طریق آون مدل Memmert انتخاب و



شکل ۳- تجهیزات مورد استفاده در فرآیند الکترورسی
Fig. 3- Equipment used in the electrospinning process

محلول پلیمری (wt%) ۱۲/۵۰، غلظت نانوذره (wt%) ۳/۵، نسبت نانوذره نانوکامپوزیت (ZnO-RGO) ۱/۷۵، ولتاژ الکترورسی ۱۷ کیلوولت در شرایط دمای اتاق و رطوبت ۲۳ درصد بود.

سرعت تغذیه محلول پلیمر ۰/۴ میلی‌لیتر در ساعت و فاصله افشانک تا جمع‌کننده ۲۰ سانتی‌متر ثابت در نظر گرفته شد. شرایط بهینه پارامترهای اولیه برای رسیدن به بیشینه ولتاژ نانوژنراتور از طریق آزمون و خطا، با غلظت

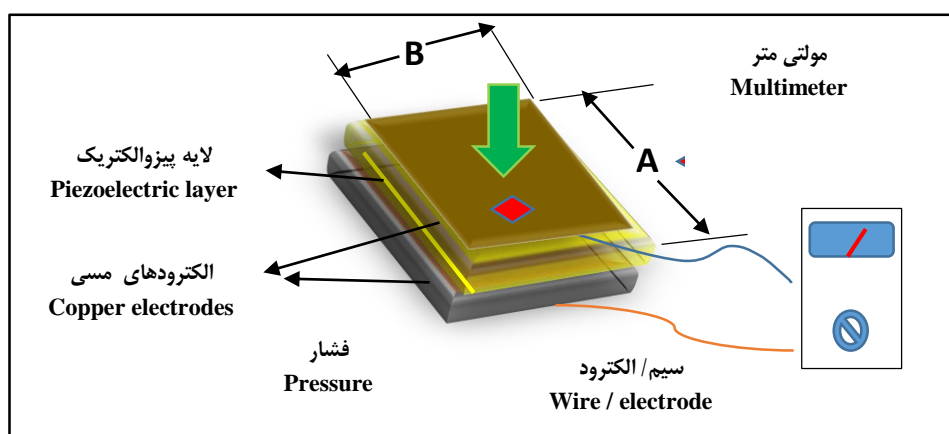


شکل ۴- شرح مراحل الکترورسی
Fig. 4- Description of electrospinning steps

فرآیند ساخت نانوژنراتور

انتهای آزاد آن و اندازه 2×1 و توسط دو سیم انتقال مسی به اندازه 0.3×1 سانتی‌متر ساخته شد. برای جلوگیری از جدا شدن نانوالیاف‌ها روی الکترودها از چسب کاغذی استفاده شد. چسب طوری به کار رفت که از اتصال کوتاه دو سر الکتروود جلوگیری شده و منجر به تخلیه بار الکتریکی نشود. دستگاه ارتعاش مکانیکی دست‌ساز با تعداد ضربه‌های ۳۰۰ دور در دقیقه، به نانوژنراتور ضربه زده ارتعاش تولید می‌کرد. طی مدت زمان ۵ دقیقه، مقدار ولتاژهای دستگاه چند موتور متر ثبت شد. ساختار نانوژنراتور فشاری در شکل ۵ نشان داده شده است. طول و عرض و ضخامت الکترودهای مسی در حالت اول $0.05 \times 0.5 \times 2$ و در حالت دوم در نانوژنراتور یک‌سرگردار $0.05 \times 0.3 \times 1$ بود. در تمام حالت‌های نانوژنراتور ضخامت نانوساختار پیزوالکتریک 0.5 میلی‌متر و ابعاد طولی و عرضی به اندازه الکترودها بود.

پس از تهیه محلول پلیمری، فیلم‌های نازکی از آن به عنوان ماده فعال نانوژنراتورها به کار گرفته شد. دستگاه مولد برق توسط غشای نانوالیاف بین دو صفحه فلزی قرار داده شد (Fang et al., 2011). در پژوهش‌های مختلف، نانوژنراتورهایی با ابعاد متفاوت ساخته شده است. در این پژوهش، نانوژنراتوری سبک با قابلیت نصب روی بازوی پهنادهای متوسط مد نظر بود از این‌رو نانوژنراتورهای ساخته شده به دو اندازه و حالت برای آزمایش در نظر گرفته شدند. در حالت اول نانوژنراتور فشاری با سطح مقطع مربع $(A \times B)$ و دو اندازه با مشخصات 3×3 سانتی‌متر و 5×5 سانتی‌متر (Koc et al., 2020) ساخته شد که توسط دو الکتروود مسی به اندازه 0.5×2 سانتی‌متر برای انتقال الکتریسیته در دو طرف نانوالیاف به کار می‌رفت (شکل ۵). در حالت دوم نانوژنراتور به صورت یک تیر یک‌سر گردار با یک جرم ۳ گرم در



شکل ۵- طرح‌واره ساختار نانوژنراتورهای پیزو الکتریک

Fig. 5- Schematic structure of piezoelectric nanogenerators

خلال آزمایش‌ها به منظور تحت ارتعاش قرار دادن نانوژنراتور ساخته شده، از یک دستگاه ارتعاش‌ساز مکانیکی دست‌ساز بهره‌برداری شد.

در نانوژنراتورهای بر پایه نانوساختار پیزوالکتریک، دستگاه‌های برداشت انرژی معمولاً با ارتعاشات نوع ضربه‌ای، تحت فشار قرار می‌گیرند. از این‌رو، در

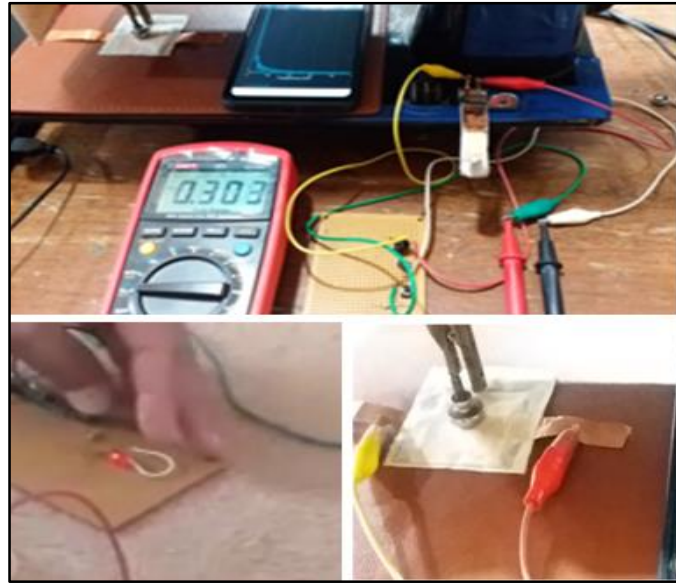
می‌تواند محل مناسبی برای نصب نانوژنراتورهای انعطاف‌پذیر و سبک پیزوالکتریک باشد. پس از اتمام ساخت، نانوژنراتور روی بازوی یک پهپاد کوادروتور استفاده شد. قاب کوادکوپتر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS تجزیه و تحلیل شد. در این پژوهش دو مکان برای نصب نانوژنراتورهای پیزوالکتریک مطابق شکل ۷ پیشنهاد شد تا نصب و بررسی وضعیت ارتعاشی و تولید ولتاژ برای پهپاد مورد آزمون و ارزیابی قرار گیرد. برای همین منظور ابتدا نانوژنراتور ساخته شده در شرایط آزمایشگاهی بررسی شد. در حالت اول همان‌طور که از شکل ۷-الف مشخص است نانوژنراتور پیزوالکتریک روی بازوی پهپاد در قسمت میانی، جایی که بیشترین کرنش وجود دارد، به صورت یکپارچه با بازو نصب شد. شکل ۷-ب نیز نمونه‌ای از نانوژنراتور پیزوالکتریک یک‌سرگردار با جرم نوک در انتهای آن را در قسمت زیر بازوی پهپاد نمایش می‌دهد.

همان‌گونه که اشاره شد، نانوژنراتورها به دو صورت فشاری و به شکل تیر یک‌سرگردار بررسی شدند. نانوژنراتور فشاری برداشت‌کننده روی دستگاه ارتعاش‌ساز دستی در محل مناسب از زیر ثابت و ضربات فشاری به طور منظم و پیوسته در راستای عمود به آن وارد شد و به صورت هم‌زمان نانوژنراتور یک‌سرگردار هم در قسمت دیگری از دستگاه ارتعاش‌ساز نصب شد که هم‌زمان توسط همان دستگاه ارتعاش‌ساز نیز تحت ارتعاش قرار گرفت. ارتعاشات توسط دستگاه ارتعاش از طریق اعمال ضربه فعال شده توسط یک محور خارج از مرکز که به یک الکتروموتور متصل بود تأمین شد. زمانی که منبع ارتعاش شروع به ارتعاش می‌کرد، توسط نانوژنراتور پیزوالکتریک یک‌سرگردار و همچنین

برداشت‌کننده‌های انرژی ارتعاشی باید بتوانند به بسامد کم و شتاب کم ارتعاشاتی که معمولاً در محیط وجود دارد نیز پاسخ دهند. از طرفی، پهپادها به دلیل ساختار شاسی که معمولاً از جنس سخت فیبروکربن هستند نیاز به تجهیزات با ارتعاش کم داشته و بنابراین ارتعاشات با دامنه و بسامد پایین دارند. به این دلیل از دستگاه ارتعاش‌سازی با بسامد پایین برای تحت ارتعاش قرار دادن نانوژنراتورها استفاده شد. برای آنکه سطوح ارتعاش تشخیص داده شود از قابلیت گوشی‌های هوشمند و برنامه‌های متناسب با اندازه‌گیری ارتعاش بهره‌گیری شد. در این پژوهش، از گوشی هوشمند مدل POCO m3 با جعبه ابزار ارتعاش‌سنج نرم‌افزار تحت اندروید Physics toolbox نسخه 2021.09.30 استفاده شد. داده‌های ارتعاشی با میزان نمونه‌گیری ۲۰۰ هرتز دریافت شد. مجموعه آزمایشی تهیه شده در شکل ۶ نشان داده شده است. به منظور بررسی ریخت‌شناسی سطح با هدف کنترل خواص پیزوالکتریک اندازه و ریخت‌شناسی FESEM نانوالیاف تحلیل و بررسی شد. برای تصویربرداری از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) در دانشگاه کردستان استفاده شد.

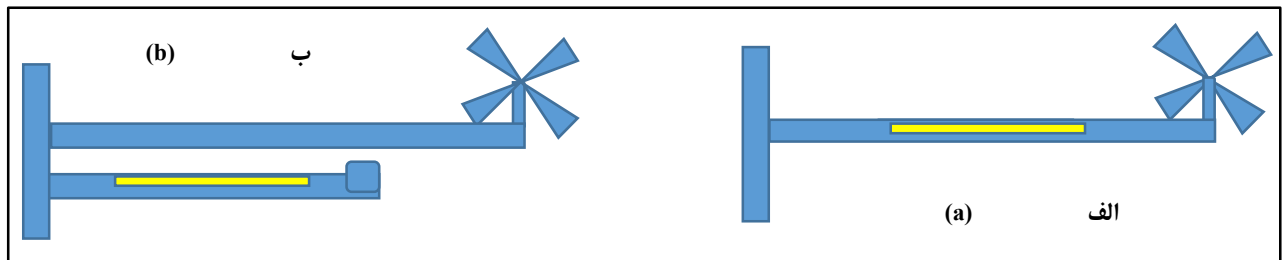
در پهپادهای چند موتوره بازوهای وجود دارد که در قسمت انتهایی آنها محل نصب موتورهای بدون جاروبک است تا نیروی بالابرنده برای پهپاد را فراهم کنند. قسمت‌های مختلف پهپاد و از جمله بازوها تحت ارتعاش قرار می‌گیرند. این بازوها در زمان فعالیت پهپاد تحت ارتعاش ناشی از موتور قرار می‌گیرند و در آنها کرنش ایجاد می‌شود. در صورتی که مسایل آیرودینامیکی در نظر گرفته شود داخل، رو و زیر بازوهای پهپادهای چند موتوره

نانوژنراتور فشاری تولید برق شروع می‌شود. برداشت‌کننده، ارتعاش را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و پس از آن ولتاژ از طریق الکترودها انتقال یافت. در هر یک از حالت‌های آزمایشی در نظر گرفته شده در خصوص نانوژنراتورها تعداد ۱۰ نانوژنراتور برای داده‌برداری در نظر گرفته و ولتاژ تولیدی آن در مدت زمان ۵ دقیقه اندازه‌گیری و ذخیره شد.



شکل ۶- مجموعه آزمایشی برداشت انرژی از نانوژنراتور

Fig. 6. Experimental stop of energy extraction from nanogenerators



شکل ۷- محل پیشنهادی برای نصب نانوژنراتور پیزوالکتریک روی بازوی پهپاد (الف) نصب نانوژنراتور به صورت یکپارچه روی بازوی پهپاد و (ب) نصب نانوژنراتور به صورت یک تیر یک‌سرگیردار در زیر بازوی پهپاد

Fig. 7- Proposed location for installing a piezoelectric nanogenerator on the UAV arm a) The nanogenerator is integrated on the UAV arm and b) The nanogenerator is installed as a single beam under the UAV arm

به صورت هم‌زمان دارا بوده و به علت تنوع ساختاری مورد توجه است. برای کوت کردن بر اکسید RGO به کار رفت. اگر ولتاژ اعمالی افزایش یابد، نیروهای الکترواستاتیکی در مخروط تیلور تعدیل و در نتیجه موجب پایداری بیشتری در تولید نانو الیاف در

با توجه به اهمیت نانوذرات در افزایش خاصیت پیزوالکتریکی نانوژنراتورها، در این پژوهش از RGO در ترکیب با ZnO به منظور تهیه نانوالیافی، سبک، انعطاف‌پذیری و با خاصیت پیزوالکتریکی بالا استفاده شد. ZnO دو خاصیت نیم رسانایی و پیزوالکتریک را

$C =$ ظرفیت نانوژنراتور؛ و $V_{oc} =$ ولتاژ مدار باز تولید شده الکترودهای نانوژنراتور. نانوژنراتور به خازن متغیری متصل شد که توسط ارتعاشات مکانیکی هدایت می‌شد. ولتاژ تولید شده پس از یکسوسازی در شارژر خازن ذخیره گردید. یکی دیگر از پارامترهای بسیار مهم ظرفیت خازن بود که با رابطه ۲ به دست آمد:

$$V_{oc} = \frac{Q}{C} \quad (2)$$

که در آن،

$Q =$ بار روی الکترودهای نانوژنراتور که به دلیل ارتعاشات مکانیکی ایجاد می‌شود. این رابطه، رابطه بین بار ذخیره شده و ولتاژ مدار باز تولید شده است. مقادیر V_{oc} به بسامد نانوژنراتورها بستگی دارد (Murillo et al., 2016). از آنجا که بیشترین جابه‌جایی و کرنش در بسامد تشدید رخ می‌دهد، بنابراین بیشینه ولتاژ نیز در این حالت تولید می‌گردد (Maftuni & Kamali, 2018)

ارتعاشات مکانیکی ایجاد شده توسط دستگاه ارتعاش‌ساز دستی موجب تغییر شکل و کرنش در مواد فعال نانوژنراتور گردید که منجر به تولید ولتاژ شد. کیفیت، جنس، ساختار نانوژنراتور، نیروی ضربات اعمالی، ابعاد نانوژنراتور و نیز مدت زمانی که نانوژنراتور تحت تحریک قرار می‌گرفت، بر ولتاژ تولید شده مؤثر بود. به منظور یافتن بسامد رزونانس آزمایش‌ها چندین مرتبه تکرار شد. از آنجایی که انرژی آنی تولید شده توسط یک ماشین برداشت پیزوالکتریک برای تأمین انرژی قسمت‌های مختلف الکترونیکی پهنپایه کافی نیست، یک محیط ذخیره‌سازی همچون باتری یا خازن اغلب برای

فرآیند الکتروروسی می‌شود. هرچند افزایش بیش از حد آن موجب ناپایداری محلول نوک سوزن می‌شود و اثر سوء بر تولید ولتاژ خواهد گذاشت. با افزایش غلظت محلول پلیمری و با در نظر گرفتن ویسکوزیته مطلوب، میزان ولتاژ خروجی نانوژنراتور تا حدی افزایش می‌یابد. افزایش غلظت نانوذرات منجر به افزایش ولتاژ خروجی و بهبود خواص پیزوالکتریکی می‌شود و اثر مثبتی بر افزایش فاز β خواهد داشت که این موضوع موجب بهبود خاصیت پیزوالکتریکی پلیمر PVDF می‌شود. نسبت نانوذرات باید به گونه‌ای باشد که ضمن جلوگیری از افزایش ضخامت نانوالیاف، خواص پیزوالکتریک الیاف PVDF را بهبود بخشد.

برای محاسبه تاثیر ارتعاش بر عملکرد پیزوالکتریک نانوژنراتور و نیز اثر تغییر شکل در آن، ولتاژ الکتریکی تولید شده اندازه‌گیری شد. برای ثبت مقدار ولتاژ خروجی در نانوژنراتور از یک مدار الکتریکی طراحی شده استفاده شد. مقدار انرژی ذخیره شده (EC) که به وسیله اثر پیزوالکتریک به دست می‌آید برابر است با انرژی ذخیره شده. در این پژوهش توسط یک دستگاه چند موتوره متر مدل UT139C ساخت کشور چین، ۱۰ نمونه از نانوژنراتورهای تهیه شده در مدت زمان ۵ دقیقه تحت ارتعاش توسط دستگاه ارتعاش دست‌ساز با بسامد ۲۳ هرتز به عنوان بسامد رزونانس مورد بررسی قرار گرفت. مقدار EC از رابطه ۱ برابر است با:

$$Ec = \frac{1}{2} * c * Voc^2 \quad (1)$$

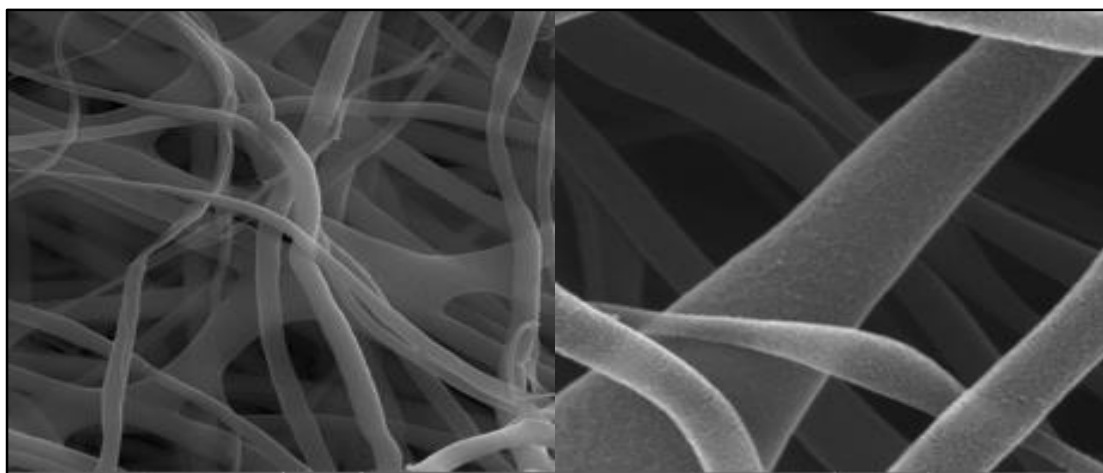
که در آن،

بررسی ریخت‌شناسی سطح به منظور کنترل خواص پیزوالکتریک اندازه و ریخت‌شناسی FESEM نانوالیاف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که مشاهده می‌شود لایه‌های تولید شده از این نانو الیاف دارای شکل یکنواخت و خوبی هستند. اضافه کردن نانوذرات به ماده، منجر به تغییر شکل ریخت‌شناسی شد و ناهمواری‌های سطحی نمایان گردید. در شکل ۹ مشاهده می‌شود که قطر نانوالیاف پلیمری تهیه شده در مقایسه با نانوالیاف PVDF خالص کمتر است. قرار داشتن نانوذرات فلزی و رسانای جریان الکتریسیته در محلول باعث افزایش توزیع یکنواخت بار سطحی بر سطح قطرات پلیمری تشکیل شده در نوک افشانک و در نهایت موجب افزایش تأثیر میدان الکتریکی روی قطره شد. افزایش میدان الکتریکی روی قطره‌ها منجر به کشیده‌تر شدن آنها در هنگام فرآیند الکترورسی گردید.

ذخیره موقت انرژی برداشت شده قبل از استفاده به کار می‌رود. ۱۰ نمونه از نانوژنراتورهای با ابعاد ۳×۳ سانتی‌متری آزمایش شدند و آزمایش‌ها برای هر نمونه سه بار تکرار شده است و میزان ولتاژ تولیدی در بسامد ثابت ۲۳ هرتز و مدت زمان ۵ دقیقه ذخیره شد. برای برداشت انرژی الکتریکی از نانوژنراتور، یک مدار متشکل از یک خازن با ظرفیت ۴۷ میکروفاراد، یک مقاومت ۱ کیلو اهمی و یک LED استفاده شد. همچنین به منظور نمایش ولتاژ خروجی از یک دستگاه چند موتوره‌متر از طریق اتصال دو الکتروود نانوژنراتور به دو سر چند موتوره‌متر استفاده شد.

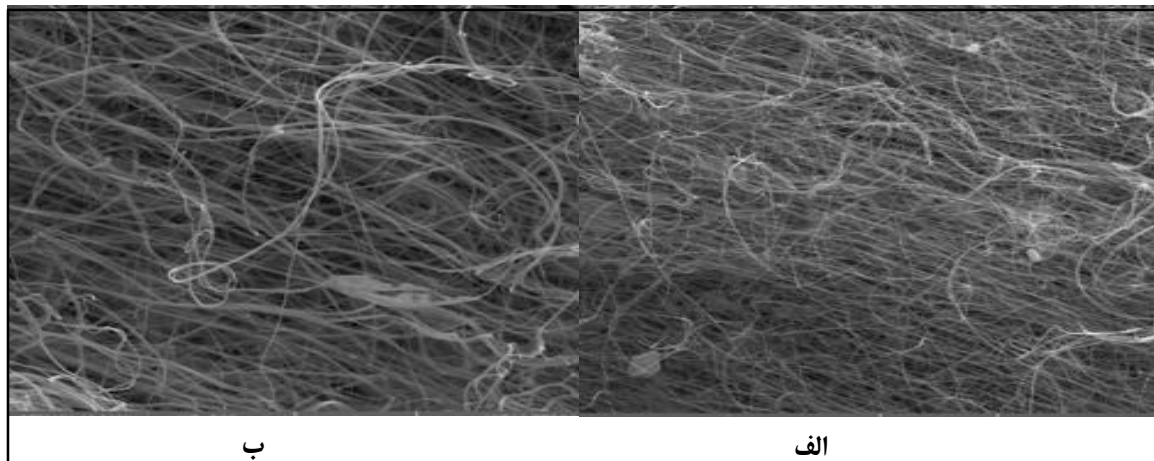
نتایج و بحث

در شکل ۸ نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) مدل نشان داده شده است. در خصوص شکل‌های مربوط به



شکل ۸- SEM نانو الیاف PVDF تولید شده در شرایط بهینه الکترورسی

Fig. 8- SEM PVDF nanofibers produced under optimal electrospinning conditions

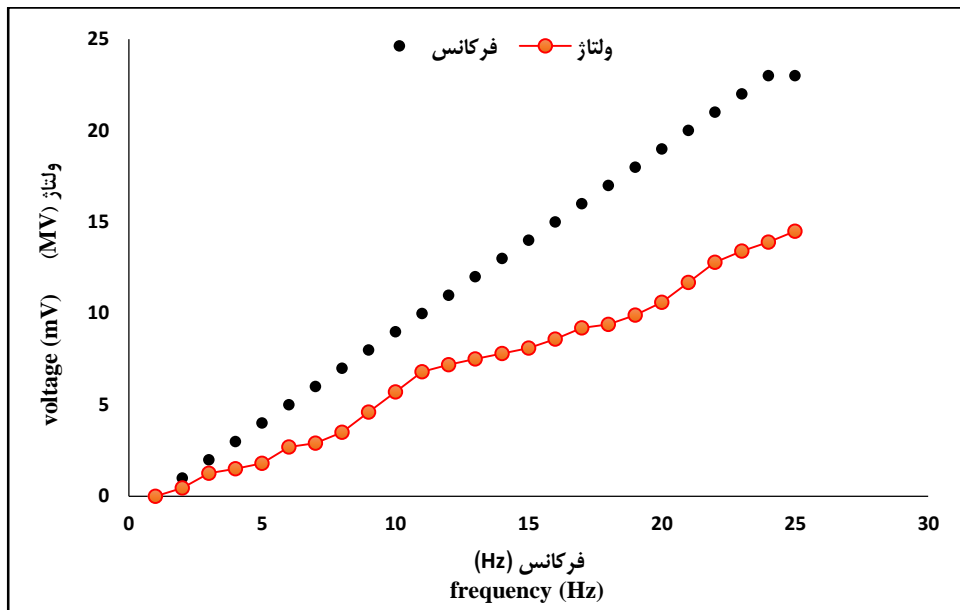


شکل ۹- الف) نانو الیاف PVDF خالص و ب) نانو پلیمر کامپوزیتی
 Fig. 9- a) Pure PVDF nanofibers and b) composite nanopolymers

با افزایش بسامد ضربه به ۵ هرتز، ولتاژ خروجی ۲/۷ میلی‌ولت شد. سپس با افزایش بسامد به ۱۵ هرتز، ولتاژ خروجی ۸/۶ میلی‌ولت بود. همان‌گونه که پیش‌تر عنوان شد سطح تأثیر جسم مرتعش‌کننده از پارامترهای مهم بر میزان ولتاژ تولیدی است. لذا با افزایش سطح برخورد، ولتاژ بیشتری تولید خواهد شد. در این پژوهش بیشترین ولتاژ تولیدی در بسامد ۲۳ هرتز در مدت زمان ۵ دقیقه برای یکی از نمونه نانوژنراتورها ۳×۳ سانتی‌متری مقدار ۵۶۰ میلی‌ولت و میانگین ولتاژ تولیدی در این حالت ۵۲۱/۴ میلی‌ولت بود. همچنین در یکی از نمونه ژنراتورهای ۵×۵ سانتی‌متری میزان ۱۸۷۰ میلی‌ولت و میانگین ولتاژ خروجی تمام نانوژنراتورها ۱۶۱۲/۹ میلی‌ولت بود که منجر به روشن شدن چراغ LED مدار شد. در جدول ۱ نتایج داده‌برداری با نانوالیاف‌های کامپوزیتی در تعدادی از نانوژنراتورها برای هر حالت نشان داده شده است.

در خصوص پهنادهای چندموتوره تجزیه و تحلیل قاب کوادکوپتر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS نشان داد که حداکثر جابه‌جایی روی روتور پهناد (۱/۵ میلی‌متر) و در مرکز بال قاب پهناد رخ داد (بین ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌متر) (Redde *et al.*, 2018). همچنین در شبیه‌سازی کوادکوپتر در حالت فرود نتایج نشان داد بیشترین جابه‌جایی روی محل قرارگیری روتور و در مرکز بازوی پهناد رخ داده است (Sawalakhe & Shaaikh, 2020).

در شکل ۱۰ میانگین ولتاژ تولیدی نانوژنراتور ۵×۵ سانتی‌متری در بسامدهای مختلف ارتعاشی نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودار این شکل مشاهده می‌شود با افزایش بسامد ضربه، ولتاژ خروجی افزایش یافته است. بسامد ضربه تأثیر قابل توجهی بر ولتاژ خروجی داشت. همان‌گونه که مشخص است تحت ضربه‌های فشاری با بسامد ۱ هرتز، میانگین قله ولتاژ خروجی ۰/۴۴ میلی‌ولت بود.



شکل ۱۰- نمودار میانگین ولتاژ تولیدی نانوجنراتور ۵×۵ سانتی‌متری در بسامدهای مختلف

Fig. 10- Diagram of the average output voltage of a nanogenerator (5*5) at different frequency

جدول ۱- نتایج داده‌برداری با نانوالیاف‌های کامپوزیتی برای ساخت نانوجنراتورها

Table 1- Data collection with composite nanofibers for fabrication of nanogenerators

ولتاژ خروجی (میلی‌ولت) ژنراتور ۵×۵ سانتی‌متری	ولتاژ خروجی (میلی‌ولت) ژنراتور ۳×۳ سانتی‌متری	بسامد ارتعاش (هرتز)	زمان (دقیقه)	شماره آزمایش
The output voltage (mV) of the 5×5cm generator	The output voltage (mV) of the 3×3cm generator	Frequency (Hz)	Time(min)	Test No.
1850	524	23	5	1
1240	540	23	5	2
1250	498	23	5	3
1670	555	23	5	4
1870	523	23	5	5
1545	480	23	5	6
1730	494	23	5	7
1849	550	23	5	8
1650	560	23	5	9
1475	490	23	5	10

دولایه PVDF-TrFE انعطاف‌پذیر با اکسیدگرافن (GO) بهبود یافت (Bhavanasi *et al.*, 2014; Bhavanasi *et al.*, 2016). نتایج مطالعه مشابهی با به‌کارگیری نانو ژنراتور ترکیبی پلی‌وینیلیدین فلوراید (PVDF)، روی نانومیله‌های اکسید (NRs) (ZnO) و باریم تیتانات (BaTiO₃) نانوکره (BT NS) توسط الکتروریسی نشان داد که افزودن BT NS و ZnO

اضافه کردن GO کاهش یافته سبب باعث بهبود خاصیت پیزوالکتریک و افزایش فاز β پلیمر در مقایسه با پلیمر خالص شده است. نانوساختارهای اکسید روی توسط نیروهای بسیار کوچک، ضریب پیزوالکتریک بیشتر و خصوصیات مکانیکی برجسته‌تری را از خود نمایش دادند. عملکرد برداشت انرژی پیزوالکتریک فیلم‌های

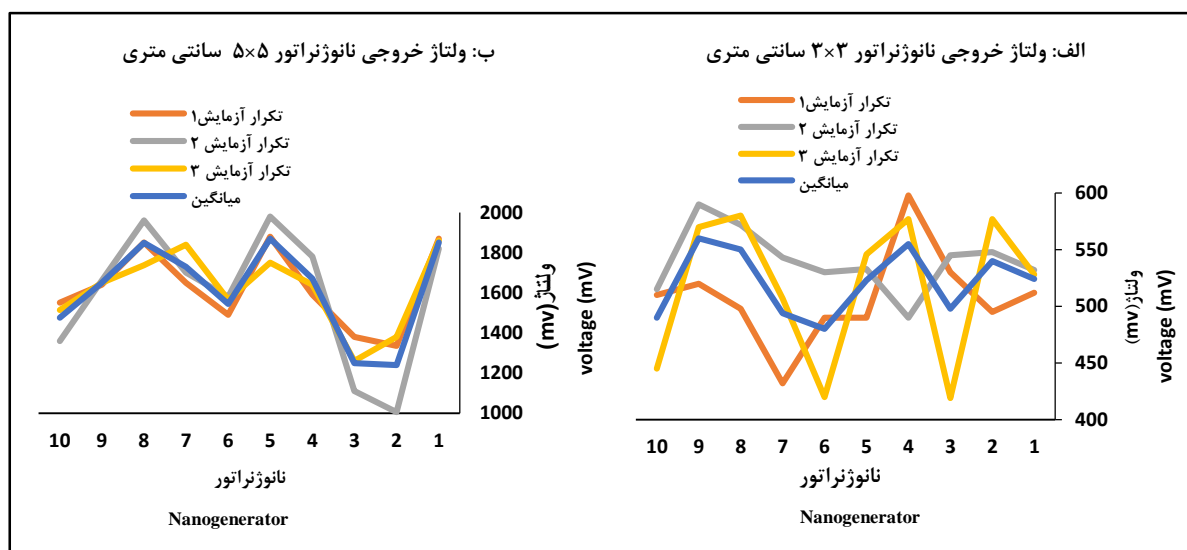
افزایش نانوذرات موجب افزایش فاز β و در نهایت افزایش ولتاژ خروجی خواهد بود (Parangusan *et al.*, 2017). در جدول ۲ نتایج تعداد دیگری از پژوهش‌های انجام شده برای مقایسه آمده است. نتایج این مطالعه با نتایج پژوهش‌های انجام شده مرتبط همسو بود.

NR به ماتریس PVDF زنجیره‌های پلیمری بلور فاز β بهبود یافت و خروجی ۱۲ ولت در یک نیروی اعمالی ۱/۵ نیوتن بود (Sabry & Hussein, 2019). همچنین ولتاژ نانوکامپوزیت پلیمری (PVDF-HFP/CoZnO) ۲/۸ ولتی در مقایسه با نمونه (PVDF-HFP) ۱۲۰ میلی‌ولتی نشان داد

جدول ۲- نتایج تعدادی از پژوهش‌ها

Table 2- The results of a number of studies conducted

توان در مقاومت Power in resistance	اندازه سطح مقطع نانوفیبر و سطح کار Nanofiber cross-sectional area size and work area	ضخامت نانو فیبر Nanofiber thickness	میزان توان power	بسامد frequency	نیرو force	روش method	مواد material	نویسنده(گان) authors
-	4 سانتی‌متر	30 میکرومتر	8.8 میلی‌وات	-	11.6 نیوتن	الکتروریسی	PVDF و نانو ذرات فلزی	Mahdavi <i>et al.</i> , 2016
-	4×1 سانتی‌متر	200 میکرومتر	1 میلی‌وات	30 هرتز	-	الکتروریسی	ZnO/PVDF	Sharaf Khani & Kokbi, 2018
-	2.5×40×40 میلی‌متر	1100 نانومتر	13.2 وات	-	2000 پاسکال	الکتروریسی	PVDF	Garcia <i>et al.</i> , 2018
1 مگاها	4×4 سانتی‌متر	-	79.71 میلی‌وات	15 هرتز	-	الکتروریسی	Pvdf+10 vol.% PZT	Koç <i>et al.</i> , 2020
1 مگاها	6.8 سانتی متر مربع	14 میکرومتر	30 وات	-	0.3 مگاپاسکال	الکتروریسی	Pt-PVDF NFs	Lu <i>et al.</i> , 2020
-	2×2 سانتی‌متر	140 میکرومتر	2.21 وات	5 هرتز	34 میلی‌متر بر معکوس ثانیه	الکتروریسی	PVDF nanofibre	Fang <i>et al.</i> , 2011
4 میکرووات در 10 مگاها	2.5×2.5 سانتی‌متر	18-20 میکرومتر	11 وات	2 هرتز	-	الکتروریسی	graphene/BaTiO3/PVDF	Shi <i>et al.</i> , 2018
0.364 میلی-آمپر در 1 ساعت	-	-	1.5 میلی‌وات	28.4 مگاهرتز	-	ترکیبی	PZT-5A bracket by Kapton/MEC thin-film batteries	Anton <i>et al.</i> , 2012



شکل ۱۱- ولتاژ خروجی نانوجنراتورها در مدت زمان ۵ دقیقه

(الف) ولتاژ خروجی ژنراتور ۳×۳ سانتی متری و (ب) ولتاژ خروجی ژنراتور ۵×۵ سانتی متری

Fig. 11- Output voltage diagram of nanogenerators in 5 minutes

a) Generator output voltage 3 × 3 cm, b) Generator output voltage 5 × 5 cm

آزمایش ۲ به میزان ۱۹۶۰ میلی‌ولت در مدت زمان ۵ دقیقه تحت ارتعاش بود. نتایج آزمایش نشان داد که چنانچه سطح مؤثر نانوجنراتور در معرض بارهای ارتعاشی افزایش یابد، ولتاژ بیشتری تولید خواهد شد. همین‌طور هرچه مدت زمان بیشتری نانوجنراتور در بسامد رزونانس مورد ارتعاش و ضربه قرار داده شود مقدار ولتاژ بیشتری در خازن ذخیره خواهد شد که از آن می‌توان برای کاربردهای مختلف پهنپاد استفاده کرد.

نتایج بررسی‌ها نشان داد که علاوه بر ضربه که موجب ایجاد اختلاف پتانسیل در نانوجنراتور شد، تغییر شکل نانوجنراتور از جمله خم و راست شدن آن نیز منجر به تولید ولتاژ می‌شود. با ثابت بودن دامنه و بسامد ارتعاشات در دو حالت نانوجنراتور ساخته شده اگر مساحت نانوجنراتورها دو برابر شود، ولتاژ به دست آمده حدود سه برابر بیشتر می‌شود. از این‌رو رابطه مستقیمی بین سطح مورد تاثیر ارتعاش و نتیجه ولتاژ خروجی به دست آمده در دامنه‌های

در نمودارهای شکل ۱۱، میزان ولتاژ تولیدی در هر یک از حالت‌های نانوجنراتور نشان داده شده است. برای مثال، در خصوص نانوجنراتور شماره ۱ (بخش الف در شکل) در تکرار اول (خط قرمز رنگ نشان داده شده روی نمودار) در مدت زمان ۵ دقیقه و بسامد ۲۳ هرتز ولتاژ تولیدی ۵۱۲ میلی‌ولت بود. در تکرار آزمایش دوم (خط مشکی رنگ نشان داده شده روی نمودار) ۵۳۲ میلی‌ولت و در تکرار آزمایش سوم ۵۲۸ میلی‌ولت برق تولید شد که میانگین ولتاژ تولیدی نشان داده شده روی نمودار با خط آبی میزان ۵۲۴ میلی‌ولت بود. در خصوص سایر نانوجنراتورها به تفکیک تکرار آزمایش میزان ولتاژ تولیدی نمایش داده شده است. مطابق نمودار، بیشترین ولتاژ تولیدی در بین نانوجنراتورهای ۳×۳ سانتی‌متری، مقدار ۵۹۰ میلی‌ولت در نانوجنراتور شماره ۹ و تکرار آزمایش ۲ به دست آمد. بیشترین ولتاژ تولید شده در بین نانوجنراتورهای با ابعاد ۵×۵ سانتی‌متری مربوط به نانوجنراتور شماره ۸ در تکرار

پژوهش همچنین نشان داد بین سطح مورد تاثیر ارتعاش و نتیجه ولتاژ خروجی به دست آمده در دامنه‌های ارتعاشی ثابت رابطه مستقیمی وجود دارد. از آنجا که پارامترهای زیادی بر میزان ولتاژ خروجی نانوذراتورها تأثیرگذار است می‌توان با ترکیب حالات مختلف، بیشترین میزان ولتاژ را به دست آورد. نتایج نشان داد که نانوذراتورهای مبتنی بر PVDF در ترکیب با نانوساختارهای اکسید روی به دلیل جرم و حجم کم و سهولت کاربرد می‌توانند به عنوان گزینه-ای مناسب در حسگرها، ترکیب در ساخت اجزای مختلف پهنادهای چند موتوره و به منظور بهره‌گیری از توان تولیدی الکتروسیسته آنها استفاده شوند.

ارتعاشی ثابت وجود دارد. نتایج آزمایش نشان داد با گذشت زمان مقدار بیشتری از ولتاژ توسط نانوذراتورهای پیزوالکتریک به دست آمده و ذخیره می‌شود. همچنین با موازی کردن ژنراتورها با یکدیگر ولتاژ تولیدی افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج پژوهش‌ها و نتایج به دست آمده از این پژوهش، بازوهای پهنادهای چند موتوره از ظرفیت خوبی برای اضافه کردن برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک بر پایه نانوساختارهای سبک و منعطف در هر بازوی پهنادار برخوردار هستند. نتایج این

مراجع

- Anton, S. R. (2011). Multifunctional piezoelectric energy harvesting concepts (Ph. D. Thesis), Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA.
- Anton, S. R., Erturk, A., & Inman, D. J. (2012). Multifunctional unmanned aerial vehicle wing spar for low-power generation & storage. *Journal of Aircraft*, 49(1), 1-10.
- Ashkaran, A., & Amini, M. (2018). *Synthesis and Characterization of Graphene and Graphene Oxide Nanosheets. Proceedings of the 13th Iranian Physical Society Dense Matter Conference*. Feb. 1-2, Tehran, Iran. (in Persian)
- Asgharzadeh, M., Jahani, K., Kianpour, A., & Sadeghi, M. (2015). Investigation of energy absorption from trapezoidal beam vibrations with a piezoelectric layer using the distributed parameters method. *Modares Mechanical Engineering*, 14(15), 96-102.
- Bhavanasi, V., Kumar, V., Parida, K., Wang, J., & Lee, P. (2016). Enhanced piezoelectric energy harvesting performance of flexible PVDF-TrFE bilayer films with graphene oxide. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8, 521-529.
- Erturk, A., Renno, J. M., & Inman, D. J. (2009). Modeling of piezoelectric energy harvesting from an L-shaped beam-mass structure with an application to UAVs. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 20(5), 529-544.
- Fang, J., Wang, X., & Tong, L. (2011). Electrical power generator from randomly oriented electrospun (polyvinylidene fluoride) nanofiber membranes. *Journal of Materials Chemistry*, 21, 11088-11091. doi: 10.1039/c1jm11445j.
- Garcia, C., Trendafilova, I., de Villoria, R. G., & del Rio, J. S. (2018). Self-powered pressure sensor based on the triboelectric effect and its analysis using dynamic mechanical analysis. *Nano Energy*, 50, 401-409.
- Ghahari, M., Hassanzadeh, M., & Bidaki, S. M. (2021). *Synthesis of graphene-zinc oxide nanocomposites to improve the beta phase in electrospun polyvinylidene fluoride nanofibers. Proceedings of the 12th*

- National Conference on Textile Engineering*. June 9, Faculty of Textile Engineering, Yazd University. (in Persian)
- Hajar, Z., Sultan Ali, S., Tayyabi, Sh., & Masoumi, M. (2018). Investigation of synthesized grapheme oxide with hummers method and its application as Hydrodesulphurization reaction catalyst support. *Journal of Applied Researches in Chemistry (JARC)*, 12(3), 71-78. (in Persian)
- Hassan Koko, H. A. (2019). Multifunctional Piezoelectric System for a Mini UAV (*M. Sc. Thesis*), Mechatronics Engineering, Sudan University of Science and Technology Postgraduate Collage.
- Hosseini, S. M. (2017). Preparation and characterization of piezoelectric nanocomposite of polyvinylidene fluoride nanoclay/carbon nanotube by electrospinning method (*Ph. D. Thesis*), Iran Polymer and Petrochemical Research Institute, Process Research Institute - Plastics Group. (in Persian)
- Jaleh, B., & Jabbari, A. (2014). Evaluation of reduced graphene oxide/ZnO effect on properties of PVDF nanocomposite films. *Applied Surface Science*, 320, 339-347.
- Keshavarz Jaokar, R., Mohammad Khanlu, H., & Dehghani, R. (2019). *Vibration analysis of energy harvesting models due to aeroelastic behavior of aircraft wings*. *Proceedings of the 8th International Conference on Acoustics and Vibrations*. Dec. 4-5, Shahid Beheshti University, Iran. (in Persian)
- Koc, M., Paral, M., & San, O. (2020). Fabrication & vibrational energy harvesting characterization of flexible piezoelectric nanogenerator (PEN) based on PVDF/PZT. *Polymer Testing*, 90, 106695. doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106695.
- Kopsaftopoulos, F., Nardari, R., Hung Li, Y., Wang, P., Ye., B., & Chang, F. (2015). *Experimental identification of structural dynamics & aeroelastic properties of a self-sensing smart composite wing*. *Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM)*. Sep. 1-3. Stanford, CA, USA. doi:10.12783/SHM2015/163.
- Koszewnik, A., & Oldziej, D. (2019). Performance assessment of an energy harvesting system located on a copter. *The European Physical Journal Special Topics*, 228 (7), 1677-1692. doi:10.1140/epjst/e2019-800128-3.
- Lu, L., Jiang, C., Hu, G., Liu, J., & Yang, B. (2021). Flexible noncontact sensing for human-machine interaction. *Advanced Materials*, 33(16), 2100218.
- Lung-Jieh, Y., Cheng-Kuei, H., Chao-Kang, F., Shih, H. M., Feng, G. H., & Gao, M. W. (2007). *Smart flapping wings with a PVDF sensor to modify aerodynamic performance of a micro UAV*. *Transducers- Proceedings of the International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*. June 10-14. Lyon, France. doi:10.1109/SENSOR.2007.4300480.
- Magoteaux, K., Sanders, B., & Sodano, H. A. (2008). *Investigation of an energy harvesting small unmanned air vehicle*, *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*. No. 6928, Article ID: 692823.
- Mahdavi, A., Yousefzadeh, M., & Lati, M. (2016). *Investigation of piezoelectric performance of nanofiber and film pressure sensors of metal nanocomposites made of poly Vinyliden fluoride*. *Fourth Specialized Conference on Nanotechnology in Electricity and Energy Industry*, March 12, Tehran, Iran. (in Persian)
- Mahmoodi, M., Patriot, F., Riahi Chaleshtari, H., & Mehvari, R. (2016). Comparison of car engine speed sensor with PVDF sensor in XU7 engine and vibration energy perception. *Journal of Engine Research*, 44, 15-1.
- Maftuni, N., & Kamali, Sh. (2018). Piezoelectric phenomenon, energy harvesting and introduction of the relevant module in Comsol Multiphysics software. *Mechanical Engineering*, 26(115), 73-78.

- Murillo, N., Maudes, J., Perez-Marquez, A., Ortiz, J., & Aranguren, G. (2016). *Optimization of energy harvesting concepts from vibration by piezoelectric actuator design. Proceedings of the 8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM)*, July 5-8. Bilbao, Spain.
- Nyamayoka, L. T., Adewumi, G. A., & Inambao, F. L. (2017). Design of a prototype generator based on piezoelectric power generation for vibration energy harvesting. *Journal of Energy in Southern Africa*, 28(4), 32-40. doi: <http://dx.doi.org/10.17159/2413-3051/2017/v28i4a2054>.
- Parangusan, H., Ponnamma, D., & Al-Maadeed, M. A. A. (2017). Stretchable electrospun PVDFHFP/Co-ZnO nanofibers as piezoelectric nanogenerators. *Scientific Reports*, 8, 754. doi:10.1038/s41598-017-19082-3. 1-11.
- Redde, G., Kulkarni, P., Patil, P., Khedkar, D., & Chopade, P. J. (2018). Vibration analysis on farm & propeller of drone. *International Journal of Advance Research in Science & Engineering*, 7(5), 23-32.
- Sabry, R. S., & Hussein, A. M. (2019). PVDF: ZnO/BaTiO₃ as high out-put piezoelectric nanogenerator. *Polymer Testing Journal*, 20, doi:10.3390/s20185214.
- Salek Soltani, K., & Salek Soltani, S. (2013). Electricity generation from environmental energy by nanogenerators. *Nanotechnology Monthly*, 12(5), 28-33.
- Sawalakhe, P. V., & Shaaikh, J. A. (2020). Simulation & analysis of a quadrotor UAV while Landing, *International Journal of Recent Technology & Engineering (IJRTE)*, 8(6), 1-9.
- Sharaf Khani, S., & Kaukabi, M. (2018). Electrospun ZnO / PVDF nanofibers in the role of piezoelectric sensor. *Nanoscale*, 4(4), 357-363.
- Shi, K., Sun, B., Huang, X., & Jiang, P. (2018). Synergistic effect of graphene nanosheet and BaTiO₃ nanoparticles on performance enhancement of electrospun PVDF nanofiber mat for flexible piezoelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 52, 153-162.
- Singh, U. K., & Middleton, R. H. (2007). Piezoelectric power scavenging of mechanical vibration energy, Australian Mining Technology Conference, Oct. 2-4. Swan Valley, WA.
- Singh, A., & Sharma, V. (2013). Design analysis & construction of energy harvesting. *Aviation*, 17(4), 145-149. doi:10.3846/16487788.2013.861230.
- Tao, K., Chen, Z., Yi, H., Zhang, R., Shen, Q., Wu, J., Tang, L., Fan, K., Fu, Y., Miao, J., & Yuan, W. (2021). Hierarchical honeycomb-structured electret/triboelectric nanogenerator for biomechanical & morphing wing energy harvesting. *Nano-Micro Letters*, 13(1), 2150-5551.
- Thakur, P., Kool, A., Hoque, N. A., Bagchi, B., Khatun, F., Biswas, P., & Das, S. (2018). Superior performances of in situ synthesized ZnO/PVDF thin film based self-poled piezoelectric nanogenerator and self-charged photo-power bank with high durability. *Nano Energy*, 44, 456-467.
- Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312, 242-246.
- Yeganeh, R., Baqerzadeh Shahri, S. A., & Salehi, M. (2018). *Experimental and numerical investigation of energy harvesting from harmonic loading on the wing of a micro-UAV with different aspect ratio. 26th Annual International Conference of the Iranian Society of Mechanical Engineers*. May 24-27, Semnan University, Semnan, Iran.

Research Paper

Feasibility Study of using Piezoelectric Nanogenerators to Power UAVs by Vibrations

N. Astan, D. Mohammadzamani*, M. Gholami Pareshkoohi and E. Ebrahimi

*Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran. Email: dr.dmzamani@gmail.com

Received: 6 June 2022, Accepted: 9 October 2022

[http://doi: 10.22092/AMSR.2022.358840.1419](http://doi:10.22092/AMSR.2022.358840.1419)

Abstract

The use of renewable energy is very important in meeting current and future needs. Vibrations are a good source of energy, especially through piezoelectric nanogenerators. Light, soft and flexible piezoelectric materials such as PVDF can be used to supply part of the electrical energy required by drones. This study was conducted to investigate the possibility of using PVDF/Zno-RGO piezoelectric polymer polymer nanofibers in supplying the required energy of different UAV components. In this study, first, polymer nanofibers were constructed through electrospinning process and then piezoelectric nanogenerator was constructed. Finally, the amount of electrical energy produced and its usability in multi-axis drones were evaluated. A plan was proposed to install a piezoelectric nanogenerator on the arm of a multi-axis drone. The highest output voltage in one of the samples of nanogenerators was 560 mV and in the larger sample was 1870 mV in laboratory conditions and at a frequency of 23 Hz for 5 minutes. The results of this study showed that by using piezoelectric nanogenerators, it is possible to supply part of the electrical energy used by drones and it can be upgraded.

Keywords: Electrospinning, PVDF/Zno-RGO Nanofibers, Renewable Energies, Vibrations



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)