



## کاربرد نانوذراتورهای پیزوالکتریک در پایش وضعیت یک پهپاد نصراله آستان<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

### چکیده:

تشخیص زود هنگام ناهنجاری و خرابی‌های پهپادها به منظور تصمیم‌گیری و افزایش قابلیت اطمینان آنها ضروری است. در این مقاله، به بررسی کاربرد نانوذراتورهای پیزوالکتریک در پایش وضعیت پهپادها پرداخته شده است. سامانه پایش وضعیت ارائه شده مبتنی بر کاربرد یک نانوذراتور پیزوالکتریک بر روی بازوی یک پهپاد چند موتوره محلول پاش کشاورزی بود. پس از تهیه نانوذراتور، نسبت به نصب آن بر روی یک بازوی پهپاد اقدام شد. طیف ارتعاشی پهپاد در سه حالت برخاستن، شناوری و نشستن به دست آمد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد نانوپیزوالکتریک‌های سبک و منعطف در حسگرهای مورد استفاده برای پایش وضعیت پهپادها و همچنین در ترکیب ساختار اجزای مختلف پهپادها چند موتوره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: پهپاد، پایش وضعیت، نانو پیزوالکتریک، تشخیص عیب

### مقدمه:

اعتماد برای انجام عملیات همه‌گیر پهپادها ضروری است. (Mohammed, et al. 2014) چرا که نقص یک واحد پروانه موتور تنها به راحتی ممکن است منجر به سقوط شود. (Valavanis, 2017) امروزه کاربرد مواد پیزوالکتریک در پایش وضعیت، نظارت و تعمیرات و سلامت سازه‌ها به طور وسیعی رواج یافته است. تشخیص زود هنگام ناهنجاری و خرابی‌های ماشین‌ها و سازه‌های مختلف به منظور تصمیم‌گیری و افزایش قابلیت اطمینان آنها لازم است. مواد پیزوالکتریک موادی هستند که اگر تحت تنش قرار گیرند در آنها بار الکتریکی تولید می‌گردد. در طبیعت سرامیک‌های پیزوالکتریک و پلیمرهای پیزوالکتریک وجود دارند. پلیمرهای پیزوالکتریک سبک، انعطاف‌پذیر و دارای خاصیت پیزوالکتریکی مناسبی هستند. از جمله مواد پلیمری با خاصیت پیزوالکتریکی PVDF می‌باشد. می‌توان از طریق مواد نانو خاصیت پیزوالکتریکی PVDF را افزایش داد. کاربرد مواد پیزوالکتریک پلیمری PVDF در منسوجات پوشیدنی هوشمند به منظور پایش وضعیت بدن انسان افزایش یافته است. از جمله مزیت پیزوالکتریک‌های پلیمری، خاصیت انعطاف‌پذیری، وزن کم و اتصال مکانیکی مناسب آنهاست که می‌توان در قطعات منعطف مورد استفاده قرار بگیرند. همچنین مواد پیزوالکتریک پلیمری استرس متمرکز کمتری بر ساختارهای آسیب‌پذیر ایجاد می‌کنند. لذا این مواد می‌تواند گزینه مناسبی در پایش وضعیت

در سالهای اخیر از هواپیماهای بدون سرنشین (پهپاد) در زمینه‌های مختلف، در امداد و نجات، تصویربرداری و فیلمبرداری، نقشه‌برداری، اکتشاف معدن، کشاورزی، باغداری، پست و جابه‌جایی، ارزیابی و بازرسی، محیط زیست ماهی‌گیری و چوپانی، تجسس و اطلاعات، فتوگرامتری، مریخ‌نوردی، ایجاد و اختلال ارتباط، باستان‌شناسی، مراقبت بهداشتی، سنجش از دور، سرگرمی و تفریح استفاده شده است. مهندسين، روزنامه‌نگاران، فیلمبرداران، کشاورزان، کارمندان، کمک‌های اولیه، نیروی انتظامی و ارتش در حال کشف چگونگی انجام استفاده از این فناوری جدید برای بهبود فعالیت‌های کاری خود هستند. (Pourpanah, et al. 2016) پهپادها یک سامانه عامل هوایی دارند که انواع تجهیزات دوربین و حسگرهای مختلف را می‌توان نصب کرد این وسایل نقلیه چند موتوره در طیف گسترده‌ای از اندازه‌ها موجود هستند. در مقایسه با وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین بال ثابت، پهپادهای چند روتوره، به دلیل توانایی عمودی برخاستن و فرود، سهولت استقرار و عملکرد، حرکت در ارتفاع کم و افزایش وضوح نظارت از مزایای بسیاری برخوردار است. (Intaratep, et al. 2016) محبوبیت روزافزون وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین میکرو چند موتوره منجر به نگرانی در مورد ایمنی عملکرد آنها شده است. (Clothier and Walker, 2006) یک سازوکار ایمنی قابل

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران  
نویسنده مسؤول: nasastan@yahoo.com



تشخیص عیب حسگرها و محرکها در پهپاد هگزا روتور از طریق معادلات دیفرانسیل و شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شد. (Saeed et al, 2020) روش شناسی و تجزیه و تحلیل ارتعاشی یک هواپیمای بدون سرنشین و کنترل از راه دور در پژوهشی دیگر انجام شد. (Dino Krantz, 2017) در پژوهشی منابع ارتعاش روی یک چارچوب ضد ارتعاش بر روی پهپاد مورد بررسی قرار گرفت. (Li et al, 2017) در پژوهشی دیگر به منظور تشخیص عیب و پایش وضعیت پهپاد با پردازش سیگنال، سیگنال‌های لرزش برای شناسایی و بومی سازی تیغه‌های آسیب دیده با استفاده از مجموعه درخت تصمیم‌گیری تصادفی استفاده شد. با داده‌های جمع‌آوری شده در طول پروازهای آزمایشی متعدد مورد بررسی قرار گرفت و اعتبارسنجی شد. نتایج طبقه بندی بیش از ۹۵ درصد حساسیت در تشخیص و جداسازی حالت‌های روتور معیوب به دست آمد. (Bondyra et al, 2018) بازوهای هوشمند پیزو-الکتریک توانستند تا ۵/۳ مگاوات برق را در طول یک پرواز ثابت تولید نمایند که این میزان برای تامین برق مورد نیاز حسگرهای کم مصرف کافی بود. (Perez et al, 2022) روشی برای تشخیص عیوب موتور در پهپاد مولتی روتور با استفاده از میله‌های پیزو-الکتریک نصب شده بر روی بازوی پهپاد ارائه شد بر اساس نتایج تشخیص ناهنجاری‌های کار موتور براساس ارتعاشات حس شده توسط عنصر پیزوالکتریک امکان‌پذیر است. استفاده از حسگر پیزوالکتریک و نظارت بر ارتعاش نه تنها کنترل خرابی‌های ناگهانی بلکه نظارت مداوم بر وضعیت فنی پيشرانه را نیز امکان‌پذیر می‌سازد. نتایج نشان داد حسگر سبک وزن، ساده و قابل اعتمادی توانست عیوب سامانه رانش پهپاد را تشخیص دهد. (Ambroz- et al, 2023). یک روش تشخیص عیب براساس استخراج ویژگی‌ها توسط طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبانی (SVM) برای تعیین وقوع خرابی روتور به کار رفت. (Yaman et al, 2022) همچنین یک مدل مبتنی بر الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی تیغه‌های نامتعادل پروانه در پهپاد با استفاده از سیگنال‌های صوتی ساخته شد. این مدل دقت بالایی را نشان داد. با اندازه‌گیری اغتشاش تولید شده توسط پهپاد امکان تشخیص عدم تعادل در پره پروانه بود. (Pourpanh et al, 2018) تبدیل فوریه برای تجزیه و تحلیل نقص در چرخ‌دنده‌های چرخشی در یک سامانه پروانه‌ای یک چرخ‌بال بدون سرنشین کوچک سیگنال‌های ارتعاش مختلف اندازه‌گیری شد و ویژگی‌های فرکانس زمانی آنها به عنوان ورودی سامانه تشخیصی مبتنی بر شبکه‌های عصبی، سامانه‌های فازی و الگوریتم‌های ژنتیکی در نظر گرفته شد. (Marichal et al, 2016) بر این اساس هدف از این مطالعه حاضر بررسی کاربرد مواد نانوپیزوالکتریک در پایش وضعیت پهپادها

پهپادها باشند. مواد نانو موجب بهبود ساختار مواد پیزوالکتریک می‌شود. کاربرد نانو حسگرها و نانویست حسگرها در پایش وضعیت گیاهان و تولیدات کشاورزی رواج یافته است. نظارت بر وضعیت به کمک ارتعاش یک روش مشهور است، به خصوص وقتی که تشخیص خرابی در ماشین‌های متشکل از قطعات چرخان باشد. با این حال، تلاش‌های زیادی برای استفاده از پردازش سیگنال مبتنی بر روش‌های تشخیص گسل در زمینه پهپادها چندتایی انجام شده است. (Bondyra et al, 2017) در سال‌های اخیر افزایش علاقه در کاربرد انرژی با استفاده از منابع جایگزین وجود دارد. (Ilyas and Swingler, 2015) از بین روش‌های گوناگون برداشت انرژی از طریق ارتعاشات به دلیل داشتن تأثیرات کویل الکتریکی- مکانیکی مساعد از روش‌های خوب برداشت انرژی است. (Asgharzadeh et al, 2015) کاربردهای مواد پیزوالکتریک در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب نموده است. یکی از روش‌ها تبدیل انرژی ناشی از ارتعاشات مکانیکی توسط این مواد، به انرژی الکتریکی است. اثر پیزوالکتریک توسط ژاک و پیر کوری در سال ۱۸۸۰ ارائه شد. (Francesco Cottone, 2011) مواد پیزو الکتریک موادی هستند که تغییر شکل در آنها منجر به تولید ولتاژ می‌شود که از آن می‌توان در تولید نانوذرات تورها استفاده نمود. پلی وینیلیدین فلوراید یک پلیمر نازک انعطاف پذیر است که چگالی کم و عالی دارد. فیلم PVDF برای کاربردهای سنجش کرنش و پایش وضعیت مناسب است در مقایسه با PZT که شکننده است. بنابراین از نانوذرات تورهای پیزوالکتریک بر پایه PVDF می‌توان به خوبی در پایش وضعیت پهپادها استفاده نمود. (Masango, 2015) در واقع، در سامانه‌های مکانیکی چرخش نا متعادل قطعات منبع لرزش هستند. بدست آوردن یک علامت مشخصه از حالت معیوب، پس از ذخیره سیگنال توسط الگوریتم-های استخراج ویژگی ساده پردازش می‌شوند. (Bondyra, 2017) پژوهشی برای بررسی امکان برداشت انرژی الکتریکی از طریق ارتعاش و خورشید در یک مینی پهپاد RC شامل دو پیک پیزو الکتریک در ریشه بال‌ها و در بدنه برای برداشت انرژی از ارتعاشات بال و حرکات بدنه سفت و سخت هواپیما یک بازوی پیزو الکتریک یکسر گیردار نصب شد. همچنین دو فیلم نازک پانل‌های فتوولتائیک متصل به بالای صفحه بال‌های هواپیما برای برداشت انرژی از نور خورشید بود. آزمایش پرواز انجام شد و توان خروجی دستگاه‌های پیزوالکتریک و فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفت. (Anton, 2008) یک پهپاد کواد کوپتر در حالت فرود شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. (Sawalakhe and Shaiikh, 2020)

آنالیز ارتعاشی و مدل‌سازی هلیکوپتر در حالت شناور انجام شد. (Castillo - Rivera and Tomas - Rodriguez, 2018)

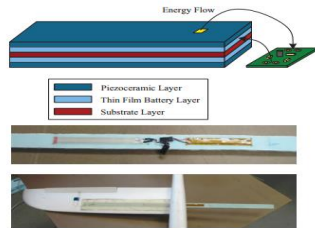


بوده است.

مطالعات زیادی در خصوص کاربرد پیزوالکتریک‌ها به منظور برداشت انرژی الکتریکی و بررسی وضعیت پهبادهای انجام شده است. در جدول ۱ تعدادی از پژوهش‌های انجام شده به همراه نتایج آنها آمده است.

جدول ۱- برخی از پژوهش‌های انجام شده در حوزه کاربرد پیزوالکتریک‌ها در پهباد

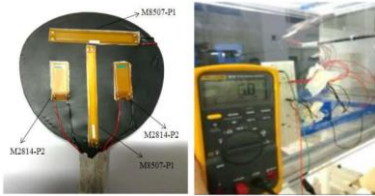
موضوع	ماده پیزو مورد استفاده	نتایج	شکل - منبع
مدل‌سازی ساختار پرتو-جرم L شکل پهباد	پیزوسرامیک به صورت سری متصل شد.	برداشت‌کننده انرژی L شکل در ارابه‌های فرود پهباد به منظور بهبود زمان پرواز پیشنهاد شد	<p>Erturk et al, 2009</p>
بررسی توسعه دستگاه‌های جمع‌آوری انرژی پیزوالکتریک چند منظوره خودشارژ	دستگاه‌های QuickPack حاوی پیزوسرامیک یکپارچه (PZT-5A)	در حالت اول با شتاب پایه ۱.۳ g، ساختار خود شارژ توانست به طور متوسط ۰.۶۵ مگاوات توان مداوم و ظرفیت ۱.۳۴۸ میلی آمپر ساعت را به لایه باتری لایه نازک رساند	<p>Anton et al, 2009</p>
مدل‌سازی نیمه تحلیلی غیرخطی پس‌کمانش محرک‌های پیزوالکتریک پیش‌فشرده برای کنترل پرواز پهباد	تیر بيمورف پیزوسرامیک (PZT)	تکنیک گسسته‌سازی رالی-ریتز برای مدل‌سازی محرک PBP پیشنهاد شد. روش Rayleigh-Ritz برای به دست آوردن همگرایی ۹۹٪ و حداکثر رزونانس بال ۲۶ هرتز که نزدیک به مقدار پیش‌بینی شده ۲۸ هرتز بود.	<p>De Breuker et al, 2006</p>
طراحی بال (UAV) با پیزوالکتریک و هوشمند	کامپوزیت‌های فیبر ماکرو پیزوالکتریک (MFCs)	مدل طراحی با آزمایش‌های دینامیکی استاتیکی و اولیه بال نمونه تأیید شد. توافق کیفی بین نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌ها و امکان سنجی کنترل فرمان کنترل شده با MFC را در یک پهباد تأیید کرد همچنین برای نظارت بر سلامت ساختاری و فزایندگی کنترل در آینده می‌تواند مفید باشد	<p>Parideand Ciresa, 2009</p>
کنترل سطح مواد کامپوزیت پیزوالکتریک	MFC ماکرو کامپوزیت فیبر با محرک بيمورف	محاسبات عملکرد آیرودینامیکی با استفاده از اندازه‌گیری تجربی هندسه‌های شکل‌یافته، به افزایش قابلیت اطمینان و کاهش مرگ پهباد منجر شد.	<p>Ohanian et al, 2011</p>
مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل میکروگریپر پیزوالکتریک برای پهباد	ساختاری اصلاح شده پیزوالکتریک (PZT-5H) با سیلیکون، پلی سیلیکون و دی اکسید سیلیکون	پس از مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل در میان آنها دی اکسید سیلیکون در مقایسه با مواد دیگر نتیجه بهتری داد. بیشترین ولتاژ روی محرک پرتو ۲۰ ولت در جابه‌جایی ۲۲.۲۳ میکرو متر بود.	<p>Nachippan et al, 2018</p>



Anton and Inman, 2011

تکه‌های پیزوالکتریک در نزدیکی ریشه بال و دو صفحه خورشیدی لایه نازک بر روی سطح بال بالایی برای برداشت نصب شد. که توانست منجر به افزایش استقامت پرواز شود.

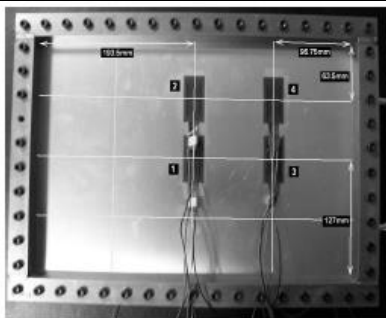
برداشت انرژی توسط ساختارهای هوشمند بر روی پهپاد لایه پیزو سرامیک، یک لایه شیم فلزی مرکزی و لایه فیلم نازک باتری



Bayramoglu et al, 2021

محاسبات با عدد رینولدز حداکثر انرژی الکتریکی حاصل از مواد پیزوالکتریک بدست آمد. براساس نتایج به احتمال زیاد، افزایش بیشتر در عدد رینولدز انرژی الکتریکی افزایش خواهد یافت.

محاسبه مقادیر انرژی بدست آمده از مواد پیزو روی بال انعطاف پذیر بال چهار ماده پیزوالکتریک MFC روی بال به هم موزی متصل شدند.



Featherston et al, 2009

نتایج نشان داد با برداشت کننده در محدوده ۲۹ - ۴۱ هرتز می‌توان تا ۱۲ مگاوات قدرت تحت تحریک ۰.۵ گرم انرژی برداشت نمود.

برداشت انرژی ارتعاشی برای نظارت بر سلامت سازه در هواپیما برداشت کننده PZT (سرب زیر کونات تیتانات) به چسبیده می‌شوند یک پائل آلیاژ آلومینیوم، نماینده یک پائل بال هواپیما

### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی و تشریح ارتعاشات حرکتی موتور یک پهپاد کشاورزی محلول پاش و تشخیص خرابی احتمالی، یک مجموعه آزمایشی برای اندازه‌گیری داده‌های ارتعاش موتور مورد نیاز بود. حسگر باید قادر به اندازه‌گیری داده‌های شتاب باشد، تا حد ممکن وزن کمی داشته و با جریان هوا در اطراف ترکیب موتور - پروانه تداخل نداشته باشد. بنابر نتایج مطالعات انجام شده مواد پیزوالکتریک می‌توانند در تامین انرژی الکتریکی پهپادها مورد استفاده قرار گیرند. پهپادها عموماً توسط باتری‌های الکتریکی شارژی که بر روی خود دارند، انرژی خود را تامین می‌کنند. سیستم عامل‌های پهپاد دارای مقدار محدودی از الکتریسیته برای تأمین برق به منظور پرواز در طول زمان ثابت هستند لذا تشخیص عیب به کمک مواد پیزوالکتریک خودشارژ می‌تواند کمک کننده باشد. نانوزنراتور مناسب بر اساس منابع علمی ساخته شد. (Astan et al, 2022) به منظور کاهش خطا هر آزمایش چند بار تکرار شد. برای تعیین مقدار خروجی هر نانوزنراتور با آزمایش در حالت مزرعه و عملی مورد ارتعاش قرار گرفت و ولتاژ خروجی توسط مولتی‌متر اندازه گرفته شد. در شکل ۱ مراحل کار مولتی روتور نشان داده شده است.



شکل ۱- مراحل کار مولتی‌روتور

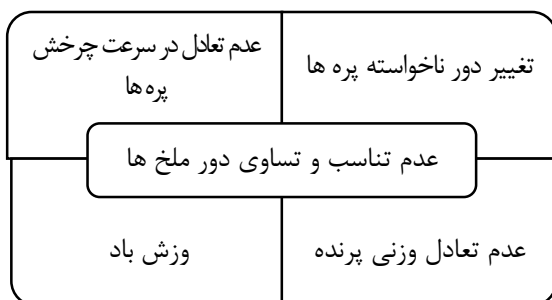
اندازه‌گیری‌های ارتعاشی در سه حالت برخاستن، شناوری و نشستن پهپاد انجام گرفت. حالت Hover هاور یا شناوری به حالتی از مولتی‌روتور گویند که در آن پرنده در ارتفاع ثابتی از آسمان بدون حرکت قرار گیرد.



شکل ۲- نمونه آزمایشی مزرعه‌ای پهپاد



ماژول الکتریکی کنترل سرعت (اسپید کنترلر) میکروکنترلر یا رایانه کوچک (پردازنده) و قطعات جانبی نظیر حافظه و غیره تعبیه شده و برای کنترل برنامه‌نویسی شده روی شاسی نصب شدند. به منظور کارایی بهتر و عملکرد مناسب مولتی‌روتور، باید موتورها و ملخ‌ها در فاصله‌های مساوی قرار بگیرند. جنس و اندازه قطعات مهم است. یک پیشران نامتعادل در مولتی‌روتور می‌تواند بر عملکرد آن به دلیل لرزش تأثیر بگذارد و همچنین عملکرد رانش را کاهش دهد. ممکن است روتور آسیب دیده و نامتعادل، ارتعاشات را افزایش دهد. مسائلی که بر عدم تعادل مولتی‌روتورها تأثیرگذار هستند در شکل ۴ نشان داده شده است.

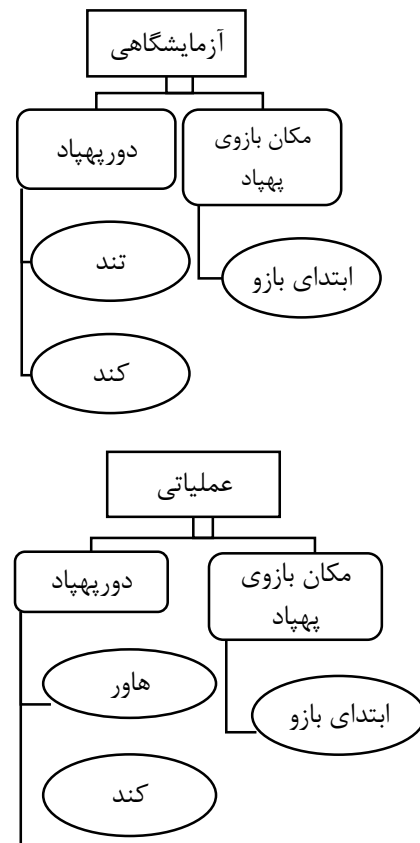
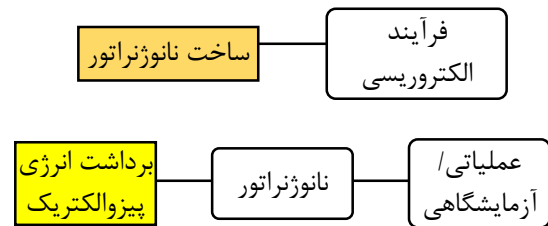


شکل ۴- عوامل عدم تعادل مولتی‌روتورها

## نتایج

با بررسی مطالعات مشخص شد که چنانچه طول عمر، استحکام و انعطاف‌پذیری حسگر در برابر شرایط مختلف ارتعاشی و عوامل محیطی افزایش یابد، میزان انرژی تولیدی نیز افزایش می‌یابد. بر اساس بررسی‌های پژوهش‌های قبلی انجام شده، انتخاب نوع مواد پیزوالکتریک، مکان قرارگیری مواد پیزوالکتریک و هندسه پیزوالکتریک از جمله مواردی مهمی است که پژوهشگران پیشین برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد داده‌اند. موتور بدون برس<sup>۱</sup> در پهنادهای شش روتوره در قسمت انتهایی بازوهای پهناده قرار می‌گیرند. در شکل ۲ محل نصب نانو ژنراتور پیزوالکتریک روی بازوی تک پهناده نشان داده شده است. در مکان‌هایی که موتورهای پهناده نصب شده‌اند، ارتعاشات بیشتری وجود دارد که موتورهای ارتعاشات را روی بازوی منتقل می‌کند. هنگامی که موتورهای پهناده روشن شد، ارتعاش تولید شد. این ارتعاش به بازوهای پهناده و دیگر قسمت‌های آن منتقل گردید. بازوی پهناده شروع به ارتعاش کرد، نانو ژنراتور انعطاف‌پذیر نصب شده روی بازوی پهناده شروع به ارتعاش کرد و برق تولید شد. برداشت کننده ارتعاش پیزوالکتریک ارتعاشات تولیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل نمود. سپس ولتاژ توسط الکترودهای مسی به مدار شارژ ساخته شده و نصب شده روی پهناده، منتقل گردید.

مبدل پیزوالکتریک از لایه نانوذره مناسب مبتنی بر نانو الیاف PVDF با مواد افزودنی ساخته شد که توسط دو لایه چسبنده احاطه شد. این لایه‌ها خود توسط لایه‌های دیگر پوشانده شدند. نانوژنراتور پیزوالکتریک در ۳ حالت عملکرد پهناده مورد آزمایش قرار گرفت. سپس با انجام آزمایش‌های عملی (شکل ۳) و اعمال متغیرهای مدنظر کارایی این ابزار مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از برداشت انرژی الکتریکی از طریق یک برد، یکسو ساز، خازن و باتری لیتیومی نسبت به ذخیره انرژی الکتریکی اقدام شد. در شکل ۳ روش کل پژوهش نشان داده شده است.

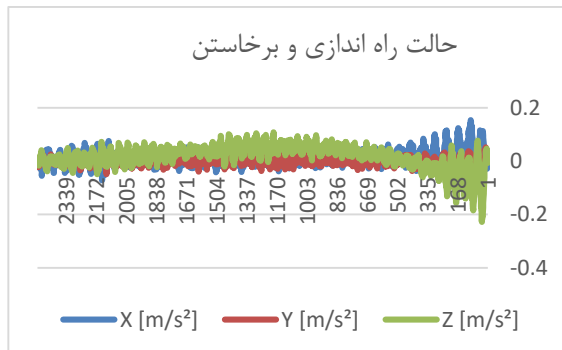


شکل ۳- مراحل آزمایشی و داده‌برداری انرژی الکتریکی از طریق نانوژنراتور بر روی پهناده

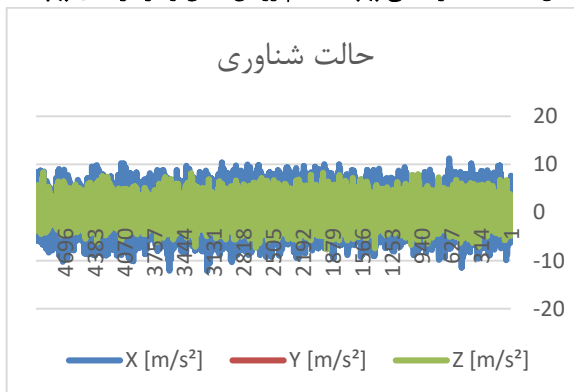
اجزای مولتی‌روتور شامل گیرنده، فرستنده، فلایت کنترلر، اسپید کنترلر، فریم یا بدنه، ملخ‌ها و موتورهای براسلس است.



دقیقه اندازه‌گیری شد. با بررسی طیف ارتعاشی در حالت فرود فرکانس ارتعاشات ایجاد شده توسط پروانه دوار مربوط به سرعت زاویه‌ای آن است. اختلالاتی همچون باد یا ناهمواری‌های طبیعی تعادل جرم روتورها را به هم می‌زند. بنابراین، استفاده از یک روش تجزیه و تحلیل ارتعاشی سریع برای تشخیص خطا می‌تواند موفقیت‌آمیز باشد چرا که اختلال در عملکرد روتورهای ممکن است به تخریب بیشتر آنها منجر شود در نتیجه، شکست کامل و سقوط اتفاق بیفتد. مشاهده شده است که پهپاد در هنگام فرود می‌شکند از آنجا که پهپادها عمدتاً از روی زمین سقوط می‌کنند تجزیه و تحلیل فرود ضروری است. در این پژوهش مدار ساخته شده توسط خازن مقدار ولتاژ خروجی را در نانو ژنراتور ذخیره می‌کرد. ارتعاشات مکانیکی ایجاد شده توسط بازوی پهپاد باعث تغییر شکل و کرنش در مواد فعال نانو ژنراتور شد که منجر به تولید ولتاژ شد. کیفیت، جنس، ساختار نانو ژنراتور، نیروهای وارده، اندازه نانو ژنراتور و مدت زمانی که نانو ژنراتور تحت ارتعاش قرار می‌گیرد بر ولتاژ تولیدی موثر است. مقدار ولتاژ تولید شده در فرکانس ثابت ۲۳ هرتز و مدت زمان یک دقیقه ذخیره شد.

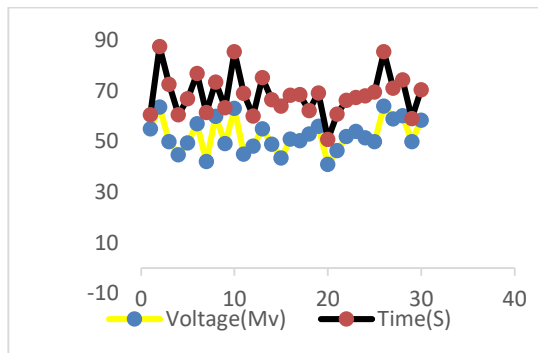


شکل ۵ - طیف ارتعاشی پهپاد هنگام روشن شدن و کار در جای پهپاد



شکل ۶ - طیف ارتعاشی پهپاد در هنگام پرواز در حالت شنواری

انرژی الکتریکی تولیدی در خازن ذخیره شد. مدت زمان داده-برداری یک دقیقه بود. پس از فرود و خاموش شدن روتور هگزا ولتاژها توسط مولتی‌متر اندازه‌گیری و ثبت و در رایانه ذخیره شد. برای برداشت انرژی الکتریکی از نانو ژنراتور از مدار شارژ متشکل از یک خازن با ظرفیت ۴۷ میکروفاراد، یک مقاومت یک کیلو اهم و یک LED استفاده گردید. همچنین برای نمایش ولتاژ خروجی از دستگاه چند موتورمتری با اتصال دو الکتروود نانو ژنراتور به دو سر مولتی‌متر استفاده شد. در این مطالعه آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها ۳۰ بار تکرار شد. برنامه تحت اندروید Idynamic تلفن هوشمند در هر داده ارتعاشی را در دو میلی‌ثانیه ذخیره نمود. بنابراین در طول یک دقیقه پرواز تعداد ۳۰۰۰۰ داده ارتعاشی در حوزه زمانی ذخیره شد که برای هر حالت تعداد ۵۰۰۰ داده ارتعاشی در حوزه زمان در نظر گرفته شد. مدت زمان جمع‌آوری داده‌ها بین یک تا سه دقیقه متغیر بود. به منظور بررسی ارتعاشات در سه حالت بلند شدن، شنواری و فرود پهپاد هگزا موتور داده‌های مربوط به مدت زمانی که پهپاد در هر حالت قرار داشت به میزان تعداد ۱۵۰۰۰ داده ارتعاشی ثبت و ذخیره گردید پس از آن نمودار میزان ولتاژ تولیدی توسط نانوژنراتور پیزوالکتریک در آن مدت زمانی در مقابل سطح ارتعاشات تولیدی در هر حالت نمایش داده شد. در شکل ۵، ۶ و ۷، طیف دامنه زمانی ارتعاش بازوی هگزا روتور در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل موج عدد ۱۵۰۰۰ نقطه سیگنال ارتعاشی در بازه زمانی ۵۰۰۰ میلی‌ثانیه ثبت شد. شتاب پهپاد در حالت شنواری پرواز در سه جهت X، Y و Z نشان داده شده است. از شکل نمودار می‌توان نتیجه گرفت که برد در ابتدا و انتهای نمودار کمتر است. این مربوط به این است که سامانه جمع‌آوری داده‌ها در حالت پهپاد فعال است و تقریباً ارتعاشات محیط را نشان می‌دهد. اما بیشترین افزایش در دامنه ارتعاش را می‌توان در دو طرف نمودار مشاهده کرد. این به دلیل برخاستن و فرود پرنده در طول آزمایش است. در وسط نمودار، یک شکل متناسب یکنواخت مشاهده می‌شود که مربوط به حالت پرواز پایدارتر و حالت شنواری است. نتایج نشان داد که بیشترین دامنه ارتعاشات در هنگام برخاستن و فرود پهپاد رخ داد. طبق شکل، حداکثر دامنه شتاب در جهت-های X، Y و Z به ترتیب ۲۰/۶، ۰/۹ و ۱۳/۷ متر بر مجذور ثانیه در بسامدهای ۵۴/۳، ۴۹/۸ و ۰/۴۹ هرتز است و بیشینه بازه شتاب در جهت رخ داده است. به منظور محاسبه اثر ارتعاش بر عملکرد پیزوالکتریک نانو ژنراتور و همچنین اثر تغییر شکل، ولتاژ الکتریکی تولید شده در هر مرحله از آزمایش به مدت یک



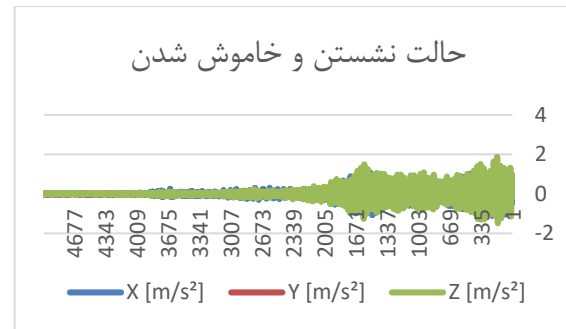
شکل ۹- نتایج ولتاژ خروجی نانو ژنراتور نصب شده بر روی بازوی هواپیمای بدون سرنشین

### نتیجه گیری

پایش وضعیت پهپاد به روش های مختلف می تواند انجام شود. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده و نتایج به دست آمده در صورت رعایت مسایل آیرودینامیک، بازوهای پهپادهای چند موتوره می توانند به منظور نصب نانوپیزوالکتریک های سبک و منعطف مورد استفاده قرار گیرند. از طریق مواد پیزو-الکتریک انعطاف پذیر و سبک پیزوالکتریک می توان سطح ارتعاشات اجزای مختلف پهپاد را تشخیص داد و با اطلاع از وضعیت ارتعاشی آن از خرابی های دیگر اجزای آن و همچنین سقوط پهپاد می توان جلوگیری نمود. نتایج این پژوهش نشان داد نانوپیزوالکتریک ها در حسگرهای مورد استفاده برای پهپادها و همچنین در ترکیب ساختار اجزای مختلف پهپادها چند موتوره می تواند مورد استفاده قرار گیرند.

### References

- Ambroziak, L., Ołdziej, D., & Koszewnik, A. (2023). Multicopter motor failure detection with piezo sensor. *Sensors*, 23(2), 1048.
- Anton, S. R., & Inman, D. J. (2008, April). Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles. In *Active and passive smart structures and integrated systems 2008* (Vol. 6928, pp. 621-632). SPIE.
- Anton, S. R., & Inman, D. J. (2011, April). Performance modeling of unmanned aerial vehicles with on-board energy harvesting. In *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2011* (Vol. 7977, pp. 519-533). SPIE.
- Asgharzadeh, Jahani, Kamal, Kianpour, Arman, & Homayun Sadeghi. (2015). Investigating energy harvesting from the vibrations of a trapezoidal beam with a piezoelectric layer using the distributed parameters method. *Madrass Mechanical Engineering*, 15(14), 96-102.
- Astan, N, Mohammad Zamani, D, Gholami Parshkahi, Mohamma, & Ebrahimi, E. (2022).



شکل ۷- طیف ارتعاشی پهپاد در هنگام فرود و خاموش شدن



شکل ۸- جابجایی بازوی پهپاد در یکی از مجموعه داده ها

پس از آن نمودار جابجایی تثبیت شده و با روشن شدن پهپاد و شروع ارتعاشات، میزان جابجایی در سه جهت  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  افزایش یافته است (شکل ۸). اما دو قله در موج جابجایی مشاهده می شود که پیک اول با جابجایی  $0.42$  متر در امتداد محور  $X$ ،  $0.23$  متر در امتداد محور  $Y$  و  $0.26$  متر در امتداد محور  $Z$  نمایش داده می شود. این میزان جابجایی مربوط به زمان برخاستن پهپاد است. پس از آن، خلبان پهپاد را در حالت شناور قرار داد و شکل موج جابجایی یکنواخت تر شد. پیک دیگری از جابجایی در  $50$  ثانیه رخ داد که مربوط به زمان فرود پهپاد است و پس از آن پهپاد در بازه زمانی  $60$  تا  $63$  ثانیه خاموش شد و جابجایی در هر سه جهت نزدیک به صفر در نهایت فرآیند جمع آوری داده ها متوقف و داده های ارتعاشات ثبت شد.

در نمودار شکل ۹، ولتاژ خروجی نانو ژنراتور در هر زمان جمع آوری داده نشان داده شده است. همانطور که از نمودار مشاهده می شود، بالاترین ولتاژ ثبت شده  $64$  میلی ولت در طول زمان پرواز پهپاد در  $85/5$  دقیقه در تست شماره  $26$  بود. بر اساس نتایج هر آزمایش پرواز، با توجه به زمان متفاوتی برای فرود و برخاستن ایمن پهپاد، ولتاژهای خروجی متفاوتی وجود دارد و نتایج نشان داد که معمولاً با افزایش زمان پرواز، ولتاژ بیشتری ذخیره می شود.



Ilyas, M. A., & Swingler, J. (2015). Piezoelectric Energy harvesting from raindrop impacts. *Energy*, 90, 796-806.

Intaratep, N., Alexander, W. N., Devenport, W.J., Grace, S.M., & Dropkin, A. (2016). Experimental study of quadcopter acoustics and performance at static thrust conditions. In 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (p. 2873).

Krantz, D. (2017). Methodology and vibrational analysis for measurements on a VTOL RAPS.

Li, Z., Lao, M., Phang, S. K., Hamid, M. R. A., Tang, K.Z., & Lin, F. (2017, September). Development and design methodology of an anti-vibration system on micro-UAVs. In International micro air vehicle conference and flight competition (IMAV) (pp. 223-228).

Marichal, G.; Del Castillo, M.; López, J.; Padrón, I.; Artés, M. An artificial intelligence approach for gears diagnostics in AUVs. *Sensors* 2016, 16, 529.

Mohammed, F., Idries, A., Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., & Jawhar, I. (2014, May). UAVs for smart cities: Opportunities and challenges. In 2014 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS) (pp. 267-273). IEEE.

Nachippan, N. M., Venkatesh, A. P., & Muniyappan, M. (2018). Modelling and analysis of piezoelectric microgripper for unmanned aerial vehicle. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19456-19462.

Ohanian III, O. J., Karni, E. D., Olien, C. C., Gustafson, E. A., Kochersberger, K. B., Gelhausen, P.A., & Brown, B. L. (2011, April). Piezoelectric composite morphing control surfaces for unmanned aerial vehicles. In *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011* (Vol. 7981, pp. 1486-1498). SPIE.

Paradies, R., & Ciresa, P. (2009). Active wing design with integrated flight control using piezoelectric macro fiber composites. *Smart Materials and Structures*, 18(3), 035010.

Perez, M., Billon, K., Gerges, T., Capsal, J. F., Cabrera, M., Chesné, S., & Jean-Mistral, C. (2022). Vibration energy harvesting on a drone quadcopter based on piezoelectric structures. *Mechanics & Industry*, 23, 20.

Pourpanah, F., Zhang, B., Ma, R., & Hao, Q. (2018, October). Anomaly detection and condition monitoring of UAV motors and propellers. In 2018 IEEE SENSORS (pp. 1-4). IEEE.

Pourpanah, F.; Zhang, B.; Ma, R.; Hao, Q. Anomaly Detection and Condition Monitoring of UAV Motors and Propellers. In Proceedings of the 2018 IEEE SENSORS, New Delhi, India, 28–31 October 2018; pp. 1–4.

Richman, J. S. and Moorman, J. R., 2000.

Feasibility study of using piezoelectric nanogenerators to power UAVs using vibrations. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 23(82), 1-18. doi: 10.22092/amsr.2022.358840.1419.

BAYRAMOĞLU, N., GENÇ, M. S., Kemal, K.O.C.A., & Altunal, A. (2021). Electricity production from piezoelectric patches mounted over flexible membrane wing at low Reynolds numbers. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39(1), 70-79.

Bondyra, A., Gasior, P., Gardecki, S., & Kasinski, A. J. (2018, July). Development of the Sensory Network for the Vibration-based Fault Detection and Isolation in the Multirotor UAV Propulsion System. In ICINCO (2) (pp. 112-119).

Bondyra, A.; Gasior, P.; Gardecki, S.; Kasiński, A. Fault diagnosis and condition monitoring of uav rotor using signal processing. In Proceedings of the 2017 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), Poznan, Poland, 20–22 September 2017; pp. 233–238.

Castillo-Rivera, S., & Tomas-Rodriguez, M. (2018). Helicopter modelling and study of the accelerated rotor. *Advances in Engineering Software*, 115, 52-65.

Clothier, R. A. and Walker, R. A. (2006). Determination and evaluation of UAV safety objectives.

Cottone, F. (2011). Introduction to vibration energy harvesting. NiPS Energy Harvesting Summer School, 10, 9781119991151.

De Breuker, R., Tiso, P., Vos, R., & Barrett, R. (2006, May). Nonlinear semi-analytical modeling of Post-Buckled Precompressed (PBP) piezoelectric actuators for UAV flight control. In Proceedings of the 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 7th, Newport, Rhode Island.

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.

Featherston, C. A., Holford, K. M., & Greaves, B. (2009). Harvesting vibration energy for structural health monitoring in aircraft. *Key Engineering Materials*, 413, 439-446

Ghahramani, B. and Mueller, M., 2018. Vibration-Based Propeller Fault Diagnosis for Multirotors. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) Dallas, TX, USA, June 12-15. Międzyzdroje, Poland, September, 2–5.





Physiological timeseries analysis using approximate entropy and sample entropy.

Saeed, A., Wang, L., Liu, Y., Shah, M. Z., & Zuo, Z. Y. (2020). Modeling and control of unmanned finless airship with robotic arms. *ISA transactions*, 103, 103-111.

Sawalakhe, P. V., & Shaaikh, J. A. (2020). Simulation and analysis of a quadrotor UAV while landing. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(6), 672-680.

Valavanis, K. P. (2017). Unmanned aircraft systems challenges in design for autonomy. In *2017 11th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*, pages 73–86.

Yaman, O., Yol, F., & Altinors, A. (2022). A Fault Detection Method Based on Embedded Feature Extraction and SVM Classification for UAV Motors. *Microprocessors and Microsystems*, 94, 104683.



## Application of Piezoelectric Nanogenerators in Monitoring the State of a Drone

Nasrolah Astan<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems-Energy, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran

\* Corresponding author: nasastan@yahoo.com

*Received: 05 Nov 2022*

*Accept: 20 Dec 2022*

### Abstract

Early detection of UAV abnormalities and malfunctions is necessary in order to design and increase their reliability. In this article, the use of piezoelectric nanogenerators in monitoring the status of UAVs was investigated. The presented condition monitoring system was based on the application of a piezoelectric nanogenerator on the arm of a multi-motor agricultural spraying UAV. After preparing the nanogenerator, it was installed on a UAV arm. The vibration spectrum of the UAV was obtained and analyzed in three states: take off, hover and sit. The results showed that light and flexible nano-piezoelectrics can be used in the sensors used to monitor the status of UAVs and also in the composition of the structure of various components of multi-engine UAVs.

**Keywords:** UAV, condition monitoring, nano piezoelectric, fault diagnosis