



## مقایسه حسگر دور موتور خودرو با حسگر PVDF در موتور XU7 و برداشت انرژی ارتعاشی

معین الدین محمودی<sup>۱\*</sup>، فرشاد وطن خواهان<sup>۲</sup>، همایون ریاحی چالشتری<sup>۳</sup>، رضا مهوری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران [moien.mahmouditrx@gmail.com](mailto:moien.mahmouditrx@gmail.com)

<sup>۳</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده فنی و مهندسی، نجف آباد، ایران [fvatank@gmail.com](mailto:fvatank@gmail.com)

<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، دانشکده فنی و مهندسی، تهران، ایران [hom.Riyahi-chalesshtari@iauctb.ac.ir](mailto:hom.Riyahi-chalesshtari@iauctb.ac.ir)

<sup>۴</sup> دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، تهران، ایران [reza.mehvari@yahoo.com](mailto:reza.mehvari@yahoo.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۸ فروردین ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۳ شهریور ۱۳۹۵

کلیدواژه‌ها:

برداشت انرژی ارتعاشی

تیر یک سر گیردار پیزوالکتریک

PVDF

چرخ طیار

حسگر القایی دور موتور

### چکیده

قطعات پیزوالکتریک در زمینه سازه‌های هوشمند و برداشت انرژی، به عنوان عنصری اصلی و کلیدی معرفی می‌شوند. پیزوالکتریک‌ها به دو دسته اصلی سرامیکی و پلیمری تقسیم می‌گردند. قطعاتی با خواص پلیمری، توانایی تحمل تغییرات کرنش و قابلیت انعطاف به مراتب بیشتری نسبت به قطعات سرامیکی دارند و عمر بیشتری دارند. یکی از پرکاربردترین پیزوالکتریک‌های پلیمری، PVDFها هستند. تغییرات کرنش بر روی لایه پیزوالکتریک‌ها، سبب تغییرات ولتاژ به دو سر سیم آنها شده و مانند یک حسگر عمل می‌کنند. در پژوهش انجام شده، با اتصال حسگر PVDF به تیر یک-سرگیردار با جنس فولاد فتری CK75 و قرار دادن این سامانه بر روی دندانه‌های چرخ طیار موتور XU7، به نحوی استفاده شده است که این حسگر بتواند در خودرو عملکردی مشابه با حسگر القایی دور موتور را داشته باشد. همه آزمون‌ها به صورت عملی انجام شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که این نوع از پیزوالکتریک، توانایی برداشت انرژی به مقدار  $72,46 \text{ V/g}$  را تا  $600$  دور در دقیقه دارد و تا این دور مشابهت‌هایی با حسگر دور موتور وجود دارد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

چندین برابر بیشتر از انواع سرامیکی مانند کوارتز و PZTها است. در پلیمرها، مولکولها در هم تنیده شده و زمانیکه در اثر میدان برقی قرار می‌گیرند، همدیگر را جذب و یا دفع می‌کنند (تغییرات کرنش).

در بررسی‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که طول عمر مواد سرامیکی به مراتب از انواع پلیمری کمتر بوده و پس از مدتی از دقت آن‌ها کاسته می‌شود. این مقایسه به‌صورت کاملاً تجربی انجام گردیده است و نتایج آزمایش نشان داد، که استفاده از پیزوالکتریک PVDF تا دور ۶۰۰ دور بر دقیقه توانایی برداشت انرژی را داشته [۱۱] و علاوه بر آن تا این دور شاهد مشابهت‌هایی با حسگر القایی، نظیر وقفه در علامت خواهیم بود (در بخش بعد این وقفه بطور کامل معرفی شده است). اما با بالا رفتن دور موتور از ۶۰۰ دور بر دقیقه، شاهد افت ولتاژ در این حسگر هستیم و دیگر برداشت انرژی نخواهیم داشت.

این سازوکار شامل یک تیر یک سرگردار از جنس CK75 است [۱۲] که قطعه پیزوالکتریک روی آن متصل شده است [۱۲-۱۴] و مقابل دندانه‌های چرخ طیار و تحت ارتعاشات مکانیکی بالایی قرار می‌گیرد. تحلیل و استفاده از پیزوالکتریک بر روی تیرهای تحت ارتعاش [۱۲] موضوعی است که به تازگی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در اکثر این تحقیقات، محققین سعی بر این داشته‌اند که زمان نوسانات را کم و بسامد ارتعاشات در تیر را افزایش دهند [۱۱، ۱۵ و ۱۶] تا بتوانند انرژی بیشتری از پیزوالکتریک‌ها برداشت و ذخیره کنند. به‌طور مثال استفاده از میدان مغناطیسی [۹-۱۱، ۱۵، ۱۷-۱۹]، القای الکترومغناطیس [۱۰، ۲۰-۲۲]، ضربه [۱۳، ۲۳-۲۵] و افزایش خاصیت الاستیسیته در تیر [۱۲، ۲۶-۲۷]. در طرح پیشنهاد شده ارتعاشات با دامنه بسامد بسیار پایینی به‌صورت خودکار اعمال می‌شود و نیازی به ارتعاش اجباری نیست (در نمونه‌های ذکر شده، کلیه ارتعاشات داده شده به سامانه، اجباری بوده است).

برای ساخت و آزمون سامانه ارائه شده، از کلیه تحقیقات پیشین تا حد امکان استفاده شده است، نظیر افزایش خاصیت الاستیسیته در تیر برای افزایش خیز تیر و همچنین افزایش بازده در پیزوالکتریک نصب شده، که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته شده است.

در نمونه‌های نشان داده شده کلیه پیزوالکتریک‌ها سرامیکی اند. به همین دلیل تغییرات کرنش ایجاد شده توسط ارتعاشات اجباری، بسیار محدود است که در این طرح، با انتخاب جنس PVDF، مشکل برطرف گردیده و شاهد آزمون این حسگر در ارتعاشات و تغییرات کرنش بیشتر خواهیم بود.

## ۲- نحوه عملکرد حسگر القایی دور موتور

این حسگر تنها در مقابل فلزات عکس العمل نشان می‌دهد و می‌تواند فرمان مستقیم به تنظیم کننده‌ها، شیرهای برقی و مدارهای تنظیم برق

برداشت انرژی به یک زمینه پژوهشی بسیار مهم و رایج در چند سال اخیر تبدیل شده است و در بسیاری از حوزه‌های مهندسی، مانند حسگرهای زیست میحطی [۱] لوازم مصرف کننده الکتریکی [۲، ۳] تجهیزات نظامی [۴] و شبکه‌های بی‌سیم (WAN) [۵-۶] کاربردهای زیادی داشته است.

برداشت انرژی مینی‌ر لرزش و ارتعاشات [۷] یک جایگزین مناسب برای برداشت انرژی به کمک انرژی خورشیدی و یا برق-گرمایی<sup>۱</sup> برای مکان‌هایی که دسترسی به خورشید و یا افت حرارتی به آسانی وجود ندارد، قرار گرفته است.

بحث برداشت انرژی<sup>۲</sup> با بحث ذخیره انرژی و استفاده از آن، دو بحث جدا و متفاوت و در اصل مکمل و ادامه یکدیگر اند. بطوریکه ابتدا انرژی به صورت تغییرات ولتاژ برداشت، ذخیره و سپس طبق نیاز طراح، استفاده می‌گردد.

یکی از عناصر پر کاربرد در زمینه برداشت انرژی، حسگرهای پیزوالکتریک هستند که به‌تازگی کاربردهایی در صنایع خودروسازی نظیر حسگرهای شتاب، حسگرهای فشار سرامیکی<sup>۳</sup>، حسگرهای فراسوت در خودروهای نظامی، انژکتورها، حسگرهای ضربه، ژيروسکوپ‌ها و... داشته‌اند. قطعات پیزوالکتریک هم توانایی عملکرد بودن را دارند و هم توانایی برداشت انرژی. در بحث عملکردها، با اعمال بار الکتریکی به دو الکترود آن‌ها، شاهد تغییرات کرنش خواهیم بود و در بحث برداشت انرژی، با تغییرات کرنش بر روی لایه پیزوالکتریک، تغییرات ولتاژ خواهیم داشت، به همین دلیل می‌توان از پیزوالکتریک‌ها بعنوان یک حسگر استفاده کرد.

بین موتور و جعبه دنده خودرو صفحه چرخ طیار قرار دارد که وظیفه اصلی آن گرفتن لرزش دورانی موتور، تنظیم سرعت میل‌لنگ در دوره‌های مختلف، ذخیره نیروی انفجاری حاصل از احتراق و انتقال آن به میل‌لنگ در مواقع لازم است.

چرخ طیار یکی از اجزای انتقال قدرت به حساب می‌آید. در قسمت پوسته کلاچ خودرو، درست بالای دندانه‌های چرخ طیار، حسگر دور موتور قرار گرفته است [۸]، که وظیفه‌اش تشخیص زاویه چرخش میل‌لنگ، تشخیص حالات موتور (وضعیت و موقعیت هر یک از سیمه‌ها در استوانه)، اطلاع رسانی به ECU برای عملیات تزریق سوخت و جرقه‌زنی در استوانه خودرو است [۸]. زمان جرقه زنی در رایانه خودرو، محاسبه و تعیین می‌شود و به کمک علامت<sup>۴</sup>، اعمال می‌گردد.

هدف از این مقاله، برداشت انرژی [۹، ۱۰] از چرخ طیار، با استفاده از حسگر پیزوالکتریک PVDF و مقایسه عملکرد این حسگر با حسگر القایی دور موتور است. پلی واینی لیدین فلوراید یا PVDF، نوعی پیزوالکتریک پلیمری است. خاصیت پیزوالکتریسته در این نوع پلیمری،

<sup>3</sup> Ceramic

<sup>4</sup> Signal

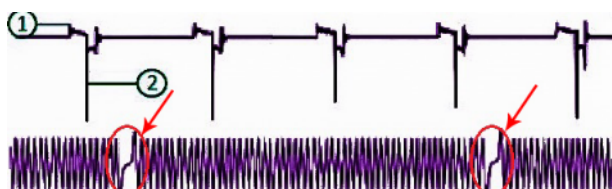
<sup>1</sup> Thermoelectric

<sup>2</sup> Energy Harvesting

علاوه زمان قطع شدن منفی اولیه سیم پیچ و شماره (۲) وقفه ایجاد شده در روند علامت است که همان زمان جرقه زنی است، که در الگوی پایینی آن به خوبی با فلش قرمز قابل رویت است [۲۸].

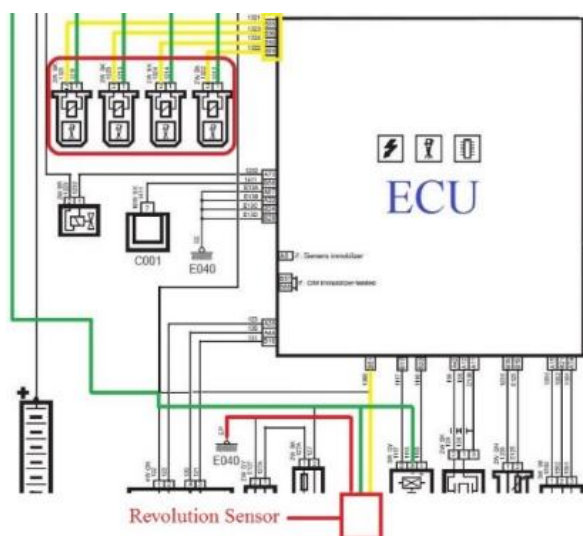
جدول ۱: اجزای حسگر دور موتور (شکل ۱)

شماره	نام
۱	سیم عایق شده
۲	آهن ربای دائمی
۳	بدنه حسگر
۴	بدنه نصب حسگر
۵	هسته آهنی
۶	سیم پیچ
۷	فاصله هوایی
۸	چرخ دندانه تولید کننده علامت با دندانه مرجع



شکل ۲: الگوی تولید علامت از حسگر القایی دور موتور برای موتور XU7.

در خودروهای جدید در کنار حسگر دور موتور از حسگر میل بادامک استفاده می شود. این حسگر مکمل حسگر دور موتور است و همزمان عملکردی تقریباً مشابه با حسگر القایی دور موتور را دارد. در خودروهایی که دورهای تندی را تجربه می کنند و زمان جرقه زنی بین سمبه ها بسیار اندک است و از دقت بسیار ظریفی برخوردارند، نیاز است از این حسگر به عنوان پشتیبان استفاده شود و هر دو حسگر به صورت همزمان به ECU علامت ارسال می کنند (شکل ۳).

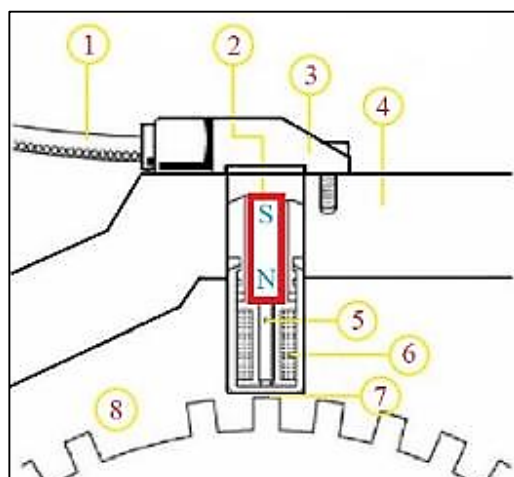


شکل ۳: نحوه ارسال علامت ها و موقعیت زاویه ای میل لنگ به ECU

مثل ECU ارسال نماید. جریان خروجی از این حسگر، به صورت یک ولتاژ متناوب را به صورت امواجی سینوسی به واحد مدیریت برقی خودرو ECU ارسال می کند.

این حسگر یک حسگر القایی-مغناطیسی ساده است که در مقابل چرخ دندانه دارای که روی چرخ طیار قرار دارد نصب می شود. این حسگر شامل یک آهنربا، یک هسته آهنی نرم به همراه سیم پیچ مسی است. میدان گذرنده از سیم پیچ به دلیل حرکت چرخ دندانه دار مقابل میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط آهنربا، تغییر می کند. این تغییر میدان یک جریان برقی متغیر سینوسی ایجاد می نماید که دامنه و بسامد این علامت متناسب با دور موتور است.

محیط چرخ دندانه دار به ۶۰ قسمت مساوی تقسیم شده است. این چرخ دارای ۵۸ دندانه است که به فواصل مساوی از یکدیگر قرار دارند و محل دو دندانه روی آن خالی است. زمانیکه حسگر مقابل این جای خالی قرار می گیرد، بیانگر یک موقعیت خاص از استوانه است که برای ECU تعریف شده است. در هنگام چرخش چرخ طیار به ازای هر دندانه از جلوی حسگر، یک علامت سینوسی در حسگر تولید می شود و به ECU ارسال می کند. حین چرخش چرخ طیار وقتی که محل دو دندانه پاک شده به سر انتهای حسگر رسید دو سمبه ۱ و ۴ به نقطه مکث بالا می رسند. در این ناحیه به دلیلی که حسگر جلوی خود دندانه ای مشاهده نمی کند علامتی نیز تولید نمی کند و فوراً مرگ بالای این سمبه فرا می رسد و جرقه زنی انجام می شود. با احتساب ۶۰ دندانه در ۳۶۰ درجه، ۲ دندانه خالی گستره ۱۲ درجه را شامل می شوند. این بدین معناست که حداکثر پیش رسی جرقه در دلکو ۱۲ درجه می تواند باشد (شکل ۱) [۲۸].

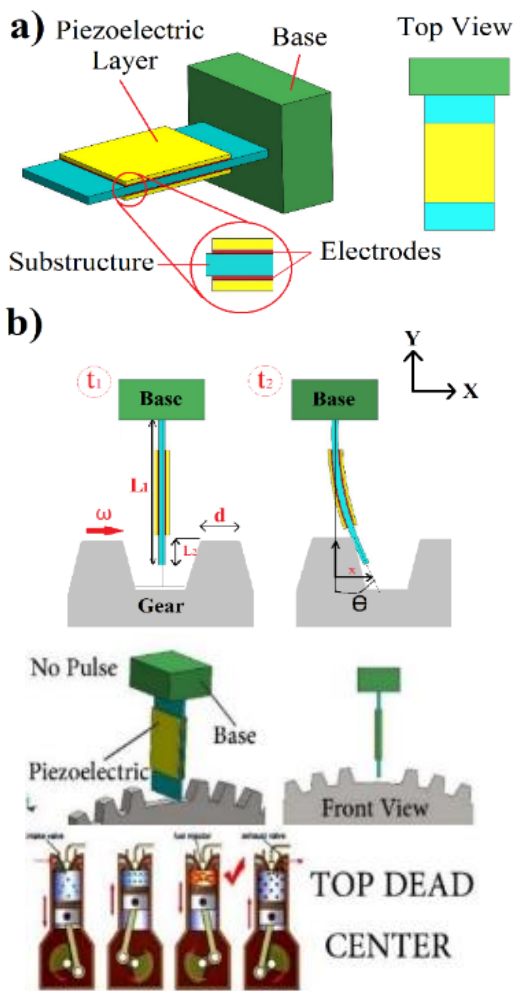


شکل ۱: جزئیات حسگر القایی [۲۸]

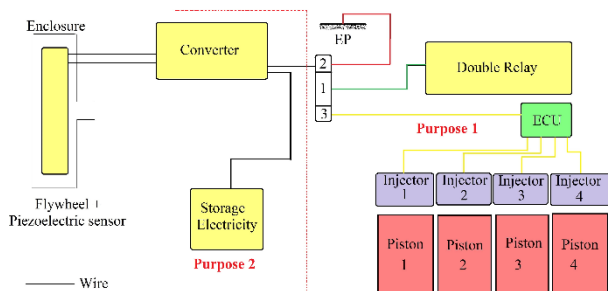
اجزای حسگر دور موتور نیز مطابق شماره گذاری های انجام شده در شکل ۱ و جدول ۱ آمده است.

در شکل ۲ مشاهده می کنید که این شیوه دارای نوفه و شیب است [۲۸]. در این شکل، شماره (۱) مقدار نوفه ها و خطاهای ایجاد شده، به

طیار قرار می‌گیرد. به این ترتیب با چرخش چرخ طیار تیر مرتعش شده و این ارتعاشات با همان بسامد به قطعه پیزوالکتریک منتقل می‌گردد و یک الگوی تغییرات ولتاژ از خود نمایش می‌دهد [۱۲، ۲۶]. اندازه‌های  $L$ ،  $x$ ،  $\omega$ ، و... در شکل ۵، در ادامه پس از طراحی به صورت دقیق آورده شده است [۲۹]. در انتها خروجی‌های پیزوالکتریک را با حسگر دور موتور خودرو مقایسه خواهیم کرد (شکل ۲).



شکل ۵: (a) نمای شماتیک از طرح پیشنهاد شده شامل یک تیر یک سر گیردار و دو قطعه پیزوالکتریک همراه با الکترود (b) نمایی از زاویه رو به رو در لحظه قبل برخورد ( $t_1$ ) و لحظه برخورد ( $t_2$ ) چرخ طیار با انتهای تیر

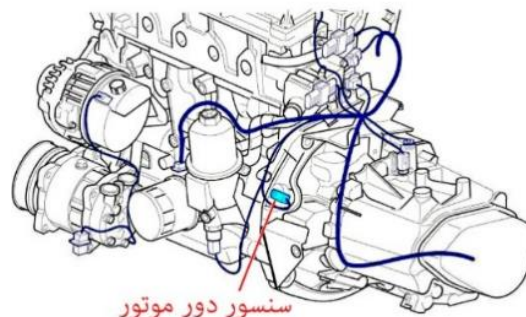


شکل ۶: دو هدف اصلی استفاده از پیزوالکتریک: ۱. برداشت انرژی و ذخیره سازی جریان الکتریسیته ۲. انجام کلیه وظایف حسگر القایی دور موتور

حسگر دور موتور زاویه چرخش میل لنگ را به طور مکرر به ECU ارسال می‌کند و ECU اطلاعات دریافتی را تحلیل می‌کند و سپس زاویه چرخش را محاسبه و فرمان را به عملگرها ارسال می‌کند و سپس عمل جرقه‌زنی را به صورت مکرر انجام می‌شود. ECU علامت را به صورت منظم و به ترتیب به چهار عملگر نشان داده شده در بالای شکل ۳، برای جرقه‌زنی ارسال می‌کند. (شکل برای موتورهای چهار استوانه در نظر گرفته شده است).

محل قرارگیری این حسگر رو پوسته کلاچ چرخ طیار است و فاصله نوک حسگر با دندانه‌های چرخ طیار ۰٫۵+۱ میلی‌متر است. این حسگر ۳ پایه و یا ۲ پایه است. در حسگرهای ۳ پایه، پایه‌های ۱ و ۲ علامت تولیدی حسگر، و پایه ۳، محافظ علامت در برابر نوفه و متصل به بدنه است. (شکل ۱) [۲۸] که با گذشت زمان این فاصله به دلیل چربی و آلودگی تغییر کرده (کاهش پیدا می‌کند) و الگوی علامت به خوبی و با دقت به ECU ارسال نمی‌گردد [۲۸] و در مواردی موتور به خوبی روشن نمی‌شود. زیرا حسگرهای القایی بر اساس فاصله معینی بین دندانه و سیم‌پیچ، طراحی و ساخته می‌شوند. (کلیه اطلاعات بالا و ایرادات دیده شده از این حسگر، از چند نمایندگی در ایران خودرو گرفته شده است) عیبی که در صورت خرابی این حسگر در موتور ایجاد می‌گردد عبارتند از:

۱. روشن نشدن خودرو به دلیل ارسال نشدن علامت‌ها به ECU برای پاشش سوخت (در صورتیکه روشن شدن خودرو با استفاده از اطلاعات حسگر میل دریچه برای ECU تعریف نشده باشد)
۲. حرکت و پرش عقربه دور موتور به صورت غیر معمول و Cut Off‌های ناپهنگام قبل از رسیدن به Red Line
۳. ثابت ماندن یا حرکت نکردن دورسنج از یک دور موتور مشخص
۴. در صورت آلودگی نوک حسگر با براده‌های آهن، جعبه‌دنده و روغن، به علت رسیدن اطلاعات غلط به ECU، موتور در دورهای مختلف بد کار می‌کند.
۵. قطع شدن تلمبه بنزین در حین روشن کردن می‌تواند ناشی از خرابی این حسگر باشد [۲۸].

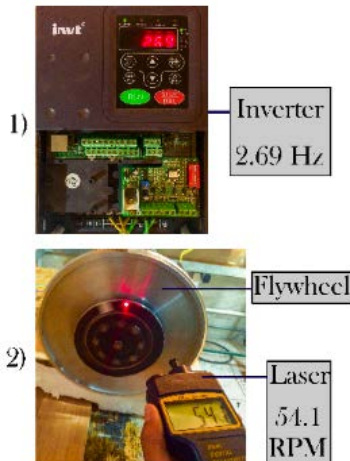


شکل ۴: محل قرارگیری این حسگر در خودرو ۲۰۶ [۲۸]

### ۳- ارائه و شبیه سازی طرح

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید، قطعه پیزوالکتریک بر روی یک تیر یک سر گیردار متصل شده و انتهای تیر مقابل دندانه‌های چرخ

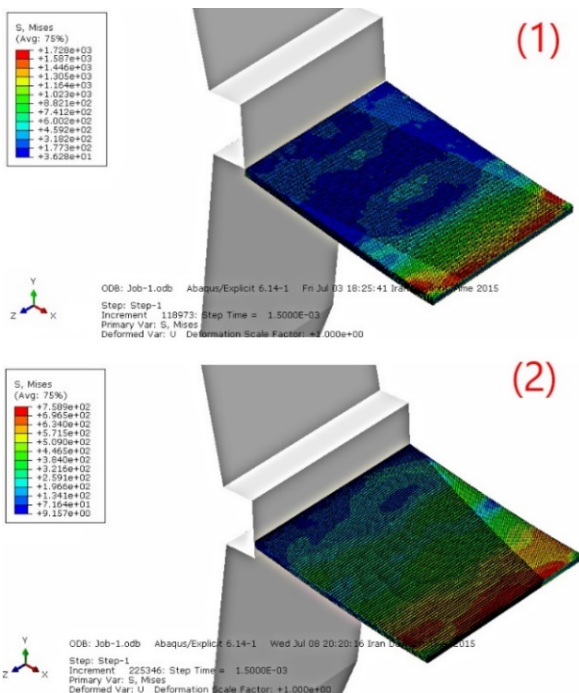
دارد. اینورتر از یک طرف به خروجی موتور و از طرف دیگر به جریان سه فاز متصل است.



شکل ۹: استفاده از دستگاه اینورتر و دورسنج لیزی برای تنظیم دور موتور

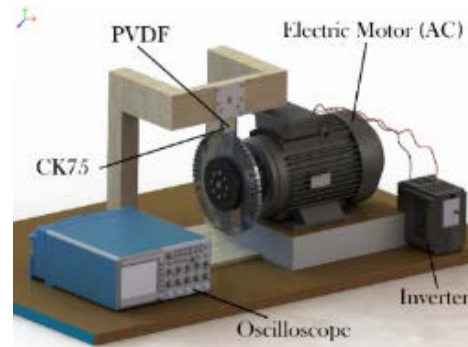
#### ۴- طراحی تیر نگه دارنده پیزوالکتریک

از آنجایی که پیزوالکتریک بر روی تیر متصل خواهد شد و تحت ارتعاش قرار می‌گیرد، به تیری نیاز خواهیم داشت که در شرایط آزمون آزمایشی (دور ۴۰۰ RPM) بتواند تحمل کند. تیر با توجه به شبیه‌سازی پویا و دینامیکی طراحی شده است [۲۱، ۳۰ و ۳۱]. با توجه به نتایج حاصل از FE، بیشترین تنش وارد بر تیر در دور ۴۰۰ RPM در حدود ۱۲۰۰ مگاپاسکال است. بر این اساس فولاد فنی CK75 را با تنش تسلیم ۱۲۷۵ مگاپاسکال انتخاب شده است (جدول ۲). شکل‌های ۱۰ و ۱۲ نمایش دهنده نتایج هستند.



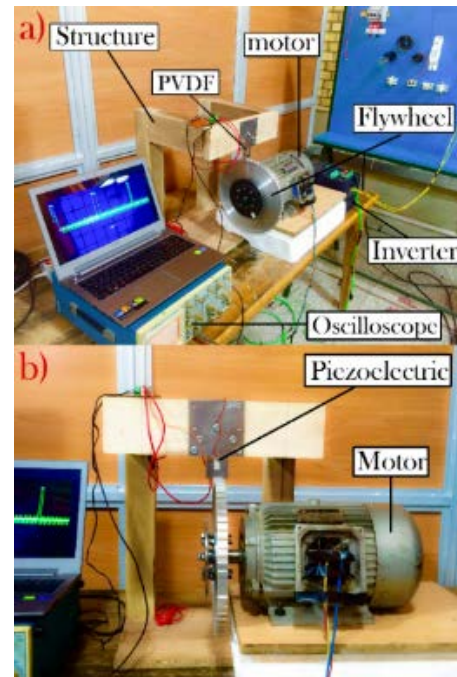
شکل ۱۰: تحلیل دینامیکی تیر

برای اجرای این اهداف یک آزمون به‌صورت آزمایشی مطابق شکل ۷ و ۸ شبیه‌سازی و ساخته شده است. در این آزمون به‌جای موتور خودرو از موتور الکتریکی AC با مشخصات ۹۴۰ rpm، ۵۰ Hz، ۱.۵ KW و ۲HP و به‌جای چرخ طیار از یک صفحه گرد آلومینیومی فرزکاری شده مطابق با شافت موتور و در اندازه‌های چرخ طیار اصلی موتور مورد نظر، و یک ساختار برای مقید کردن تیر و پیزوالکتریک طراحی گردیده است.



شکل ۷: طراحی و شبیه‌سازی نهایی اجزای سازوکار، پیش از ساخت

در زیر پایه چوبی، از لایه‌های فوم، برای تنظیم ارتفاع موتور تا سر تیر به‌نحوی استفاده شده است تا مقدار برخورد دندانها با لبه تیر ۱mm باشد. طراحی به‌شکلی است، که کلیه اندازه‌ها به‌راحتی قابل تغییر باشد. تیر تا حد امکان بالا برده شده تا تنش و جابه‌جایی تیر به حداقل برسد (شکل ۸) (طی آزمون و خطا در شبیه‌سازی سامانه، در ایاکوس)



شکل ۸: (a) موتور الکتریکی و چرخ طیار (b) پایه موتور بر روی تخته

برای تنظیم دور موتور از دستگاه اینورتر و دورسنج لیزی استفاده شده است (شکل ۹). روی چرخ طیار یک برچسب منعکس کننده لیزی قرار

آن‌ها خودداری شده است. در ادامه ورق CK45 و CK75 در ابعاد یکسان ۴۰ میلیمتر در ۴۰ میلیمتر به صورت عملی آزمون شده و نتایج آن آورده شده است.

در شکل ۱۱ شیوه اتصال صفحه چرخ طیار با محور موتور و مقید کردن تیر نشان داده شده و تیر به راحتی قابل تعویض است. تنظیم تیر با کولیس انجام گرفته و جهت حرکت چرخ طیار در این آزمون پادساعتگرد انتخاب شده است.

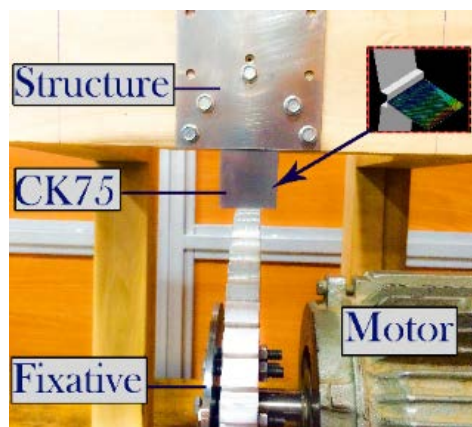
همانگونه که انتظار داشتیم شرایط بارگذاری به گونه‌ای بود که ورق CK45 توانست تحمل کند و قسمتی که داخل گیره بود شکست (ایجاد ترک) و از حالت الاستیک خارج شد (شکل ۱۲). این آزمون در ۴۰۰ دور در دقیقه و به مدت زمان ۱۲۰ ثانیه طول کشید. در تصویر (a) به خوبی می‌توانید مشاهده کنید که تیر خم شده است و از حالت طبیعی (اولیه) خود خارج گردیده است. مقدار انحراف ایجاد شده نسبت به حالت اولیه در حدود ۷ میلیمتر است. (b) در مورد CK75 با ابعاد ۴۰ میلیمتر در ۴۰ میلیمتر و موقعیت آزمایشی ۴۰۰ دور در دقیقه است، که آزمون ۳۰۰ ثانیه به طول انجامید. به دلیل محدودیت دور موتور در موتور الکتریکی استفاده شده و به دلیل طراحی تیر بر اساس دور مشخص ۴۰۰ دور بر دقیقه، امکان بالا بردن دور و آزمون در شرایط قبل نظیر دور ۶۰۰۰ امکان پذیر نبود. خستگی تیر در این تحلیل بررسی نشد و این آزمون تنها برای اثبات اولیه انجام گرفته است. (انحنای دیده شده، قبل از ورود ورق به شرایط آزمون و در هنگام برش ورق ایجاد گردیده است نه در زمان آزمون)

بعد از تحلیل‌ها، محاسبات و آزمون‌هایی که انجام گرفت این نتیجه حاصل شد که از ورق CK75 با ابعاد  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 1\text{mm}$  استفاده کنیم. (کلیه تیرها با wire cut و به طور دقیق بریده شدند)

جدول ۲: مشخصات مکانیکی ورق CK75 (DIN) - AISI 1075

عنوان	CK75	واحد
چگالی	۷,۸۵	$\text{g/cm}^3$
استحکام تسلیم	۱۲۷۵	$\text{N/mm}^2$
تنش کششی	۱۳۲۰-۱۸۷۰	$\text{N/mm}^2$
خواص شیمیایی	C	۰,۷۵
	Si	۰,۲۵
	Mn	۰,۷۰

در شکل ۱۳، اتصال PVDF بر روی ورق CK75 با ابعاد  $80\text{mm} \times 40\text{mm} \times 1\text{mm}$ ، ورق وارد گیره شده و اتصال موقت خواهد شد. پیزوالکتریک کاملاً به ابتدای تیر متصل شده است و ورودی‌های PVDF مرتعش نمی‌شوند. (اگر این ورودی‌ها تحت ارتعاش قرار گیرند، در الگوی تولید علامت خطا ایجاد می‌شود. در نتیجه فقط باید خود قطعه به تنهایی مرتعش شود - ارتعاشات پایه چوبی هم می‌تواند این مشکل را ایجاد کند)



شکل ۱۱: نحوه برخورد دندان‌های چرخ طیار با انتهای تیر



شکل ۱۲: بررسی شکست در تیرهای CK75 و CK45

در تحلیل (۱) تیر CK75 با ابعاد  $35\text{mm} \times 30\text{mm}$  و با ضخامت ۱ mm در نظر گرفته شده است، که پس از بارگذاری و اصابت دندان‌های چرخ طیار، مقدار تنش‌های اعمال شده بسیار شده است و تیر از حالت الاستیک به حالت پلاستیک رفته است (۱۷۰۰ مگاپاسکال). در تحلیل (۲) با کاهش طول تیر به اندازه ۵ mm و جنس CK75، تنش‌های ایجاد شده در تیر تا حد امکان کاهش یافته (۷۰۰ مگاپاسکال - مناسب آزمون نهایی زیرا تنش تسلیم CK75، ۱۲۷۵ است). جنس CK45 با ابعاد دیگر آزمون شده که به دلیل افزایش حجم مقاله از آوردن

در جدول ۳ مشخصات اصلی قطعات PVDF آورده شده است. از این جدول برای نوشتن جدول‌های اصلی پیزوالکتریک برای تحلیل نرم‌افزاری استفاده شده است. (نتیجه تحلیل در انتها آمده است)

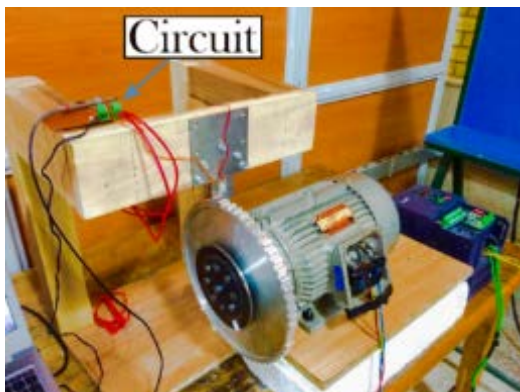
جدول ۳: مشخصات فنی PVDF

نماد	متغیر	PVDF	کوپلیمر	واحد
$d_{31}$	ثابت کرنش	۲۳	۱۱	$10^{-12} \frac{C}{m^2}$
$d_{33}$	پیزوالکتریک	-۳۳	-۳۸	$\frac{N}{m^2}$
$g_{31}$	ثابت تنش	۲۱۶	۱۶۲	$10^{-3} \frac{V}{m}$
$g_{33}$	پیزوالکتریک	-۳۳۰	-۵۴۲	$\frac{N}{m^2}$
$k_{31}$	ضریب	%۱۲	%۲۰	
$k_t$	کوپلینگ الکترومکانیک	%۱۴	-%۲۹	
$Y$	ضریب یانگ	۲ - ۴	۳ - ۵	$10^9 \frac{N}{m^2}$
$\rho_m$	چگالی جرمی	۱,۷۸	۱,۸۲	$10^3 \frac{kg}{m}$

با توجه به نتایج حاصل شده، تنش به مقداری نیست که بتواند تیر را وارد حالت پلاستیک کند.

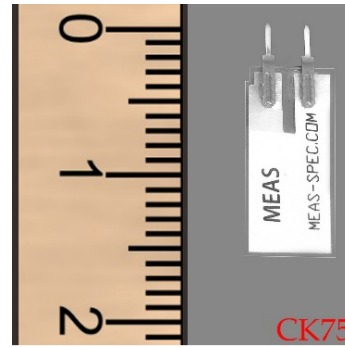
همانطور که در مقدمه اشاره شد، PVDFها یک نوع پیزوالکتریک با خاصیت پلیمری است که بر خلاف انواع PZT که سرامیکی هستند، قابلیت انعطاف بسیار بهتری دارد. جهت دوقطبی شدن در راستای محور  $y$ ها است (شکل ۱۵).

این پیزوالکتریک شامل یک جزء انعطاف پذیر حاوی لایه پیزوالکتریک پلیمری PVDF با ضخامت  $28 \mu m$  و با الکترودهای نقره‌ای است. روکش قسمت پلیمری  $0.125$  میلی‌متر است و مجهز به دو خروجی برای اتصال است. به‌طوریکه محور مکانیکی لایه پیزوالکتریک، با خم شدن (یک کرنش بالا داخل پیزو پلیمر) یک ولتاژ بالا ایجاد می‌کند (شکل ۱۶).



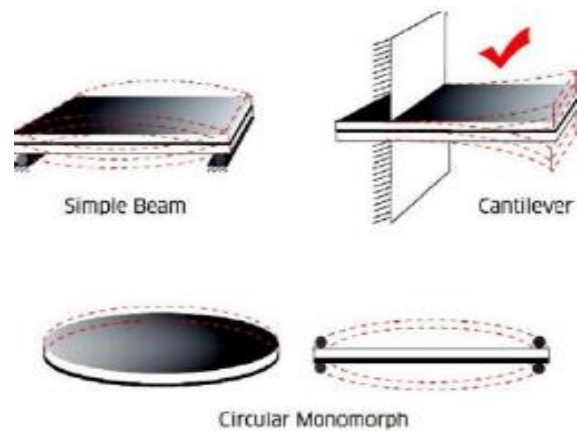
شکل ۱۶: ابعاد اصلی PVDF و نمایش مدار مربوط به حسگر

هنگامی که کل اجزا با یک تماس مستقیم منحرف می‌گردند، دستگاه به‌عنوان یک سویچ انعطاف پذیر عمل کرده و خروجی تولید شده کافی است به یک نکه دارند MOSFET یا CMOS برای ذخیره هدایت گردد.



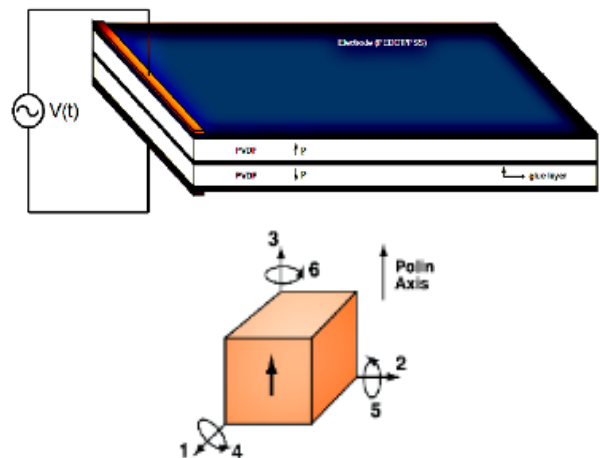
شکل ۱۳: اتصال PVDF بر روی ورق CK75

پیکربندی‌های متفاوت برای اعضای تحت ارتعاش مطابق شکل ۱۴ وجود دارد که در این آزمون از تیر یک سرگیردار (تیک قرمز رنگ) استفاده شده است.



شکل ۱۴: پیکربندی‌های متفاوت برای اعضای تحت ارتعاش

رایج‌ترین اشکال خم کردن به‌صورت مربعی، مستطیلی و یا دایره‌ای هستند (شکل ۱۵). این اشکال اگر به‌صورت پیکربندی Cantilever نصب گردند، نصب آسان و تنظیم ساده‌ای خواهند داشت. قطعاتی که به‌صورت Cantilever نصب شده‌اند چهار برابر انحنا را تولید می‌کنند و یک چهارم نیرو را نسبت به تیر ساده دریافت می‌کنند (simple beam).

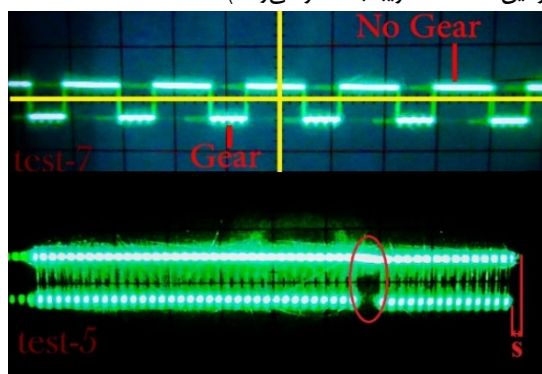


شکل ۱۵: شمای یک bimorph - نمادهای محورهای دوقطبی شدن یک پیزوالکتریک

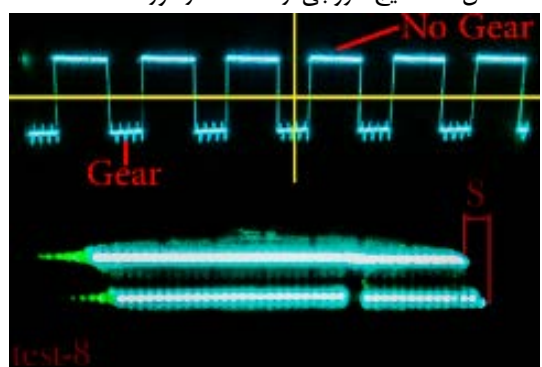
## ۶- نتایج

### ۶-۱- بررسی عملکرد حسگر PVDF با حسگر القایی دور موتور

پس از آزمون‌هایی که بر روی پیزوالکتریک انجام گرفت، نتایج به شرح زیر بدست آمد: کلیه تصاویر با عکس برداری ۶۰ فریم بر ثانیه انجام گرفته شده و تا زمانی که موتور الکتریکی روشن نشود تغییرات ولتاژ مشاهده نمی‌شود و نمودار تغییرات ولتاژ برحسب زمان یک خط افقی خواهد بود. در شکل ۱۸ یک چرخه ساده، از چرخش چرخ‌طیار نشان داده شده است. دایره‌های روشن سبز رنگ، همان دندانها هستند. در قسمتی که با دایره قرمز رنگ مشخص شده است، به خوبی دو دندان صاف شده قابل تشخیص هستند. اختلاف "S" در این تصویر که به اندازه دو دندان است به این دلیل اتفاق افتاده که در واقعیت، علامت‌هایی که ایجاد شده به صورت مربعی نبوده و با اندکی زاویه ایجاد شده‌اند. این اختلاف در چرخه‌ای که نشان داده شده است در شکل ۱۹ هم اتفاق افتاده است، اما به دلیل آن که دور موتور ۴۰۰ RPM است این اختلاف به اندازه چهار دندان است واضح‌تر دیده می‌شود. (در دورهای تندتر این اختلاف تقریباً به صفر می‌رسد).



شکل ۱۸: نتایج خروجی از PVDF در دور ۶۰۰ RPM



شکل ۱۹: نتایج خروجی از PVDF در دور ۴۰۰ RPM

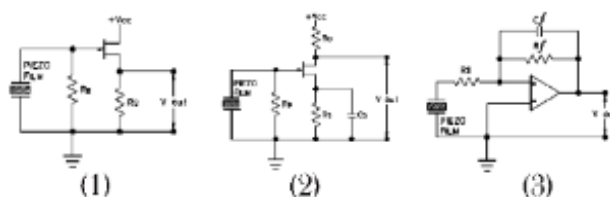
در شکل ۱۹، علامت‌هایی که ایجاد شده، ناشی از قسمتی است که دو دندان چرخ‌طیار صاف است و وقفه‌ای در علامت‌ها به وجود آمده است. در تصویر پایینی با تغییراتی که در نمایشگر اعمال شد این وقفه در علامت، به صورتی دیگر و با دایره‌ای قرمز رنگ مشخص شده است

اگر سامانه، با اینرسی از یک طرف گیردار شده و از طرف دیگر آزاد باشد (همانند یک تیر ایجاد تنش خمشی)، دستگاه به‌عنوان یک شتاب سنج عمل می‌کند. افزودن جرم یا تغییر در طول آزاد این قطعه با گیره، می‌تواند برای مصارف خاص بسامد تشدید و حساسیت‌های زیاد استفاده شود. پاسخ چند محور را می‌توان با یافتن مرکز جرم بدست آورد. LDTM-028K (PVDF)، یک حسگر لرزشی است که در آن عنصر سنجش استفاده شده، شامل یک سگدست بارگذاری شده به وسیله یک جرم اضافی به منظور افزایش حساسیت در بسامدهای پایین است.

### ۵- مشخصات مدارهای الکتریکی پیزوالکتریک

مدارهای مختلفی از جمله ترانزیستورهای اثر میدانی (FETS)، تقویت کننده‌های عملیاتی (تقویت‌کننده‌ها) و جریان‌های لوگیک ضعیف (Coms)، می‌توانند به حسگرهای پیزوالکتریک متصل شوند. در این بین، FETSها با توجه به این که در سطوح بسامدی کوچکی هستند، در کاربردهایی با مقیاس کوچک‌تر از فناوری قرار می‌گیرند و ویژگی‌های آن باعث شده است که این دسته از مدارها، برای سوئیچ کردن بسامد، تغییر ظرفیت پیزوالکتریک، محافظت از تداخل الکترومغناطیس و... استفاده گردند.

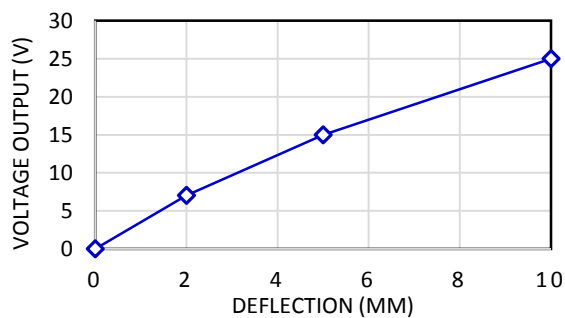
مقاومت آن‌ها مطابق شکل ۱۷، RS و RD است. همانگونه که بهره‌وری در سامانه‌های دارای پیزوالکتریک افزایش پیدا کند، پهنای باند بسامد، کاهش پیدا خواهد کرد. تقویت کننده‌های قابل استفاده در این گونه از سامانه‌ها، تنوع زیادی برای کاربردهای سوئیچینگ پیزوالکتریک دارند. مدار تقویت کننده نشان داده شده در شکل ۱۷، تقویت کننده با مقاومت داخلی در حدود صفر است، بنابراین در نبود ولتاژ در سراسر لایه پیزوالکتریک، به‌عنوان یک مولد عمل خواهد کرد. از ویژگی‌های دیگر یک تقویت کننده، این است که سریعاً عوارض ناشی از لایه پیزوالکتریک را بدون وقفه در زمان نمایش اطلاعات، و بدون کاهش هیچگونه باری از الکترودها، جذب می‌کند. تقویت کننده، مستلزم داشتن یک مقاومت ورودی قوی و یک جریان پایه ضعیف است. در مدارهایی با ظرفیت خازنی پیزوالکتریک، به دلیل وجود خازن و سیم‌های اتصال دهنده آن، مقدار مختصری بر روی تابع جریان منتقل شده، تأثیر گذاشته و از این رو، تغییر در اندازه لایه پیزوالکتریک و طول سیم‌ها، حساسیت لازم را نخواهد داشت و شاهد خطا هستیم.



شکل ۱۷: مدارهای اتصال به پیزوالکتریک. (۱) یک نمونه از اثر میدانی، مدار (۲) شامل مدار خازنی و مدار (۳)، مدار دارای تقویت کننده است

### ۶-۲- برداشت انرژی الکتریکی از PVDF

در دور ۴۰۰ RPM مقدار تنش که به قطعه پیزوالکتریک وارد شده، ۱۰۰ MPa و مقدار کرنش ۰,۰۰۲ بوده است. این آزمون در دورهای مختلف ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ RPM انجام شد، اما به دلیل افزایش رفتن حجم مطالب نتایج کلیه آزمون‌ها ذکر نشده و تنها به صورت مختصری آورده شده است. در شکل ۲۳، نمودار تغییرات ولتاژ برحسب مقدار انحراف. برای PVDF از یک تقویت کننده برای به دست آوردن حساسیت ولتاژ مدار باز استفاده شده است و خروجی برای کنترل مقدار انحراف عملی نوک حسگر اندازه گیری شده است. ۲ میلیمتر انحراف برای تولید ۷ ولت ولتاژ کافی است [۳۲].



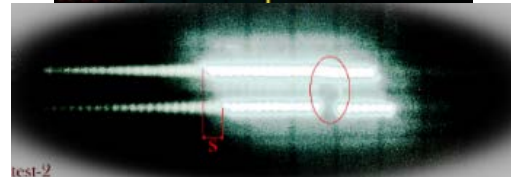
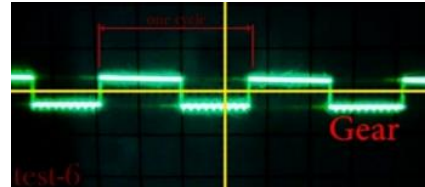
شکل ۲۳: نمودار تغییرات ولتاژ برحسب مقدار انحراف

به دلیل ولتاژ بسیار ضعیفی که پیزوالکتریک نسبت به تغییر شکل تولید می‌کند، در این آزمایش از تقویت کننده استفاده شده است. با توجه به نتایج تحلیل ایستایی در نرم‌افزار، مقدار جابه‌جایی تیر ۷ mm و PVDF، ۴ mm است، که مقدار خروجی پیزوالکتریک ۲۵۷ بدست آمد (شکل ۲۴). در آزمون آزمایشی در دور ۴۰۰ RPM مقدار جابه‌جایی PVDF تقریباً ۵ mm است که مطابق شکل ۲۳ مقدار ولتاژی که پیزوالکتریک در این انحراف باید تولید کند تقریباً ۱۵۷ است. (شکل ۲۳ و ۲۶ از دفترچه رسمی شرکت تولید کننده با عنوان محصول LDT0-028K گرفته شده است.)

### ۶-۳- تحلیل ایستایی PVDF در شرایط آزمون عملی

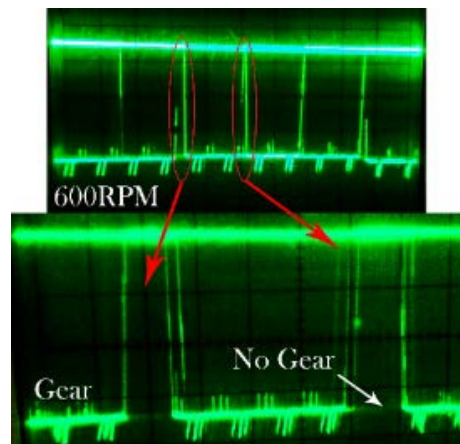
مطابق سه ماتریس اصلی (برق، مکانیک، برق و مکانیک) پیزوالکتریک PVDF و اطلاعات جدول ۳، قطعه لازم طبق ابعاد دفترچه بر روی تیر CK75 (طراحی شده در شکل ۱۰) مطابق شکل ۲۴ هم‌بندی شد. شرایط تحلیل به این گونه بود که تیر یک سرگیردار شامل پیزوالکتریک، تحت آزمون استاتیکی قرار گرفت (تحلیل استاتیکی در نرم‌افزار اباکوس انجام گرفته است). ضربه‌ایی با سرعت دورانی ۴۰۰ RPM به انتهای تیر برخورد کرده و نتایج آن در شکل ۲۴ و ۲۵ آورده شده است. در شکل ۲۵ مشاهده می‌کنید که موقع بارگذاری استاتیکی مقدار ولتاژ تولید شده توسط پیزوالکتریک ۲۵۷ است (در واقعیت اعمال نیروها به صورت دینامیکی اعمال می‌گردد).

(تیر برای دور ۴۰۰ طراحی شده بود اما در آزمون نشان داد که برای چند لحظه می‌تواند دور ۶۰۰ را هم تحمل کند) در شکل ۱۹ و ۲۰ این آزمون انجام شده و وقفه موردنظر دیده می‌شود. محور اصلی در کلیه تصاویر با رنگ زرد مشخص گردیده است.

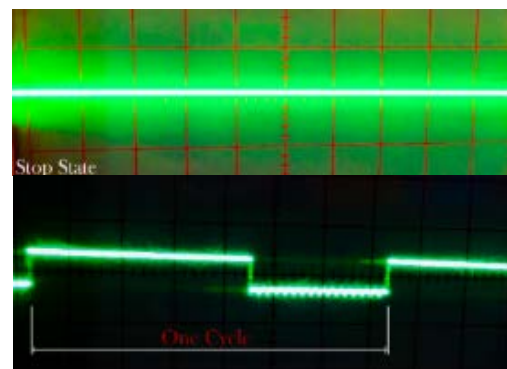


شکل ۲۰: نمودار ولتاژ- زمان، خروجی‌های PVDF در ۳۰۰ RPM

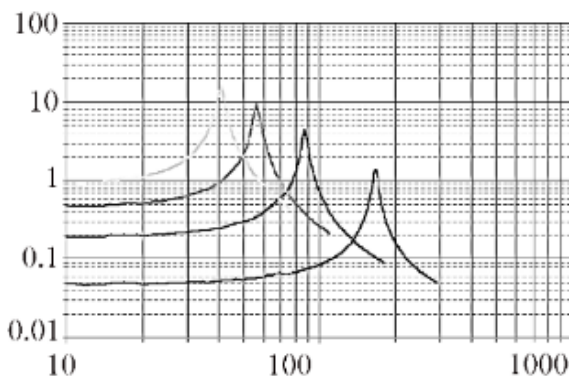
در شکل ۲۱ وقفه‌های دیده شده به شکلی دیگر نشان داده شده و در شکل ۲۲ یک چرخه حرکتی چرخ‌طیار مشخص شده است. از زمان دیده شدن وقفه در روند علامت تا دیده شدن وقفه دوم را یک چرخه دورانی کامل در نظر گرفته‌ایم. (زمانی که چرخ‌طیار در چرخش نیست علامت به صورت یک خط صاف دیده می‌شود)



شکل ۲۱: دور ۶۰۰ RPM فاصله وقفه اول تا وقفه دوم



شکل ۲۲: نمودار ولتاژ- زمان، خروجی‌های PVDF در ۲۰۰ RPM

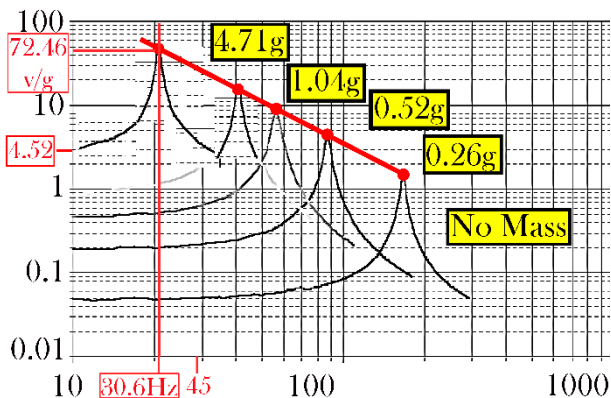


شکل ۲۶: حساسیت PVDF - تاثیر افزودن جرم - محور عمودی حساسیت (V/g) و محور افقی بسامد (Hz) را نشان می‌دهد.

### ۶-۵- پیش‌بینی بسامدهای تشدید برای PVDF

طبق شکل ۱۳ ابعاد تیر CK75 به صورت ۱۴ میلیمتر × ۴۰ میلیمتر که به حالت معلق و معادلی افزودن ۴,۷۱ گرم جرم به انتهای آن است (با توجه به ابعاد و چگالی ورق CK75). ارتعاشات چرخ‌طیار به‌عنوان shaker و تیر معلق به‌عنوان شتاب‌گیرنده (جرم افزوده شده) استفاده می‌گردد.

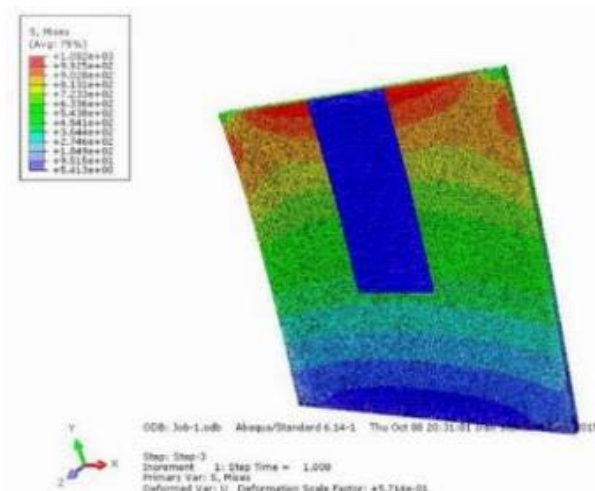
در شکل ۲۷ بسامد تشدید PVDF در شرایط آزمایش - نقاط قرمز رنگ بسامدها تشدید با افزودن جرم‌های متفاوت است - نمودار جدید از نمودارهای دیگر برای ۴,۷۱ گرم به‌دست آمده است (به‌صورت تجربی و به‌صورت ترسیمی از نمودار).



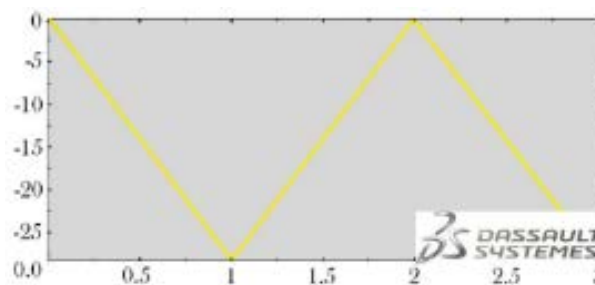
شکل ۲۷: بسامد تشدید PVDF در شرایط آزمایش

جدول ۵: پیدا کردن بسامد تشدید و حساسیت پایه در شرایط آزمایشگاه و مطابقت با دفترچه شرکت تولید کننده.

جرم اضافه شده	حساسیت پایه	حساسیت تشدید	بسامد تشدید
۰	۵۰ mV/g	۱,۴V/g	۱۸۰ Hz
۰,۲۶	۲۰۰ mV/g	۴V/g	۹۰ Hz
۰,۵۲	۴۰۰ mV/g	۸V/g	۶۰ Hz
۱,۰۴	۸۰۰ mV/g	۱۶V/g	۴۰ Hz
۴,۷۱	۳۶۱۶ mV/g	۷۲,۴۶V/g	۳۰,۶ Hz



شکل ۲۴: نقشه تنش - تحلیل PVDF بر روی CK75



شکل ۲۵: ظرفیت الکتریکی - زمان (تست استاتیکی)

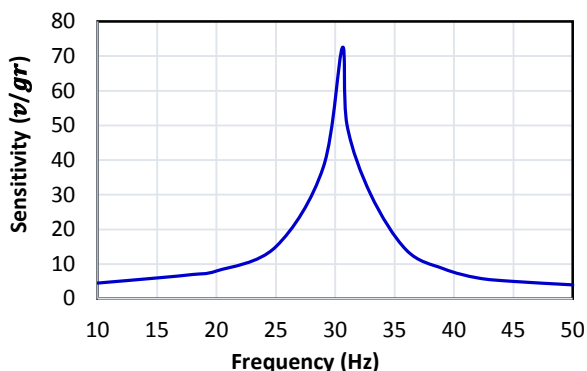
### ۶-۴- رفتار پیزوالکتریک PVDF در سرعت‌های مختلف

یک تقویت کننده برای نمایان ساختن علامت خروجی استفاده شده است به طوری که ارتعاشات یک shaker در جدول تنظیم گردیده است (استفاده از تقویت کننده اجازه می‌دهد تا یک اندازه‌گیری بسیار طولانی را در زمانی ثابت داشته باشیم و بنابراین ولتاژ پاسخ در یک مدار باز را محاسبه می‌کنیم). جرم‌های کوچک (مقادیر حدود ۰,۲۶ گرم) به نوک حسگر افزوده شده و پس از آن اندازه‌گیری‌های مکرر انجام گرفته است. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است و رسم نمودارها در کنار همدیگر در شکل ۲۶ بدون اضافه کردن جرم تا اضافه کردن ۱,۰۴ g PVDF نشان داده شده است. بسامد تشدید برای بدون جرم ۱۸۰ هرتز است و افزودن جرم به نوک باعث کاهش بسامد تشدید و افزایش حساسیت پایه می‌گردد (جدول ۴).

جدول ۴: قطعه PVDF به‌عنوان حسگر ارتعاشی

جرم اضافه شده	حساسیت پایه (mV/g)	حساسیت تشدید	بسامد تشدید
۰	۵۰	۱,۴V/g	۱۸۰ Hz
۱	۲۰۰	۴V/g	۹۰ Hz
۲	۴۰۰	۸V/g	۶۰ Hz
۳	۸۰۰	۱۶V/g	۴۰ Hz

(۴۰۰ دور در دقیقه) معادل ۲۰ هرتز است (۲۰ هرتز بر اساس داده‌های ثبت شده در مبدل است). این سازوکار در بسامد ۳۰ تا ۳۱ هرتز خطرناک است (۶۰۰ تا ۶۰۵ دور در دقیقه). بسامد تشدید برای PVDF با افزودن جرم ۴,۷۱ گرم برابر بسامد تشدید CK75 است. اگر موتور خودرو در ۶۰۰ دور در دقیقه یا تندتر کار کند، بر اساس اطلاعات ثبت شده در شکل ۲۷ و ۲۸ ما شاهد کاهش ولتاژ تولید شده خواهیم بود، اما برای این که بدانیم در دوره‌های تندتر از ۶۰۰ این سازوکار رفتار مشابه حسگر القایی را خواهد داشت یا نه، باید این آزمون در دوره‌های تندتر انجام گیرد.



شکل ۲۸: حساسیت (V/g) بر حسب بسامد  
باتوجه به جدول ۷ حساسیت برای تشدید با افزودن ۴,۷۱ گرم جرم در حدود ۷۲,۴۶ ولت می‌گردد.

جدول ۷: تغییرات بسامد نسبت به حساسیت در شرایط آزمایشگاهی

بسامد (Hz)	حساسیت (v/gr)
۱۰	۴,۵۲
۲۰	۷,۵
۳۰,۶	۷۲,۴۶
۳۹,۱۱	۸,۶۶
۵۰	۴

قسمت طوسی رنگ حساسیت در تشدید است و قسمت آبی رنگ سرعت موتور الکتریکی در آزمون تجربی را نشان می‌دهد. (۲۰ هرتز و ۴۰۰ دور در دقیقه) - تمام نتایج در این بخش به صورت تقریبی است.

### ۶-۷- مقایسه و تحلیل چند نمونه پژوهش مشابه

• اولین تحقیق: این آزمون با استفاده از چهار نوع جرم ثابت مختلف انجام گرفته است، ۰، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ گرم (شکل ۲۹.a) و نشان داد که ولتاژ تولید شده برای دو الگوی اول با جرم ثابت‌های مختلف با یک دیگر متفاوت است. از شکل ۲۹.a می‌توان این را دریافت که ولتاژ تولید شده با افزایش وزن، افزایش پیدا کرده است. همچنین اولین بسامد طبیعی با افزایش وزن کاهش پیدا کرده است. از این رو

بسامد تشدید در ۴,۷۱gr برابر ۳۰,۶Hz و حساسیت در رزونانس برابر ۷۲,۴۶V/g (بدست آمده از شکل ۲۷). در نتیجه طبق شکل ۲۵ ولتاژ تولیدی برابر است با ۲۵۷. طبق جدول ۶ [۳۲] حساسیت تشدید ۷۵ ولت بر گرم است و در آزمون تجربی ۷۲,۴۶ ولت بر گرم (و یا ۳۰Hz) بدست آمد (جدول ۵).

جدول ۶: خواص نمونه برای PVDF

واحد	مقدار	پارامتر
V/g	۱,۱	حساسیت ولتاژ (مدار باز حالت پایه)
pC/g	۲۶۰	حساسیت شارژ (پایه)
V/g	۷۵	حساسیت تشدید
V/g	۶	حساسیت ولتاژ (مدار باز حالت تشدید)
Hz	۴۲	بسامد محدود بالایی
%	+/- ۱	خطی بودن
pF	۲۴۴	ظرفیت خازنی
(none)	۰,۰۱۸	ضریب تلفات
gr	۰,۳	جرم داخلی

وقتی که تیر به صورت افقی نصب گردد شتاب در سطح عمودی یک خمش را در تیر به وجود می‌آورد (با توجه به لختی جرم در نوک تیر). کرنش ایجاد شده در تیر یک واکنش برای پیزوالکتریک ایجاد کرده که ممکن است به عنوان یک خروجی و یا ولتاژ خروجی در سراسر الکترودهای حسگر نمایان گردد. حسگر ممکن است برای شناسایی لرزش‌های مداوم و یا ضربه‌ها و یا هر دوی این دو استفاده گردد. برای بسامدهای زیر بسامد تشدید حسگر، اگر دستگاه یک خروجی خطی را به وسیله‌ی خط پایه‌ای که در بالا نقل شد تولید کند، حساسیت در تشدید به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. ضربه‌های حاوی بسامدهای بالا باعث تحریک بسامد تشدید اجزا می‌گردد. همان طور که نشان داده شد، توانایی حسگر برای کشف کردن بسامد پایین حرکت‌ها (تکان‌ها) شدیداً بر روی خروجی مدارهای برقی تأثیر می‌گذارد همان گونه که در پایین بیان می‌گردد:

### ۶-۶- بسامد تشدید در تیر CK75

$$\omega_n = \sqrt{K/M} \quad (۳)$$

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (۴)$$

در اینجا E برابر  $210 \times 10^6$  MPa، I برابر است با  $\frac{1}{2}bh^3$  ( $5 \times 10^{-9}$ )، L = 40 mm طبق شکل ۱۰. برای ابعاد  $1 \times 40 \times 40$  میلی‌متر و جنس CK75، m برابر ۱۲,۵۶ گرم خواهد بود. در نتیجه بسامد تشدید برای CK75 ۳۱,۰۴ هرتز است. با توجه به جدول ۳ بسامد تشدید در شرایط آزمایش برابر ۳۰,۶ هرتز و بسامد در شرایط آزمایش

## ۷- بحث و نتیجه گیری

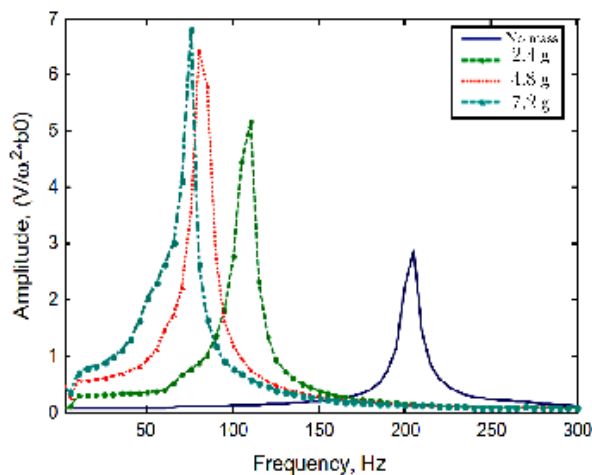
حسگرهای القایی موجود، جوابگوی تمامی نیازهای ضروری یک خودرو هستند و ایرادات گفته شده از این حسگر کاملاً طبیعی بوده و برای هر نوع حسگری این ایرادات به نحوی وارد است. حتی در برخی از خودروهای جدید، دندانه‌ها هم بر روی چرخ طیار وجود ندارند و در نتیجه این طرح در آن خودروها جوابگو نخواهد بود. با این وجود این آزمون به صورت کاملاً آزمایشی و تنها برای اثبات فرضیه انجام گرفت. برای نزدیک شدن به واقعیت باید موتور الکتریکی با دور تندتر RPM ۳۰۰۰ انتخاب، و تیر را به نحوی طراحی کرد که بتواند در دورهای تندتر از RPM ۳۰۰۰، تحمل کرده و در حالت الاستیک باقی بماند. بطور مثال می‌توان از مواد مرکب با انعطاف پذیر و تنش تسلیم قویتر استفاده کرد. رفتار قطعه پیزوالکتریک در تنش‌های قویتر و در دورهای تندتر آزمون نشده است. می‌توان مانند شکل ۵ در دو طرف تیر از قطعه PVDF به نحوی استفاده کرد که مقدار برداشت انرژی تقریباً ۲ برابر شود. علامت‌های خروجی از پیزوالکتریک به راحتی قابل ارسال به ECU هستند، به صورتی که با قرار دادن یک تقویت کننده در مدار پیزوالکتریک، ولتاژ نهایی را به ۱۲۷ رساند (متناسب با منبع تغذیه خودرو).

این سازوکار نشان داد که پیزوالکتریک می‌تواند کاربردهای حسگر دور موتور خودرو را تا دور RPM ۶۰۰ انجام دهد و تا این دور جوابگوی نیازهای خودرو باشد (با به کار بردن پیزوالکتریک‌هایی که در شکل ۲۹ آورده شد می‌توان نتیجه گرفت که پیزوالکتریک‌هایی هستند که توانایی کار کردن در بسامدهای شدیدتر را دارند). در این آزمون و این نوع از پیزوالکتریک تا دور RPM ۶۰۰ برداشت انرژی را خواهیم داشت و با افزایش دور طبق شکل ۲۸ شاهد افت انرژی در پیزوالکتریک هستیم. طبق شرایط آزمون شده در این آزمایش، به علت وجود تماس بین حسگر و دندانه، علامت‌ها دقیق‌اند و امکان رد شدن وقفه علامت وجود ندارد. به دلیل وجود تداخل فیزیکی، امواج صوتی نسبتاً قوی از این سازوکار منتشر می‌شود که می‌توان با عایق‌های صوتی آن‌را به حداقل رساند. نمودارهایی که در انتها نشان داده شد تماماً بر حسب تغییرات ولتاژاند که این تغییرات عامل اصلی جریان برق اند.

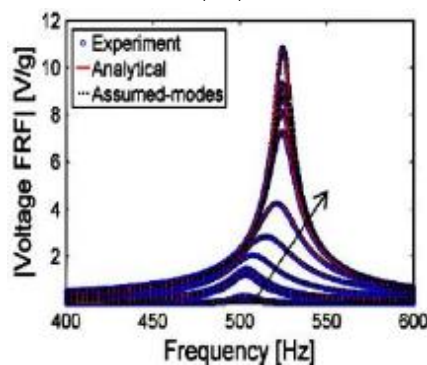
همانطور که دیده شد، اختلاف ولتاژ و وقفه‌ایی که در روند علامت‌ها وجود دارد، نسبت به خروجی‌های حسگر القایی، نتایجی تقریباً مشابه داشته است. کلیه صحبت‌ها تنها در شرایط دور RPM ۶۰۰ مطرح شده است و برای دورهای تندتر صادق نیست و نیاز به طراحی و جایگزین کردن مواد و طراحی مجدد هستیم. در تحلیل‌های نرم‌افزاری مقدار ولتاژ ۲۵۷ (شکل ۲۵) و در آزمون تجربی این مقدار ۱۵۷ بدست آمد (شکل ۲۳). این اختلاف به دلیل اینست که در تحلیل نرم‌افزاری، پیزوالکتریک در شرایط اعمال بار استاتیکی شبیه‌سازی شده، اما در واقعیت به صورت دینامیکی این بارگذاری اعمال شد. اما خطاهای ایجاد شده دیگری در سازوکار نظیر نمایشگر و مبدل در آزمون آزمایشگاهی این خطا را بیشتر

از جرم ثابت می‌توان برای تنظیم بسامد طبیعی تیر استفاده کنیم. نتایج آزمون با نتایج حاصل از تحلیل و شبیه‌سازی مقایسه گردیده است [۳۳].

• دومین تحقیق: در این تحقیق، از قطعه PZT-5H استفاده و این قطعه، در سرعت‌های مختلف آزمون شده است. همانطور که در شکل ۲۹.b مشاهده می‌کنید، پیک و بسامد تشدید اول، در بسامد ۵۳۰ هرتز است ایجاد شده است. شتاب سنج استفاده شده بر روی انتهای تیر قرار گرفته و مقدار  $V/g$  طبق شکل نشان داده شده، بدست آمده است. (همانطور که مشاهده می‌کنید این پیزوالکتریک توانایی تولید  $۱۲۷/g$  را داشته و تا بازه بسامدی ۶۰۰ هرتز قابلیت آزمون دارد [۳۴].



(الف)



(ب)

شکل ۲۹: (الف) ولتاژ خروجی از آزمایش PZT با جرم‌های ثابت مختلف برای نزدیک شدن به اولین بسامد طبیعی - (ب) تغییرات ولتاژ برای قطعه PZT-5H.

در تمامی آزمون‌ها و تحلیل‌ها، قطعات پیزوالکتریک (PZT، PVDF) در برابر افزایش شتاب با افزودن جرم ثابت در ارتعاشات رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند [۱۳، ۲۸، ۳۲ و ۳۳]. این رفتار مشابه در بسامد تشدید و حساسیت در تشدید با جرم‌های متفاوت اضافه شده در بسامدهای مختلف، متفاوت است [۱۵، ۳۰].

Soundand Vibration. 333(2014)6209-6223

[11] Samuel C. Stanton, Clark C. McGehee and Brian P. Mann. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator. *Physica. D* 239 (2010) 640-653

[12] Chengkuo Lee, Huicong Liu, Lokesh Dhakar and F.E.H. Tay. A new energy harvester design for high power output at low Frequencies. *Sensors and Actuators. A* 199 (2013) 344- 352

[13] Chengkuo Lee, Huicong Liu, Takeshi Kobayashi, Cho Jui Tay and Chenggen Quan. Piezoelectric MEMS-based wideband energy harvesting systems using a frequency-up-conversion cantilever stopper. *Sensors and Actuators. A* 186 (2012) 242- 248

[14] V. Ferrari, M. Baù, M. Ferrari and E. Tonoli. Sensors and energy harvesters based on piezoelectric thick films. *Procedia Engineering.* 25 (2011) 737 - 744. *Proc. Eurosensors XXV*, September 4-7, 2011, Athens, Greece

[15] A. Erturk and D.J. Inman. Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling. *Journal of Sound and Vibration.* 330 (2011) 2339-2353

[16] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti and D. Marioli. A Single-Magnet Nonlinear Piezoelectric Converter for Enhanced Energy Harvesting from Random Vibrations. *Procedia Engineering.* 5 (2010) 1156-1159. *Proc. Eurosensors XXIV*, September 5-8, 2010, Linz, Austria

[17] M. Ferrari, M. Bau, M. Guizzetti and V. Ferrari. A single-magnet nonlinear piezoelectric converter for enhanced energy harvesting from random vibrations. *Sensors and Actuators. A* 172 (2011) 287- 292

[18] Mustafa H. Arafa, Mohamed O. Mansour and Said M. Megahed. Resonator with magnetically adjustable natural frequency for vibration energy harvesting. *Sensors and Actuators. A* 163 (2010) 297-303

[19] M. Ferrari, D. Alghisi, M. Baù and V. Ferrari. Nonlinear Multi-Frequency Converter Array for Vibration Energy Harvesting in Autonomous Sensors. *Procedia Engineering.* 47 (2012) 410 -4

[20] Yunus Uzun and Erol Kurt. The effect of periodic magnetic force on a piezoelectric energy harvester. *Sensors and Actuators. A* 192 (2013) 58- 68

[21] Hua Yu, Jieli Zhou, Xiaozhou Yi, Han Wu and Wei Wang. A hybrid micro vibration energy harvester with power management circuit. *Microelectronic Engineering.* (2014)

[22] Mayra Peralta, José L. Costa-Krämer, Ernesto Medina and Arnaldo Donoso. Analysis and fabrication steps for a 3D-pyramidal high density coilelectromagnetic micro-generator for energy harvesting applications. *Sensors and Actuators. A* 205 (2014) 103- 110

[23] Yung-Tien Liu, Toshiro Higuchi and Rong-Fong Fung. a novel precision positioning table utilizing impact force of spring-mounted piezoelectric actuator—part I: experimental design and results.

کرده است که تنها به صورت کیفی به آن پرداخته شده است. با استفاده از تزریق پیزوالکتریک‌های خاص با روش‌های نانوتیوب و طراحی بهینه تیر یک سرگردار نظیر تعویض جنس به کامپوزیت Kevlar با الیاف فیبر کربن، امکان آزمون در دوره‌های تندتر را خواهیم داشت.

## تشکر و قدردانی

با تشکر از نمایندگی ایران خودرو و شرکت ایساکو، بابت اطلاعات حسگر دور موتور و چرخ طیار در موتور XU7 و با سپاس از مسئولین کارگاه برق - قدرت، و مکانیک خودرو دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، و جناب آقای مهندس شیرانی و سرکار خانم مهندس محمدی که در طراحی و ساخت مدارهای الکتریکی همکاری کردند و جناب آقای مهندس عطارد که در ویرایش متن انگلیسی کمک کردند.

## مراجع

- [1] M. Rasouli and L.S.J. Phee. Energy sources and their development for application in medical devices. *Expert Review of Medical Devices.* 7 (2010) 693-709
- [2] P. Mitcheson, E. Yeatman and G. Rao. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE.* 96 (2008)1457-1486
- [3] J. Paradiso and T. Starner. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *Pervasive Computing, IEEE.* 4 (2005) 18-27
- [4] S.R. Anton and D.J. Inman. Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles. *Proceedings of SPIE.* 6928 (2008), 692824-692824-12
- [5] C. Enz, A. El-Hoiydi and J. Decotignie. WiseNET: an ultralow-power wireless sensor network solution. *Computer.* 37 (2004) 62-70
- [6] S. Tadigadapa and K. Mateti. Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives. *Measurement Science and Technology.* 20 (2009) 92001
- [7] S.P. Beeby, M.J. Tudor and N.M. White. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology.* 17 (2006) R175-R195
- [8] Fajie Duan, Haotian Guo and Jilong Zhang. Blade resonance parameter identification based on tip-timing method without the once-per revolution sensor. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 66 67 (2016) 625 - 639
- [9] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, B. Andò, S. Baglio and C. Trigona. Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters. *Sensors and Actuators. A* 162 (2010) 425-431
- [10] S. Leadenha and, A. Erturk. M-shaped asymmetric nonlinear oscillator for broadband vibration energy harvesting: Harmonic balance analysis and experimental validation. *Journal of*

- [30] C.T. Pan, Z.H. Liu and Y.C. Chen. Study of broad bandwidth vibrational energy harvesting system with optimum thickness of PET substrate. *Current Applied Physics*. 12 (2012) 684e696
- [31] F. Stoppel, C. Schröder, F. Senger, B. Wagner and W. Benecke. AlN-based piezoelectric micropower generator for low ambient vibration energy harvesting. *Procedia Engineering*. 25 (2011) 721 – 724. Proc. Eurosensors XXV, September 4-7, 2011, Athens, Greece
- [32] LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch, Measurement Specialist, North America, Measurement Specialties, Inc. 1000 Lucas Way Hampton, VA 23666 Sales and Customer Service, Part Number : 1002794-0. ([www.meas-spec.com](http://www.meas-spec.com))
- [33] Alper Erturk. Assumed-modes modeling of piezoelectric energy harvesters: Euler–Bernoulli, Rayleigh, and Timoshenko models with axial deformations. *Computers and Structures*. 106–107 (2012) 214–227
- [34] M.N. Fakhzan and Asan G.A. Muthalif. Harvesting vibration energy using piezoelectric material: Modeling, simulation and experimental verifications. *Mechatronics*. 23 (2013) 61–66
- Precision Engineering. 27 (2003) 14–21.13
- [24] Yung-Tien Liu and Cheng-Wei Wang. A self-moving precision positioning stage utilizing impact force of spring-mounted piezoelectric actuator. *Sensors and Actuators. A* 102 (2002) 83–92
- [25] Lei Gu. Low-frequency piezoelectric energy harvesting prototype suitable for the MEMS implementation. *Microelectronics Journal*. 42 (2011) 277–282
- [26] X.J. Zheng, L. Zhou, S.F. Deng, J.H. Zhao, S.T. Peng, Y. Zhang, X.Y. Wang and H.B. Cheng. A model for the energy harvesting performance of shear mode piezoelectric cantilever. *Sensors and Actuators. A* 179 (2012) 185– 192
- [27] Salem Saadon and Othman Sidek. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters. *Energy Conversion and Management*. 52 (2011) 500–504
- [۲۸] دانستی‌های سامانه‌های الکتریکی خودرو – حسگر دور موتور، ایساکو خدمات پس از فروش ایران خودرو، معاونت فنی و مهندسی، مدیریت مهندسی خودرو، کلید مدرک ۱۴۳۰۵، بهار ۱۳۹۱
- [29] <https://www.Linkedin.com>, Principles and working of four-stroke Gasoline Engine, Published on July 17, 2014



## Comparison between revolution sensor by using PVDF sensor in XU7 engine and vibration energy harvesting

M. Mahmoudi<sup>1\*</sup>, F. Vatankhahan<sup>2</sup>, H. Riyahi Chaleshtari<sup>3</sup>, R. Mehvari<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Young Researchers and Elite club, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [moien.mahmouditr@gmail.com](mailto:moien.mahmouditr@gmail.com)

<sup>2</sup> Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran, [fvatank@gmail.com](mailto:fvatank@gmail.com)

<sup>3</sup> Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran, [hom.Riyahi-chaleshtari@iauctb.ac.ir](mailto:hom.Riyahi-chaleshtari@iauctb.ac.ir)

<sup>4</sup> Sharif University of Technology, [Reza.mehvari@yahoo.com](mailto:Reza.mehvari@yahoo.com)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 6 April 2016

Accepted: 13 September 2016

#### Keywords:

Vibration energy harvesting

Piezoelectric cantilever beam

PVDF

Flywheel

RPM induction sensor

### ABSTRACT

In the field of intelligent structures and energy harvesting, piezoelectric elements are considered as key elements. Piezoelectric elements are divided in two Categories; ceramic and polymeric. Polymeric elements can bear strain and have a lot more flexibility and Durability than ceramic elements. PVDFs are one of the most useable polymeric piezoelectric elements. Strain variations on piezoelectric films causes voltage changes on both sides of their electrode and makes them act like a sensor. At the following study, a PVDF sensor is connected to a Cantilever beam made of spring steel CK75 and the whole system is put on XU7 Engine flywheel teeth in a way that the sensor can operate the same way as rpm induction sensor of the car. All the tests are practically carried out and inspected. The results showed this type of piezoelectric element is capable of harvesting 72.46 V/g energy up to 600 rpm and up to this round functional similarities compared to the current sensor are occurred as well.

