مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۷، شماره ۱۱۸، صفحات ۱۵–۲۱

# کاربردهای مواد پیزوالکتریک در سیستم تعلیق

محمد امامی مقدم[۱]، مسعود دهمرده[۲] و *، مسعود مسیح طهرانی[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران
*مسئول مکاتبات: mdahmardeh@iust.ac.ir

## چکیده

این مقاله به بررسی کاربردهای مواد پیزوالکتریک در سیستم تعلیق می‌پردازد. مواد پیزوالکتریک مواد هوشمندی هستند که با تغییرات ولتاژ، دچار تغییر طول می‌شوند و یا در اثر تغییر طول، ولتاژ تولید کنند. از این رو این مواد می‌توانند به عنوان حسگر، عملگر و منبع تولید انرژی مورد استفاده قرار بگیرند. از طرفی سیستم تعلیق، یکی از قسمت‌های مهم خودروست، که نقش تعیین‌کنندهای در فرمان‌پذیری و راحتی خودرو در حین حرکت دارد. سیستم تعلیق خودرو به شدت تحت ارتعاش است و این موضوع علاوه بر این که بر قابلیت فرمان‌پذیری خودرو و راحتی سرنشینان اثر می‌گذارد، اتلاف انرژی بالایی نیز دارد. این مقاله سعی دارد که با توجه به مطالعات انجام شده، توانایی پیزوالکتریک در کاهش معضلات سیستم تعلیق را بررسی کند. با توجه به اینکه سیستم تعلیق سخت، برای تحمل وزن و بهبود قابلیت فرمان‌پذیری خودرو و سیستم تعلیق نرم برای مجزا کردن خودرو از اختلالات ناشی از ناهمواری‌های جاده مورد نیاز است، پیزوالکتریک می‌تواند در قالب یک حسگر و با یک طراحی مناسب، شرایط را بسنجد و در قالب یک عملگر، تغییرات مورد نیاز، برای تطبیق خودرو با شرایط رانندگی را اعمال کند. همچنین با توجه به مشکلات ناشی از کمبود منابع انرژی، مواد پیزوالکتریک می‌توانند، انرژی‌هایی را که در سیستم‌های ارتعاشی به صورت گرما آزاد می‌شود، بازیابی کنند.

## واژگان کلیدی

مواد پیزوالکتریک
سیستم تعلیق
بازیاب انرژی
عملگر
حسگر
خودرو

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۶/۲۲
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

## ۱ مقدمه

سیستم تعلیق یکی از قسمت های مهم خودرو است، که نقش مهمی در فرمان‌پذیری و مشخصات راحتی خودرو در حین حرکت دارد. سیستم تعلیق مثل پلی میان مسافر و جاده عمل می کند. سیستم تعلیق دو وظیفه ی مهم دارد. یک وظیفه مجزا کردن مسافر و بدنه ی خوردو، از اختلالات خارجی وارد شده از قبیل ارتعاشات ناشی از ناهمواری‌های جاده است. این موضوع معمولا با کیفیت سواری[۱] گزارش داده می‌شود. وظیفهی دیگر سیستم تعلیق حفظ کردن چسبندگی تایر و سطح جاده به منظور فراهم آوردن امکان هدایت خودرو در مسیر حرکت است. این ویژگی سیستم تعلیق را قابلیت فرمان‌پذیری[۲] گویند. در سیستم‌های تعلیق غیر فعال معمول، یک تحلیل عمومی برای حل کردن نیازهای متعارض راحتی و قابلیت فرمان‌پذیری خودرو مورد نیاز است. این موضوع به این دلیل است که سیستم تعلیق سخت برای تحمل وزن خودرو و قابلیت فرمان‌پذیری بهتر و سیستم تعلیق نرم برای مجزا کردن خودرو از اختلالات جاده مورد نیاز است. از این رو در سی سال گذشته سیستم‌های تعلیق فعال مورد توجه قرار گرفته است [۱]. سیستم تعلیق شامل فنر و کمک فنر و سایر اتصالات است، که در مواجهه با تحریکات، فنر انرژی را در خود ذخیره می کند و این انرژی به وسیله ی کمک فنر به صورت گرما در فضا آزاد می‌شود. از این رو بازیابی این انرژی هدر رفته در سیستم تعلیق، از موضوعات مهم و مورد توجه است [۲].

در بسیاری از کاربردهای کنترل ارتعاشات، دقت و سرعت پاسخ مهم است. مواد پیزوالکتریک در کاربردهای بیشماری، به عنوان حسگر و عملگر یا هر دو، مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمانی که سیستم‌های کنترل ارتعاشات غیر فعال برای پاسخ به نیازها ناتوان هستند، مبدل پیزوالکتریک می‌تواند در ترکیب با یک سیستم کنترلی دارای بازخورد، با استفاده از روشی موثر، ارتعاشات را کنترل کند [۳].

اثر پیزوالکتریک در دو حوزه تعریف می‌شود. حوزه اول، اثر پیزوالکتریک مستقیم است و توانایی پیزوالکتریک در تبدیل کرنش مکانیکی به بار الکتریکی را بیان می‌کند. حوزه دوم اثر پیزوالکتریک معکوس است که توانایی تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی را نشان می‌دهد.

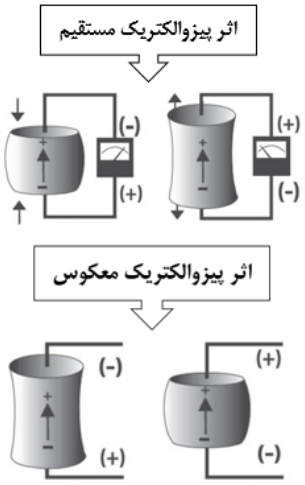
رفتار مکانیکی و الکتریکی مواد پیزوالکتریک به وسیله‌ی دو معادله ساختاری خطی مدل می‌شود. این معادله‌ها دو متغیر مکانیکی و دو متغیر الکتریکی دارند. اثر مستقیم پیزوالکتریک در در معادله‌ی (۱) و اثر معکوس در معادله‌ی (۲) تعریف می‌شود.

$$\{D\} = [e]^T\{s\} + [\alpha^s]\{E\} \qquad (۱)$$

$$\{T\} = [c^E]\{S\} + [e]\{E\} \qquad (۲)$$

در اینجا $\{D\}$ بردار جابجایی الکتریکی است، $\{T\}$ بردار تنش است، $[e]$ ماتریس گذردهی دی‌الکتریک است، $[cE]$ ماتریس ضرایب کشش در قدرت میدان الکتریکی ثابت است، $\{S\}$ بردار تنش است، ماتریس دی‌الکتریک در کرنش مکانیکی ثابت است و $\{E\}$ بردار میدان الکتریکی است [۴]. شکل ۱ عملکرد پیزوالکتریک را نشان می دهد.

[1] Riding quality [2] Automobile handling




**شکل ۱:** اثر مستقیم و معکوس پیزوالکتریک

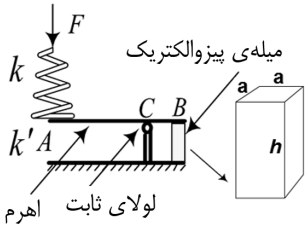
در عمل و در ده سال گذشته این مواد به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند و در کاربردهای زیادی مانند کنترل ارتعاشات ساختارهای انعطاف‌پذیر، کاربردهای پزشکی و سیستم‌های میکروالکترومکانیک، به عنوان عملگر و حسگر به کار رفته‌اند [۳]. مبحث مورد توجه دیگر درباره مواد پیزوالکتریک، توانایی این مواد در بازیابی انرژی است. این مواد با تبدیل ارتعاشات محیط به بار الکتریکی، انرژی ارتعاشی را تبدیل به انرژی الکتریکی می کنند. با توجه به چگالی انرژی بالای مواد پیزوالکتریک و بازده بالاتر آن در مقایسه با مکانیزم‌های الکترواستاتیک و الکترومغناطیس، استفاده از پیزوالکتریک جهت بازیابی انرژی توجیه دارد [۵]. البته بسیاری از کاربردهای مواد پیزوالکتریک برای سیستم هایی است که به انژی اندکی نیاز دارند، اما با توجه به گسترش خودروهای الکتریکی استفاده از این مواد برای تولید توان بالا نیز مورد توجه قرار گرفته است [۲].

در ادامه با برخی از کاربردهای مواد پیزوالکتریک در سیستم تعلیق خودرو آشنا می‌شویم.

## ۲ بازیابی انرژی سیستم تعلیق به وسیله میله بازیاب پیزوالکتریک دوجرمی

در سال ۲۰۱۵ مدلی برای بازیابی انرژی از کمک‌فنر خودرو ارائه شد که با توجه به توان تولید شده در این مدل، نتایج امیدوار کننده‌ای به همراه داشت که می‌تواند بخش قابل توجهی از نیازهای خودروهای الکتریکی را تأمین کند [۶]. به جز ساختارهای پیزوالکتریک، ساختارهای الکترومغناطیس نیز، برای بازیابی انرژی ارتعاشات، به منظور بهبود عملکرد خودرهای الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است، اما بازده پایین این بازیاب ها نتایج مناسبی نداشت. در جدول ۱ مقایس‌های میان این دو مدل صورت گرفته است. طرح شماتیک میله‌ی مبدل پیزوالکتریک در شکل ۲ مشخص است که شامل یک فنر با سختی $k$، یک اهرم با بازوی $AC$، بازوی گشتاور کوچک $BC$، یک لولای فیکس کنندهی مقاوم در برابر حرکت خطی اهرم در نقطه‌ی $C$ و یک میله‌ی پیزوالکتریک با عرض و ارتفاع $A$ و $H$ است.

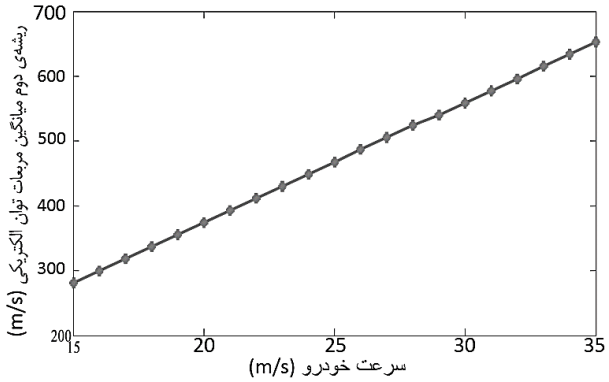
این میله‌ی بازیاب پیزوالکتریک دو جرمی برای بازیابی انرژی ناشی از ارتعاشات محیط که از ناهمواری‌های جاده سرچشمه می‌گیرد مناسب است. مدل ریاضی برای محاسبه‌ی شارژ، ولتاژ و توان خروجی ولتاژ، می‌تواند مورد استفاده قرار بگیردکه از این طریق نتایجی حاصل شده‌است. محاسبات نشان داد که میانگین جذر مربعات توان در این مدل می‌تواند به ۶۵۰ وات برسد.




**شکل ۲:** طرح شماتیک میله‌ی مبدل پیزوالکتریک [۶]

**جدول ۱:** ابعاد و ظرفیت بازیابی دو سیستم بازیاب تعلیق خودرو [۶]

| نوع بازیاب | ژنراتور خطی الکترومغناطیس | میله‌ی بازیاب پیزوالکتریک |
|---|---|---|
| ابعاد | قطر خارجی | ضخامت |
| | ۷/۶۲ cm | ۱/۵ cm |
| | طول فشرده شده | ارتفاع |
| | ۳۰/۴۸ cm | ۱۰ cm |
| ریشه میانگین مجذور سرعت | ۰/۲۵ cm/s | ۰/۲۹ cm/s |
| توان میانگین | ۲۶ – ۳۳ W | ۷۳۸ W |

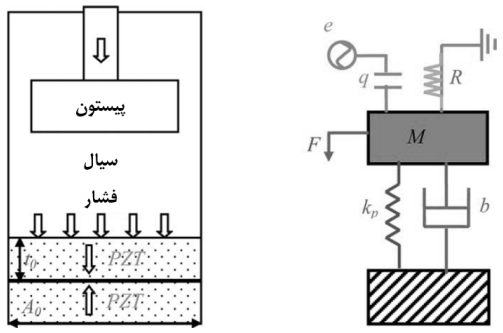



**شکل ۳:** نمودار تغییرات میانگین مجذور ریشه‌های توان تولیدی با تغییر سرعت [۶]

## ۳ مبدل الکتریکی با استفاده از صفحات پیزوالکتریک

دومین نمونه‌ای که در زمینه کاربرد مواد پیزوالکتریک در سیستم تعلیق خودرو ارائه شده است، محصول دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه چانگ‌وون کرهی جنوبی است، که در سال ۲۰۱۳ منتشر شد. این مدل همانند مدل پیش در راستای تأمین انرژی مناسب برای رفع نیازهای خودروهای الکتریکی یا سیستم‌های تعلیق فعال ارائه شد. تفاوت این مدل با مدل قبل، ارائه‌ی راه حلی مناسب با توجه به شکننده بودن سرامیک‌های پیزوالکتریک است. این مدل همانطور که ادر ادامه اشاره کرده است، از فشار سیال برای اعمال نیرو به پیزوالکتریک استفاده می‌کند [۲]. سیستم مورد نظر شامل یک کمک فنر است، که با دو صفحه پیزوالکتریک ترکیب شده است. در

ابتدا ارتعاشات خارجی به سیستم تعلیق انتقال می‌یابد و این نیروی منتقل شده، به وسیله پیستونی که در کمک‌فنر است، سیال درون استوانه را فشار می‌دهد. هنگامی که مقدار اندکی از جریان از اوریفیس می‌گذرد، باقیمانده آن به صفحات پیزوالکتریک فشار وارد می‌کند، که در نتیجه اعمال این فشار خارجی، الکتریسیته تولید می‌شود [۲]. در شکل ۴ مدل شماتیک این مدل که نویسنده آن را PEHSA[1] نامیده قابل مشاهده است.




شکل ۴: طرح کلی PESHA [۲]

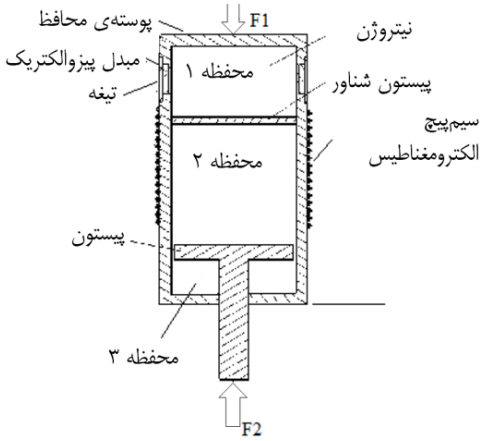
## ۴ استفاده از مواد پیزوالکتریک در کمک‌فنرهای انطباقی الکترومغناطیس

امروزه روش‌های نیمه‌فعال زیادی بر پایه میراگرهای الکترومغناطیس ارائه شده است. دمپرهای الکترومغناطیس نوعی از دمپرها هستند که براساس مواد الکترومغناطیس کار می‌کنند. این دمپرها در مقایسه با دمپرهای معمول، می‌توانند محدودهی وسیعی از نیروی دمپینگ و پاسخ سریع را فراهم کنند. علاوه بر این، کنترل این دمپرها کار سادهای است و می‌توان از آن‌ها برای سیستم کنترل نیمه فعال استفاده کرد. با این حال، می‌بایست یک سیستم کنترل خارجی به کار گرفته شود که این موضوع خود سبب پیچیده شدن ساختار کمک فنر می شود [۷].

در اینجا کمک‌فنر انطباق‌پذیر که برای میرایی از جریان الکترومغناطیس استفاده می‌کند، معرفی می‌شود. میدان مغناطیسی اعمالی به وسیله جریان تولید شده از شار مغناطیسی، تغییر می‌کند. بنابراین نیروی میرایی به بار خارجی اعمالی وابسته است [۷].

شکل ۵ ساختار کلی کمک‌فنر انطباقی را نشان می‌دهد. این کمک‌فنر سه محفظه دارد. محفظه‌ی ۱ محفظه‌ی هواست، که با نیتروژن پر شده است. این محفظه به وسیله‌ی پیستون شناور از محفظه‌ی ۲ جدا شده است. محفظه‌های ۲ و ۳ محفظه‌ی مایع هستند. این دو محفظه به وسیله‌ی سیال الکترومغناطیس پر شده‌اند. بر سطح خارجی دو مبدل پیزوالکتریک و سرامیک پیزوالکتریک درون آن‌ها، ماده‌ی عایق کننده وجود دارد. این‌ها به ترتیب در شیارهای موجود در دو طرف پوستهی انبارهی انرژی مرتب شده‌اند. تیغ‌های بر پوستهی انباره پیچ شده است. میان تیغه و انباره نیروی پیش بار وجود دارد تا تضمینی بر اتصال محکم پیزوالکتریک به پوستهی انباره و تیغه باشد. دو انت‌های سیم‌پیچ الکترومغناطیسی از درون صفحه‌ی تیغه و لایه‌ی عایق می‌گذرد. این‌ها به ترتیب با ماده‌ی سرامیک پیزوالکتریک در تماس هستند تا انرژی الکتریکی تولید شده به وسیله‌ی اثر پیزوالکتریک را به درون میدان مغناطیسی انتقال دهند [۷].

نیروی ضربهی ناشی از زمین، به وسیله‌ی چرخ‌ها به پیستون منتقل می‌شود که این موضوع سبب ارتعاشات در هر محفظه می‌شود. نوسان فشار در محفظه‌ی ۳، به وسیله‌ی دیوارهی خارجی کمک‌فنر به پیزوالکتریک منتقل می‌شود، که این ویژگی انتقال اثر پیزوالکتریک را در پی دارد. پس از آن، به وسیله‌ی جاری شدن جریان درون سیم‌پیچ الکترومغناطیس، شار مغناطیسی تولید می‌شود. در نهایت، شار مغناطیسی میزان میرایی کمک‌فنر را به وسیله‌ی سیال مغناطیسی تغییر می‌دهد. چون شدت القاء مغناطیسی به میزان جریان وابسته است، تا زمانی که جریان تولید شده به وسیله‌ی اثر پیزوالکتریک، به وسیله‌ی بار خارجی بر جاذب اعمال می‌شود، میزان میرایی جاذب به وسیله‌ی بار خارجی تعیین می‌شود [۷].




شکل ۵: ساختار کلی کمک فنر انطباقی [۷]

## ۵ تولید انرژی به وسیله‌ی حلقه‌های پیزوالکتریک

بازیاب انرژی به وسیله‌ی مواد پیزوالکتریک کاربردهای متعددی دارد. گالچو، کیم و نجفی در سال ۲۰۰۹ ژنراتور تولید توان الکترومغناطیس کوچکی را تهیه کردند. این دستگاه ساخته شده حداکثر توان ۲۸۸ میکروووات را تولید می‌کند [۸] لی، کیمی، اُه و چُی در سال ۲۰۱۲، کامپوزیت پیزوالکتریک بازیاب انرژی که برای انتقال کرنش طولی تایر، به صورت توان الکتریکی، به سطح داخلی تایر چسبانده شده است را ارائه کردند [۹]. در سال ۲۰۰۹ مدلی از بازیاب انرژی الکترومغناطیس برای جمع‌آوری ارتعاشات مکانیکی درون تایر که ناشی از تماس تایر و جاده است، ارائه شد [۱۰]. در سال ۲۰۱۲ مانلا، وایت و جان یک مدل بازیاب انرژی پیزوالکتریک بدون تماس ارائه کردند، تا از نیروی مغناطیس ناشی از اثر نیروی مرکزگرا، توان تولید کنند [۱۱].

تایرهای بازیاب، می‌توانند در سه دسته‌بندی اصلی مرتب می‌شوند:

۱. بازیاب‌هایی با قطعه‌های کامپوزیت پیزوالکتریک متصل شده به روکش داخلی تایر برای تبدیل کرنش طولی به توان الکتریکی
۲. بازیاب انرژی الکترومغناطیس برای جمع آوری ارتعاشات الکتریکی درون تایر به علت جهش‌های شیب‌دار شتاب مماسی در طول تماس تایر بر جاده و
۳. بازیاب‌هایی با تیر پیزوالکتریک محکم شده در مجرا و یا پوشش برای جذب انرژی ارتعاشات به علت تغییر شتاب شعاعی تایرها.

[1] Piezoelectric Energy-Harvesting Shock Absorber

تحقیق‌های بیان شده عمدتا بر اساس مفاهیم کاربردی سیستم‌های بازیاب است اما این مطالعات فاقد مفهوم علمی چهارچوب‌های اساسی و تئوری روند بازیابی انرژی با استفاده از تکنولوژی پیزوالکتریک است. به طور ویژه مدل و توصیف علمی برای روند بازیابی انرژی از تحریکات شعاعی تایر که از ناهمواری‌های جاده سرچشمه می‌گیرد و مبنای آن مواد پیزوالکتریک باشد، در دسترس نیست. به علاوه مدل‌های ارائه شده‌ی قبلی در زمینه‌ی بازیاب‌های انرژی معمولا کوچک است، تا از اختلال ناشی از نیروی مرکزگرای بازیاب‌های محکم شده در تایر در تعادل دینامیکی تایرهای دوران بالا جلوگیری شود. از این رو توان تولید شده در این بازیاب‌ها فقط در محدوده‌ی میکروواط است. از این گذشته برای این کاربردها فقط از اثر الکترومغناطیس و یا مد ۳۱ در مبدل‌های پیزوالکتریک برای تولید توان استفاده شده‌است. در حقیقت این را به خوبی میدانیم که در بیشتر مکانیزم‌های تبدیل ارتعاشات به اکتریسیته‌ی موجود، چگالی انرژی مبدل‌های پیزوالکتریک سه برابر ترانسفورماتورهای الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی است [۱۲]. مواد پیزوالکتریک دارای مد ۳۱ و مد ۳۳ هستند. مد ۳۱ دارای بازده پایین است، زیرا بازدهی شارژ پیزوالکتریک و ضریب اتصال‌ها پایین است. در مقابل مد ۳۳ مشخصات ماده‌ی ممتازی را نمایش می‌دهد [۱۳].

تکنیک جدید حلقه‌ی پیزوالکتریک برای تولید الکتریسیته با استفاده از مد ۳۳ برای جذب کامل تحریکات شعاعی تایر که از سطح جاده تولید می‌شود پیشنهاد شده و از طرفی این حلقه می‌تواند از عدم تعادل دینامیکی در تایرهای دارای دوران بالا جلوگیری کند تا صفحه‌ی تقارن مرکزی آن‌ها حتی اگر حجم بالایی داشته باشند، حفظ شود. همچنین رینگ پیزوالکتریک دوجرمی بازیاب تایر، می‌تواند برای تأمین توان مناسب برای بخش‌های الکتریکی مربوط به سنسورهای خودرو و تأمین توان بازیابی شده‌ای که از تحریکات تایر در نتیجه‌ی ناهمواری جاده بدست می‌آید، به منظور بازیابی انرژی تولید شود. که این روش کارامدتر از تکنیک‌های بحث شده در گذشته است، که فقط برای استفاده از انرژی کرنش و ارتعاشات مکانیکی در فضای محدود تایر بود [۱۳].

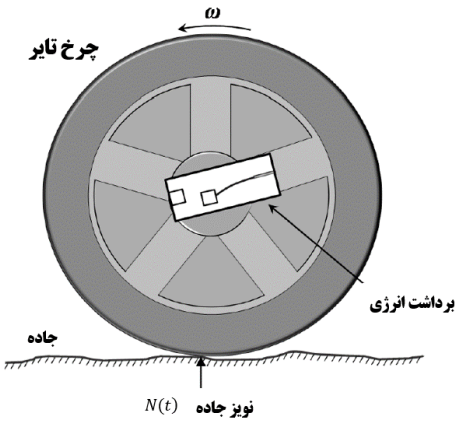
مدل تحلیلی بازیاب رینگ پیزوالکتریک دوجرمی در شکل ۵ و قسمت‌های (الف تا ج) نشان داده شده است. مدل تایر پیزوالکتریک در شکل ۵ و قسمت (الف) نشان داده شده است. این شکل شامل لایه های تایر به ضخامت $d_1$، دو تسمه فلزی و یک حلقه‌ی پیزوالکتریک با ضخامت $d_2$ و یک پوسته است. حلقه‌ی پیزوالکتریک شامل تکه‌های گسسته از PZT4 در سطوح مربع شکل با طول ضلع $a$ که به صورت محیطی و یکنواخت در حلقه‌ی پلیمر که دارای سختی به مراتب کمتری نسبت به قطعات PZT4 است، جاسازی شده‌است. حلقه‌ی پیزوالکتریک بین دو تسمه‌ی فلزی قرار گرفته که به منظور فرایند بازیابی انرژی درون روکش داخلی تایر محکم چسبانده شده‌است. شکل ۷ و قسمت (b) یک مدل یک چهارم ماشین، شامل شاسی و یک چرخ متصل به آن به وسیله‌ی فنر و دمپر است. چون چرخ می‌تواند به وسیله‌ی یک جرم و فنر که بر روی یک جادهی ناهموار تصادفی با تابع عملکرد $q(t)$ مدل شود، مدل یک چهارم می‌تواند برای سادگی به صورت مدل دوجرمی نشان داده شده در شکل ۵ و قسمت (ج) مدل شود. مدل دوجرمی، شامل جرم فنربندی شده‌ی $m_2$ و جرم فنربندی نشده‌ی $m_1$ (یعنی جرم چرخ به همراه فنری با ضریب سختی $k_1$) است. دو جرم به صورت سری به وسیله‌ی فنر سیستم تعلیق با سختی $k_2$ و یک میراگر با ضریب میرایی $C_2$ متصل شده‌اند [۱۳].

شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که RMS[1] توان با افزایش ضخامت قطعات PZT4، سرعت خودرو، کلاس سطح جاده و کاهش زویه‌ی مرکزی تتا، شعاع حلقه‌ی پیزوالکتریک، پهنا و تعداد قطعات پیزوالکتریک در مسیر پهنای تایر افزایش می‌یابد. برای یک بازیاب انرژی با ساختار هندسی و پارامترهایی به صورت جدول ۱، توان میانگین جذر مربعات می تواند به ۴۲/۰۸ وات برسد. انتظار می رود که عملا چهار حلقه ی بازیاب انرژی و یا بیشتر می تواند به طور هم زمان بر تایرهای خودرو تا بازیابی انرژی بیشتری برای جبران انرژی مورد نیاز سنسورهای نصب شده در تایرها و حتی انرژی مورد نیاز کاربردهای دیگر خودرو مهیا شود [۱۳].

شکل ۸ نمودارهای میانگین مجذور توان الکتریکی تولیدی را در شرایط مختلف نشان می‌دهد [۱۳].

## ۶ جمع‌آوری انرژی ناشی از دوران چرخ خودرو

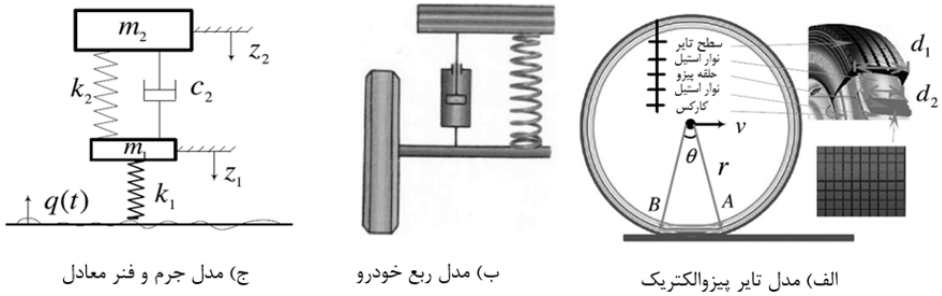
با گسترش استفاده از سیستم‌های کمک‌راننده، محققین سیستم نمایش فشار تایر را ارائه کردند. این سیستم از طریق ارتباط بی‌سیم، شرایط تایر را گزارش می‌دهد. اما به علت دشواری‌های جایگزینی و یا شارژ باتری سیستم نمایش، ایجاد کردن یک سیستم بازیابی انرژی مطلوب است. در این قسمت برای استفاده از چرخش چرخ‌های اتومبیل، یک بازیاب انرژی پیزوالکتریک معرفی می‌شود [۱۴]. شکل ۶ می‌تواند نشان می‌دهد که یک بازیاب انرژی با مقیاس بزرگ، می‌تواند به چرخی که با سرعت زاویه‌ای در خلاف جهت عقربه‌های ساعت دوران می‌کند، متصل شود. نویز در نتیجه‌ی تقابل جاده و تایر تولید می‌شود [۱۴].




شکل ۶: نمایش سیستم جمع‌آوری انرژی نصب شده در مرکز تایر [۱۴]

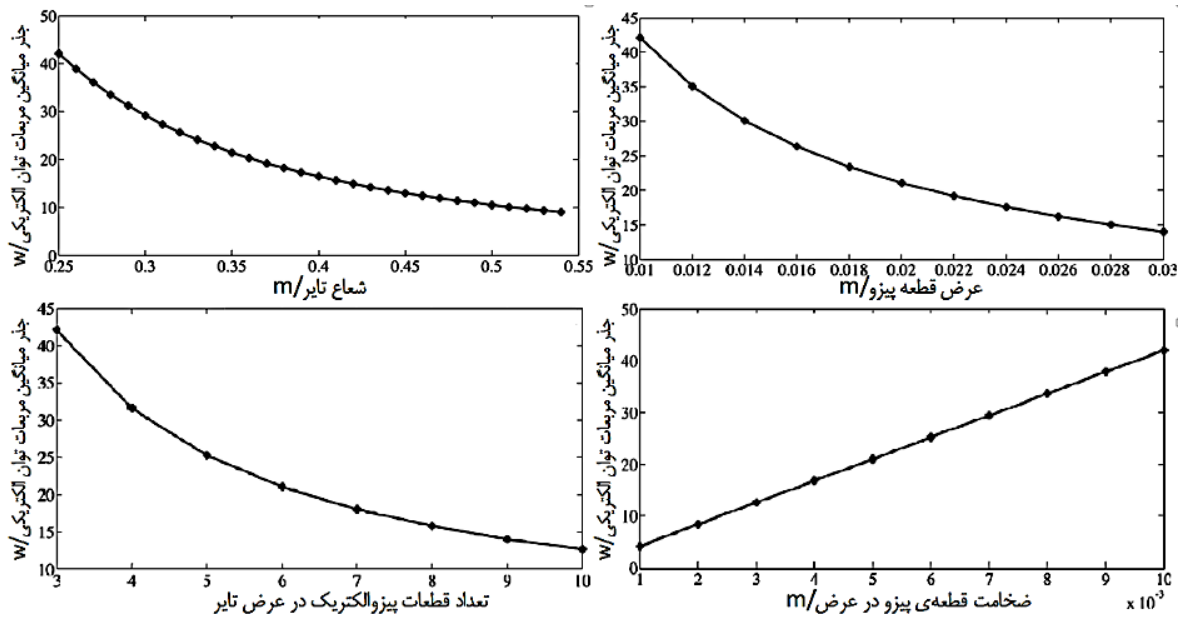
برای اجتناب از تاثیر نیروهای مرکزگرا، مرکز جرم نصب شده در انتهای تیر در مرکز دوران چرخ نصب شده که در شکل ۹ قابل مشاهده است [۱۴]. این سیستم به صورت تجربی به وسیله‌ی یک تیر آلومینیومی به همراه یک پیچ قابل تنظیم برای تعیین فاصله‌ی میان دو آهن‌ربا به اجرا درآمد.

[1] Root mean square



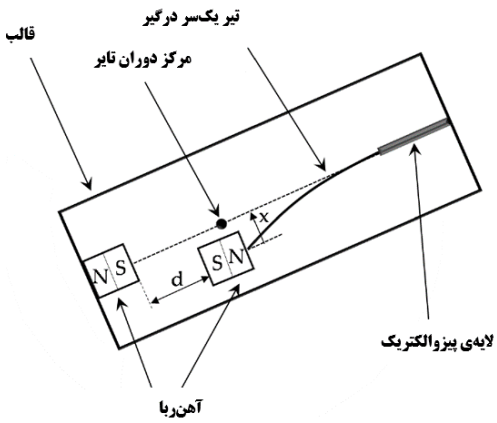

ج) مدل جرم و فنر معادل ب) مدل ربع خودرو الف) مدل تایر پیزوالکتریک

شکل ۷: بازیاب تایر پیزوالکتریک و مدل یک چهارم دوجرمی محاسبه شده [۱۳]




شکل ۸: تاثیر عرض، ضخامت و تعداد پیزوالکتریک و شعاع تایر در میانگین مجذور توان الکتریکی تولیدی [۱۳]

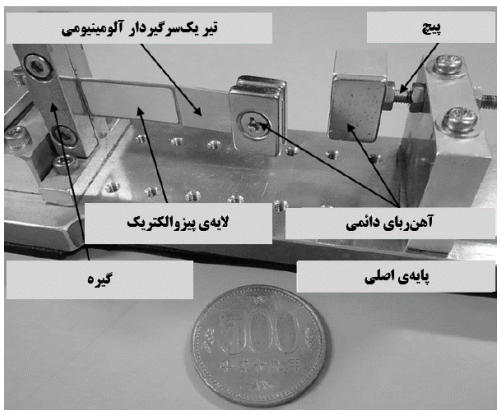
لایه‌ی پیزوالکتریک در راستای ضخامت تیر خم می‌شود تا تحت تاثیر بیشترین تنش قرار گیرد و توان تولیدی افزایش یابد. حجم بازیاب انرژی ۱۵/۷۵ $m^3$ است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است و شکل ۱۱ کاربرد آزمایشی سیستم را ارائه می‌دهد [۱۴].




شکل ۹: نمودار پیکربندی برداشت انرژی [۱۴]

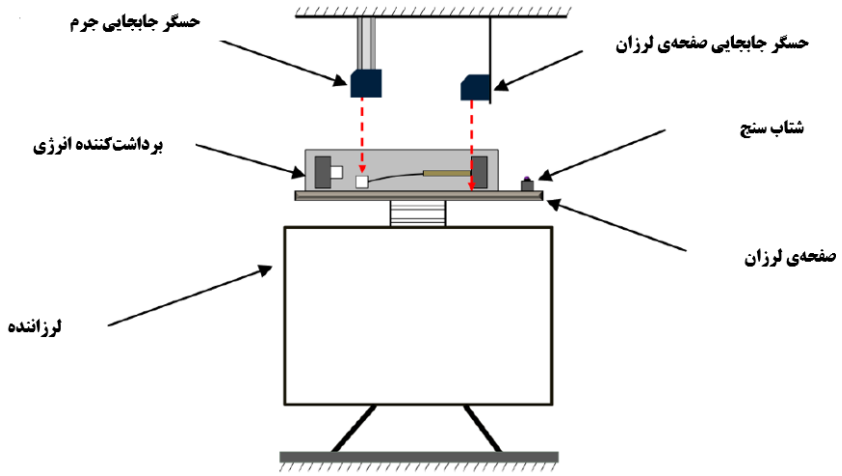
در شکل ۱۲ ساختار کلی تنظیمات آزمایشگاهی نمایش داده شده است [۱۴].

این سیستم به چرخ جلوی خودروی الکتریک متصل شده و عملکرد توان تولیدی آن در جاده واقعی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۳ محل نصب را نشان می‌دهد [۱۴].




شکل ۱۰: پیکربندی جمع‌آوری کننده انرژی با ابعاد بزرگ (قطر سکه ۲۶/۵ $mm$ است.) [۱۴]

شکل ۱۴ نمودار توان تولیدی این سیستم در سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت است. خط موازی محور زمان و عمود بر محور توان، مقدار میانگین توان را مشخص می‌کند [۱۴].




شکل ۱۱: طرح شماتیک کاربرد آزمایشگاهی [۱۴]

## ۷ جمع‌بندی

با توجه به آنچه تا به حال ارائه شد، نمونه‌هایی از کاربردهای مواد پیزوالکتریک مورد مطالعه قرار گرفت. همانطور که مشاهده شد و با توجه به ساختار مواد پیزوالکتریک، این مواد در برابر اعمال فشار و ولتاژ، عکس‌العمل نشان می‌دهند. این خاصیت مواد پیزوالکتریک سبب شده تا بتوان از این مواد برای سه کاربرد مهم استفاده کرد. این کاربردها عبارتند از:

- کاربرد مواد پیزوالکتریک به عنوان حسگر
- کاربرد مواد پیزوالکتریک به عنوان عملگر
- استفاده از مواد پیزوالکتریک برای تأمین انرژی

این سه کاربرد در خودرو مورد استفاده قرار گرفته است و به طور خاص، در این مقاله مثال‌هایی از عملگرهای پیزوالکتریک در سیستم تعلیق و کاربرد مواد پیزوالکتریک در تأمین انرژی هدررفته در سیستم تعلیق ارائه شد. در نهایت و با توجه به مطالعات صورت گرفته، برای کار در زمینه‌ی پیزوالکتریک در سیستم تعلیق خودرو، می‌توان به پیشنهادات زیر توجه کرد:

۱. نحوه چیدمان ساختارهای پیزوالکتریک

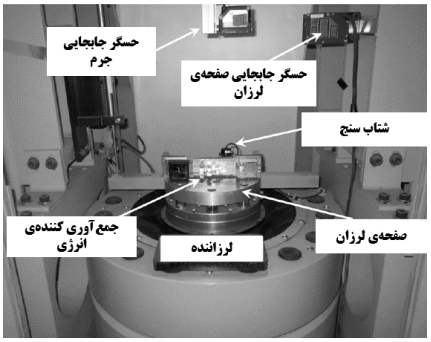
همانطور که اشاره شد، بازیابی انرژی در پیزواکتریک می‌تواند در مدهای مختلفی صورت بگیرد. انتخاب بهترین مد و بهترین چیدمان می‌تواند بازده سیستم بازیابی انرژی را افزایش دهد.

۲. انتخاب مکانیزم اعمال بار مناسب

مبحث دیگری که می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد مکانیزم اعمال بار است. با توجه به ترد بودن سرامیک‌های پیزوالکتریک، اعمال بار بر آن‌ها باید به گونه‌ای باشد که این مواد سالم بمانند. از این رو مکانیزم اعمال بار دچار پیچیدگی‌هایی می‌شود که یافتن بهترین حالت می‌تواند میزان توان بازیابی شده را افزایش دهد.

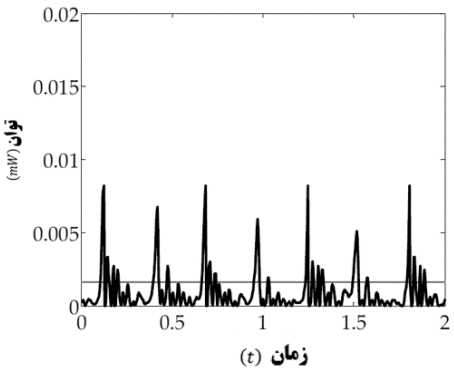
۳. استفاده از مواد پیزوالکتریک به صورت تجمیع شده

این مواد می‌تواند به صورت تجمیع‌شده در سیستم تعلیق به کار گرفته شود. با این کار علاوه بر کاهش مصرف انرژی، متعلقات به کار رفته در خودرو نیز کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در سیستم‌های تعلیق نیمه‌فعال، می‌توان از مواد پیزوالکتریک به عنوان منبع انرژی، عملگر و حسگر، استفاده کرد.




شکل ۱۲: نمای کلی ساختار دستگاه آزمایشگاهی [۱۴]

شکل ۱۳: دستگاه آزمایش سیستم برای خودروی واقعی [۱۴]




شکل ۱۴: نمودار توان تولیدی در سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت [۱۴]

# مراجع

[1] J. Cao, H. Liu, P. Li, and D. J. Brown, “State of the Art in Vehicle Active Suspension Adaptive Control Systems Based on Intelligent Methodologies,” IIEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 9, no. 3, pp. 392–405, 2008.

[2] H. Lee, H. Jang, J. Park, S. Jeong, T. Park, and S. Choi, “Design of a Piezoelectric Energy-Harvesting Shock Absorber System for a Vehicle,” Integr. Ferroelectr., vol. 141, no. 1, pp. 32–44, Jan. 2013.

[3] S. O. R. Moheimani and A. J. Fleming, Piezoelectric transducers for vibration control and damping. Springer, 2006.

[4] H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, “A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials.”

[5] A. Erturk and D. Inman, Piezoelectric energy harvesting. 2011.

[6] X. D. Xie and Q. Wang, “Energy harvesting from a vehicle suspension system,” Energy, vol. 86, pp. 385–392, 2015.

[7] X. H. Wei, S. J. Yu, H. Nie, M. Zhang, and Y. Z. Shao, “Design and Dynamic Analysis of Magnetorheological Shock Absorber Based on the Piezoelectric Technology,” Appl. Mech. Mater., vol. 397–400, pp. 505–510, Sep. 2013.

[8] T. Galchev, H. Kim, and K. Najafi, “A Parametric Frequency Increased Power Generator for Scavenging Low Frequency Ambient Vibrations,” Procedia Chem., vol. 1, no. 1, pp. 1439–1442, 2009.

[9] J. Kim, E. Yim, C. Jeon, C. Jung, and B. Han, “A SELF-POWERING SYSTEM BASED ON TIRE DEFORMATION DURING DRIVING,” Int. J. …, vol. 13, no. 2, pp. 293–300, 2012.

[10] G. Hatipoglu and H. Urey, “FR4-based electromagnetic energy harvester for wireless tyre sensor nodes,” Procedia Chem., vol. 1, no. 1, pp. 1211–1214, 2009.

[11] G. Manla, N. M. White, and M. J. Tudor, “Numerical model of a non-contact piezoelectric energy harvester for rotating objects,” IEEE Sens. J., vol. 12, no. 6, pp. 1785–1793, 2012.

[12] S. Priya, “Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers,” J. Electroceramics, vol. 19, no. 1, pp. 167–184, Mar. 2007.

[13] X. Xie and Q. Wang, “A mathematical model for piezoelectric ring energy harvesting technology from vehicle tires,” Int. J. Eng. Sci., vol. 94, pp. 113–127, Sep. 2015.

[14] Y. Zhang, R. Zheng, K. Shimono, T. Kaizuka, and K. Nakano, “Effectiveness Testing of a Piezoelectric Energy Harvester for an Automobile Wheel Using,” 2016.