

# طراحی، ساخت و تحلیل مکانیزم برداشت انرژی از ارتعاشات سیستم تعلیق

## موتورسیکلت

حامد شهابی

کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه

تهران، تهران

hamed.shahabi@ut.ac.ir

فرزاد آیتاله زاده شیرازی\*

استادیار، مهندسی مکانیک،

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

farzad.shirazi@gmail.com

محمد محجوب

استاد، مهندسی مکانیک،

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

mmahjoob@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶

### چکیده

فرایند به دست آوردن انرژی موجود در محیط و تبدیل آن به انرژی الکتریکی قابل استفاده، برداشت انرژی نامیده می‌شود. مواد پیزوالکتریک و ابزارهای الکترومغناطیس از روش‌های اصلی برداشت انرژی هستند که در این پژوهش از هر دو روش استفاده شده است. در چند سال گذشته تحقیقات زیادی در این حوزه و به‌طور خاص استحصال انرژی از ارتعاشات محیطی صورت گرفته است. در این مقاله، مکانیزمی برای تولید الکتریسیته از ارتعاشات سیستم تعلیق یک موتورسیکلت ارائه می‌گردد. ناهمواری سطح جاده یک ورودی اتفاقی به سیستم تعلیق موتورسیکلت وارد می‌نماید که موجب ارتعاش آن و اجزای متصل می‌گردد. برای شناسایی طیف فرکانسی و محاسبه فراوانی فرکانسی از دستگاه آنالایزر ارتعاشی استفاده شده و سیگنال‌های ارتعاشی از جاده گرفته شده است. با بررسی داده‌های گرفته شده فرکانس ۱۵ هرتز، بیشترین فراوانی را در طیف فرکانسی برای موتورسیکلتی که با سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت در حرکت است، دارد. این فرکانس به عنوان فرکانس رزونانس مکانیزم الکترومغناطیس در نظر گرفته شده است. مکانیزم پیزوالکتریک به‌صورتی در نظر گرفته شده که در فرکانس‌های بالاتر رزونانس داشته باشد به‌گونه‌ای که سیستم برداشت انرژی در بازه وسیع‌تری از طیف فرکانسی خروجی الکتریکی داشته باشد. سیستم در مقیاسی که قابلیت استفاده در یک موتورسیکلت نمونه را داشته باشد، ساخته شده است. سیستم به‌طور آزمایشگاهی تست گردیده و توان خروجی آن در بازه فرکانسی صفر تا ۵۰ هرتز به دست آمده است.

**واژگان کلیدی:** برداشت انرژی، مکانیزم الکترومغناطیس، مکانیزم پیزوالکتریک، ارتعاشات موتورسیکلت

### ۱. مقدمه

را از منابع انرژی موجود در محیط به دست آورد. طیف گسترده‌ای از منابع انرژی در محیط شامل انرژی حرارتی، انرژی‌های طبیعی (مثل باد، امواج و...)، تحریک‌های مکانیکی (مثل ارتعاشات ماشین‌آلات، تنش و کرنش

بحران انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی ایده‌های جدیدی برای دسترسی به منابع جدید انرژی به وجود آورده است که از آن جمله می‌توان به برداشت انرژی اشاره نمود. برداشت انرژی به فرایندی گفته می‌شود که بتوان انرژی الکتریسیته

مکانیکی) و انرژی الکترومغناطیسی (مثل سلف و سیم‌پیچ) وجود دارد. از این رو کاربرد برداشت انرژی توسعه پیدا کرده است. ارتعاشات محیط به دلیل گستردگی منابع آن یکی از منابع برداشت انرژی است و در چند سال گذشته توجهات زیادی را به خود اختصاص داده است. در زمینه ارتعاشات مکانیکی سه نوع مکانیزم عمده برای برداشت انرژی پیشنهاد شده است: پیزوالکتریک، الکترومغناطیس و الکترواستاتیک. در چند سال اخیر مکانیزم پیزوالکتریک به دلیل مدل‌سازی آسان و برداشت انرژی مطلوب بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال در ورودی‌های مترو صفحات پیزوالکتریک در کف سالن نصب می‌شود که با عبور افراد از روی این صفحات انرژی الکتریسیته ایجاد و ذخیره می‌شود. از محدودیت‌های تکنولوژی برداشت انرژی از ارتعاشات، وابستگی ولتاژ خروجی به فرکانس رزونانس ارتعاشات محیط است. برای حل این مشکل محققان بر روی توسعه و بهینه کردن دستگاه‌های برداشت انرژی تمرکز کرده‌اند. وچاراسیندو [۱] یک میکرو ژنراتور توسعه داد که انرژی الکتریکی را با استفاده از مکانیزم‌های الکترومغناطیس و پیزوالکتریک برداشت می‌کند و یانگ و همکاران [۲] یک دستگاه برداشت‌کننده هیبرید پیزوالکتریک و الکترومغناطیس را مطالعه کرده‌اند. نتایج تجربی نشان داد که هنگام تحریک با شتاب  $2/5g$ ، حداکثر ولتاژ خروجی و حداکثر توان خروجی برداشت‌کننده پیزوالکتریک  $0/84V$  و  $176 \mu W$  بود. خالقی و همکاران [۳] مدل ریاضی یک سیستم هیبرید پیزوالکتریک و الکترومغناطیس را با استفاده از مدل درجه دوم ارتعاشی جرم، فنر و دمپر توسعه دادند. کرمی و اینمن [۴] مدل ریاضی برداشت‌کننده هیبرید پیزوالکتریک-الکترومغناطیس را با استفاده از سه سیستم کوپل شده به‌دست آوردند. در این پژوهش، ابتدا مکانیزم‌های مورد استفاده ارائه می‌شود و در انتها نتایج تجربی بیان خواهد شد.

## ۲. تئوری و مدل‌سازی

سیستم برداشت انرژی مورد نظر، شامل دو قسمت الکترومغناطیس و پیزوالکتریک است. معادلات هر بخش به‌صورت جداگانه در زیر بیان شده است.

### ۲-۱. مکانیزم الکترومغناطیس

شکل ۱ دیاگرام مکانیزم الکترومغناطیس را نشان می‌دهد. این مکانیزم یک درجه آزادی دارد و برای راحتی می‌توان آن را به عنوان یک مدل جرم، فنر و دمپر بیان کرد. معادله حاکم بر مدل به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (1)$$

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص شده است،  $Z$  جابه‌جایی نسبی آهن‌ربا،  $Y$  جابه‌جایی اعمالی به سیستم ناشی از پستی و بلندی جاده،  $m$  جرم آهن‌ربا،  $k$  سختی فنر و  $c$  میرایی ناشی از نیروی الکترومغناطیسی است. از طرفی معادله حاکم در بخش الکتریکی طبق قانون لنز به‌صورت زیر می‌شود [۵]:

$$V = -NBl \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $N$  تعداد دور سیم‌پیچ،  $V$  ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ،  $B$  میدان مغناطیسی و  $l$  طول سیم‌پیچ است. همان‌طور که مشخص است ولتاژ سیم‌پیچ رابطه مستقیم با سرعت آهن‌ربا دارد. در نتیجه هر چه سرعت آهن‌ربا بالاتر باشد، ولتاژ بیشتری در سیم‌پیچ خواهیم داشت. پاسخ فرکانسی معادله ۱ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{Z}{Y} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right)^2}} \quad (3)$$

در رابطه بالا  $Z$  دامنه پاسخ فرکانسی جابه‌جایی نسبی آهن‌ربا،  $Y$  دامنه ورودی فرکانسی به سیستم،  $\omega$  متغیر فرکانسی،  $\omega_n$  فرکانس طبیعی و  $\xi$  ضریب میرایی سیستم است. همچنین پاسخ سرعت با ضرب  $\omega$  در پاسخ جابه‌جایی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

فرکانسی در طیف جاده به دست آمده است. در ادامه پژوهش نقشه سه بعدی مدل سیستم برداشت انرژی در نرم افزار سالی دورکس ارائه می شود و مدار الکتریکی و مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده بیان می شود.

### ۱-۳. فرکانس رزونانس مکانیزم الکترومغناطیس

برای محاسبه فرکانس رزونانس مکانیزم الکترومغناطیس باید یک توزیع احتمال از فرکانس های موجود در طیف فرکانسی خیابان مشخص شود. برای پیدا کردن توزیع احتمال ابتدا پاسخ زمانی شتاب جاده با استفاده از دستگاه آنالایزر 01dB و با نصب سنسورهای دستگاه روی موتورسیکلت آپاچی مطابق شکل ۲ گرفته شده است.



شکل ۲. دستگاه 01dB و محل نصب سنسورها

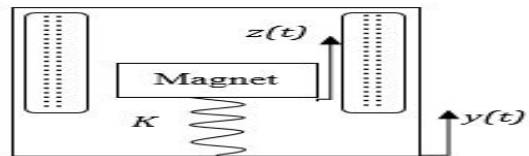
با استفاده از دستگاه 01dB در خیابان امیرآباد ۱۳ مرتبه داده برداری انجام شد. برای داده برداری سرعت موتورسیکلت اهمیت زیادی دارد. بنابراین با توجه به شرایط جاده سعی شده است که سرعت موتورسیکلت ۳۰ km/h ثابت باشد. با استفاده از نرم افزار مربوط به دستگاه آنالایزر، ۱۳ داده زمانی ۱۶ ثانیه ای را استخراج کرده سپس این داده ها را به ۲۶ داده زمانی ۸ ثانیه ای تبدیل کرده و در نهایت با انجام کدنویسی و استفاده از فیلتر پایین گذر ۲ هرتز در متلب برای حذف مقادیر میانگین ثابت، چگالی طیفی پاسخ های زمانی محاسبه شده است. سپس برای به دست آوردن فراوانی فرکانس ها، فرکانس هایی با مقدار چگالی بیشتر محاسبه شده و به صورت نرمالایز شده در شکل ۳ بیان شده است.

$$\frac{\dot{Z}}{Y} = \frac{\omega \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right)^2}} \quad (4)$$

طبق رابطه ۲ و ۴ ولتاژ تولیدی ارتباط مستقیمی با فرکانس رزونانس مکانیزم دارد. بنابراین با تنظیم فرکانس رزونانس، ولتاژ را به صورت حداکثری استحصال کرد و در نهایت توان استحصالی مکانیزم الکترومغناطیس از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_e = \frac{V^2}{R_l} \quad (5)$$

در این رابطه  $R_l$  بار الکتریکی خارجی و  $P_e$  توان خروجی استحصالی مکانیزم الکترومغناطیس است.



شکل ۱. دیاگرام مکانیزم الکترومغناطیس

### ۲-۲. مکانیزم پیزوالکتریک

معمولاً یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک به صورت یک تیر یک سر گیردار با یک یا دو لایه پیزوالکتریک است. تیر پیزوالکتریک روی سطح ارتعاشی نصب می شود و کرنش در لایه های پیزوالکتریک یک ولتاژ عبوری از الکترودهای لایه های پیزوالکتریک تولید می کند. با استفاده از رابطه ۶ توان خروجی از مکانیزم پیزوالکتریک محاسبه می شود.

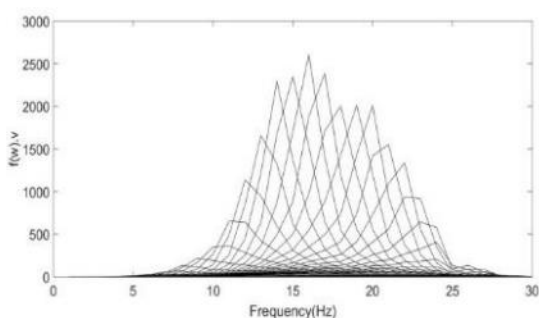
$$P_p = \frac{V^2}{R_l} \quad (6)$$

در رابطه بالا  $R_l$  بار الکتریکی خارجی مکانیزم و  $P_p$  توان استحصالی از مکانیزم پیزوالکتریک است.

### ۳. طراحی، تحلیل و شبیه سازی

طیف فرکانسی جاده با استفاده از دستگاه آنالایزر ارتعاشی پورتابل 01dB محاسبه شده است. با انجام چندین داده برداری با استفاده از دستگاه و پردازش داده ها، فراوانی

شکل ۵ نمودار ضرب تابع احتمال در سرعت آهن‌ریا برای فرکانس‌های رزونانس مختلف است. با توجه به شکل ۵ منحنی با فرکانس رزونانس ۱۶ هرتز بیشترین مساحت زیر نمودار را دارد. به دلیل اینکه در محاسبه فراوانی فرکانس‌های ۱۵ تا ۱۶ هرتز به عنوان فرکانس ۱۶ هرتز حساب شده، پس فرکانس رزونانس باید در این بازه باشد. بنابراین انتخاب فرکانس رزونانس در این بازه اختیاری بوده و فرکانس ۱۵ هرتز به عنوان فرکانس رزونانس مکانیزم الکترومغناطیس انتخاب شده است.



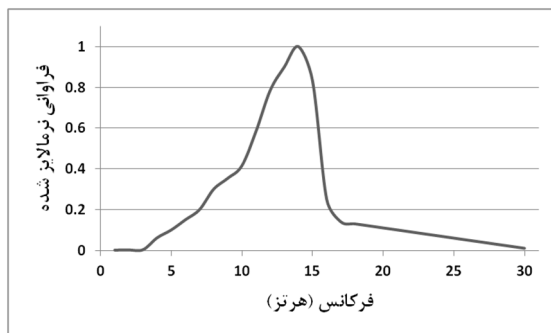
شکل ۵. نمودار ضرب تابع احتمال فرکانسی در سرعت آهن‌ریا

بدین ترتیب با مشخص بودن فرکانس رزونانس می‌توان با استفاده از رابطه فرکانس دورانی را محاسبه کرد.

$$\omega_n = 2\pi f = 94.247 \text{ rad/s} \quad (8)$$

جدول ۱. پارامترهای ابعادی و مواد تیر با دو لایه پیزوالکتریک

تیر	پیزوالکتریک	ابعاد
۷۰	۷۰	طول $L$ (mm)
۵۳	۵۰	عرض $b$ (mm)
۰/۲۵	۰/۲	ضخامت $h$ (mm)
خواص ماده		
۲۷۰۰	۷۷۵۰	چگالی $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )
۷۰	۲۰	مدول یانگ $Y, C_{11}$ (GPa)
-	-۱۰/۴	ثابت پیزوالکتریک $e_{31}$ (pm/V)

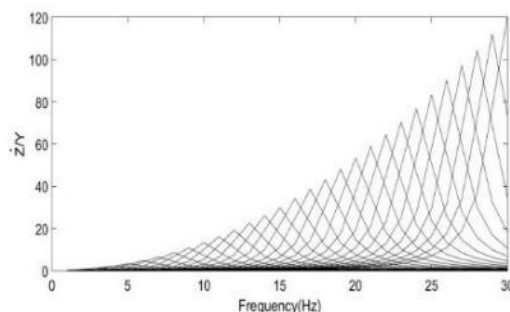


شکل ۳. نمودار فراوانی فرکانسی نرمالایز شده

شکل ۴ نمودار سرعت آهن‌ریا است که برای فرکانس‌های رزونانس مختلف رسم شده است. با توجه به ارتباط مستقیم این نمودار و رابطه ۲ هر چه فرکانس رزونانس بیشتر باشد، توان جذب شده بیشتری خواهیم داشت. در نتیجه برای تنظیم فرکانس رزونانس بخش الکترومغناطیس باید فرکانسی که بیشترین توان را استحصال می‌کند، با استفاده از توزیع فراوانی فرکانسی مشخص شود. رابطه ۷ بیان کننده مناسب‌ترین فرکانس رزونانس برای توان حداکثری است. فرکانسی که در این رابطه بیشترین شود، فرکانس رزونانس مناسب برای مکانیزم الکترومغناطیس خواهد بود. در این رابطه  $f_\omega$  توزیع فراوانی فرکانسی جاده است.

$$S = \int f_\omega V d\omega \quad (7)$$

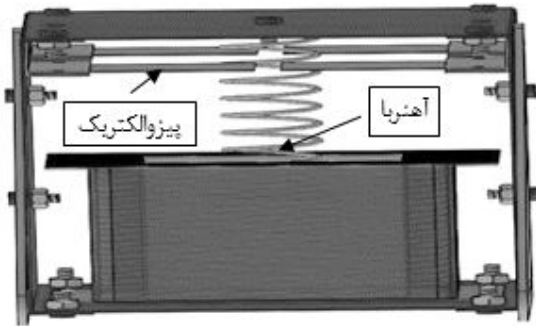
رابطه بالا انتگرال ضرب دو تابع ضرب فراوانی فرکانسی و سرعت آهن‌ریا در حوزه فرکانس است که با متغیر  $S$  مشخص شده است.



شکل ۴. نمودار سرعت آهن‌ریا برای فرکانس‌هایی با رزونانس مختلف

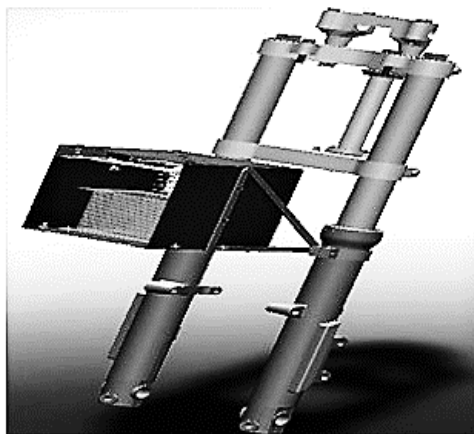
جدول ۲. مشخصات جنس و ابعاد آهن‌ربا و سیم پیچ

ابعاد	آهن‌ربا	سیم پیچ
طول (mm)	۵۰	۱۴۰
عرض (mm)	۴۰	۱۰۰
ضخامت (mm)	۲۰	۷۵
جنس	-	سیم مسی ۰/۲ قطر
تعداد دور $N$	-	۱۶۰۰۰
مقاومت داخلی	-	۲۶۵۰ اهم
جرم (kg)	۰/۶	-



شکل ۶. مدل سیستم برداشت انرژی از نمای جلو

شکل ۷ مدل سوار شده سیستم برداشت انرژی روی سیستم تعلیق موتورسیکلت رسم شده است. در این شکل جایگیری سیستم برداشت انرژی در سیستم تعلیق موتورسیکلت کاملاً مشخص شده است.



شکل ۷. مدل سوار شده سیستم روی سیستم تعلیق موتورسیکلت

### ۳-۳. ساخت سیستم برداشت انرژی

با توجه به حضور آهن‌ربا و ایجاد یک میدان مغناطیسی قوی در اطرافش برای ساخت سیستم از ماده آلومینیوم استفاده شده است. با استفاده از نقشه‌های ساخت به دست آمده از نرم‌افزار سالی‌دورکس؛ خم‌کاری و سوراخ‌کاری‌های مرتبط انجام شده و برای اتصالات از پیچ M5 استفاده شد. در نهایت سیستم به صورت شکل ۸ ساخته شده است.

بدین ترتیب طبق رابطه ۸ و جدول ۲ سختی فنر با مشخص بودن فرکانس رزونانس، می‌توان با استفاده از رابطه فرکانس طبیعی سختی فنر را محاسبه کرد. ابعاد و خواص مکانیکی تیر و لایه‌های پیزوالکتریک در جدول ۱ بیان شده است.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \rightarrow K = m * \omega_n^2 = 5329.49 \frac{N}{m} \quad (۹)$$

### ۳-۲. طراحی سیستم در نرم‌افزار سالی‌دورکس

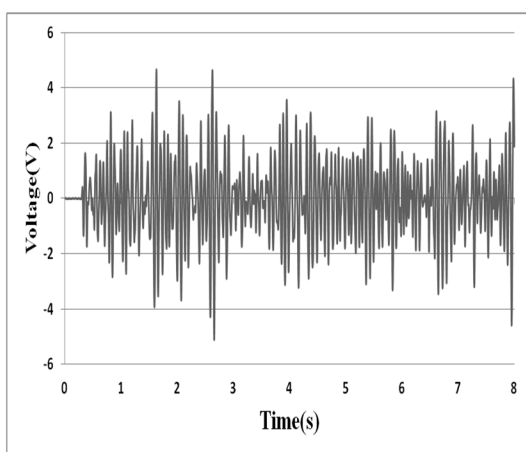
با توجه به مشخص شدن ابعاد و اندازه‌های مکانیزم‌های الکترومغناطیس و پیزوالکتریک در قسمت‌های قبل امکان طراحی سیستمی که هر دو مکانیزم را در خود داشته باشد فراهم می‌باشد. برای طراحی سیستم، جایگیری سیستم در موتورسیکلت را نیز باید در نظر گرفت. بنابراین با اندازه‌گیری‌های انجام شده مدلی در نرم‌افزار سالی‌دورکس رسم شده است. شکل ۶ مدل رسم شده سیستم در حضور دو مکانیزم الکترومغناطیس و پیزوالکتریک است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، جایگاه و عملکرد مکانیزم‌های پیزوالکتریک و الکترومغناطیس کاملاً واضح است. فنر و کوئل در مرکز سیستم نصب شده است تا تقارن سیستم حفظ شود. مکانیزم پیزوالکتریک در اطراف مکانیزم الکترومغناطیس به صورتی که تداخلی باهم نداشته باشند، نصب شده است.

#### ۴. نتایج

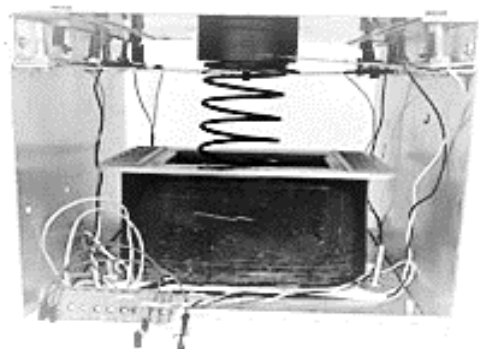
با ساخت سیستم و آماده کردن مجموعه آزمایشگاهی و انجام تنظیمات نرم‌افزاری شرایط انجام تست فراهم شده است. به همین منظور سیستم برداشت انرژی توسط مجموعه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده، بررسی خواهد شد و نتایج تجربی به صورت زیر بیان خواهد شد.

سیگنال‌های ولتاژ و سیگنال شتاب به سیستم توسط شیکر و نمودارهای تغییرات ولتاژ و توان خروجی از هر مکانیزم و به صورت ترکیبی برای فرکانس‌ها و مقادیر شتاب ورودی مختلف در این بخش ارائه شده است.

دامنه ولتاژ خروجی از مکانیزم الکترومغناطیس تحت تحریک سینوسی با فرکانس تحریک ۱۶ هرتز، ۱/۴ ولت به دست آمده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب ولتاژ مکانیزم الکترومغناطیس و پیزوالکتریک تحت تحریک تصادفی است. فرکانس تحریک در بازه ۱-۵۰ هرتز اعمال شده است. با توجه به شکل در زمانی که ولتاژ بیشترین شد، فرکانس رزونانس مکانیزم الکترومغناطیس اعمال شده است.



شکل ۱۰. سیگنال ولتاژ مکانیزم الکترومغناطیس تحت تحریک تصادفی

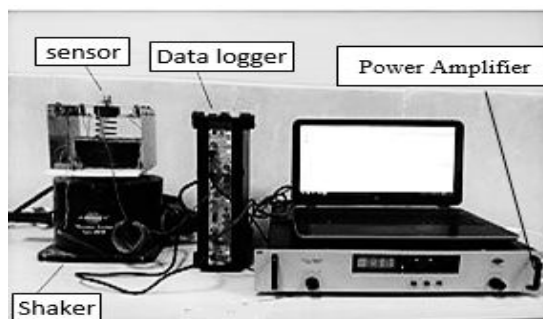


شکل ۸. نمایی از سیستم برداشت انرژی ساخته شده

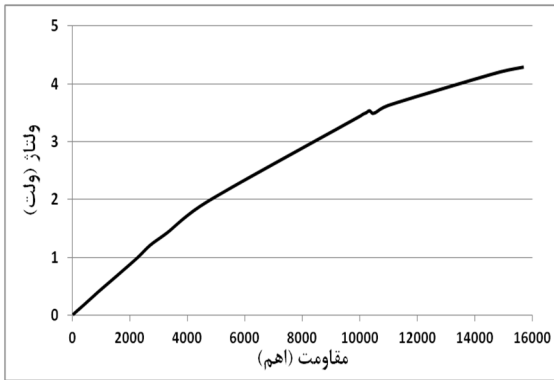
برای خواندن توان خروجی از دو مکانیزم الکترومغناطیس و پیزوالکتریک از یک مقاومت بار  $R_l$  استفاده شده است. ولتاژ خروجی  $V_{out}$  از مکانیزم‌های پیزوالکتریک و الکترومغناطیس است. مقاومت داخلی مکانیزم  $R_c$  است.

#### ۴-۳. مجموعه آزمایشگاهی

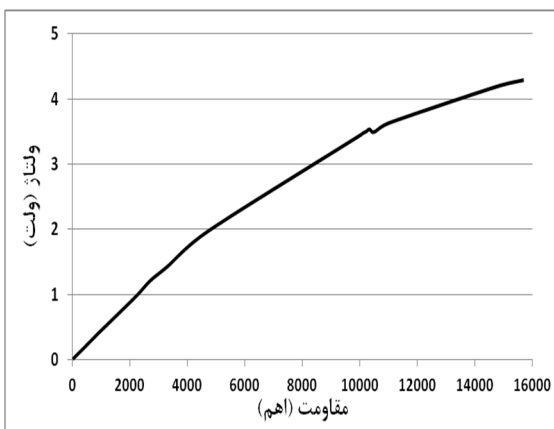
برای انجام تست‌های مربوطه از مجموعه تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری Pulse که توسط شرکت Bruel & Kjaer ارائه شده، استفاده شد که امکان انجام طیف وسیعی از آزمایش‌های ارتعاشی و صوتی را دارند. همچنین برای تحریک سیستم از شیکر<sup>۱</sup> استفاده شد. تحریک اعمالی به سیستم توسط نرم‌افزار Pulse تنظیم می‌شود. با نصب سیستم برداشت انرژی روی شیکر و نصب تجهیزات می‌توان تست‌های مربوطه را انجام داد. در نهایت مجموعه آزمایشگاهی برای انجام تست به شکل زیر آماده می‌شود.



شکل ۹. نمایی از مجموعه دستگاه‌های مورد استفاده در تست

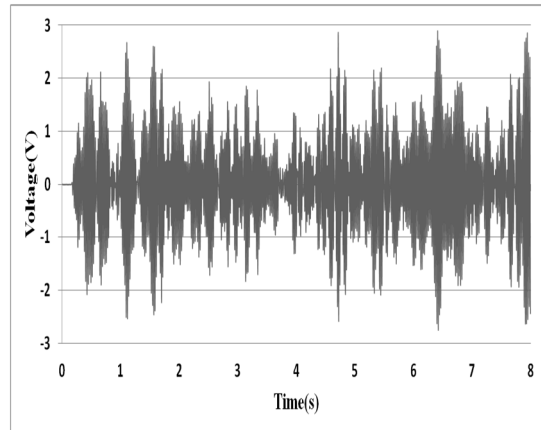


شکل ۱۴. نمودار ولتاژ خروجی از مکانیزم پیزوالکتریک تحت بار الکتریکی مختلف

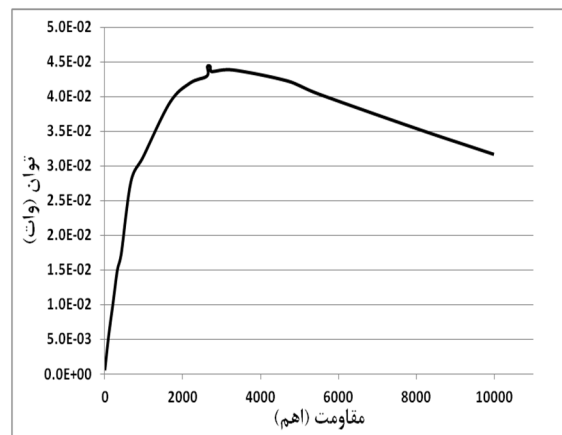


شکل ۱۵. نمودار توان مکانیزم پیزوالکتریک تحت بار الکتریکی مختلف

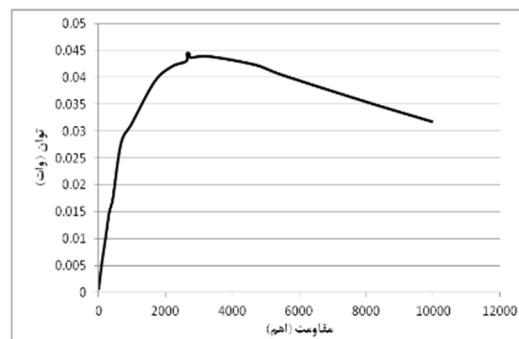
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب ولتاژ و توان حاصل از بخش الکترومغناطیس سیستم را در حضور مقاومت‌های بار مختلف نمایش می‌دهند. با توجه به شکل ۱۳ می‌توان مقاومتی که سیستم الکترومغناطیس بیشترین توان خروجی را دارد، به دست آورد. این مقاومت حدود ۲۷۰۰ اهم است. ولتاژ و توان خروجی بخش پیزوالکتریک در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ برای بارهای مختلف نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱۵ توان خروجی از مکانیزم پیزوالکتریک در مقاومت ۱۰۴۳۰ اهم بیشترین مقدار را دارد. شکل ۱۶ نمایش‌دهنده طیف فرکانسی ولتاژ خروجی از مکانیزم الکترومغناطیس تحت شتاب‌های مختلف می‌باشد. ولتاژ در فرکانس ۱۴ هرتز



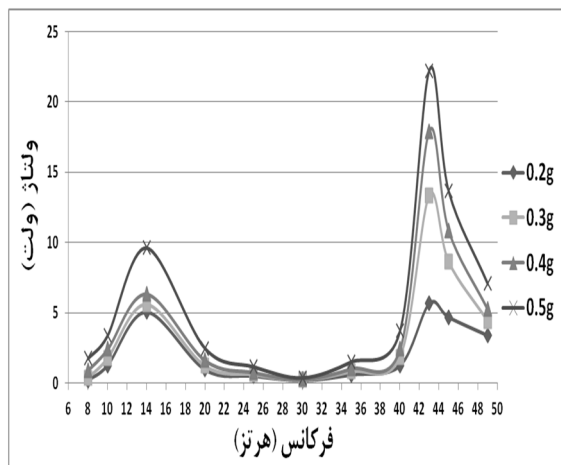
شکل ۱۱. سیگنال ولتاژ مکانیزم پیزوالکتریک تحت تحریک تصادفی



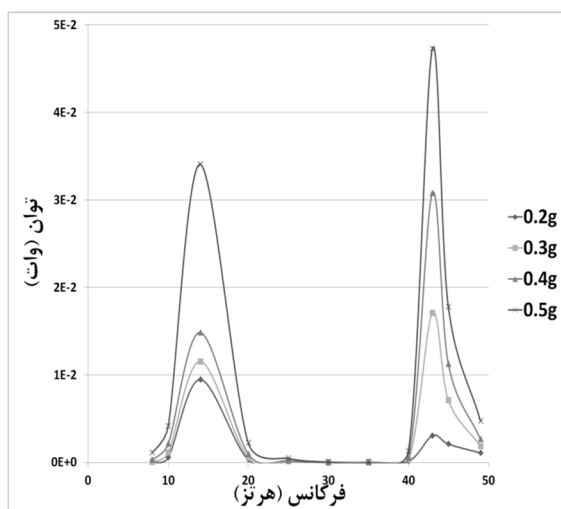
شکل ۱۲. نمودار ولتاژ خروجی از مکانیزم الکترومغناطیس تحت بار الکتریکی مختلف



شکل ۱۳. نمودار توان خروجی از مکانیزم الکترومغناطیس تحت بار الکتریکی مختلف



شکل ۱۸. نمودار ولتاژ خروجی سیستم تحت شتاب‌های ورودی مختلف

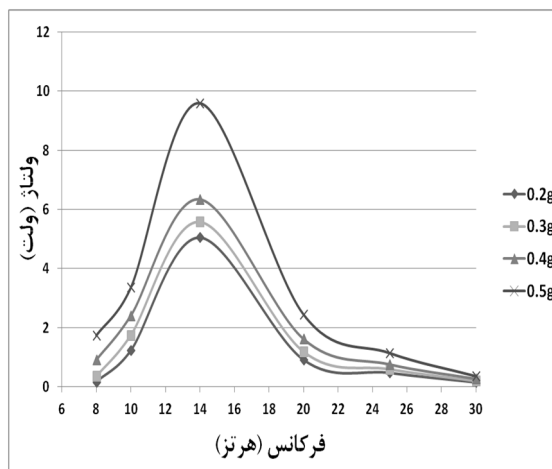


شکل ۱۹. نمودار توان سیستم تحت شتاب‌های ورودی مختلف

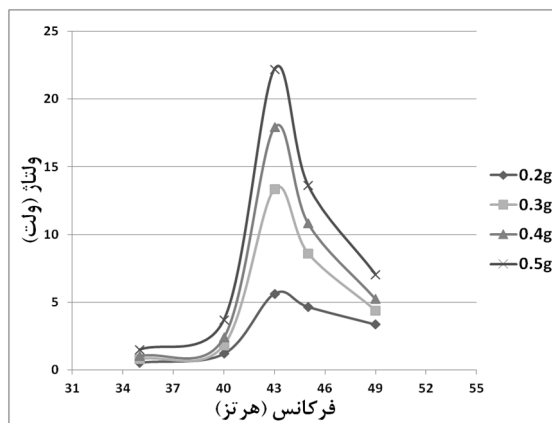
## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

در جدول ۳ بعضی از پژوهش‌های انجام شده در چند سال اخیر بیان شده که سطح ولتاژ و توان پژوهش‌ها مقایسه شده است. مرجع [۶] از آهن‌ربای استوانه‌ای استفاده کرده است که وسط تیر پیزوالکتریک دو سر گیردار نصب شده است و در سیم‌پیچ استوانه‌ای ارتعاش می‌کند. بیشترین توان از دو مکانیزم پیزوالکتریک و الکترومغناطیس گرفته شده به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۶۴ میلی‌وات است. سیستمی که در مقاله مرجع [۱۲] بیان شده است، برای انرژی ناشی از قدم زدن انسان است. بدین منظور با استفاده از آهن‌رباهای استوانه‌ای و سیم‌پیچ پیچیده شده به دور یک استوانه انرژی حرکتی را

بیشترین مقدار را دارد. در نتیجه فرکانس رزونانس مکانیزم الکترومغناطیس ۱۴ هرتز است.



شکل ۱۶. نمودار ولتاژ خروجی مکانیزم الکترومغناطیس تحت شتاب ورودی مختلف



شکل ۱۷. نمودار ولتاژ خروجی مکانیزم پیزوالکتریک تحت شتاب ورودی مختلف

شکل ۱۷ تغییرات ولتاژ مکانیزم پیزوالکتریک در محدوده فرکانس ورودی برای مقادیر مختلف شتاب ورودی رسم شده است. در این شکل فرکانس رزونانس مکانیزم پیزوالکتریک واضح است. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ تغییرات ولتاژ و توان خروجی از سیستم برداشت انرژی را در گستره فرکانسی تا ۵۰ هرتز برای مقادیر مختلف شتاب ورودی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، سیستم در طیف فرکانسی ۵۰ هرتز دو فرکانس رزونانس ۱۴ هرتز و ۴۳ هرتز دارد که در این فرکانس‌ها بیشترین توان خروجی از سیستم گرفته می‌شود.



جذب می‌کند. در این مطالعه، ولتاژ خروجی ۱۸ و ۳۲ ولت برای سیستم الکترومغناطیس و پیزوالکتریک به ترتیب به دست آمد. مقایسه با برداشت‌کننده‌های موجود در جدول ۳ نشان می‌دهد که امکان دستیابی به ولتاژ خروجی بالاتر وجود

دارد. همچنین نشان می‌دهد نتایج به دست آمده با نتایج تحقیقات پژوهشگران در یک محدوده است و در نتیجه قابل قبول است.

جدول ۳. مقایسه پژوهش‌های اخیر در این زمینه با پژوهش انجام شده

توان (میلی وات)	سطح ولتاژ (ولت)	مکانیزم برداشت‌کننده
۴۵-۳۴	۳۲-۱۸	این مطالعه: الکترومغناطیس و پیزوالکتریک
۰/۹۸ - ۰/۶۴	۹-۰/۳	حالیم و همکارانش پیزوالکتریک و الکترومغناطیس [۷]
۳/۸	۱۵	لو و همکارانش الکترومغناطیس [۸]
۱/۵	-	کرمی و اینمن الکترومغناطیس و پیزوالکتریک [۹]
۲/۱۸	-	وانگ و همکاران الکترومغناطیس و پیزوالکتریک [۱۰]
۴/۱	-	شان و همکاران الکترومغناطیس و پیزوالکتریک [۵]
۰/۷۰۳	-	رابرت و همکاران الکترومغناطیس و پیزوالکتریک [۱۱]
۱۰	۰/۵	وانگ و همکارانش الکترومغناطیس [۱۲]

## ۶. مآخذ

- [1] Wacharasindhu, T., and J. W. Kwon, "A micromachined energy harvester from a keyboard using combined electromagnetic and piezoelectric conversion." *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.18, No.10, 2008, p.104016.
- [2] Yang, Bin, et al., "Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms." *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, Vol.9, No.2, 2010, p.023002.
- [3] Khaligh, Alireza, et al., "A hybrid energy scavenging topology for human-powered mobile electronics." *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE.*, IEEE, 2008, pp. 448-453.
- [4] Karami, M. Amin, and Daniel J. Inman., "Equivalent damping and frequency change for linear and nonlinear hybrid vibrational energy harvesting systems." *Journal of Sound and Vibration*, Vol.330, No.23, 2011, pp.5583-5597.
- [5] Shan, Xiaobiao, et al., "A new mathematical model for a piezoelectric-electromagnetic hybrid energy harvester." *Ferroelectrics*, Vol.450, No.1, 2013, pp.57-65.
- [6] Erturk, Alper, and Daniel J. Inman., *Piezoelectric energy harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] Halim, Miah Abdul, H. O. Cho, and J. Y. Park. "A handy-motion driven, frequency up-converted hybrid vibration energy harvester using PZT bimorph and nonmagnetic ball." *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 557, No. 1. IOP Publishing, 2014.
- [8] Lu, Hung-I., et al., "Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Device Combined with Damper." *Smart Science*, Vol.2, No.2, 2014, pp.96-100.

- [9] Karami, M. Amin, and Daniel J. Inman., "Equivalent damping and frequency change for linear and nonlinear hybrid vibrational energy harvesting systems." *Journal of Sound and Vibration*, Vol.330, No.23, 2011, pp.5583-5597.
- [10] Wang, Hong-yan, et al., "A 2DOF hybrid energy harvester based on combined piezoelectric and electromagnetic conversion mechanisms." *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol.15, No.9, 2014, pp.711-722.
- [11] Robert, D., et al., "A hybrid piezoelectric and electromagnetic energy harvesting device." *19th international conference on AST*, Vol.10, 2008.
- [12] Wang, Wei, et al., "Magnetic-spring based energy harvesting from human motions: Design, modeling and experiments." *Energy Conversion and Management*, Vol.132, 2017, pp. 189-197.

پی نوشت:

---

1. Shaker