



## بررسی تجربی و عددی اثر کاهش عرض بر توان خروجی تیر برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک

سعید منصوری لطفعلی، روحاله حسینی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۶-۰۴  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۲۵  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۲۵

### کلمات کلیدی:

برداشت انرژی  
پیزوالکتریک  
تیریکسرگردار  
حرکت هارمونیک  
اتصال سری و موازی

**خلاصه:** با توجه به کاهش منابع انرژی جهان، برداشت انرژی ارزان از محیط پیرامون اهمیت زیادی پیدا کرده است. از مهم‌ترین روش‌های برداشت انرژی، برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک می‌باشد و اخیراً محققان بر روی بهینه‌سازی این نوع برداشت‌کننده‌های انرژی متمرکز شده‌اند. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی اثر کاهش عرض تیر بر میزان برداشت انرژی از تیر یکسرگردار حامل پیزوالکتریک که حرکت هارمونیک دارد، پرداخته شده است. در این پژوهش از یکی از جدیدترین مواد پیزوالکتریک بنام الکترو-اکتیو پیپر سلولزی استفاده شده است. در ابتدا یک تیر با عرض ثابت مورد بررسی قرار گرفته و سپس دو تیر یکسرگردار متصل بصورت سری و موازی که عرض هر کدام نصف عرض تیر اولیه می‌باشند، مورد تحلیل واقع شده‌اند و در مرحله بعدی تیر واحد را به سه قسمت مساوی تقسیم کرده و حالات سری و موازی این تیرها مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که اگر عرض یک تیر را به چند قسمت مساوی تقسیم کرده و چند تیر با عرض کمتر ایجاد شود و بصورت سری به یکدیگر متصل گردند، میزان برداشت انرژی در این حالت از تیر واحد اولیه به طور قابل توجهی بیشتر خواهد بود.

### ۱- مقدمه

امواج رادیویی<sup>۱</sup>، انرژی‌های مکانیکی و ... اشاره نمود. یکی از این منابع که به وفور در طبیعت وجود دارد، ارتعاشات محیطی است که می‌توان با برداشت و مهار این نوع انرژی، از آن برای تأمین توان الکتریکی تجهیزات استفاده نمود. انرژی تولیدی از ارتعاشات ماشین‌آلات صنعتی، فعالیت بشر [۳]، وسایل نقلیه، سازه‌ها [۴]، نیروهای هیدرودینامیکی در سیستم‌های انتقال سیال [۵] و منابع محیطی [۶]، می‌توانند روش‌های مختلفی را برای برداشت انرژی فراهم کنند. الکترومغناطیس، الکترواستاتیک و پیزوالکتریک، روش‌های برداشت انرژی در مقیاس‌های ماکرو، میکرو و نانو از ارتعاشات محیطی هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحقیقات بسیاری در این زمینه‌ها صورت گرفته است که در آینده نزدیک پیشرفت‌هایی را برای تولید انرژی از محیط پیرامون به ارمغان می‌آورد [۷-۱۰]. از آنجا که مهارکننده‌های انرژی الکترواستاتیک نیاز به یک ولتاژ اولیه دارند، ممکن است همیشه در دسترس نباشند. از طرفی مقاومت و

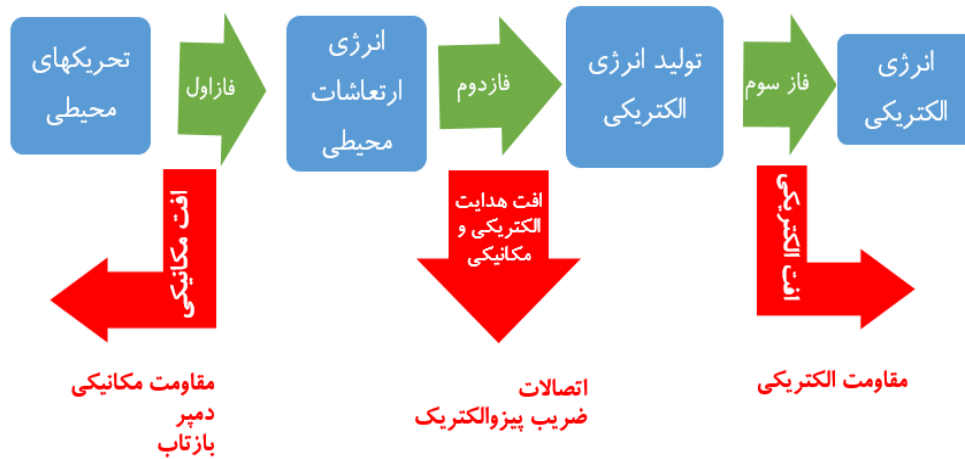
انرژی الکتریسیته امروزه یکی از نیازهای اساسی بشر می‌باشد و از مهم‌ترین منابع انرژی الکتریسیته سیار می‌توان به باتری‌ها اشاره نمود. این در حالی است که استفاده از باتری‌ها بسیار هزینه‌بردار می‌باشد و محدودیت‌های دیگری از جمله دمای کارکرد را به همراه دارد. برای مثال محدودیت دمایی در آگزوز خودروها و محدودیت محیطی در باتری قلب، برای بیماران قلبی و ردیاب‌ها جهت پایش حیوانات و همچنین در مواردی که اجزای متحرک و دوار وجود داشته باشند و سیم‌کشی آن‌ها سخت باشد، امکان استفاده از این باتری‌ها فراهم نیست. از سویی دیگر افزایش چشم‌گیر حجم مصرفی انرژی حسگرها و همچنین طول عمر محدود، اندازه بزرگ، آلودگی محیط زیست و هزینه نگهداری بالا [۱] منجر به تمرکز تحقیقات بر روی منابع تغذیه‌ای به عنوان جایگزین باتری‌ها شده است [۲]. منابع تأمین توان زیادی در محیط پیرامون وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نور خورشید،

1 Radio Frequency (RF)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kprhosseini@ihu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱: مراحل برداشت انرژی از پیزوالکتریک

Fig. 1: Energy flow of a piezoelectric generator

هستند. اگر این مواد تحت کرنش قرار بگیرند دو قطبی‌هایی در آن‌ها پدید می‌آید که این دو قطبی‌ها در سرامیک‌ها بصورت کریستال و در پلیمرها بصورت درشت مولکولی ایجاد می‌گردند و همین عامل باعث ایجاد اختلاف پتانسیل و تولید جریان الکتریکی می‌گردد [۱۱]. با توجه به توانایی منحصر به فرد مواد پیزوالکتریک که برای تبدیل ارتعاشات مکانیکی به انرژی الکتریکی دارند، در دهه گذشته روش برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک رشد قابل توجهی را به همراه داشته است. در برخی سازه‌ها از حسگرهایی مانند سنسور دما یا رطوبت یا کرنش برای نظارت استفاده می‌شود و شارژ باتری آن‌ها به دلایل فنی و عملیاتی، پرهزینه و حتی غیرممکن می‌باشد و با توجه به چگالی توان خروجی بالای پیزوالکتریک‌ها، می‌توان آن‌ها را به عنوان جایگزینی مناسب برای باتری‌ها معرفی نمود [۱۲]. مراحل برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک که از اثر مستقیم آن بدست می‌آید، در شکل ۱ نشان داده شده است و سه مرحله اولیه در تولید انرژی الکتریکی بدین شرح است؛ فاز اول: به دام انداختن تنش‌های مکانیکی از منابع موجود، فاز دوم: تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی توسط پیزوالکتریک و فاز سوم: پردازش و ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی تولید شده [۸].

تمرکز تحقیقات جهت بهینه‌سازی برداشت انرژی بر روی شکل تیر و شرط مرزی و ماده پیزوالکتریک و... می‌باشد. کومار<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳] بر روی برداشت انرژی از تیر ساده و تیر با مقطع متغیر پلکانی تحقیقاتی انجام داده‌اند که در حالت پلکانی برداشت انرژی قابل

ولتاژ خروجی این نوع برداشت‌کننده‌ها بالاست و جریان نسبتاً کمی را تولید می‌کنند، که ممکن است برای برخی کاربردهای خاص مناسب نباشد و برای استفاده از آن‌ها باید ابتدا یک تقویت‌سیگنال انجام گیرد که موجب پیچیده‌تر شدن پروسه ساخت نیز می‌گردد و به کار بردن این برداشت‌کننده‌ها را مقرون به صرفه نمی‌کند. معمولاً ولتاژ حاصل از مهارکننده‌های الکترومغناطیس کم می‌باشد، یک مبدل افزایش‌دهنده ولتاژ نیز در کنار دستگاه مورد نیاز است. در محاسبه توان الکتریکی برداشت شده از این مهارکننده‌ها، باید افت توان ناشی از مبدل را نیز در نظر گرفت. مونتاژ سیم‌پیچ القایی الکترومغناطیسی بسیار چالش برانگیز است و مکانیسم‌هایی که در این مقیاس می‌توانند کار کنند با استفاده از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی یکپارچه‌سازی می‌شوند، و بسیار پرهزینه هستند. با در نظر گرفتن معادلات اساسی در مکانیسم الکترومغناطیس و پیزوالکتریک، انرژی الکتریسیته با توان ۲ با حجم ماده کاری الکترومغناطیس متناسب است، در حالی که در مکانیسم برداشت انرژی پیزوالکتریک با توان  $0.75$  با حجم ماده پیزوالکتریک متناسب است. بنابراین در مقیاس‌های کوچک، مکانیزم پیزوالکتریک در مقایسه با الکترومغناطیس مناسب‌تر می‌باشد [۸].

استفاده از مواد پیزو الکتریک یک روش ساده جهت تبدیل انرژی از ارتعاشات مکانیکی به جریان الکتریسیته می‌باشد که به این روند اثر مستقیم پیزوالکتریک می‌گویند، اما در صورت اعمال جریان الکتریسیته، اگر ماده پیزوالکتریک کرنش یا ارتعاش از خود نشان دهد به آن اثر معکوس پیزوالکتریک می‌گویند. مواد پیزوالکتریک موادی از جنس سرامیک‌ها و پلیمرها می‌باشند که دارای چنین خاصیتی

1 Kumar

پیزوالکتریک نوین الکترو-اکتیو پیپر<sup>۷</sup> استفاده شده است. از دیگر نوآوری‌های این مقاله بررسی اثر آرایش سری و موازی تیرهایی که عرض آن‌ها کاهش یافته است، می‌باشد. به گونه‌ای که اگر چند تیر برداشت انرژی، با هم سری یا موازی شوند در کدام حالت بیشترین توان الکتریکی قابل برداشت خواهد بود.

## ۲- آزمایش تجربی

### ۲-۱- لایه پیزوالکتریک و تیرهای مورد آزمایش

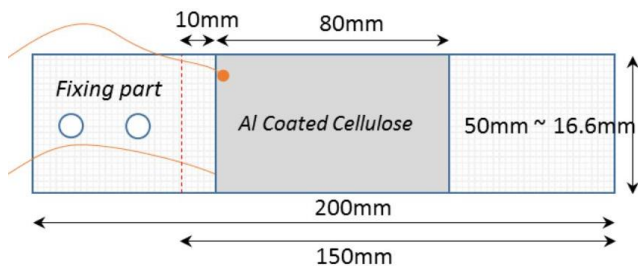
سلولز یک ماده قابل بازیافت انبوه است، که سالیانه ۱/۵ تریلیون تن از آن تولید می‌گردد. این ماده خام تقریباً بی‌پایان، دارای خواص مناسب جهت برداشت انرژی می‌باشد. از آنجا که سلولز قابل تجزیه بوده و سازگار با محیط زیست است، مشتقات آن کاربردهای بسیاری از جمله دارو، پارچه، مواد غذایی، برداشت انرژی و غیره دارد [۲۴]. ماده پیزوالکتریک مورد استفاده در این مقاله الکترو-اکتیو پیپر می‌باشد. این ماده سلولزی یکی از مواد پیزوالکتریکی است که در سال ۱۹۵۰ شناخته شد و در سال ۲۰۰۶ توسط کیم<sup>۸</sup> و همکاران به عنوان یک ماده هوشمند معرفی شد [۲۵]. ماده پیزوالکتریک الکترو-اکتیو پیپر سلولزی از تفاله کتان با درجه پلیمریزاسیون ۴۵۰۰ سانتی‌گراد ساخته شده است، که بعد از خورد شدن در آن-دیمتیل استالید بی‌آب با نسبت خاصی از کلرید لیتیم در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌گردد [۲۶]. بعد از همزنی بسیار به مخلوط همگن و کاملی می‌رسیم، که این محلول بسیار چسبناک و شفاف می‌باشد و در نهایت با ریخته‌گری نواری بر روی شیشه به یک لایه یکنواخت از آن می‌رسیم. در ادامه با حلال‌های آبی دی یونیزه شده و ایزوپروپیل اقدام به رفع باقی مانده آندلیتیم می‌شود. در اینجا لایه کمی رطوبت دارد که آن را تا ۱/۵ برابر طول اصلی می‌کشند و به مدت یک ساعت در مقابل اشعه مادون قرمز قرار می‌دهند تا به لایه مورد نظر برسند. لایه بدست آمده در حد میکرو را با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت کشش برش می‌زنند. در نهایت دو طرف لایه نازک پیزوالکتریک حاصله را با لایه‌های آلومینیومی به عنوان الکتروود برای جایگذاری در مدار می‌نشانند و در انتها یک لایه شفاف جهت جلوگیری از آسیب‌دیدگی و اتصال کوتاه لایه پیزوالکتریک روی آن می‌کشند [۲۷-۲۹]. دلایلی که باعث شده تا این ماده از مواد

ملاحظه‌ای مشهود است، و همچنین بررسی برداشت انرژی از تیر مستطیلی و مثلثی مرکب توسط حسینی و حامدی [۱۴ و ۱۵] صورت گرفته است که تیر ذوزنقه‌ای از مستطیلی برداشت انرژی بیشتر دارد و در ادامه تحقیقات به بررسی فرکانس طبیعی تیرهای ذوزنقه‌ای و مثلثی، ساده و مرکب جهت فرکانس تشدید پرداختند و ویژگی‌های نظیر طول و عرض را در فرکانس تشدید مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۶ و ۱۷]. اثر افزایش طول تیر برداشت انرژی توسط هاتا<sup>۱</sup> و همکاران [۱۸] صورت گرفته است که نتایج حاکی از آن است که با افزایش طول تیر، برداشت انرژی نیز افزایش خواهد یافت. ونگ<sup>۲</sup> و همکاران [۱۹] برداشت انرژی از پیزوالکتریک‌های ستاره شکل با تعداد پره‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند و از تعداد ۴ تا ۱۲ پره برداشت انرژی، ۶ پره را به عنوان حالت بهینه معرفی نموده‌اند. برخی از محققان همانند باترا<sup>۳</sup> و همکاران [۲۰] به بررسی تیر دو سرگردار پیزوالکتریک پرداخته‌اند. ماده پیزوالکتریک یکی از مهم‌ترین عوامل بهینه‌سازی برداشت انرژی می‌باشد حال آن‌که این مواد از پیزوسرامیک‌ها و یا از پیزوپلیمرها باشند، برای مثال مقایسه پیزوسرامیک پی.زد.تی<sup>۴</sup> و پی.زد.تی<sup>۵</sup> در یک سیستم برداشت انرژی توسط امینی و همکاران [۲۱] انجام شده است. در باب کاربردهای برداشت انرژی از پیزوالکتریک می‌توان به تحقیقاتی که کلنت<sup>۵</sup> و همکاران [۲۲] اخیراً انجام داده‌اند اشاره کرد که ایشان به بررسی کرنش وارده به ریل‌های قطار با در نظر گرفتن ساختار واگن پرداخته‌اند، و چاه<sup>۶</sup> [۲۳] به بررسی برداشت انرژی از پیاده‌روی پرداخته که در این تحقیق با در نظر گرفتن لایه پیزوالکتریک بر روی زانو بند و کمر بند و پوتین، ولتاژ استحصالی را در یک سیکل منظم پیاده‌روی در نظر گرفته است که بیشینه انرژی دریافتی مربوط به زانو بند می‌باشد. تحقیقات بسیاری با تغییر بر روی شکل‌ها، قیدها و مواد مختلف جهت بهینه‌سازی برداشت انرژی از پیزوالکتریک‌ها صورت گرفته است، اما این مقاله اثر کاهش عرض تیر برداشت‌کننده انرژی را بر روی ظرفیت انرژی قابل برداشت بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌دهد. در ساخت تیرهای برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی از ماده

- 1 Hata
- 2 Wong
- 3 Batra
- 4 Lead Zirconate Titanate (PZT)
- 5 Cleante
- 6 Cha

7 Electro Active Paper (EAPap)

8 Kim



شکل ۲: ابعاد تیر اصلی به همراه لایه پیزوالکتریک [۳۱]

Fig. 2: Photograph and schematic diagram of the EAPap piezobeam energy harvester



شکل ۳: تیرهای مورد آزمایش تجربی [۳۱]

Fig. 3: Photograph of EAPap cantilever beam

می‌باشد. در مرحله سوم سه تیر آماده شده یک بار بصورت سری و یک بار بصورت موازی نسبت به هم قرار داده شده و آزمایش شدند.

## ۲-۲- سامانه آزمایش تجربی

نحوه و شرایط آزمایش از مهم‌ترین اصول تحلیل تجربی به شمار می‌آیند، به گونه‌ای که اگر از دستگاهی مناسب با تنظیمات مد نظر در شرایط آزمایش استفاده نشود، درصد خطا زیاد می‌شود. شرایط آزمایش برداشت انرژی از تیر یکسردرگیر بدین شرح می‌باشد: نمونه تیر یکسردرگیر پیزوپلیمری ساخته شده با فیلم نازک الکترو-اکتیو پیپر، با سفت کردن جیگ<sup>۲</sup> بر روی بوبین<sup>۳</sup> شیکر<sup>۴</sup> الکترومغناطیسی الیزر اچ.ای.وی-۵۰<sup>۵</sup> نصب شد. تیر پیزوالکتریک با ولتاژ ورودی ۱۰۰ میلی‌ولت تحریک می‌شود که این تحریک صورت گرفته توسط شیکر باید هدفمند و کنترل شده باشد. هدفمند از این جهت که برداشت

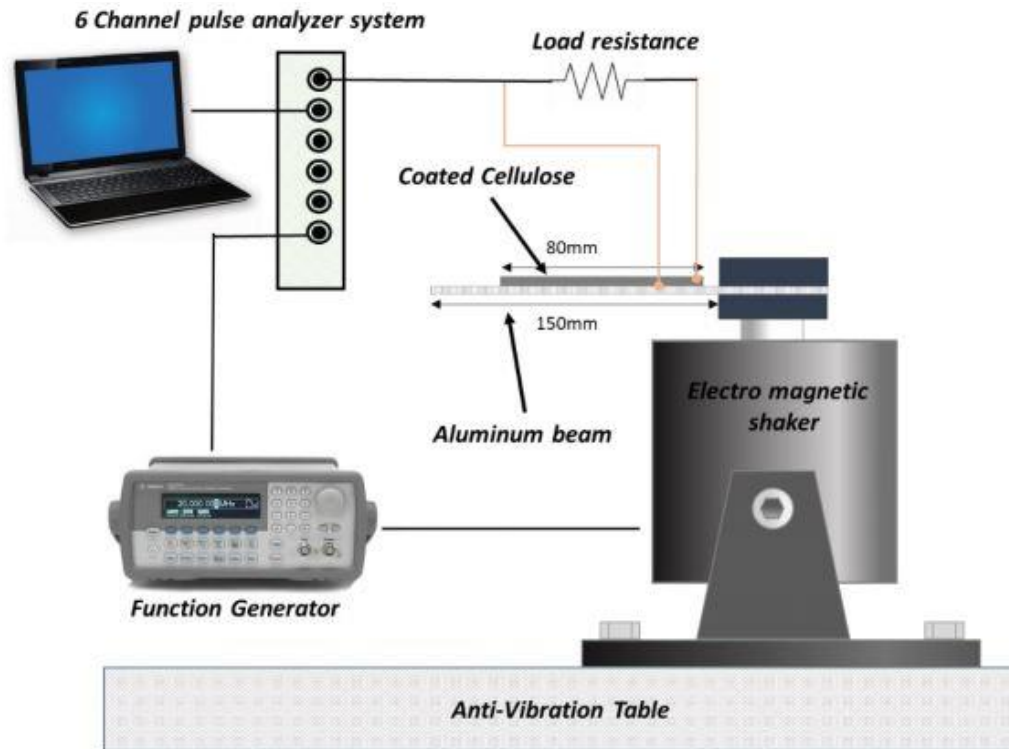
پر کاربرد پیزوالکتریک باشد عبارتند از: تولید ساده به همراه جزییات ساخت آن، چگالی پایین، و دوام بالای آن، پایین بودن هزینه به دلیل فراوانی سلولز و تامین ولتاژ نسبتاً مناسب و انعطاف بسیار خوب، که این نکته نقطه مقابل پیزوسرامیک‌های شکننده در برداشت انرژی می‌باشد [۳۰].

لایه پیزوالکتریک الکترو-اکتیو پیپر ساخته شده به ابعاد  $50 \times 80$  میلی‌متر و ضخامت ۱۵ میکرومتر را روی یک تیر آلومینیومی به ابعاد  $200 \times 50$  میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر به فاصله ۶ سانتی‌متری از انتهای این تیر چسبیده می‌شود. از این فاصله ۶ سانتی‌متری ۵ سانتی‌متر آن متعلق به گیره اتصال می‌باشد، این اتصال توسط چهار پیچ به ننگ‌دارنده شیکر صورت می‌گیرد، که در شکل ۲ نشان داده شده است. یک سانتی‌متر از این ۶ سانتی‌متر برای فاصله گرفتن از لبه اتصال شیکر به تیر می‌باشد، زیرا زمانی که تیر در حال تحریک باشد، بیشترین خمش در انتهای گیردار تیر است و برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی لایه پیزوالکتریک، باید آن را از این ناحیه کمی فاصله داد [۳۱].

از آنجاکه هدف اصلی آزمایش بررسی اثر کاهش عرض تیر و مقایسه حالات مختلف سری و موازی است، نیاز به نمونه‌های دیگری نیز می‌باشد که در شکل ۳ قابل مشاهده است. دو نمونه دیگر همانند تیر اصلی ساخته شده، با این تفاوت که عرض آن‌ها ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. و بطور مشابه نیز سه نمونه دیگر به عرض  $16/6$  میلی‌متر ساخته می‌شوند. در ابتدا باید فرکانس طبیعی را در تمامی تیرها محاسبه کنیم، برای این کار، یک سنسور شتاب سنج را در انتهای آزاد تیر یکسردرگیر قرار می‌دهیم و با چکش مودال ضربه‌ای را به محلی مشخص از تیر وارد می‌کنیم و با استفاده از نرم افزار می-اسکوپ<sup>۱</sup> که تنظیمات آزمایش روی آن اعمال شده، با چندین بار تکرار، فرکانس طبیعی تمامی تیرها را محاسبه می‌کنیم. شایان ذکر است که آزمایش‌های انجام شده برای بررسی کاهش عرض تیر می‌باشند و این اندازه‌ها به ترتیب نصف و ثلث تیر واحد می‌باشند. بنابراین در مرحله اول فقط تیر واحد مورد آزمایش قرار می‌گیرد و در مرحله دوم، دو تیر نصف شده را یک‌بار با هم موازی و بار دیگر بصورت سری مورد آزمایش قرار می‌دهیم. در اینجا پیزوالکتریک تحت تحریک هارمونیک معادل منبع تغذیه هارمونیک در یک مدار

2 Jig  
3 Bobbin  
4 Shaker  
5 Eliezer HEV-50

1 Me Scoup



شکل ۴: دستگاه‌ها ونحوه قرارگیری آن‌ها جهت آزمایش تجربی [۳۱]

Fig. 4: Schematic of experimental setup

مختلف قابل اندازه‌گیری است. نحوه چیدمان آزمایش تجربی در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد. شیکر به مولد تابع<sup>۷</sup> و تقویت‌کننده<sup>۸</sup> متصل شده است. از مولد تابع و تقویت‌کننده برای کنترل فرکانس، شکل موج و نیز مقدار ارتعاشات استفاده می‌شود. داده‌های خروجی از کامپیوتر به صورت ولتاژ خروجی در زمان‌های مختلف می‌باشد و داده‌های هر آزمایش یک نمودار دامنه بر حسب زمان را در اختیار ما قرار می‌دهد. در نهایت از نمودار دامنه-زمان برای تحلیل، تبدیل فوریه سریع<sup>۹</sup> گرفته و نمودار فرکانس-زمان استخراج شده است. [۲۷ و ۳۲].

### ۳- تحلیل عددی

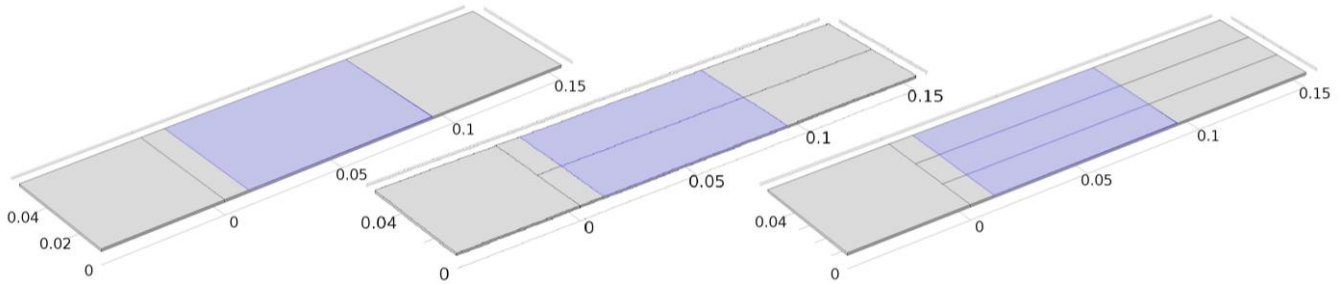
#### ۳-۱- مکانیک جامدات

این قسمت از حل عددی به بررسی ارتعاشات و کرنش تیر می‌پردازد، که شکل ۵ شماتیک اتصال شیکر و تیر آلومینیومی و پیزوالکتریک‌ها را نمایش می‌دهد.

انرژی اگر در فرکانس تشدید رخ دهد، بیشینه انرژی را به همراه دارد و کنترل شده به جهت صحت آزمایش می‌باشد. با توجه به این‌که فرکانس طبیعی تیرمورد نظر ۳۶ هرتز می‌باشد، تحریک شیکر جهت برداشت انرژی بیشینه نیز باید در فرکانس ۳۶ هرتز رخ دهد که با سیگنال ژنراتور اگیلنت ۳۳۲۰<sup>۱</sup> و تقویت‌کننده الیزر ای.۱۵۷<sup>۲</sup>، این بازه فرکانسی برای شیکر کنترل شده است. در ادامه برای اطمینان از فرآیند آزمایش از یک شتابسنج جهت پایش جابجایی هارمونیک استفاده گردیده است. از یک پتانسیومتری که با دو الکترو لایه پیزوالکتریک سری است، برای اندازه‌گیری توان خروجی در آن استفاده شده و برای اندازه‌گیری جریان در مدار از یک پیکوآمتر کیتلی<sup>۳</sup> ۶۴۸۵ و همچنین از آنالایزر بروئل آند کاجیر ۳۵۳۶۰ بی-۰۳۰<sup>۴</sup> برای اندازه‌گیری ولتاژ خروجی استفاده شد. امپدانس لایه پیزوالکتریک با وسیله اندازه‌گیری ال.سی.آر.۵. پی.۴۲۸۲<sup>۶</sup> به نسبت فرکانس‌های

- 7 Function Generator
- 8 Amplifier
- 9 Fast Fourier Transform (FFT)

- 1 Agilent 33220A
- 2 EA157 Elizer
- 3 Keithley
- 4 Bruel & Kjaer 35360B-030
- 5 LCR Meter
- 6 HP4282A



شکل ۵: شکل‌های تیرهای برداشت انرژی در سه مرحله

Fig. 5: Shape of energy harvesting beams in three steps

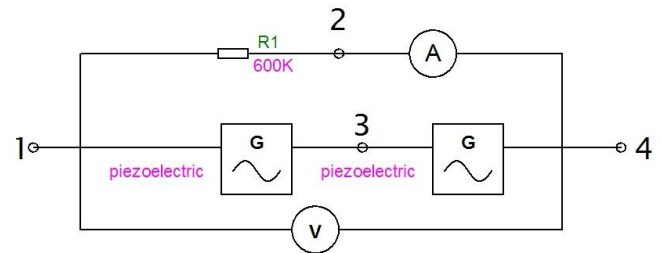
می‌کند. شکل ۶ مدار دو تیر سری را در حل عددی بصورت شماتیک نمایش می‌دهد.

### ۳-۴-المان‌بندی در حل عددی

با توجه به این‌که شکل‌های مورد تحلیل مستطیل مکعب بوده، بنابراین از ساده‌ترین نوع المان‌بندی یعنی مکعبی استفاده می‌شود. همانطور که در شکل‌های ۷ و ۸ قابل مشاهده است، المان‌بندی موجود در تمامی حالات یعنی تیر واحد و... به یک صورت می‌باشد.

### ۳-۵-آنالیز مودال تیر یکسر گیردار

در ابتدا به بررسی آنالیز مودال تیر می‌پردازیم تا فرکانس طبیعی تیر را محاسبه کنیم. برای این کار بعد از وارد کردن ابعاد تیر آلومینیومی که ذکر شد، ویژگی‌های آلومینیوم را از جمله مدول یانگ  $E=69\text{GPa}$  و چگالی  $p=2700\text{kg/m}^2$  و همچنین مشخصات لایه نازک پیزوالکتریک الکترو-اکتیو پیپر که مدول یانگ آن  $E=3\text{GPa}$  و چگالی  $p=1400\text{kg/m}^2$  و ضریب پیزوالکتریک آن  $d_{31}=25\text{PC/N}$  می‌باشد، را وارد کرده و بعد از المان‌بندی مکعبی ساده، شروع به تحلیل فرکانس طبیعی می‌کنیم. اولین فرکانس طبیعی تیر برداشت



شکل ۶: مدار دو تیر سری در کامسول

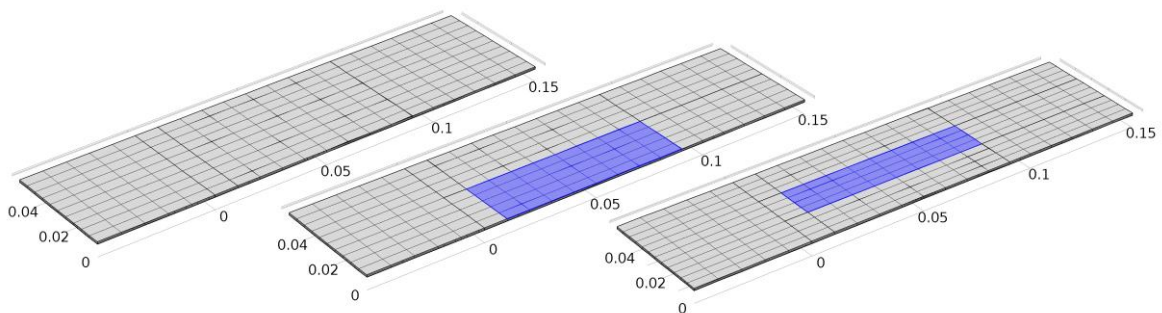
Fig. 6: Energy harvester electrical circuit

### ۳-۲-الکترواستاتیک

این قسمت از حل عددی مربوط به تحلیل پیزوالکتریک است. در این مرحله نرم‌افزار تجزیه و تحلیل مربوط به کرنش را از قسمت قبل گرفته و بر روی پیزوالکتریک اعمال می‌کند و پتانسیل الکتریکی را به قسمت مدار جهت محاسبه ولتاژ و جریان منتقل می‌کند.

### ۳-۳-مدار

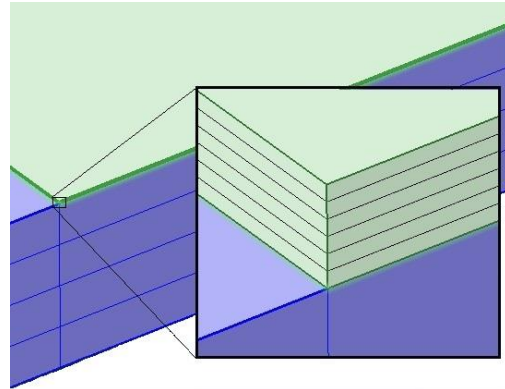
در انتها نرم‌افزار داده‌های مربوط به قسمت الکترواستاتیک را در قالب پتانسیل الکتریکی دریافت و در مداری که شامل، منبع تغذیه متناوب (پیزوالکتریک)، مقاومت، ولت‌متر، آمپر متر می‌باشد، وارد



شکل ۷: نمایش المان‌بندی تیر واحد، دو تیر و سه تیر برداشت انرژی در کامسول

Fig. 7: Meshing the types of energy harvesting cantilever beam

معرفی کنیم. صفحه‌های تحتانی و فوقانی لایه پیزوالکتریک همان الکترودهای آزمایش تجربی می‌باشند. نرم‌افزار، منبع تغذیه هارمونیک را تحت عنوان ترمینال می‌شناسد و مطابق مدار آزمایش تجربی، مقاومت، ولت‌متر و آمپر‌متر را در هر مرحله وارد می‌کنیم. با توجه به شرط مرزی حرکت هارمونیک که با یک تابع سینوسی وابسته به زمان تعریف شده است، از حوزه زمان جهت بررسی و تحلیل مدل مذکور همان‌طور که در شکل ۱۰ مشهود است، استفاده می‌کنیم.



شکل ۸: نمایش المان‌بندی ضخامت تیر و پیزوالکتریک  
Fig. 8: Meshing thickness of the beam

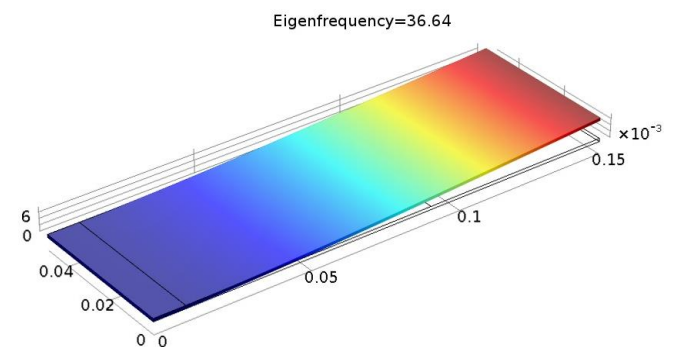
کننده انرژی ۳۶/۶۴ هرتز می‌باشد که در شکل ۹ قابل مشاهده است. از آنجاکه بیشترین جابجایی و کرنش در فرکانس تشدید رخ می‌دهد، بنابراین بیشینه ولتاژ نیز در این حالت تولید می‌گردد.

### ۳-۶- برداشت انرژی تیرحامل پیزوالکتریک در حوزه زمان

در ادامه به مدل‌سازی آزمایش مذکور در حوزه زمان می‌پردازیم. برای شبیه‌سازی شیکر موجود در آزمایش تجربی با اعمال شرط مرزی جابجایی را مطابق رابطه (۱) به انتهای گیردار تیر وارد می‌کنیم.

$$z = 0.0003 \times \sin(226t) \quad (1)$$

در مدل‌سازی لایه پیزوالکتریک باید صفحه تحتانی پیزو را به عنوان پتانسیل صفر در قالب شرط مرزی زمین و همچنین صفحه فوقانی پیزوالکتریک را به عنوان پتانسیل مرجع بصورت شرط مرزی ترمینال که ارتباط بین پیزوالکتریک و مدار می‌باشد را به نرم‌افزار



شکل ۹: آنالیز مودال تیر واحد جهت محاسبه فرکانس طبیعی  
Fig. 9: Modal analysis of the unit beam natural frequency

### ۳-۷- برداشت انرژی تیرحامل پیزوالکتریک در حوزه فرکانس

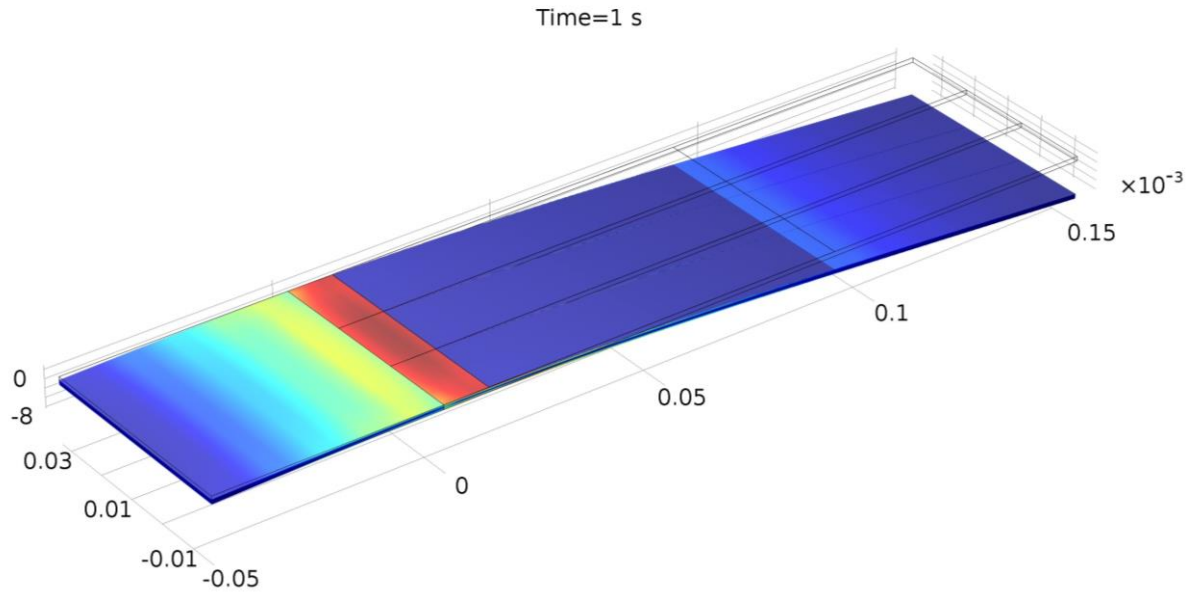
در آنالیز مودال، مقدار فرکانس طبیعی با توجه به مشخصات تیر و ویژگی‌های ماده مشخص می‌گردد. با توجه به این‌که بیشترین کرنش و برداشت انرژی در فرکانس تشدید تیر رخ می‌دهد، بنابراین تحریک صورت گرفته همان‌طور که در جزئیات آزمایش تجربی شرح داده شد، در این فرکانس صورت می‌گیرد. حال به اثبات این ادعا در حوزه فرکانس به کمک حل عددی می‌پردازیم. اساس کار حوزه فرکانس در نرم‌افزار کامسول بدین صورت است که نیروهای حجمی وارد بر تیر را در فرکانس‌های متعدد بررسی می‌کند. در اینجا تیر یکسرگرداری را که حامل لایه‌ای از پیزوالکتریک است در حوزه فرکانس مورد بررسی عددی قرار می‌دهیم. در ابتدا باید نیروهای وارده به تیر را حساب کنیم، که این نیروها شامل نیروی گرانش زمین و نیروی ناشی از حرکت هارمونیک تیر می‌باشند. در ادامه محدوده فرکانس‌های اعمالی به نیروهای وارده بر تیر را در حل عددی در نظر می‌گیریم، و با اعمال این نیرو در فرکانس‌های مختلف کرنش نیز تغییر می‌کند و در فرکانس تشدید شاهد بیشینه کرنش در لایه پیزوالکتریک و در نتیجه بیشینه برداشت انرژی در آن می‌باشیم. شکل ۱۱ نمودار ولتاژ و جریان خروجی از تیر یکسرگردار حامل لایه پیزوالکتریک در حوزه فرکانس می‌باشد.

### ۴- بحث و نتایج

فرکانس طبیعی در حالت تئوری از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۳۳].

$$f = 0.1632 \left( t / l^2 \right) (E / \rho)^{0.5} \quad (2)$$

که در آن  $t$  عرض تیر،  $l$  طول تیر،  $E$  مدول یانگ و  $\rho$  چگالی

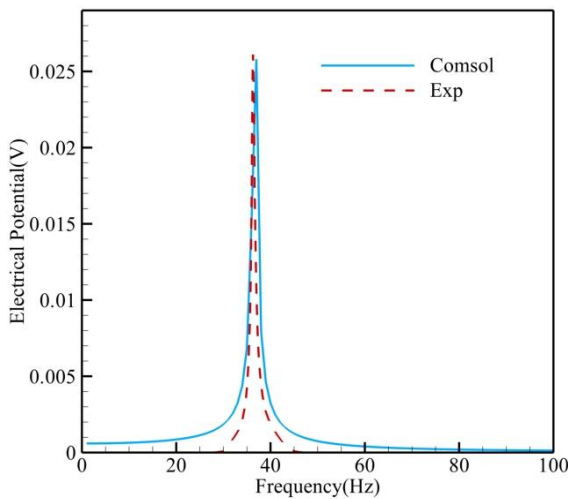


شکل ۱۰: تحلیل زمانی سه تیر یکسردرگیر در نرم افزار کامسول

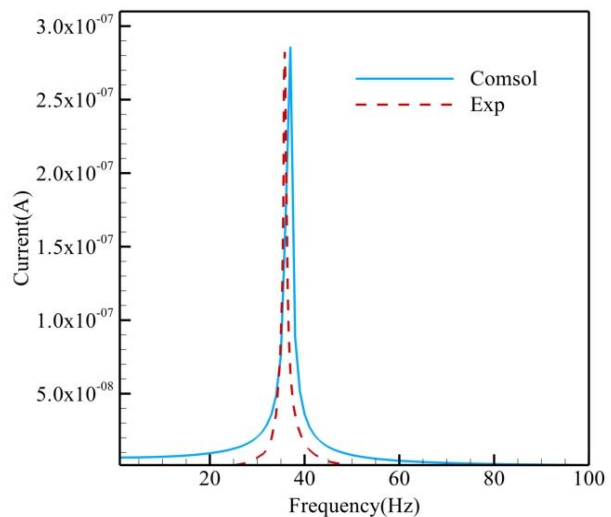
Fig. 10: Time analysis three energy harvesting cantilever beam in COMSOL

کاهش می‌یابد، فرکانس تشدید نیز در حدود همان ۳۶ هرتز می‌باشد. آزمایش‌های صورت گرفته جهت محاسبه فرکانس اول تیر یکسردرگیر برداشت انرژی با عرض‌های ۲۵ میلی‌متر و ۱۶/۶ میلی‌متر به ترتیب مقادیر ۳۵/۲ هرتز و ۳۵/۸ هرتز گزارش شده است. بعد از محاسبه فرکانس طبیعی از راه تئوری و اندازه‌گیری آن از آزمایش تجربی،

می‌باشد و با توجه به ضخامت بسیار ناچیز لایه پیزوالکتریک از تاثیر آن در فرکانس طبیعی صرف نظر می‌کنیم [۳۱]. با جایگذاری اطلاعات مربوط در رابطه (۲) فرکانس طبیعی تیر یکسردرگیر ۳۶/۲۹ هرتز محاسبه می‌شود. با توجه به فرمول بالا فرکانس طبیعی به عرض تیر وابسته نیست و بنابراین در مراحل بعدی آزمایش که عرض تیر



الف: ولتاژ خروجی در حوزه فرکانس

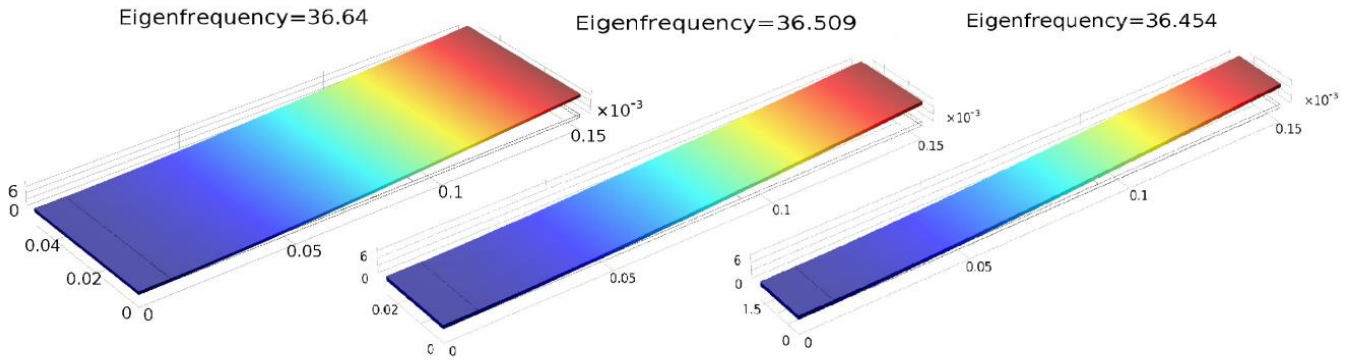


ب: جریان خروجی در حوزه فرکانس

شکل ۱۱: ولتاژ و جریان خروجی تیر حامل پیزوالکتریک در حوزه فرکانس

Fig. 11: Maximum output voltage (a) and current (b) of the EAPap-based energy harvester for a range of frequencies





شکل ۱۲: فرکانس اول تیر با عرض‌های متفاوت

Fig.12: Natural frequency of the beam with different widths

جدول ۱: فرکانس طبیعی اول در حل عددی، تحلیلی و آزمایش تجربی

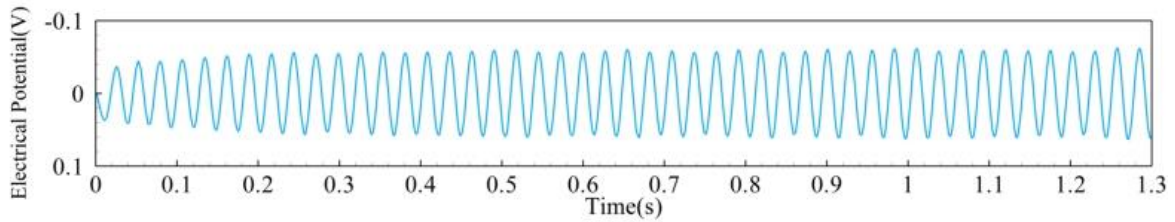
Table 1: Natural frequency in experimental, numerical and analytical solution

درصد خطای حل عددی و حل تحلیلی نسبت به آزمایش تجربی	حل عددی	حل تحلیلی [۳۳]	آزمایش تجربی	فرکانس طبیعی اول تیر با عرض ۵۰ mm میلی‌متر (Hz)
% ۰.۳۸	۳۶.۶۴	۳۶.۲۹	۳۶.۵	فرکانس طبیعی اول تیر با عرض ۲۵ میلی‌متر (Hz)
% ۳.۰۷	۳۶.۵۰۹	۳۶.۲۹	۳۵.۰۲	فرکانس طبیعی اول تیر با عرض ۱۶/۶ میلی‌متر (Hz)
% ۱.۸۲	۳۶.۴۵۴	۳۶.۲۹	۳۵.۸	

جدول ۲: نتایج آزمایش تجربی صورت گرفته در پنج مرحله

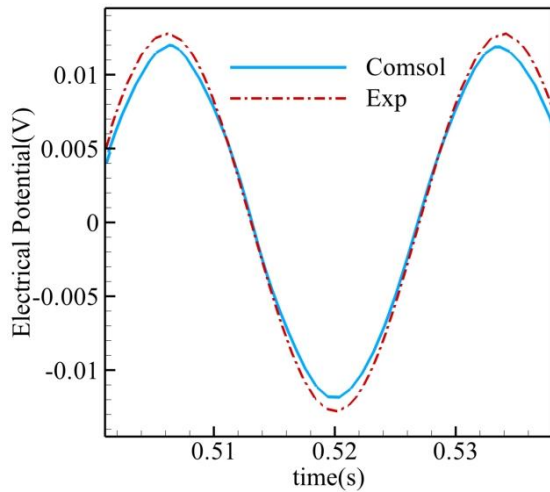
Table 2: Experimental results in five stages

سه تیر موازی با عرض ۱۶ میلی‌متر	سه تیر سری با عرض ۱۶ میلی‌متر	دو تیر موازی با عرض ۲۵ میلی‌متر	دو تیر سری با عرض ۲۵ میلی‌متر	تیر واحد با عرض ۵۰ میلی‌متر	
۱۲۵	۱۴۵۰	۱۵۰	۶۰۰	۹۰	مقاومت $k\Omega$
۳۰.۲	۹۰	۲۳۱	۱۳۳.۶	۲۸۴	بیشینه جریان nA
۳۷.۸	۱۳۰.۵	۳۴.۷	۸۰.۲	۲۵.۶	ولتاژ بیشینه mV

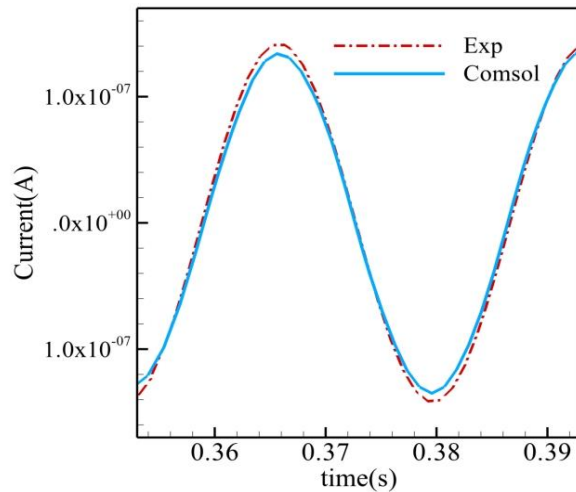


شکل ۱۳: بررسی همگرایی در حوزه زمان

Fig. 13: Convergence of the time resolution



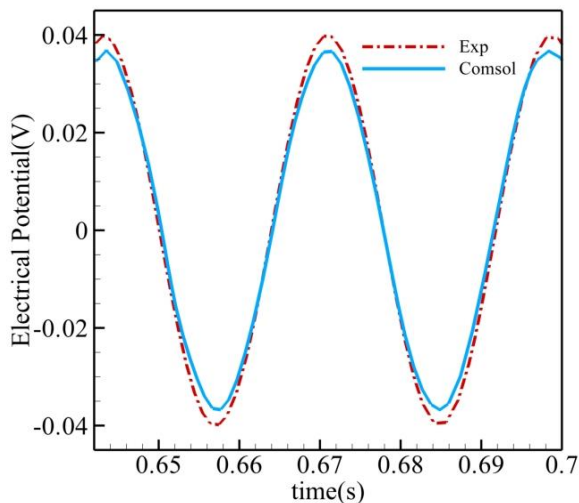
الف: ولتاژ خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی



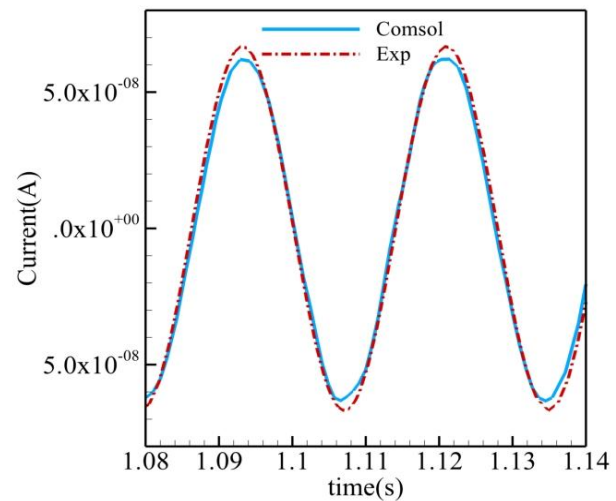
ب: جریان خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی

شکل ۱۴: ولتاژ و جریان خروجی از تیر واحد

Fig. 14: Output current of 5 cm width cellulose EAPap-based energy harvester, (a) Harmonic output voltage in experimental and numerical solution, (b) Harmonic output current in experimental and numerical solutions



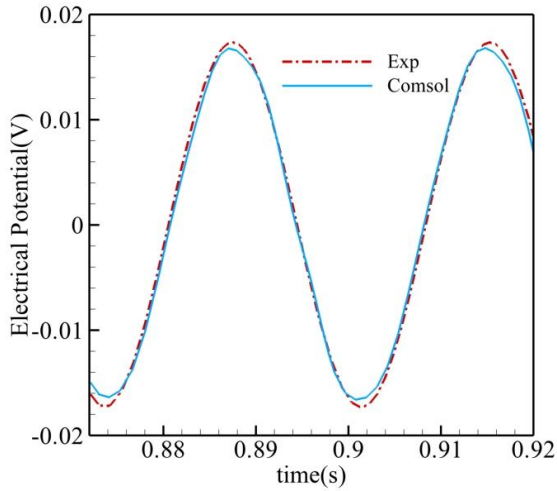
الف: ولتاژ خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی



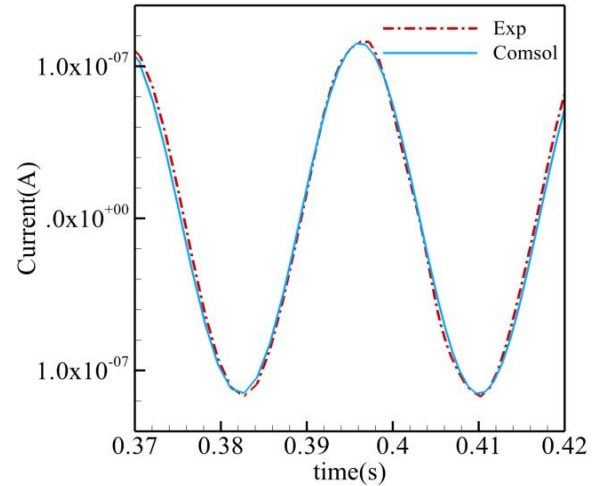
ب: جریان خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی

شکل ۱۵: ولتاژ و جریان خروجی از دو تیر در حالت سری

Fig. 15: Voltage and output current of two piezoelectric cantilever beams series, (a) Harmonic output voltage, (b) Harmonic output current in experimental and numerical solutions



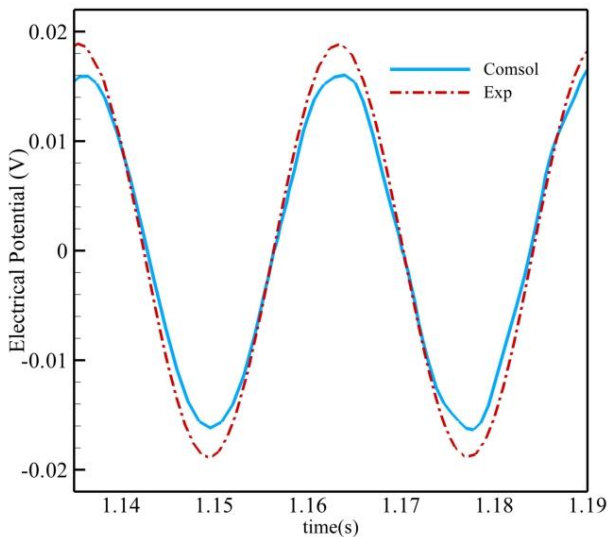
الف: ولتاژ خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی



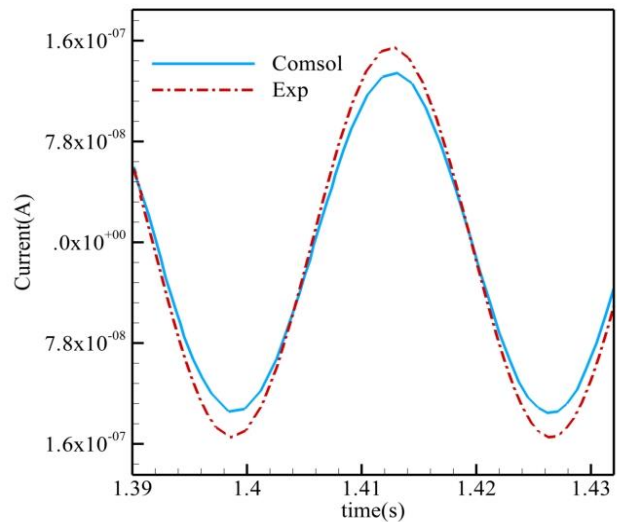
ب: جریان خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی

شکل ۱۶: ولتاژ و جریان خروجی از دو تیر در حالت موازی

**Fig. 16: Voltage and output current of two piezoelectric cantilever beams parallels, (a) Harmonic output voltage, (b) Harmonic output current in experimental and numerical solutions**



الف: ولتاژ خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی



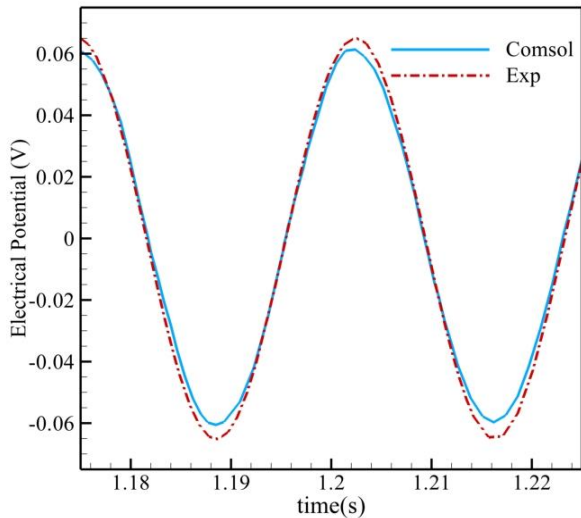
ب: جریان خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی

شکل ۱۷: ولتاژ خروجی از سه تیر در حالت موازی

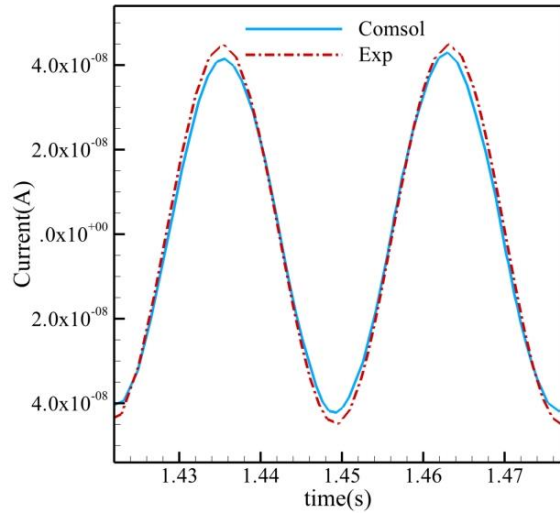
**Fig. 17: Voltage and output current of three piezoelectric cantilever beams parallels, (a) Harmonic output voltage, (b) Harmonic output current in experimental and numerical solutions**

جدول ۱ فرکانس طبیعی اول تیر یکسرگیردار با عرض‌های مختلف در آزمایش تجربی، حل عددی و تحلیلی ارائه شده در مرجع [۳۳] را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که در حل عددی خطا وجود دارد، بنابراین درصد خطای فرکانس طبیعی حل عددی و تحلیلی نسبت به آزمایش تجربی در جدول ۱ محاسبه شده است.

در ادامه به نتیجه بدست آمده از تحلیل عددی توجه می‌کنیم که مقدار آن  $36/64$  هرتز می‌شود. در مرحله بعدی شبیه‌سازی عددی به محاسبه فرکانس طبیعی اول تیر در عرض‌های  $25$  میلی‌متر و  $16/6$  میلی‌متر می‌پردازیم که نتایج حاصله با توجه به شکل ۱۲ به ترتیب  $36/509$  هرتز و  $36/454$  هرتز هستند.



الف: ولتاژ خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی



ب: جریان خروجی هارمونیک در تحلیل عددی و آزمایش تجربی

شکل ۱۸: ولتاژ خروجی سه از تیر در حالت سری

Fig. 18: Voltage and output current of three piezoelectric cantilever beams series, (a) Harmonic output voltage, (b) Harmonic output current in experimental and numerical solutions

جدول ۳: درصد خطای مدل‌سازی عددی در مقایسه با نتایج تجربی

Table 3: The maximum power outputs from various cellulose EAPap samples used in the experiment and numerical solution

سه تیر موازی با عرض ۱۶ میلی‌متر		سه تیر سری با عرض ۱۶ میلی‌متر		دو تیر موازی با عرض ۲۵ میلی‌متر		دو تیر سری با عرض ۲۵ میلی‌متر		تیر واحد با عرض ۵۰ میلی‌متر		
عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	
۱.۳	۱.۴۲۵	۱.۱۵	۱.۴۵	۱.۰۳۵	۱.۰۰۱	۱.۳۱	۱.۲۸۳	۰.۹۱۹	۰.۹۰۷	توان (nW)
۰.۰۱۶۶	۰.۰۱۸۵	۰.۰۰۶	۰.۰۰۶۵	۰.۰۱۶۸	۰.۰۱۷۳	۰.۰۳۹	۰.۰۴	۰.۰۲۴۸	۰.۰۲۵۶	ولتاژ (V)
۲۸۰	۳۰۲	۸۳	۹۰	۲۲۴	۲۳۱	۱۳۱	۱۳۳.۶	۲۷۴	۲۸۴	جریان (mA)
٪ ۱۹		٪ ۱۰		٪ ۲.۱		٪ ۲		٪ ۱.۴		در صد خطای توان خروجی

آمده برای تیر واحد و تیرهای دیگر در جدول ۲ ثبت گردیده است. در تحلیل‌های صورت گرفته در نرم‌افزار کامسول با توجه به شرایط مرزی مساله از تحلیل زمانی استفاده شده است. در این نوع تحلیل، زمان به دو قسمت تقسیم می‌گردد: زمان گذرا و زمان پایا. زمان گذرا زمانی است که مدل نیاز دارد تا به حالت پایدار برسد و زمان بعد از آن را زمان پایا می‌گویند. در شکل ۱۳ زمان پایا از ۰/۴ ثانیه شروع

آزمایش‌ها با تکرار قابل قبول پنج مرتبه در هر مرحله صورت گرفته و مقاومت مدار در هر مرحله از آزمایش در سطر اول جدول ۲ آمده است. با توجه به جزئیاتی که از نحوه آزمایش تجربی شرح داده شد، سنجش گرهای بکار رفته در هر مرحله از فرآیند آزمایش، ولتاژ و جریان خروجی را نشان می‌دهند. میانگین ولتاژ و جریان در پنج تکرار آزمایش برحسب میلی‌ولت و نانوامپر استخراج شده و نتایج بدست



پیپر ماده منعطفی است، می‌توان دو طرف تیر را با آن پوشاند و در این حالت از کرنش وارده بر تیر به بررسی برداشت انرژی بهره‌مندیم. با توجه به کاربردهایی که برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک دارند، می‌توان از این بهینه‌سازی در آن‌ها استفاده نمود. به عنوان مثال در برداشت انرژی از پیاده‌روی به جای استفاده از یک تیری که تحت کرنش قرار گرفته از چند تیر با عرض کمتری که نسبت به هم سری هستند، استفاده نمود. به عنوان مثال به جای استفاده از یک تیر پیزوالکتریک به عرض سه سانتی‌متر می‌توان از سه تیر پیزوالکتریک به عرض یک سانتی‌متر که روی هم قرار گرفته‌اند، جهت کاهش فضای اشغالی استفاده نمود. با توجه به این‌که برداشت انرژی در محیط‌های پر تنش معنا دارد، استفاده از پیزوسرامیک‌ها به دلیل شکنندگی بالایی که دارند در این مکان‌ها توصیه نمی‌شود. در این موارد بهتر است از ماده الکترو-اکتیو پیپر به دلیل قدرت انعطاف‌پذیری بالا به عنوان جایگزینی برای پیزوسرامیک‌ها استفاده نمود.

### مراجع

- [1] Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, D. Inman, High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications, *Joule*, (2018).
- [2] A. Erturk, D.J. Inman, A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters, *Journal of vibration and acoustics*, 130(4) (2008) 041002.
- [3] Y. Cha, Energy harvesting using flexible piezoelectric materials from human walking motion: Theoretical analysis, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(20) (2017) 3006-3015.
- [4] M. Karimi, R. Tikani, S. Ziaei-Rad, Piezoelectric energy harvesting from bridge vibrations under moving consecutive masses, *Modares Mechanical Engineering*, 16(6) (2016) 108-118.
- [5] S. Suhag, D. Chhabra, DESIGN OF A CLOSED CHANNEL FLUID FLOW SYSTEM FOR PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING, (2018).
- [6] S. Orrego, K. Shoele, A. Ruas, K. Doran, B. Caggiano, R. Mittal, S.H. Kang, Harvesting ambient wind energy

مواد سلولوزی با توجه به فراوانی آن در طبیعت این ایراد مرتفع گشته است. طبق روابط تئوری فرکانس طبیعی تیرهای مستطیلی وابسته به عرض آن‌ها نیست. نتایج آنالیز مودال با توجه به داده‌های بدست آمده از تحلیل عددی در کنار نتیجه بدست آمده از آزمایش تجربی نیز هر دو موکد این امر هستند که فرکانس طبیعی تیر یکسردرگیر به عرض تیر وابسته نمی‌باشد.

یکی از روش‌های بهینه‌سازی برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک تغییر شکل و شرایط مرزی می‌باشد، با توجه به نتایج آزمایش‌های عددی بدست آمده و نتایج حاصله از انجام آزمایش تجربی که موید آن است، نتیجه می‌گیریم که با کاهش عرض تیر و همچنین با سری کردن این تیرها، توان خروجی آن‌ها نسبت به تیر واحد افزایش قابل توجهی خواهد داشت، زیرا با کاهش عرض تیر میرایی نیز کاهش می‌یابد این در حالی است که فرکانس طبیعی تغییری نمی‌کند، بطوری‌که هر چه عرض تیر کاهش یابد توان خروجی نیز افزایش می‌یابد، اگر تیر واحد را نصف کنیم توان خروجی آن‌ها در حالت سری نسبت به تیر واحد ۴۷٪ افزایش خواهد یافت و در حالت موازی میزان افزایش ۱۰٪ خواهد بود. همچنین اگر تیر واحد را از عرض به سه تیر مساوی تقسیم کنیم توان برداشتی از هر سه آن‌ها نسبت به تیر واحد در حالت سری ۶۲٪ و در حالت موازی ۵۷٪ افزایش خواهد یافت. در نهایت می‌توان گفت در بهترین حالت مورد بررسی اگر یک تیر برداشت‌کننده انرژی را به سه قسمت واحد تقسیم کنیم و هر سه را با هم سری کنیم توان خروجی آن‌ها نسبت به تیر واحد ۶۲٪ افزایش خواهد داشت. در ادامه تحقیقات می‌توان کاهش عرض تیر را در مراحل سوم به بعد بررسی نمود، به گونه‌ای که از سه تیر برداشت انرژی دو نمونه آن‌ها را موازی کرده و نمونه سوم را با آن‌ها سری نموده و همچنین عکس این حالت، یعنی دو تیر که با هم سری شده‌اند را با نمونه سوم موازی کرد و این حالات را برای چهار تیر برداشت انرژی نیز تعمیم دهیم تا در نهایت حالت بهینه در نحوه چیدمان تیرها که نقش منبع تغذیه را دارند، بدست آید. همچنین توان را در یک حالت اتصال (مثلاً سری) برای انواع تعداد تقسیم‌بندی مورد بررسی قرار داد و الگوی افزایش میزان توان خروجی را بدست آورد. عامل مهم دیگری که در بهینه‌سازی برداشت انرژی نقش بسیار مهمی داشته مقاومت مدار می‌باشد که با تغییر آن در مدار می‌توان به نقطه بهینه‌تری برسیم. با توجه به اینکه ماده سلولوزی الکترو-اکتیو

- using different shapes of piezoelectric bimorphs, 25(12) (2015) 125008.
- [17] R. Hosseini, M.J.I.J.o.A.D. Hamed, M. Technology, Study of the resonant frequency of unimorph triangular V-shaped piezoelectric cantilever energy harvester, 8(4) (2015).
- [18] M.A.M. Hatta, M.W.A. Rashid, U.A.-A.H. Azlan, K.S. Leong, N.A. Azmi, Finite element method simulation of MEMS piezoelectric energy harvester using lead-free material, in: Computer and Communication Engineering (ICCCCE), 2016 International Conference on, IEEE, 2016, pp. 511-515.
- [19] C.H. Wong, Z. Dahari, M.H. Jumali, K. Mohamed, J.J.J.J.o.E.M. Mohamed, Simulation and Fabrication of Wagon-Wheel-Shaped Piezoelectric Transducer for Raindrop Energy Harvesting Application, 46(3) (2017) 1587-1597.
- [20] A. Batra, A. Alomari, M. Aggarwal, A. Bandyopadhyay, Energy harvesting under excitation of clamped-clamped beam, in: Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2016, International Society for Optics and Photonics, 2016, pp. 980612.
- [21] Y. Amini, P. Fatehi, M. Heshmati, H.J.C.S. Parandvar, Time domain and frequency domain analysis of functionally graded piezoelectric harvesters subjected to random vibration: Finite element modeling, 136 (2016) 384-393.
- [22] V. Cleante, M. Brennan, G. Gatti, D.J.M.S. Thompson, S. Processing, On the target frequency for harvesting energy from track vibrations due to passing trains, 114 (2019) 212-223.
- [23] Y.J.J.o.I.M.S. Cha, Structures, Energy harvesting using flexible piezoelectric materials from human walking motion: Theoretical analysis, 28(20) (2017) 3006-3015.
- [24] J. Kim, S. Mun, H.-U. Ko, L. Zhai, S.-K. Min, H.C. Kim, A Comprehensive Review of Electroactive Paper Actuators, in: Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs), 2015, pp. 398-422.
- with an inverted piezoelectric flag, Applied Energy, 194 (2017) 212-222.
- [7] Z.L. Wang, J. Song, Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays, Science, 312(5771) (2006) 242-246.
- [8] S. Priya, H.-C. Song, Y. Zhou, R. Varghese, A. Chopra, S.-G. Kim, I. Kanno, L. Wu, D.S. Ha, J. Ryu, A review on piezoelectric energy harvesting: materials, methods, and circuits, Energy Harvesting and Systems, 4(1) (2017) 3-39.
- [9] O. Abdeljaber, O. Avci, D.J. Inman, Active vibration control of flexible cantilever plates using piezoelectric materials and artificial neural networks, Journal of sound and vibration, 363 (2016) 33-53.
- [10] H. Salmani, G. Rahimi, S. Hosseini Kordkheili, An exact analytical solution to exponentially tapered piezoelectric energy harvester, Shock and Vibration, 2015 (2015).
- [11] B. Andò, S. Baglio, F. Maiorca, C. Trigona, Analysis of two dimensional, wide-band, bistable vibration energy harvester, Sensors and Actuators A: Physical, 202 (2013) 176-182.
- [12] D. Borthakur, K. Guha, S. Chander, S. Baishya, Optimization of Piezoelectric Energy Harvesting Structure by Segmenting the Piezoelectric Layer (s).
- [13] T. Kumar, R. Kumar, V.S. Chauhan, Design and finite element analysis of varying width piezoelectric cantilever beam to harvest energy, in: Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE), 2015 International Conference on, IEEE, 2015, pp. 1-6.
- [14] R. Hosseini, M.J.M.T. Hamed, An investigation into resonant frequency of trapezoidal V-shaped cantilever piezoelectric energy harvester, 22(5) (2016) 1127-1134.
- [15] R. Hosseini, M. Hamed, An investigation into resonant frequency of triangular V-shaped cantilever piezoelectric vibration energy harvester, (2016).
- [16] R. Hosseini, M.J.J.o.M. Hamed, Microengineering, Improvements in energy harvesting capabilities by

- nanoscience and nanotechnology, 11(1) (2011) 570-573.
- [30] Z. Cai, J. Kim, Dry and durable electro-active paper actuator based on natural biodegradable polymer, *Journal of applied polymer science*, 115(4) (2010) 2044-2049.
- [31] R. Hosseini, M. Hamed, J. Im, J. Kim, J. Dayou, Analytical and experimental investigation of partially covered piezoelectric cantilever energy harvester, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(3) (2017) 415-424.
- [32] Z. Abas, H.S. Kim, L. Zhai, J. Kim, Experimental study of vibrational energy harvesting using Electro-Active paper, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(6) (2015) 1187-1193.
- [33] R. Hosseini, M. Hamed, A. Ebrahimi Mamaghani, H.C. Kim, J. Kim, J. Dayou, Parameter identification of partially covered piezoelectric cantilever power scavenger based on the coupled distributed parameter solution, *International Journal of Smart and Nano Materials*, 8(2-3) (2017) 110-124.
- [25] M.A.H. Khondoker, S.C. Mun, J. Kim, Particle based conductive silver ink customized for ink jet printing on cellulose electro-active paper, in: *Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems 2013*, International Society for Optics and Photonics, 2013, pp. 86910Q.
- [26] A. John, S.K. Mahadeva, J. Kim, The preparation, characterization and actuation behavior of polyaniline and cellulose blended electro-active paper, *Smart Materials and Structures*, 19(4) (2010) 045011.
- [27] R. HOSSEINI, M.A. EBRAHIMI, M. NOURI, An Experimental Investigation into Width Reduction Effect on the Efficiency of Piezopolymer Vibration Energy Harvester, (2017).
- [28] L. Zhai, B.-W. Kang, J.-H. Kim, J. Kim, Z. Abas, H.S. Kim, Electrode effect on the cellulose piezo-paper energy harvester, in: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2013*, International Society for Optics and Photonics, 2013, pp. 86870R.
- [29] G.-Y. Yun, K.-J. Yun, J.-H. Kim, J. Kim, Electrical and mechanical characterization of nanoscale-layered cellulose-based electro-active paper, *Journal of*