



بررسی تجربی اثر کاهش عرض تیر بر بازده برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی پیزوپلیمری

روح‌اله حسینی^{۱*}، علی ابراهیمی ممقانی^۱ و مریم نوری^۱

^۱ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۹

چکیده

هم‌اکنون برداشت انرژی ارتعاشی با ماده پیزوالکتریک، می‌تواند بیش از ۳۰۰ میکرووات بر سانتی‌متر مربع توان تولید کند و این امر موجب شده تا این روش، به یکی از روش‌های مناسب برداشت انرژی برای تأمین توان وسایل الکترونیکی با توان کم مطرح گردد. استفاده از مواد و تکنولوژی جدید در ساخت برداشت‌کننده‌های انرژی، می‌تواند مشکلات موجود در سازه‌های فعلی را تا حد زیادی رفع نماید. در این کار به کمک مواد پیزوپلیمری EAPap که فیلم نازکی از سلولز می‌باشند، تیرهای یکسردرگیر برداشت‌کننده انرژی ساخته شده و سپس به تیرهایی با عرض کوچکتر و یکسان تقسیم گردیده‌اند. یک‌بار یک تیر به دو قسمت مساوی و بار دیگر به سه قسمت مساوی تقسیم‌بندی شدند. سپس تیرهای با عرض کمتر به صورت سری و موازی به یکدیگر متصل شده، اثر نوع اتصال نیز بررسی گردید. مشاهده شد که با تقسیم یک تیر به چند تیر با عرض کمتر و اتصال سری یا موازی تیرها، جریان، ولتاژ و در نتیجه توان خروجی تیرها افزایش می‌یابد. اتصال موازی تیرها، موجب ایجاد جریان بیشتر و اتصال سری، موجب ایجاد ولتاژ بیشتر گردید.

کلمات کلیدی: برداشت انرژی ارتعاشی؛ پیزوالکتریک؛ توان تولیدی؛ پیزوپلیمر سلولزی.

An Experimental Investigation into Width Reduction Effect on the Efficiency of Piezopolymer Vibration Energy Harvester

R. Hosseini^{1*}, A. Ebrahimi Mamaghani¹, M. Nouri¹

¹ Young Researchers and Elite Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

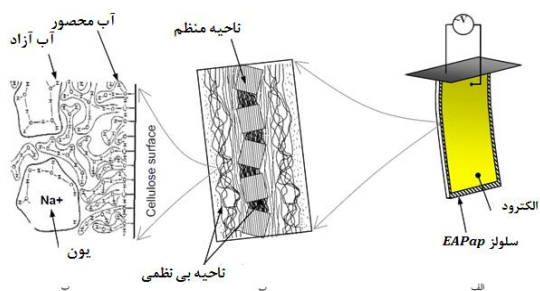
Abstract

Now piezoelectric vibrational energy harvesters can produce more than 300 microwatts per square centimeter and this has led to a suitable method for power energy harvesting for electronic devices with low power problem. The use of new technology and materials in manufacturing energy harvesting devices can greatly fix the problems in the current energy harvesting structures. In this work, using EAPap piezopolymer films, the cantilever energy harvesters are made and are split into equal parts with smaller widths. Once a beam is divided into two equal parts and once again is divided into three equal parts. Then the smaller cantilevers are connected together in series and parallel and the effect of binding were also noted. It was observed that splitting a beam into several beams with less width and connecting the beams in series or parallel, can increase the current, voltage and the resulting power output. Parallel connection create more current flow and series connection, causes more output voltage.

Keywords: Vibrational Energy Harvesting; Piezoelectric; Generated Power; Cellulosic Piezopolymer.

۱- مقدمه

ماده سلولز در ابتدا در سال ۱۹۵۰ میلادی، به عنوان ماده‌ای با خاصیت کم پیژوالکتریسیته شناخته شد [۱۰] که خاصیت پیژوالکتریسیته آن ناچیز بود. با رشد تکنولوژی علم مواد در دنیا، سلولز به عنوان ماده‌ای با خاصیت تغییر شکل و جابجایی زیاد شناخته شد که در اثر اعمال ولتاژ الکتریکی، می‌تواند تغییر شکل‌های زیادی را ایجاد نماید و در ادامه بیشتر به پتانسیل این ماده برای ایجاد رفتار الکترومکانیکی پی برده شد [۱۱]. سلولز به عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی در دنیا یافت می‌شود. برخی از مزایای عمده این ماده عبارتند از: سادگی ساخت، چگالی کم، قیمت بسیار پایین، دسترسی فراوان، مشخصات مکانیکی مناسب، قابلیت تغییر شکل زیاد و ایجاد ولتاژ خروجی قابل قبول در کاربرد، به عنوان برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی است. در شکل ۱، ساختار این ماده نشان داده شده است.



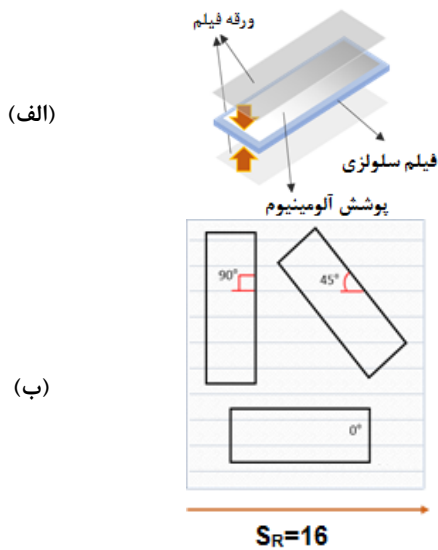
شکل ۱- مفهوم برداشت‌کننده انرژی EAPap (الف) ماده سلولزی از تعدادی نواحی کریستالی منظم و نامنظم تشکیل یافته است، (ب) EAPap از کاغذ سلولزی تشکیل شده که روی آن الکترودهایی از طلا لایه‌نشانی شده‌اند و (پ) مولکول‌های آب توسط هیدروکسیل‌ها روی سطح سلولز محدود شده‌اند و یا به صورت خوشه‌ای رها شده‌اند [۱۲]

در تحقیقات پیشین چیدمان تیرها بررسی و نشان داده شده که استفاده از آرایه‌ای از تیرها چگالی توان خروجی بیشتری از یک تیر باعرضی برابر مجموع عرض‌های تیرها ایجاد می‌کند [۱۳]. با این حال تا کنون هیچ مطالعه‌ای روی اتصالات الکتریکی سری و موازی برداشت‌کننده‌های انرژی و بررسی آن‌ها به صورت همزمان انجام نشده است. در این مقاله، یک برداشت‌کننده انرژی پیژوپلیمری EAPap سلولزی، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار تیرهای برداشت‌کننده انرژی پیژوپلیمری ساخته شده است که یک‌بار

برداشت یا مهار انرژی، عبارت از مهار انرژی‌های موجود در محیط اطراف و تبدیل آن‌ها به انرژی الکتریکی مورد نیاز است. ده‌ها سال است که سیستم‌های مهار و برداشت انرژی در ابعاد ماکرو و میکرو برای استفاده در تجهیزات مختلف مطرح شده‌اند. جهت تأمین درخواست‌های جهانی برای انرژی، سیستم‌های استحصال در مقیاس بزرگ با موفقیت ساخته شده‌اند. از طرفی برای تجهیزات با توان پایین، برداشت انرژی از محیط، روشی مناسب است، چرا هزینه‌های تعویض باتری‌های قدیمی نسبتاً بالا است. بخصوص در بسیاری از موارد ممکن است، دسترسی به سنسورها و عملگرهای مختلف برای تعویض باتری، به سادگی میسر نباشد. مکانیزم‌های متفاوتی برای برداشت انرژی ارتعاشی وجود دارند که شامل، روش‌های الکترواستاتیک، الکترومغناطیس و استفاده از مواد پیژوالکتریسیته می‌باشند [۱-۳].

عملکرد تجهیزات برداشت انرژی به نوع ماده به کار رفته در آن‌ها وابسته است. از بین روش‌های مختلف برداشت انرژی، استفاده از مواد پیژوالکتریک کاربرد بیشتری دارد و به صورت گسترده‌تر رواج دارد، زیرا از چگالی توان بالاتری برخوردار هستند [۳]. مواد پیژوپلیمری نسبت به سایر مواد پیژوالکتریک رایج، دارای انعطاف بیشتری هستند و می‌توانند به خوبی در برداشت‌کننده‌های انرژی ارتعاشی، مورد استفاده قرار بگیرند. در میان مواد رایج پیژوپلیمری مورد استفاده، به تازگی موادی به نام کاغذ الکترو-اکتیو^۱ (EAPap)، بر اساس سلولز ساخته شده‌اند که خاصیت پیژوالکتریسیته دارند و می‌توانند برای برداشت انرژی، مورد استفاده قرار بگیرند. با اعمال تنش و کرنش مکانیکی به این ماده می‌توان از آن انرژی الکتریکی مورد نیاز را استحصال نمود. در اکثر برداشت‌کننده‌های انرژی مکانیکی رایج، از هندسه یک تیر یکسردگیر برای کاربرد در ساخت برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی استفاده می‌شود؛ زیرا این هندسه معمولاً نسبت به سایر هندسه‌ها با تحریک یکسان، کرنش بیشتری ایجاد کرده و لذا مناسب‌تر است. در تحقیقات پیشین روی هندسه‌های مختلف تیر یکسردگیر، مطالعات زیادی انجام شده است [۴-۹].

^۱ Electro-Active Paper



شکل ۲- دیاگرام شماتیک الف) جهت برش فیلم EAPap و ب) فرایند روکش دهی

پس از آماده سازی فیلم نازک پیزوالکتریک، برداشت کننده انرژی ارتعاشی به شکل یک تیر یکسردرگیر ساخته شد. تیر آلومینیومی با طول ۲۰۰ میلی متر، عرض ۵۰ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر، به عنوان سازه میزبان مورد استفاده قرار گرفت و فیلم پیزوالکتریک با چسب به زیرلایه آلومینیومی متصل شده است. ۵ سانتی متر، از تیر به عنوان بخش نگهدارنده داخل فیکسچر استفاده شد که از چهار سوراخ تشکیل یافته است. ابعاد فیلم EAPap، ۸۰ میلی متر در ۵۰ میلی متر است و ۱۰ میلی متر دورتر از تکیه گاه تیر نصب شد (مطابق شکل ۳). دلیل نزدیکی مکان نصب پیزوالکتریک به تکیه گاه، خمش و در نتیجه کرنش بالای این ناحیه به منظور استفاده در کاربردهای برداشت انرژی است. مشابه این کار برای نمونه هایی از جنس پیزوالکتریک EAPap و زیرلایه آلومینیومی با عرض کمتر تکرار شد و در نهایت شش نمونه با عرض های مختلف ساخته شد. استفاده از عرض های مختلف تیر مستطیلی، به منظور بررسی اثر کاهش عرض تیر مستطیلی و بررسی اثر استفاده از دو یا سه تیر با مجموع عرض یکسان با یک تیر مستطیلی انجام گرفت؛ بنابراین شش نمونه با طول یکسان (۸ سانتی متر) و عرض های متفاوت - یک نمونه با عرض ۵ سانتی متر، دو نمونه با عرض ۲/۵ سانتی متر و سه نمونه با عرض ۱/۶۶ سانتی متر - ساخته شد (شکل ۳).

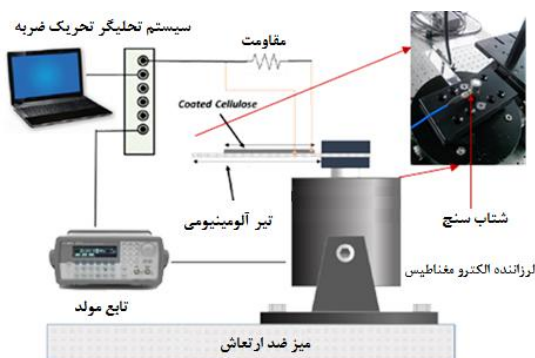
یکی از آن ها به دو و بار دیگر به سه المان برداشت کننده انرژی تقسیم و به صورت سری و موازی به هم متصل شده اند و خروجی هر یک از برداشت کننده ها، مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه شده اند.

۲- کار تجربی

فیلم پیزوالکتریک EAPap، سلولز فرآوری شده است که از کتان خام با درجه پلیمریزاسیون ۴۵۰۰ ساخته شده است. کتان پس از تبدیل شدن به قطعات کوچکتر، در ان-دیمتیل استامید بی آب با نسبت خاصی از کلرید لیتیم در 110°C حل شد. برای ایجاد یک محلول همگن، مخلوط حاصل با استفاده از همزن نوار مغناطیسی هم زده شد تا جایی که پالپ های کتان خام و لیتیم کلرید، به خوبی در هم حل شدند. سپس با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ، برای ایجاد محلولی شفاف و فوق العاده چسبناک استفاده شد. پس از آن محلول روی صفحه شیشه ای شفاف ریخته شد و با استفاده از ریخته گری نواری^۱ (معروف به روش تیغه دکتر^۲)، به صورت یکنواخت پخش گردید. از حلال های آب دی یونیزه شده و الکل ایزوپروپیل برای برداشتن باقیمانده های آند لیتیم استفاده شده است؛ در حالی که هنوز مرطوب بود، سلولز به نسبت ۱/۶ برابر حالت اولیه کشیده شد و سپس توسط نور مادون قرمز به مدت حدود یک ساعت خشک گردید. در این لحظه یک سلولز فرآوری شده نازک با ضخامت $10^{-5} \times 1/5$ با خواص پیزوالکتریسته تولید می شود که به فیلم پیزوالکتریک EAPap معروف است. برای انجام کار تجربی، فیلم با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت کشش با ابعاد مورد نظر بریده شد (شکل ۲-الف). به منظور استفاده در برداشت کننده انرژی، الکترودهای آلومینیوم در دو طرف فیلم با استفاده از روش تبخیر حرارتی لایه نشانی شدند. به منظور جلوگیری از ایجاد اتصال کوتاه بین الکترودها و میزبان و نیز کاهش امکان آسیب، هر فیلم EAPap با استفاده از لایه های شفاف پوشانده شد (شکل ۲-ب) [۱۴]. نمونه های ساخته شده، دارای طول ۸ سانتی متر و عرض ۵ سانتی متر هستند.

^۱ Tape Casting

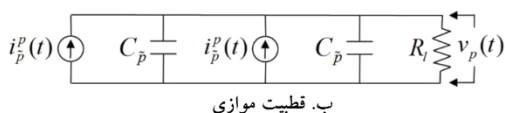
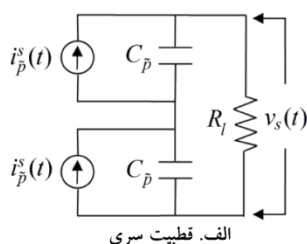
^۲ Doctor Blade



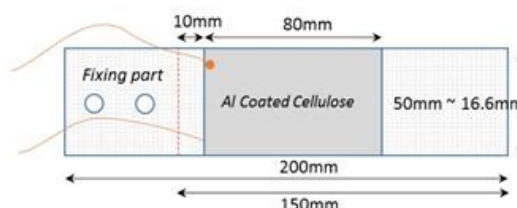
شکل ۴- عکس و شماتیک تیرهای برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی با استفاده از ماده پیزوالکتریک EAPap با عرض‌های مختلف

هر لایه از پیزوالکتریک، به عنوان یک منبع جریان الکتریکی موازی با یک خازن ذاتی در نظر گرفته می‌شود؛ لذا اتصال الکتریکی سری و موازی برداشت‌کننده‌ها را می‌توان به صورت شکل ۵ نمایش داد.

بررسی تکرارپذیری یکی از گام‌های اولیه در بررسی یک روش آزمایشگاهی بوده، به منظور تخمین میزان عدم دقت یا خطای اتفاقی آزمایش بکار می‌رود. تکرارپذیری نتایج با تکرار آزمایش برای هر حالت به تعداد حداقل دو بار انجام گردید. تکرارپذیری (r)، مقداری است که پیش‌بینی می‌شود با یک احتمال معین (مثلاً ۹۵٪)، قدرمطلق اختلاف بین دو نتیجه آزمون انفرادی حاصل از اندازه‌گیری روی یک نمونه یکسان (ثابت) با روش اندازه‌گیری یکسان در شرایط مشابه (مجری یکسان، دستگاه یکسان، آزمایشگاه یکسان و فاصله زمانی کوتاه



شکل ۵- اتصال سری و موازی دو برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک



شکل ۳- عکس و شماتیک تیرهای برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی با استفاده از ماده پیزوالکتریک EAPap با عرض‌های مختلف

نمونه تیر یکسردرگیر پیزوپلیمری ساخته شده با فیلم نازک EAPap، با سفت کردن جیگ^۱ روی بوبین^۲ شیکر^۳ الکترومغناطیسی Eliezer HEV-50 نصب شد. تیر پیزوالکتریک با ولتاژ ورودی ۱۰۰ میلی‌ولت تحریک و با سیگنال ژنراتور Agilent 33220A و تقویت‌کننده Eliezer EA157 در بازه فرکانسی مد نظر کنترل گردید. یک شتاب‌سنج برای مانیتور کردن جابه‌جایی ورودی و خروجی بکار گرفته شد. چیدمان تجهیزات آزمایشی، در شکل ۴ نشان داده شده است.

از یک پتانسیومتر به صورت سری در مدار با فیلم پیزوالکتریک، به عنوان مقاومت الکتریکی خارجی و برای اندازه‌گیری توان خروجی استفاده شد. از پیکوآمتر^۴ Keithley 6485 برای اندازه‌گیری جریان در مدار و از پالس آنالایزر Bruel & Kjaer 35360B-030، برای نشان دادن ولتاژ خروجی استفاده گردید. امپدانس فیلم EAPap با استفاده از متر LCR HP 4282A و به نسبت مقادیر مختلف فرکانس، اندازه‌گیری شد.

¹ Jig

² Bobbin

³ Shaker

⁴ Picoammeter

استفاده شده در آزمایش اندازه‌گیری شد. شکل ۶، تغییرات مقاومت را بر حسب فرکانس ارتعاشات اعمالی برای هر یک از نمونه‌ها نشان می‌دهد (از ۳۰ تا ۴۰ هرتز). نتایج نشان می‌دهند که مقاومت نمونه سلولزی تقریباً بصورت خطی با افزایش فرکانس اعمالی، کاهش می‌یابد.

همانطور که در بخش قبل بیان شد، با وجود تغییر عرض نمونه‌های مختلف، فرکانس تشدید اصلی آن‌ها یکسان است (از ۳۵/۲ تا ۳۵/۸ هرتز). مقاومت هر نمونه سلولزی در فرکانس‌های ۳۵/۰ هرتز، ۳۵/۵ هرتز و ۳۶/۰ هرتز، در جدول ۱ خلاصه شده است.

مقاومت هر نمونه پیزوالکتریک با سطح آن نمونه، نسبت عکس دارد. در این آزمایش، مقاومت هر نمونه سلولزی EAPap، رابطه عکس با عرض آن داشت، زیرا طول نمونه‌ها ثابت بود.

بر اساس نظریه تعیین مقاومت معادل اتصال سری و موازی نمونه‌های سلولزی EAPap، مقاومت دو نمونه ۲/۵ سانتی‌متری متصل به صورت سری و موازی در فرکانس تشدید ۳۶/۰ Hz به ترتیب، ۵۰۳/۹ kΩ و ۱۲۵/۷ kΩ بود. همچنین مقاومت اتصال سری و موازی سه نمونه ۱/۶۶ سانتی‌متری در فرکانس تشدید ۳۶/۰ Hz به ترتیب، ۱/۲۹ و ۱۴۲/۱ kΩ بود. مقاومت معادل اتصالات سری و موازی تیرهای برداشت‌کننده انرژی پیزوپلیمری با LCR متر اندازه‌گیری شد. نتایج تجربی و محاسباتی برای مقایسه در جدول ۲ آمده‌اند. ملاحظه می‌شود که نتایج تجربی و تئوری همخوانی خوبی با هم دارند و حداکثر اختلاف بین آن‌ها کمتر از ۳٪ است.

جدول ۱- خلاصه مقاومت هر نمونه سلولزی EAPap

بکاررفته در فرکانس تشدید

عرض (cm) و شماره نمونه (#)						
فرکانس تشدید	Δ	(#۱)	(#۲)	(#۱)	(#۲)	(#۳)
۳۵/۰ Hz	۱۲۸/۸	۲۷۰/۳	۲۳۵/۷	۲/۵	۱/۶۶	۱/۶۶
۳۵/۵ Hz	۱۲۷/۰	۲۶۶/۶	۲۳۹/۰	۲/۵	۱/۶۶	۱/۶۶
۳۶/۰ Hz	۱۲۵/۴	۲۶۳/۰	۲۴۰/۹	۲/۵	۱/۶۶	۱/۶۶

بین آزمون‌ها) از آن کوچکتر باشد. مقدار پارامتر r را می‌توان از رابطه تجربی محاسبه کرد.

لایه پیزوالکتریک پلیمری ایجاد شده، دارای چگالی 1.4 kg/m^3 بوده و مدول یانگ آن برابر 3 GPa است؛ همچنین ثابت پیزوالکتریک آن ($d_{31}=25 \text{ pC/N}$) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تشدید تیر برداشت‌کننده انرژی با لایه

پیزوپلیمری EAPap

با توجه به تئوری تشدید، مقدار ارتعاشات تیر یکسردرگیر EAPap در فرکانس طبیعی اصلی آن بیشینه است. در این لحظه برداشت‌کننده انرژی، بیشترین کارایی را از خود نشان خواهد داد. بنابر روابط تئوری و تجربی، فرکانس طبیعی اصلی تیر با صرف‌نظر از ضخامت ناچیز لایه پیزوالکتریک، طبق رابطه (۱) قابل محاسبه است [۵ و ۶]:

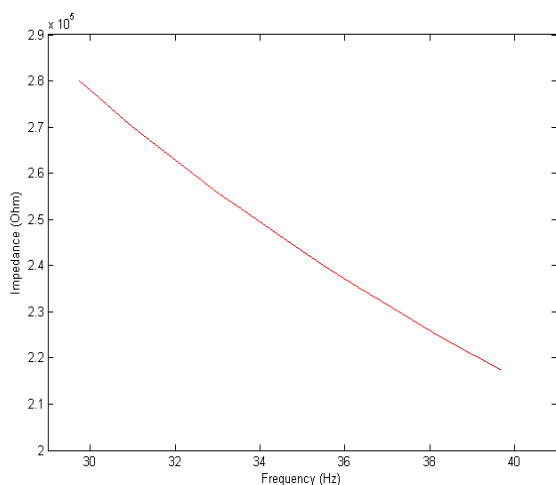
$$f_{rect} = 0.1639 \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

با جایگذاری ویژگی‌های زیرلایه آلومینیومی بکار رفته در آزمایش (مدول یانگ، $E=69 \text{ GPa}$ ، چگالی تیر، $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$ ، ضخامت تیر، $t=0.1 \text{ cm}$ ، طول تیر، $l=15 \text{ cm}$)، فرکانس طبیعی اصلی تیر، $۳۶/۲۹ \text{ Hz}$ پیش‌بینی می‌شود. نکته قابل توجه این است که فرکانس طبیعی اصلی تیر برای تیرهای مختلف مستطیلی با طول، ضخامت و ماده مشابه و عرض‌های متفاوت یکسان است؛ زیرا رابطه (۱) مستقل از عرض تیر است. در آزمایش مشخص شد که فرکانس تشدید اول تیر یکسردرگیر برداشت‌کننده انرژی EAPap با عرض‌های مختلف، از $۳۵/۲ \text{ Hz}$ تا $۳۵/۸ \text{ Hz}$ متغیر است. این اختلاف ناچیز (بین $۱/۳۵\%$ تا ۳%) طبیعی بوده، به دلیل خطاهای آزمایش و اثر عوامل خارجی (نظیر روش بستن تیر به فیکسچر و شیکر) است. نتایج آزمایش، مؤید رابطه (۱) بوده، لذا فرکانس تشدید اصلی تیر، مستقل از عرض آن است.

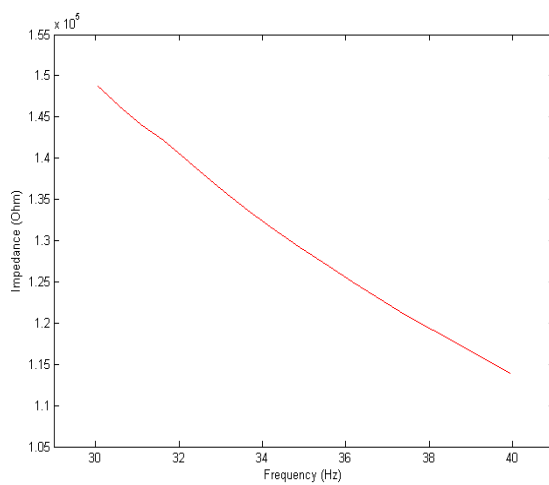
۳-۲- مقاومت برداشت‌کننده انرژی بر مبنای EAPap

سلولزی

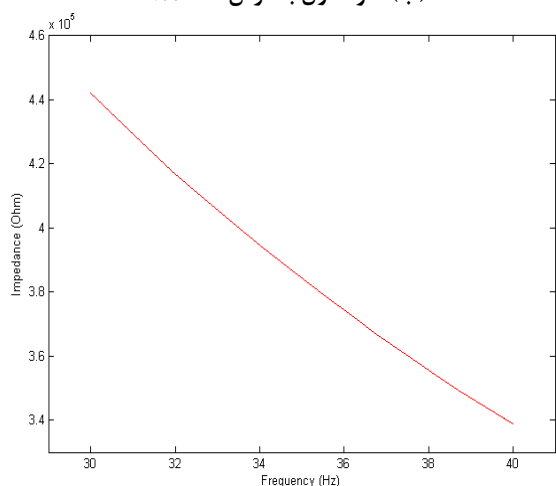
همانطور که در [۱۵] نشان داده شده است، مقدار مقاومت الکتریکی برداشت‌کننده انرژی با فرکانس نوسان سیستم، تغییر می‌کند. مقدار مقاومت هر یک از برداشت‌کننده‌های



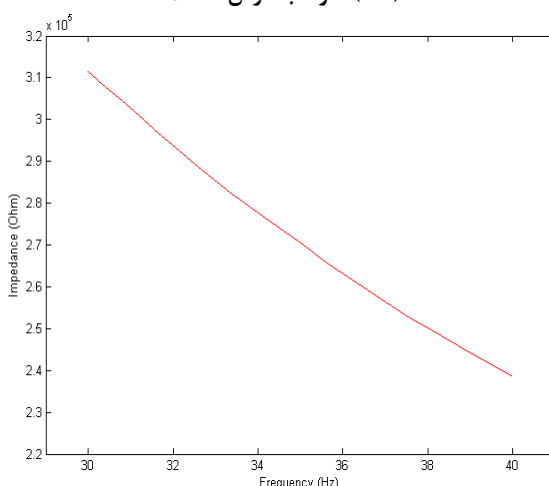
(ب) نمونه اول با عرض ۲/۵ cm



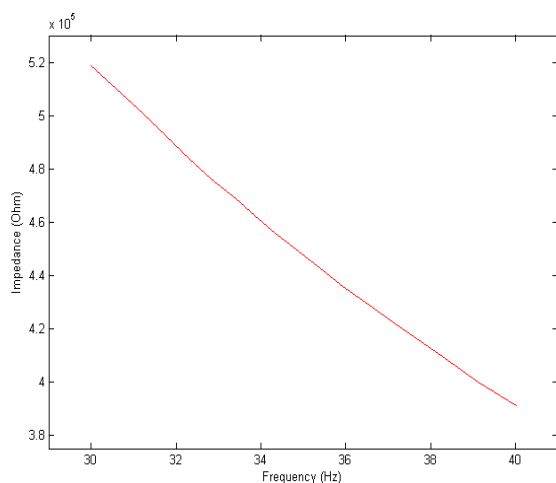
(الف) نمونه با عرض ۵ cm



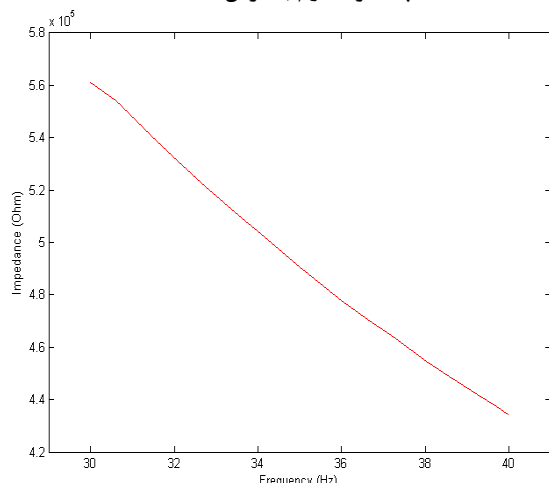
(ت) نمونه اول با عرض ۱/۶ cm



(پ) نمونه دوم با عرض ۲/۵ cm



(ج) نمونه سوم با عرض ۱/۶ cm



(ث) نمونه دوم با عرض ۱/۶ cm

شکل ۶- دامنه مقاومت برای هر نمونه سلولزی EAPap تحت فرکانس ارتعاشی ۳۰-۴۰ هرتز

جدول ۲- مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده مقاومت مؤثر اتصالات سری و موازی برای نمونه‌های مختلف سلولزی EAPap در فرکانس تشدید ۳۶/۰ Hz

۱/۶۶ سانتی‌متری (سه نمونه)		۲/۵ سانتی‌متری (دو نمونه)		۵ سانتی‌متری (یک نمونه)	EAPap نمونه‌های سلولزی
موازی	سری	موازی	سری		
۱۴۲/۱	۱۲۹۰	۱۲۵/۷	۵۰۳/۹	۱۲۵/۴	مقاومت مؤثر محاسبه شده (kΩ)
۱۴۵/۱	۱۳۲۰	۱۲۷/۳	۵۱۰/۶	۱۲۷/۹	مقاومت مؤثر اندازه‌گیری شده (kΩ)
۲/۰۷٪	۲/۲۷٪	۱/۲۶٪	۱/۳۱٪	۱/۹۵٪	درصد اختلاف

۳-۳- با عرض ۵ cm و مقاومت خارجی ۹۰ kΩ

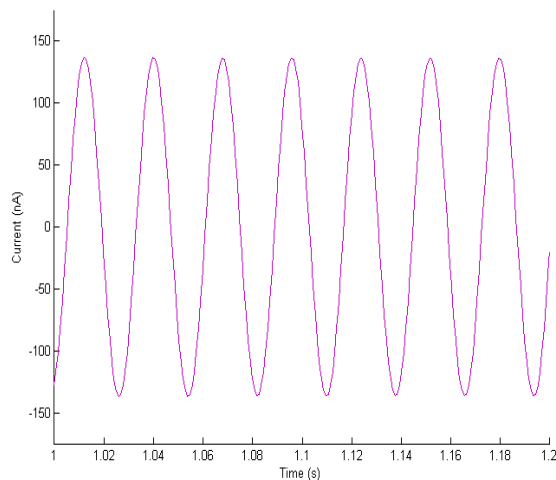
با اندازه‌گیری مجذور مربعات (rms) جریان، I_{rms} و مقاومت مدار، R_{load} ، توان متوسط خروجی از برداشت کننده انرژی، P_{mean} ، طبق رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود:

$$P_{mean} = I_{rms}^2 \times R_{load} = (0.354 \times I_{p-p})^2 \times R_{load} \quad (2)$$

توان خروجی متوسط برداشت‌کننده انرژی بر مبنای EAPap سلولزی با استفاده از تیر یکسردرگیر با عرض ۵ cm در دامنه‌ای از مقاومت‌های خارجی، مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات مشابهی در مورد دو نمونه مشابه با عرض ۲/۵ cm که بصورت سری و موازی به یکدیگر متصل شده‌اند و نیز سه نمونه مشابه با عرض ۱/۶۶ cm انجام گرفت که بصورت سری و موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. نتایج این آزمایشات در شکل ۸- نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۸- الف، توان متوسط خروجی بیشینه برای تیر برداشت‌کننده انرژی با عرض ۵ cm، به ازای مقاومت خارجی ۹۰ kΩ برابر ۰/۹۰۷ nW است. به طور مشابه با توجه به شکل ۸- ب و شکل ۸- پ، بیشینه توان متوسط خروجی برای دو تیر مشابه برداشت‌کننده انرژی با عرض ۲/۵ cm در حالات سری و موازی به ترتیب برابر، ۱/۲۸۳ nW و ۱/۰۰۱ nW است. همچنین با توجه به شکل ۸- ت تا شکل ۸- ج، بیشینه توان متوسط خروجی برای سه تیر مشابه برداشت‌کننده انرژی با عرض ۱/۶۶ cm در حالات سری و موازی به ترتیب برابر ۱/۴۶۸ nW و ۱/۴۲۵ nW است. نتایج خروجی برای توان متوسط بیشینه بطور خلاصه به همراه جریان پیک تا پیک، I_{p-p} ، ولتاژ پیک تا پیک، V_{p-p} و مقاومت خارجی مورد استفاده، R_L ، در جدول ۳ آمده‌اند.

۳-۳- توان خروجی برداشت‌کننده انرژی پیزوپلیمری بر مبنای EAPap

در هر مدار برداشت انرژی، همخوانی مقاومت الکتریکی با برداشت‌کننده انرژی، برای رسیدن به حداکثر توان حیاتی است [۱۳]. در آزمایش، یک مدار ساده متشکل از یک پتانسیومتر برای تغییر مقاومت الکتریکی مدار و رسیدن به مقاومت منبع (مقاومت فیلم EAPap سلولزی) ساخته شد. به دلیل اینکه تحریک بوجود آمده توسط شیکر یک تحریک سینوسی یکنواخت بود، یک جریان خروجی یکنواخت سینوسی توسط برداشت‌کننده انرژی ایجاد گردید. شکل ۷، جریان سینوسی خروجی از برداشت‌کننده با عرض ۵ cm و مقاومت خارجی یکسان با مقاومت برداشت‌کننده معادل ۹۰ kΩ را نشان می‌دهد. جریان پیک تا پیک اندازه‌گیری شده با پیکوآمپر در فرکانس تشدید ۳۵/۸ Hz، برابر ۲۸۴ nA است.



شکل ۷- جریان خروجی نمونه برداشت‌کننده انرژی سلولزی

عبارتند از: روش کاهش لگاریتمی و روش پهنای باند نیم-توان.

روش کاهش لگاریتمی، برای اندازه‌گیری میرایی در نمودار دامنه-زمان، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش تاریخچه مقادیر جابه‌جایی ارتعاشات آزاد سیستم به یک ضربه، اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. یک نمونه از کاهش آزاد دامنه در شکل ۹ نشان داده شده است. کاهش لگاریتمی مقدار نسبت لگاریتمی طبیعی دو پیک مجاور هم در ارتعاشات آزاد است.

برای تخمین نسبت میرایی با استفاده از نمودار دامنه-فرکانس، می‌توان از روش پهنای باند نیم-توان استفاده کرد. در این روش ابتدا مقادیر FRF سیستم‌بدست می‌آیند. به ازای هر فرکانس طبیعی، یک قله در مقادیر FRF بوجود می‌آید. ۳ دسیبل (db) پایین‌تر از مقدار قله دو نقطه مرتبط با نیم-توان وجود دارند (مطابق شکل ۱۰). هرچه میرایی بیشتر باشد، دامنه فرکانسی بین این دو نقطه بیشتر می‌شود. پهنای باند نیم-توان (BD)، به صورت نسبت فرکانس بین این دو نقطه، به فرکانس طبیعی در این نقطه تعریف می‌شود.

با بررسی ضریب میرایی هر یک از نمونه‌ها (جدول ۴) ملاحظه می‌شود که در شرایط یکسان تحریک، ضریب میرایی نمونه با عرض ۵ cm، ۴۲/۶٪ بیشتر از نمونه با عرض ۲/۵ cm است. بر این اساس جابه‌جایی سر تیر با عرض ۵ cm، کمتر از جابه‌جایی سر تیر با عرض ۲/۵ cm است. این اتفاق موجب کاهش چگالی توان تولیدی در تیر با عرض ۵ cm، نسبت به تیر با عرض ۲/۵ cm می‌شود.

در جدول ۳ جریان‌های برداشت شده در میان نمونه‌های مختلف با عرض‌های متفاوت و نحوه اتصال مختلف بیان شده است. با توجه به نتایج ذکر شده در جدول می‌توان فهمید که با افزایش تعداد اجزای نمونه‌ها، میزان جریان خروجی افزایش می‌یابد. از طرفی اتصال موازی نمونه‌ها، موجب بیشتر شدن جریان برداشت شده از برداشت‌کننده می‌شود.

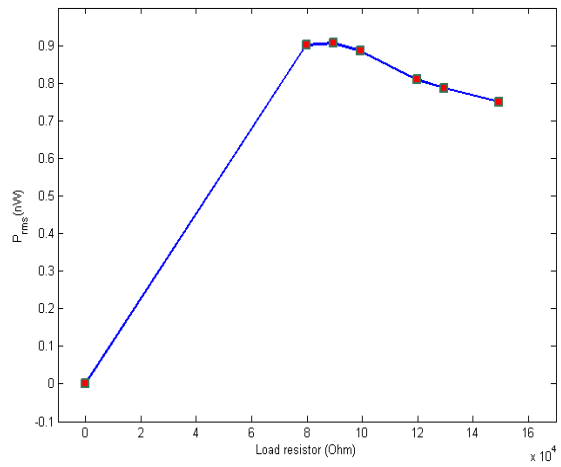
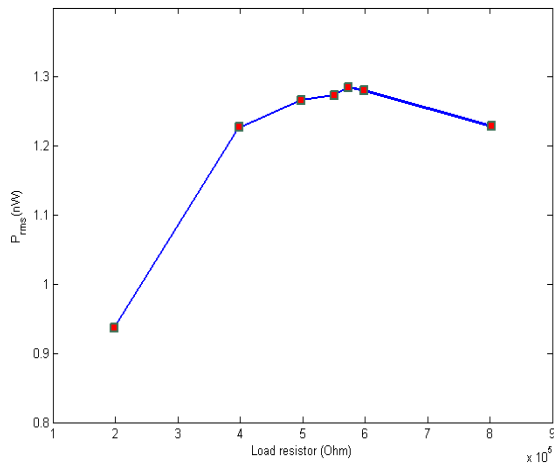
با توجه به جدول ۳، در مورد ولتاژ خروجی از برداشت‌کننده‌ها می‌توان گفت که با برش نمونه‌ها و تقسیم آن‌ها به تعداد بیشتری از نمونه‌ها، می‌توان ولتاژ خروجی را افزایش داد؛ همچنین ولتاژ خروجی در اتصال سری نمونه‌ها، به مراتب بیشتر از اتصال موازی آن‌ها است.

برای مقایسه توان خروجی با توجه به جدول ۳ می‌توان دریافت که هرچه تعداد برش‌ها بیشتر بوده و نوع اتصال نمونه‌ها سری باشد، توان خروجی از برداشت‌کننده بیشتر می‌شود. بر اساس تئوری، توان برداشت شده از برداشت‌کننده زمانی بیشینه خواهد بود که مقاومت بار خارجی و منبع تولید توان یکسان باشند. با این وجود مقداری اختلاف بین مقاومت مؤثر منبع اندازه‌گیری شده و مقاومت بار خارجی، R_{load} ، در توان بیشینه خروجی وجود دارد. این اختلافات در جدول ۵ آمده است. این اختلافات ممکن است، به دلیل تشخیص نادقیق فرکانس تشدید سازه مرتعش باشد که موجب عدم دقت در اندازه‌گیری مقاومت منبع می‌شود.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری میرایی سیستم وجود دارند. دو روش رایج و عمده مورد استفاده

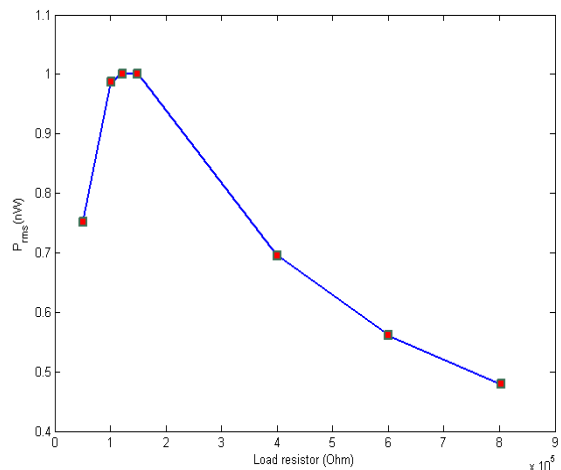
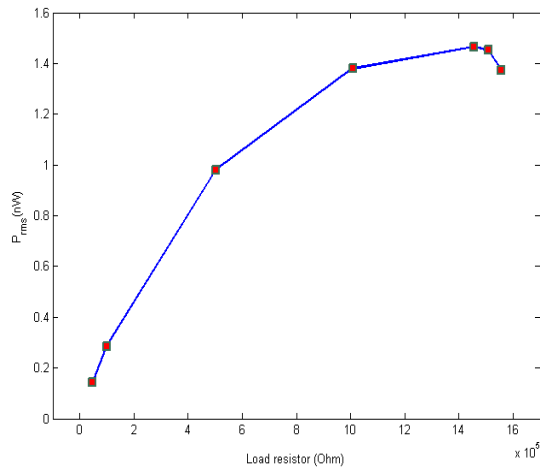
جدول ۳- توان خروجی بیشینه نمونه‌های مختلف سلولزی در آزمایش

نمونه با عرض ۵ cm	نمونه‌های با عرض ۲/۵ cm (سری)	نمونه‌های با عرض ۲/۵ cm (موازی)	نمونه‌های با عرض ۵ cm	نمونه‌های با عرض ۲/۵ cm (سری)	نمونه‌های با عرض ۲/۵ cm (موازی)
بیشینه P_{mean}	۰/۹۰۷۱ nW	۱/۲۸۳ nW	۱/۰۰۱ nW	۱/۴۶۸ nW	۱/۴۲۵ nW
R_{Load}	۹۰ kΩ	۶۰۰ kΩ	۱۵۰ kΩ	۱/۴۵ MΩ	۱۲۵ kΩ
I_{p-p}	۲۸۴ nA	۱۳۳/۶ nA	۲۳۱ nA	۹۰ nA	۳۰۲ nA
V_{p-p}	۲۵/۶ mV	۸۰/۲ mV	۳۴/۷ mV	۱۳۰/۵ mV	۳۷/۸ mV



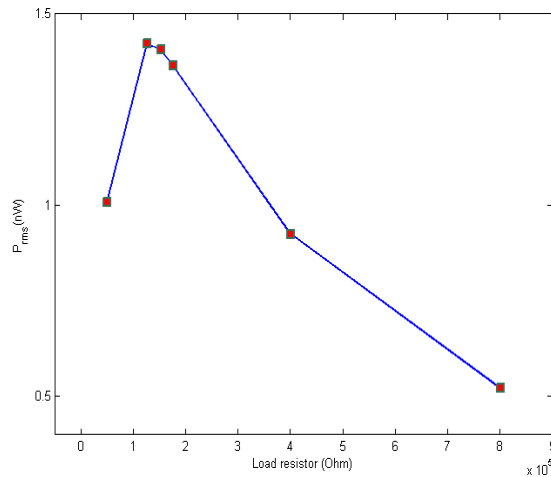
(ب) دو تیر متصل بصورت سری با عرض ۲/۵ cm

(الف) یک تیر با عرض ۵ cm



(ت) دو تیر متصل بصورت سری با عرض ۱/۶ cm

(پ) دو تیر متصل بصورت موازی با عرض ۲/۵ cm



(ث) دو تیر متصل بصورت موازی با عرض ۱/۶ cm

شکل ۸- توان متوسط خروجی از برداشت‌کننده‌های انرژی سلولزی با تیرهایی با عرض‌های مختلف ۵ cm، ۲/۵ cm (بصورت سری و موازی) و ۱/۶ cm (بصورت سری و موازی)

جدول ۴- ضریب میرایی نمونه‌های با عرض‌های مختلف

عرض تیر (cm)	۵	۲/۵	۱/۶۶
ضریب میرایی	۰/۰۰۶۸۷۶	۰/۰۰۴۸۲۲	۰/۰۰۴۴۲۴

جدول ۵- مقایسه مقاومت مؤثر اندازه‌گیری شده و مقاومت بار خارجی در توان خروجی بیشینه برای هر نمونه سلولزی

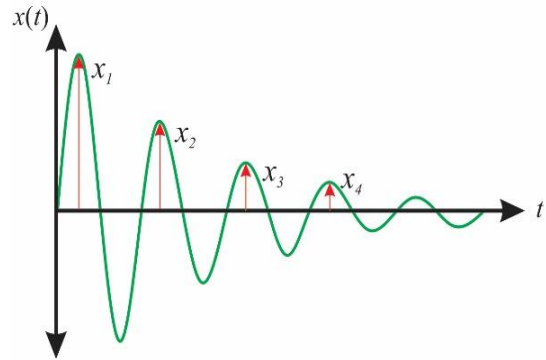
مشخصه نمونه	۵ cm	۲/۵ cm	۲/۵ cm	۱/۶۶ cm	۱/۶۶ cm
	(سری)	(موازی)	(سری)	(سری)	(موازی)
مقاومت مؤثر (kΩ)	۱۲۷/۹	۵۱۰/۶	۱۲۷/۳	۱۳۲۰	۱۴۵/۱
R_{load}	۹۰	۶۰۰	۱۵۰	۱۴۵۰	۱۲۵
درصد اختلاف	۲۹/۶	۱۷/۵	۱۷/۸	۹/۸	۱۳/۹

جدول ۶- مقایسه حداکثر توان خروجی در میان تیرهای برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی بر مبنای EAPap سلولزی با عرض‌های ۵ cm، ۲/۵ cm (بصورت سری و موازی) و ۱/۶ cm (بصورت سری و موازی)

نمونه‌های EAPap سلولزی	بیشینه P_{mean} (mW)	توان افزایش یافته در مقایسه با توان خروجی نمونه با عرض ۵ cm	درصد افزایش
عرض ۵ cm	۰/۹۰۷	-	-
عرض ۲/۵ cm (سری)	۱/۲۸۳	۰/۳۷۵۹	۴۱/۴
عرض ۲/۵ cm (موازی)	۱/۰۰۱	۰/۰۹۳۹	۱۰/۴
عرض ۱/۶۶ cm (سری)	۱/۴۶۸	۰/۵۶۰۹	۶۱/۸
عرض ۱/۶۶ cm (موازی)	۱/۴۲۵	۰/۵۱۷۹	۵۷/۱

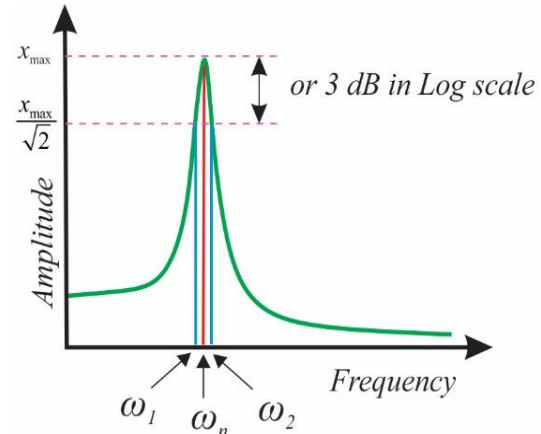
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر کاهش عرض تیر برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی و نیز نحوه اتصال انواع تیر بر کارکرد آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های EAPap سلولزی با دقت ساخته شده و به عنوان برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی، مورد استفاده قرار گرفتند. تحت تحریک یکسان انواع تیرها و شرایط یکسان در سازگاری مقاومت بار خارجی و منبع تولید انرژی (نمونه پیزوپلیمری)، ملاحظه گردید که با تقسیم یک تیر به چند تیر با عرض کمتر و اتصال سری یا موازی تیرها، جریان،



$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \delta = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{x_1}{x_{n+1}} \right| \quad \text{and} \quad \zeta = \frac{\varsigma}{\sqrt{4\pi^2 + \varsigma^2}}$$

شکل ۹- تخمین میرایی با استفاده از روش کاهش لگاریتمی در نمودار دامنه-زمان



$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_n} = 2\zeta = \frac{1}{Q}$$

شکل ۱۰- تخمین میرایی با استفاده از روش پهنای باند نیم-توان در نمودار دامنه-فرکانس

با توجه به جدول ۳ می‌توان درصد افزایش توان خروجی را در حالتی که مقدار عرض تیر کاهش می‌یابد، به نسبت تیر اولیه با عرض ۵ cm محاسبه و مقایسه نمود. این مقایسه در جدول ۵ انجام شده است. با توجه به جدول ۶ می‌توان دریافت که نمونه‌های با عرض ۲/۵ cm در حالت سری ۴۱/۴٪ و در حالت موازی ۱۰/۴٪ نسبت به نمونه اولیه با عرض ۵ cm توان بیشتری تولید می‌کنند. در مورد نمونه‌های با عرض ۱/۶۶ cm، درصد افزایش توان برداشت شده در حالات سری و موازی به ترتیب، ۶۱/۸٪ و ۵۷/۱٪ است.

- cantilevered piezoelectric energy harvester with a dynamic magnifier. in SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 79770Q-79770Q-9.
- [8] Hosseini R, Hamed M (2016) An investigation into resonant frequency of triangular V-shaped cantilever piezoelectric vibration energy harvester. *J Solid Mech* 7(3): 560-567.
- [9] Hosseini R, Hamed M (2016) Resonant frequency of bimorph triangular V-shaped piezoelectric cantilever energy harvester. *Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering* 6: 65-73.
- [10] Fukada E (1955) Piezoelectricity of wood. *Journal of the Physical Society of Japan* 10: 149-154.
- [11] Kim J, Wang N, Chen Y, Yun GY (2007) An electro-active paper actuator made with lithium chloride/cellulose films: effects of glycerol content and film thickness. *Smart Mater Struct* 16: 1564.
- [12] Kim J (2009) Improvement of Piezoelectricity in piezoelectric paper made with cellulose. DTIC Document.
- [13] Dayou J, Liew WYH, Chow MS (2012) Increasing the bandwidth of the width-split piezoelectric energy harvester. *Microelectron J* 43: 484-491.
- [14] Hosseini R, Hamed M, Im J, Kim J, Dayou J (2017) Analytical and experimental investigation of partially covered piezoelectric cantilever energy harvester. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 18(3).
- [15] Queirós R, Girão PS, Serra AC (2005) Single-mode piezoelectric ultrasonic transducer equivalent circuit parameter calculations and optimization using experimental data. IMEKO TC4 International conference.
- ولتاژ و در نتیجه توان خروجی از تیرها افزایش می‌یابد. در واقع به دلیل اینکه تیرهای با عرض کمتر، دارای میرایی کمتری بوده، تحت تحریک یکسان، دامنه نوسان آن‌ها بیشتر است؛ بنابراین انرژی برداشت شده از آن‌ها نیز بیشتر می‌شود. اتصال موازی تیرها، موجب ایجاد بیشترین جریان خروجی و اتصال سری آن‌ها، موجب ایجاد بیشترین ولتاژ و توان خروجی می‌شود.

۵- مراجع

- [۱] حسینی ر، حامدی م (۱۳۹۲) مهارکننده‌های انرژی مکانیکی. *علمی ترویجی مهندسی مکانیک* ۳۰-۲۵: ۲۲(۹۲).
- [2] Arms S, Townsend C, Churchill D, Galbreath J, Corneau B, Ketcham R (2009) Energy harvesting, wireless, structural health monitoring and reporting system. in MATERIALS FORUM.
- [3] Erturk A, Inman DJ (2011) Piezoelectric energy harvesting. John Wiley & Sons.
- [4] Hosseini R, Hamed M (2015) Improvements in energy harvesting capabilities by using different shapes of piezoelectric bimorphs. *J Micromech Microengineering* 25(12).
- [5] Ou Q, Chen X, Gutschmidt S, Wood A, Leigh N (2010) A two-mass cantilever beam model for vibration energy harvesting applications. in Automation Science and Engineering (CASE), 2010 IEEE Conference on, 301-306.
- [6] Hosseini R, Hamed M (2016) An investigation into resonant frequency of trapezoidal V-shaped cantilever piezoelectric energy harvester. *Microsyst Technol* 22: 1127-1134.
- [7] Arafa M, Akl W, Aladwani A, Aldrahem O, Baz A (2011) Experimental implementation of a