

بررسی بازدهی برداشت انرژی ارتعاشی تیر پیزوالکتریک با استفاده از روش اجزای محدود

احمد مامندی*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران، am_2001h@yahoo.com

یوسف جعفری

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران، yonaz2001@gmail.com

چکیده

در این مقاله، طراحی و مدل‌سازی عددی برداشت انرژی توسط تیر یکسرگیردار پیزوالکتریک با استفاده از روش اجزای محدود به کمک نرم‌افزار Multiphysics Comsol انجام شده است. با مدل‌سازی تیر برداشت کننده انرژی و اعمال شرایط مرزی تکیه‌گاه، خواص ماده، مش‌بندی تیر و اعمال تحریک هارمونیک به پایه گیردار، جایجایی تیر به جریان و ولتاژ وابسته به آن تبدیل می‌شود. در مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های انجام گرفته برای بلوک تیر از ماده آلومینیوم و برای بلوک پیزوالکتریک از ماده سلولوزی EAPap استفاده شده است. شکل مد ارتعاشات و فرکانس‌های طبیعی برای تیر پیزوالکتریک به دست آمده و تاثیر چیدمان لایه‌ها در مدار معادل در بهره‌گیری از برداشت انرژی الکتریکی بررسی شده است. همچنین، صحت‌سنجی و مقایسه نتایج به دست آمده از روش المان محدود با نتایج روش تجربی انجام شده است. نشان داده شده است که در فرکانس تحریک معادل با فرکانس طبیعی تیر با تقسیم کردن عرض تیر به دو و سه نوار با چیدمان به صورت موازی و یا سری در مدار الکتریکی معادل، ظرفیت برداشت بیشینه انرژی الکتریکی نسبت به مدل تیر تک نواره افزایش می‌یابد. **واژه‌های کلیدی:** تیر یکسرگیردار پیزوالکتریک، برداشت انرژی، نرم افزار Comsol، مدار الکتریکی مدل‌سازی شده.

An investigation on vibration energy harvesting efficiency of a piezoelectric beam using finite element method

A. Mamandi
Y. Jafari

Department of Mechanical Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran
Department of Mechanical Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran

Abstract

In this paper, design and numerical simulation of an energy harvester piezoelectric cantilever beam has been investigated using Comsol multiphysics finite element software. Modelling the piezoelectric cantilever beam and applying end support boundary condition, material property, meshing the beam and harmonic excitation of the clamped support, deflection of the beam yields to the electrical current and voltage, respectively. In the modelling and simulations for the beam and piezoelectric blocks, the aluminum and EAPap materials have been considered, respectively. The mode shapes and natural frequencies of vibration for the piezoelectric beam have been extracted and the effect of different type of piezoelectric block arrangement to obtain electrical energy harvesting has been investigated. Also, the outcome FE results have been validated and compared with experimental data reported in the literature. It is shown that in excitation frequency condition equals to the natural frequency of the beam when the beam width divided in either two or three strips with serie/parallel type of arrangement in an equivalent electrical circuit, the energy harvesting capacity of the beam increases in comparison to the beam with the one strip.

Keywords: Piezoelectric cantilever beam, Energy harvesting, Comsol multiphysics software, Modeled electrical circuit.

۱- مقدمه

برداشت و مهار انرژی تولیدی توسط آن، توان الکتریکی تجهیزات را ایجاد نماید. انرژی تولیدی از ارتعاشات ماشین‌آلات صنعتی، فعالیت بشر، وسایل نقلیه، سازه‌ها، نیروهای هیدرودینامیکی در سیستم‌های انتقال سیال و منابع محیطی می‌توانند روش‌های مختلفی را برای برداشت انرژی فراهم کنند [۶-۱]. ارتعاشات ایجاد شده در وسایل و تجهیزات مبتنی بر پدیده‌های الکترواستاتیک، الکترومغناطیس و پیزوالکتریک، روش‌های برداشت انرژی در مقیاس‌های ماکرو، میکرو و نانو از ارتعاشات موجود در محیط هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷-۱۰]. در برداشت انرژی از روش الکترواستاتیک ابتدا صفحات به وسیله یک منبع ولتاژ باردار نگه داشته می‌شوند و زمانی که فاصله بین دو صفحه با ارتعاشات محیطی تغییر کند جایجایی سبب افزایش پتانسیل الکتریکی بین دو صفحه می‌شود. از آنجایی که برداشت‌کننده‌های انرژی الکترواستاتیک نیاز به یک ولتاژ اولیه دارند، ممکن است همیشه در دسترس نباشند. از طرفی مقاومت و ولتاژ خروجی این نوع برداشت‌کننده‌ها، بالا بوده و جریان نسبتاً کمی تولید می‌کنند که ممکن است برای برخی کاربردهای خاص مناسب نباشد و

در بسیاری از موارد نیاز به منابع انرژی الکتریسیته مانند باتری‌ها شرایط به گونه‌ای است که این منابع را نمی‌توان به طور مستقیم بکار برد و یا اینکه استفاده از آنها سخت بوده و یا فرآیند پیچیده‌ای را به دنبال دارد. گاهی استفاده از منابع انرژی هزینه‌بر بوده و محدودیت‌های دیگری از جمله دمای کارکرد را دارند. برای مثال محدودیت دمایی در آگزوز خودروها و محدودیت محیطی در باتری قلب برای بیماران قلبی و ریب‌ها جهت پایش مسیر حرکت حیوانات و همچنین در مواردی که اجزای متحرک و دوار وجود داشته باشند و سیم‌کشی آنها سخت باشد موقعیت استفاده از این باتری‌ها فراهم نیست. از سوی دیگر افزایش چشم‌گیر حجم مصرف انرژی در حسگرها و همچنین طول عمر محدود منابع انرژی الکتریکی و اندازه بزرگ آنها، آلودگی محیط زیست و هزینه نگهداری بالا منجر به تمرکز تحقیقات بر روی منابع تغذیه‌ای به عنوان جایگزین باتری‌ها شده است. یکی از این منابع تأمین توان می‌تواند محیط (سازه) مرتعشی باشد که با

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: am_2001h@yahoo.com

برای استفاده از آنها باید ابتدا یک تقویت سیگنال انجام گیرد که موجب پیچیده‌تر شدن فرایند ساخت نیز می‌گردد. به همین دلایل به کاربردن این برداشت‌کننده‌های انرژی می‌تواند مقرون به صرفه نباشد. در مبدل‌های الکترومغناطیس، حرکت نسبی یک جرم مغناطیسی نظیر آهنربا نسبت به یک سیم‌پیچ موجب تغییر شار مغناطیسی و ایجاد یک ولتاژ متناوب در طول سیم‌پیچ می‌گردد. این حرکت نسبی می‌تواند با ثابت نگه داشتن سیم‌پیچ و حرکت آهنربا و یا بالعکس ایجاد گردد. چون معمولاً ولتاژ حاصل از مهارکننده‌های الکترومغناطیسی کم می‌باشد، یک مبدل افزایش‌دهنده ولتاژ نیز در کنار دستگاه نیاز 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 مکانیزم‌هایی که در مقیاس‌های ریز می‌توانند کار کنند با استفاده از MEMS^۱ یکپارچه سازی می‌شوند و بسیار پرهزینه هستند. با در نظر گرفتن معادلات اساسی حاکم بر رفتار دینامیکی در مکانیزم‌های مبتنی بر الکترومغناطیس، انرژی الکتریکی تولید شده، با نسبتی از توان نصف از حجم ماده کاری الکترومغناطیس متناسب است در حالی که در مکانیزم برداشت انرژی مبتنی بر پیزوالکتریک، انرژی الکتریکی تولید شده با توان ۰/۷۵ از حجم ماده پیزوالکتریک متناسب است. بنابراین در مقیاس‌های کوچک، مکانیزم پیزوالکتریک در مقایسه با الکترومغناطیس مناسب‌تر می‌باشد [۸]. استفاده از مواد پیزوالکتریک یک روش ساده جهت تبدیل انرژی از ارتعاشات مکانیکی به جریان الکتریکی می‌باشد که به این روند اثر مستقیم پیزوالکتریک می‌گویند. اما در صورت اعمال جریان الکتروسیسته، 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 هستند. اگر این مواد تحت کرنش قرار بگیرند دو قطبی‌هایی در آنها پدید می‌آید که این دو قطبی‌ها در سرامیک‌ها به صورت کریستال و در پلیمرها به صورت 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 برای تبدیل ارتعاشات مکانیکی به انرژی الکتریکی در دهه گذشته، روش برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک رشد قابل توجهی را به همراه داشته‌است. در برخی سازه‌ها از قطعاتی مانند حسگر دما یا رطوبت یا کرنش برای نظارت استفاده می‌شود و شارژ باتری آنها به دلایل فنی و عملیاتی، پرهزینه و حتی گاهی غیرممکن می‌باشد. با توجه به چگالی توان خروجی بالای پیزوالکتریک‌ها، می‌توان آنها را به عنوان جایگزینی مناسب برای باتری‌های مرسوم بکار برد [۱۲]. 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 آنجایی که سلولز ماده‌ای زیست تخریب‌پذیر و تجدید پذیر است، مشتقات آن کاربردهای بسیاری از جمله دارو، پارچه، مواد غذایی، برداشت انرژی و غیره را دارد. ماده پیزوالکتریک مهم مورد استفاده در

برداشت انرژی، EAPap^۲ می‌باشد. این ماده سلولزی یکی از مواد پیزوالکتریکی است که در سال ۱۹۵۰ شناخته شد و در سال ۲۰۰۶ به عنوان یک ماده هوشمند معرفی گردید. نتایج به‌دست آمده از تحلیل برداشت انرژی توسط تیر پیزوالکتریک که سر گیردار آن با نیروی هارمونیک تحریک می‌گردد نشان‌دهنده آن است که با کاهش عرض تیر پیزوالکتریک مرتعش، ظرفیت انرژی قابل برداشت از آن افزایش می‌یابد. زیرا با کاهش عرض تیر میرایی آن کاهش یافته و در نتیجه توان خروجی افزایش می‌یابد در حالی که مقدار فرکانس طبیعی تغییر نمی‌کند [۱۷-۱۳].

در این تحقیق، مدل‌سازی المان محدود برداشت انرژی تیر یکسرگیردار پیزوالکتریک از ماده EAPap تحت تحریک هارمونیک پایه گیردار آن به کمک نرم‌افزار Comsol انجام شده‌است. در پژوهش کنونی اثر کاهش عرض بر توان خروجی تیر مهارکننده انرژی بر مبنای اثر پیزوالکتریسته بررسی شده‌است. با مدل‌سازی تیر برداشت‌کننده انرژی، اعمال شرایط مرزی تکیه‌گاه، خواص مواد مختلف در بلوک‌های سازنده تیر و مش‌بندی تیر، مقدار جریان و ولتاژ خروجی ناشی از تحریک هارمونیک پایه تیر به جریان و ولتاژ وابسته به آن تبدیل می‌شود. در مدل‌سازی مساله، بلوک تیر از ماده آلومینیوم و بلوک پیزوالکتریک تیر از ماده جدید سلولوزی به نام EAPap می‌باشند. سپس، در مدل‌سازی المان محدود برای بررسی تاثیر تقسیم نمودن عرض بلوک پیزوالکتریک تیر واحد (تک نواره) به دو و یا سه نوار عرضی مستطیل شکل (به عنوان شکل هندسی مبنای منظم) که با یکدیگر به صورت چیدمان سری و یا موازی در مدار معادل الکتریکی معادل قرار می‌گیرند، میزان برداشت انرژی الکتریکی (جریان و ولتاژ الکتریکی) بررسی شده‌است. در ادامه تحلیل عددی، فرکانس‌های طبیعی و شکل مد ارتعاشات تیر پیزوالکتریک نیز به‌دست می‌آیند. همچنین، نتایج به‌دست آمده جهت تعیین صحت روش مدل‌سازی در نرم افزار المان محدود با نتایج گزارش شده تجربی در منابع موجود مقایسه می‌گردند. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود نشان دهنده آن است که با تقسیم نمودن عرض لایه پیزوالکتریک تیر به دو و سه نوار مستطیل شکل به صورت موازی و یا سری در مدار الکتریکی معادل، ظرفیت برداشت بیشینه انرژی الکتریکی تیر نسبت به مدل تیر تک نواره در فرکانس تحریک معادل با فرکانس طبیعی آن افزایش می‌یابد.

۲- مدل حاکم بر رفتار ماده پیزوالکتریک

۲-۱- مدل ریاضی خاصیت پیزوالکتریک

پارامترهای مربوط به اثر الکترومکانیکی مواد پیزوالکتریک شامل ضریب شارژ k ، ضریب ولتاژ پیزوالکتریک g_{ij} و ضریب کوپلینگ d_{ij} پیزوالکتریک می‌باشند. ضرایب ولتاژ پیزوالکتریک و ضریب کوپلینگ پیزوالکتریک به ترتیب نشان دهنده میدان الکتریکی تولید شده ناشی از تنش مکانیکی و تناسب بین تنش - جابجایی با جریان الکتریکی بوده و نشان دهنده انرژی ناشی از اثر پیزوالکتریک می‌باشد. به عنوان نمونه از

^۲ Electro Active Paper

^۱ Micro Electro Mechanical Systems

آن، ولتاژی هارمونیک تولید می‌کند. در روش تجربی در آزمایش‌های صورت گرفته در هر مرحله برای تیر پیزوالکتریک یک مقاومت خارجی وجود دارد [۱۶]. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی عددی تیر برداشت انرژی که دارای مقاومت خارجی نیز می‌باشد باید یک مدار معادل در مدل‌سازی آن در نظر گرفت. در نرم‌افزار Comsol با استفاده از نتایج تحلیل تنش و کرنش (جابجایی) تیر تحت ارتعاش، کرنش اعمال شده به لایه پیزوالکتریک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد. سپس، انرژی الکتریکی هارمونیک تولید شده در مدار وارد می‌شود. برای مدل‌سازی و تحلیل تیر یکسره‌گردار با لایه پیزوالکتریک در نرم‌افزار Comsol Multiphysics، تیر یکسره‌گردار تحت تحریک هارمونیک در انتهای گیردار آن در فیزیک solid mechanics تحلیل شده و خروجی کرنش به دست آمده در فیزیک electrostatics که مربوط به لایه نازک پیزوالکتریک است، به دست می‌آید تا محاسبات لازم برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی صورت گیرد. در پایان، در بخش electrical circuit، تحلیل مدار با مقاومت خارجی و منبع تغذیه متناوب (لایه پیزوالکتریک با تحریک هارمونیک) انجام می‌گردد.

۲-۱- طراحی هندسی سه نوع مدل تیر برداشت کننده انرژی

در این پژوهش، برای بررسی و تحلیل، سه مدل تیر برداشت کننده انرژی در نظر گرفته شده است. هر یک از این سه مدل از سه بلوک شامل بلوک اول مربوط به تیر آلومینیومی، بلوک دوم در برگزیده لایه پیزوالکتریک و بلوک سوم که بخش اتصال دهنده بین تیر و تکان‌دهنده است تشکیل می‌یابد. این سه مدل شامل یک تیر واحد (تک نواره)، تیر دو تکه (دو نواره) و تیر سه تکه (سه نواره) برداشت کننده انرژی می‌باشند. ابعاد این سه مدل و بلوک‌های آنها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که بلوک مربوط به تیر پیزوالکتریک در دو نوع پیکربندی دو نواره و سه نواره جهت بررسی و مقایسه میزان برداشت انرژی وابسته به نحوه چیدمانشان به صورت‌های سری و موازی با یکدیگر قرار می‌گیرند. در شکل ۱، شکل ۲ و شکل ۳، بلوک اول شامل تیر آلومینیومی، بلوک دوم شامل لایه پیزوالکتریک و بلوک سوم که برای اتصال بین تیر و تکان‌دهنده قرار گرفته به ترتیب برای سه نوع تیر تک نواره، دو نواره و سه نواره نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ابعاد بلوک سوم برای تیر واحد و در حالت تیرهای سری و موازی، یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین، از آنجایی که در انتهای گیردار تیر بیشترین کرنش ایجاد می‌شود، در ساخت عملی قطعه برای این که به لایه پیزوالکتریک صدمه‌ای وارد نگردد، مکان این لایه با فاصله نسبتاً مناسبی از بلوک سوم در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. در شکل ۱، شکل ۲ و شکل ۳، این ناحیه بین بلوک دوم و سوم نشان داده شده است. فاصله در نظر گرفته شده در مدل‌سازی برای بلوک سوم در هر سه نوع تیر برابر با ۱۰ mm می‌باشد.

مواد پیزوالکتریک که دارای ضریب g_{ij} بزرگی هستند برای کاربرد در حسگرها برای کنترل ارتعاشات استفاده می‌شود. ارتباط بین ضریب d_{ij} و g_{ij} به صورت زیر می‌باشد [۱۵]

$$d_{mi} = \varepsilon_{mm}^T g_{mj}, \quad m, n = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (۱)$$

به طور کلی خاصیت پیزوالکتریک مواد در ساده ترین حالت با دو معادله زیر بیان می‌شود

$$\{S\} = [S]^E \{T\} + [d]^T \{E\}, \quad (۲)$$

$$\{D\} = [d]\{T\} + [\varepsilon]^T \{E\}, \quad (۳)$$

که در روابط بالا، $\{S\}$ بردار مولفه‌های کرنش، $[S]^E$ ماتریس نرمی، $\{T\}$ بردار مولفه‌های تنش، $[d]$ ماتریس کوپلینگ پیزوالکتریک، $\{E\}$ بردار شدت میدان الکتریکی، $\{D\}$ بردار جابجایی الکتریکی و $[\varepsilon]$ ماتریس نفوذپذیری الکتریکی ماده می‌باشد. بر اساس رابطه (۲)، وابسته به اینکه کدام یک از درایه‌های ماتریس کوپلینگ غیر صفر باشد، با تغییرات شدت میدان الکتریکی کرنش‌های متفاوتی در ماده ایجاد می‌گردد. برای تیر پیزوالکتریک دو معادله پایه‌ای زیر برای توصیف اثر پیزوالکتریک تعریف می‌شوند

$$S_j = s_{ij}^E \sigma_j + d_{ij} E_i \quad \text{or} \quad T_j = c_{ij}^E S_j - e_{ij} E_i, \quad (۴)$$

$$D_i = d_{ij} \sigma_j + \varepsilon_{ii}^T E_i \quad \text{or} \quad D_i = e_{ij} S_j + \varepsilon_{ii}^S E_i,$$

در این دو معادله، D_i جابجایی الکتریکی، S_j کرنش مکانیکی، σ_j تنش مکانیکی، E_i میدان الکتریکی، c_{ij} سفتی کششی و s_{ij} ضریب انطباق الاستیک و ε_{ij} ضریب پیزوالکتریک می‌باشد [۱۵]. معادله حاکم بر ارتعاشات تیر یکسره‌گردار با یک لایه پیزوالکتریک عبارت است از

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + b \frac{dz(t)}{dt} + kz(t) = -m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = -ma(t), \quad (۵)$$

که $a(t)$ شتاب برحسب زمان می‌باشد. با استفاده از تبدیل لاپلاس رابطه (۵) به شکل رابطه زیر تبدیل می‌شود

$$ms^2 z(s) + bsz(s) + kz(s) = -ma(s), \quad (۶)$$

که در آن، $a(s)$ تبدیل لاپلاس کمیت شتاب $a(t)$ می‌باشد. تابع برداشت انرژی به صورت زیر بیان می‌گردد

$$\frac{z(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} = \frac{1}{s^2 + \omega_r Qs + \omega^2}, \quad (۷)$$

در حالتی که مقدار میرایی مکانیکی با میرایی الکتریکی برابر باشد بیشینه توان $P_{\varepsilon, \max}$ از رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$P_{\varepsilon, \max}(\omega_n) = \frac{mA^2}{16\omega_n \zeta_m} = \frac{mY^2 \omega_n^3}{16\zeta_m}, \quad (۸)$$

که در روابط بالا، m جرم تیر، A بیشینه دامنه شتاب، Y بیشینه دامنه جابجایی، ζ_m ضریب میرایی مکانیکی سازه و ω_n فرکانس طبیعی تیر می‌باشد.

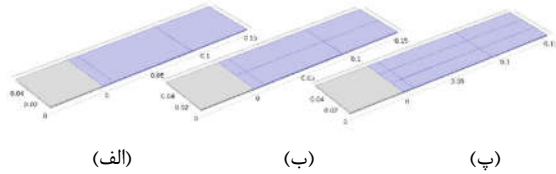
۲-۲- شبیه‌سازی المان محدود تیر برداشت کننده انرژی

در این بخش، به طراحی سه پیکربندی (مدل) در نظر گرفته شده برای تیر برداشت کننده انرژی، ایجاد مدار الکتریکی معادل با آنها، چگونگی ایجاد مدل ریاضی مساله در نرم‌افزار Comsol Multiphysics و تنظیمات آن شامل اعمال خواص مکانیکی مواد و شرایط مرزی، اعمال تحریک هارمونیک پایه گیردار تیر، المان بندی و تنظیمات حل در نرم‌افزار پرداخته می‌شود. تیر با لایه نازک پیزوالکتریک EAPap، تحت تحریک هارمونیک پایه و در نتیجه با ایجاد جابجایی در تمامی نقاط

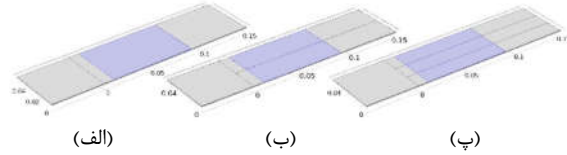
^۱ Shaker

جدول ۱- مدل‌ها و ابعاد بلوک‌های تیرهای برداشت کننده انرژی

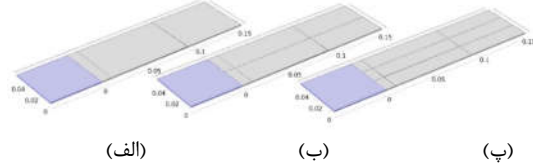
نام مدل	ابعاد بلوک (ضخامت×عرض×طول) بر حسب mm	
	بلوک اول (تیر)	بلوک دوم (پیزوالکتریک) (اتصال بین تیر و تکان دهنده)
مدل اول (تیر تک نواره)	۱۵۰×۵۰×۱	۱۵۰×۵۰×۰/۱۵
مدل دوم (تیر دونواره)	۱۵۰×۲۵×۱	۱۵۰×۲۵×۰/۱۵
مدل سوم (تیر سه نواره)	۱۵۰×۱۶/۵×۱	۱۵۰×۱۶/۵×۰/۱۵



شکل ۱- بلوک تیر آلومینیومی، (الف) تیر تک نواره، (ب) تیر دو نواره و (پ) تیر سه نواره



شکل ۲- بلوک پیزوالکتریک، (الف) تیر تک نواره، (ب) تیر دو نواره و (پ) تیر سه نواره



شکل ۳- بلوک اتصال تیر به تکان دهنده، (الف) تیر تک نواره، (ب) تیر دو نواره و (پ) تیر سه نواره

۲-۲-۲- خواص مکانیکی تیر برداشت کننده انرژی

در شبیه‌سازی‌ها، بلوک‌های تیر برداشت کننده انرژی و نگهدارنده آن از ماده Aluminium می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده‌است. در جدول ۳ خواص ماده پیزوالکتریک EAPap که یک ماده سلولوزی مشابه خواص پیزوپلیمرها می‌باشد ارائه شده‌است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی و فیزیکی بلوک آلومینیومی تیر برداشت کننده انرژی ۱۱۶

مقدار	نماد (واحد)	خاصیت مکانیکی/فیزیکی
۲۷۰۰	ρ (kg/m ³)	چگالی
۶۹	E (GPa)	مدول الاستیسیته
۰/۲	ν	نسبت پواسون
۱	μ_r	نفوذپذیری نسبی الکتریکی
۹۰۰	c_p (J/kgK)	گرمای ویژه در فشار ثابت

جدول ۳- مشخصات مکانیکی و فیزیکی لایه نازک پیزوالکتریک

EAPap تیر برداشت کننده انرژی [۱۶]

مقدار	نماد (واحد)	خاصیت فیزیکی/مکانیکی
۱۴۰۰	ρ (kg/m ³)	چگالی
۳	E (GPa)	مدول الاستیسیته
$0.333e^{-9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	SE (m ² /N)	ماتریس نرمی مکانیکی
$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 25 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$d^T E$ (PC/N)	ماتریس کوپلینگ
۲۵	d_{r1} (PC/N)	ضریب پیزوالکتریک
۱۵	$\epsilon_r T$	نشستی نسبی الکتریکی

۲-۲-۲- فیزیک Solid mechanic نرم افزار

برای مدل‌سازی و تحلیل عددی تیر پیزوالکتریک که انتهای گیردار (پایه) آن توسط تکان دهنده تحت تحریک (جابجایی) هارمونیک قرار دارد از فیزیک Solid mechanic با زیرشاخه‌های linear elastic material free و initial values و تنظیمات مربوط به ماده انتخاب شده استفاده می‌گردد. بخش‌هایی از تیر که در این فیزیک مورد تحلیل قرار می‌گیرد شامل بلوک تیر و اتصال تکان دهنده می‌باشد که از ماده آلومینیوم می‌باشند.

۲-۲-۴- ماده پیزوالکتریک

هدف از کاربرد مواد پیزوالکتریک در این تحقیق، بررسی میزان برداشت انرژی می‌باشد. در مدل‌سازی، ناحیه مربوط به پیزوالکتریک (که همان بلوک دوم می‌باشد) در نرم‌افزار به عنوان piezoelectric material معرفی می‌گردد. در مدل‌سازی نیروی حجمی وزن تیر ناشی از شتاب گرانش زمین که به تیر و پیزوالکتریک و نگهدارنده تکان دهنده وارد می‌شود، از گزینه body load (رابطه ۸) بهره گرفته می‌شود. برای اعمال شرایط تکیه‌گاه گیردار متحرک (پایه متحرک) برای شبیه‌سازی اتصال بین تکان دهنده و تیر با شرط شتاب هارمونیک از گزینه prescribed displacement و تعریف تابع هارمونیک سینوسی زیر در نرم‌افزار بهره گرفته شده‌است [۱۶]

$$y = 0.0003 \times \sin(229t) \quad ۹$$

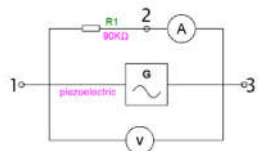
لازم به ذکر است که در رابطه (۹)، جهت مقایسه نتایج تحلیلی المان محدود با نتایج موجود از آزمایش تجربی [۱۶] در مدل‌سازی ریاضی تحریک پایه، دامنه نوسانات تکان دهنده برابر ۰/۰۰۰۳ m در نظر گرفته شده‌است. همچنین، در رابطه (۹)، فرکانس تحریک ω بر حسب Hz و مقدار آن برابر با ۲۲۹ rad/s می‌باشد. این فرکانس، همان فرکانس تشدید تیر می‌باشد.

۲-۲-۵- تحلیل الکترواستاتیک

این فیزیک مربوط به پیزوالکتریک بوده به گونه‌ای که تنش و کرنش به دست آمده از فیزیک Solid mechanic به این فیزیک وارد شده تا محاسبات لازم را تحت شرایط مرزی داده شده به پیزوالکتریک اعمال نماید. بنابراین ناحیه انتخابی در این فیزیک باید با ناحیه انتخابی piezoelectric material در فیزیک قبلی یکسان باشد. این فیزیک به

۲-۹-۱- مدار الکتریکی معادل تیر واحد

مدار تیر پیزوالکتریک به عنوان منابع تغذیه هارمونیک تحت عنوان terminal در شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار شناخته می‌شود. در شکل ۶، مدار شبیه‌سازی شده برای تیر واحد برداشت انرژی در نرم‌افزار نشان داده شده‌است.

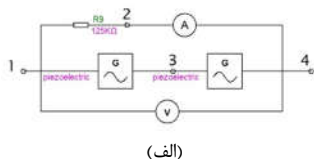


شکل ۶- مدار تیر واحد برداشت انرژی

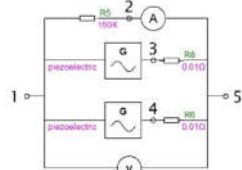
۲-۹-۲- مدارهای الکتریکی معادل تیر دو نواره برداشت

کننده انرژی به صورت سری و موازی

در شکل ۷-الف و شکل ۷-ب مدار الکتریکی تیر دو نواره (دو تیر) برداشت کننده انرژی G که به ترتیب با هم سری و موازی قرار داده شده‌اند نشان داده شده‌است. برای اندازه‌گیری جریان و ولتاژ، آمپر متر A با مقاومت در نظر گرفته شده $125\text{ k}\Omega$ (شکل ۷-الف) و $150\text{ k}\Omega$ (شکل ۷-ب) به صورت سری و با ولت‌متر V موازی قرار داده می‌شود. تیرهای پیزوالکتریک G که در این فیزیک تحت عنوان منابع تغذیه هارمونیک شناخته می‌شوند با یکدیگر مانند شکل ۷-الف و ۷-ب در حالت سری و موازی در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که نمی‌توان منابع تغذیه را با هم موازی قرار داد. بنابراین، در شکل ۷-ب در کنار این منابع تغذیه مقاومتی سری با مقدار ناچیز $0.1\ \Omega$ تعریف شده‌است.



(الف)



(ب)

شکل ۷- مدار الکتریکی تیر دو نواره برداشت کننده انرژی، (الف) - مدار سری و (ب) - مدار موازی

۲-۹-۳- مدارهای الکتریکی تیر سه نواره برداشت کننده

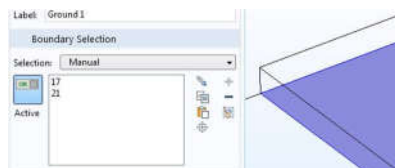
انرژی به صورت سری و موازی

مدار الکتریکی سه تیر پیزوالکتریک G مشابه که از تقسیم نمودن عرض تیر واحد به دست آمده‌اند در دو حالت سری و موازی به ترتیب در شکل ۸-الف و ۸-ب نشان داده شده‌اند. برای اندازه‌گیری جریان و ولتاژ، آمپر متر A با مقاومت در نظر گرفته شده $145\text{ k}\Omega$ (شکل ۸-الف) و $125\text{ k}\Omega$ (شکل ۸-ب) سری و با ولت‌متر V به صورت موازی

طور پیش فرض شامل charge conservation و zero charge و initial value می‌باشد.

۲-۲-۶- ایجاد مدل زمین

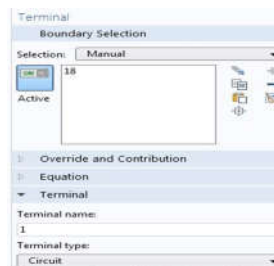
در نرم‌افزار با معرفی نمودن صفحه‌ای از تیر به عنوان پتانسیل صفر (برای تعریف معیار سنجش اختلاف پتانسیل سایر نقاط تیر نسبت به یک نقطه خاص) شرط مرزی ground در نظر گرفته شده‌است (شکل ۴ را ببینید).



شکل ۴- اعمال شرایط مرزی برای تیر

۲-۲-۷- ایجاد پایانه

برای سنجش مقدار اختلاف پتانسیل حاصل از کرنش پیزوالکتریک، صفحه مقابل به صفحه ground به عنوان terminal در نظر گرفته شده تا از آن در فیزیک پس از آن به عنوان شرط مرزی به عنوان محل ارتباط در فیزیک electrical circuit به عنوان منبع تغذیه استفاده شود (شکل ۵ را ببینید).



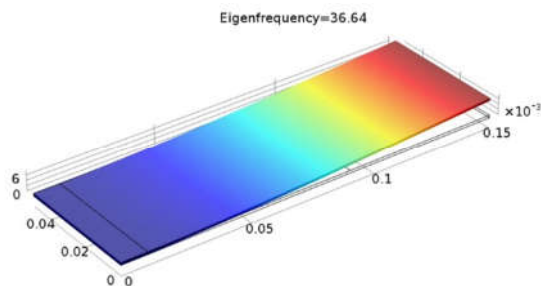
شکل ۵- شرط مرزی پایانه محل ارتباط فیزیک با فیزیک بعدی در نرم‌افزار

۲-۲-۸- ایجاد مدار الکتریکی معادل

آنچه که تحت عنوان مدار شبیه‌سازی شده در آزمایش تجربی باشد شامل در نظر گرفتن مقاومت، ولت‌متر و آمپر متر و همچنین نحوه چیدمان تیرها در مدل‌ها به صورت سری و موازی در فیزیک Electrical circuit نرم‌افزار وارد شده و مدار طراحی می‌گردد.

۲-۲-۹- مدارهای الکتریکی معادل با تیر برداشت کننده انرژی

در این تحقیق، برای بهینه‌سازی برداشت انرژی از پیزوالکتریک‌ها، چیدمان سری و موازی تیرهای برداشت انرژی، نحوه چیدمان تیرها و مدار آن‌ها بررسی شده‌است. در شبیه‌سازی برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک، هر تیر برداشت انرژی نقش منبع تغذیه هارمونیک را دارد و همچنین در هر مرحله از برداشت انرژی یک مقاومت خاص وجود دارد که در موقعیت خود در مدار باید قرار داشته باشد.



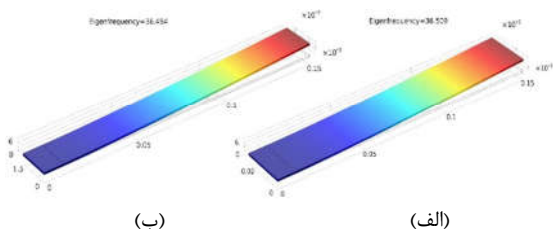
شکل ۱۰- شکل مد اول تیر برداشت کننده انرژی در اولین فرکانس طبیعی برابر با ۳۶ Hz

در روش تحلیلی، فرکانس طبیعی اول تیر از رابطه زیر محاسبه

می‌گردد [۱۶]

$$\omega_{n,1} = 0.1632(t/l^2)\sqrt{E/\rho} \quad (10)$$

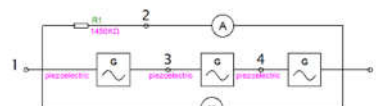
که در آن، t ضخامت و l طول تیر می‌باشند. لازم به ذکر است که با توجه به ضخامت بسیار ناچیز لایه پیزوالکتریک از تاثیر آن در محاسبه فرکانس طبیعی در رابطه (۱۰) صرف نظر شده است [۱۶]. با جایگذاری داده‌های تیر در رابطه (۱۰) فرکانس طبیعی تیر یکسرگیردار برابر با مقدار ۳۶/۲۹۰ Hz محاسبه می‌گردد. با توجه به رابطه (۱۰)، از آنجایی که مقدار فرکانس طبیعی به عرض تیر وابسته نمی‌باشد پس در روش تحلیلی با وجود آنکه عرض تیر کاهش می‌یابد فرکانس تشدید همان ۳۶ Hz می‌باشد. نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی [۱۶] برای فرکانس اول تیر یکسرگیردار برداشت کننده انرژی برای تیر با عرض ۲۵ mm و عرض ۱۶/۶ mm، به ترتیب مقادیر ۳۵/۲ Hz و ۳۵/۸ Hz گزارش شده است [۱۶]. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار Comsol برای محاسبه فرکانس طبیعی اول تیر در مدل اول شامل تیر واحد با عرض ۵۰ mm، مدل دوم شامل دو تیر با عرض برابر با ۲۵ mm و مدل سوم شامل سه تیر با عرض ۱۶/۶ mm، به ترتیب مقادیر ۳۶/۶۴۰ Hz، ۳۶/۵۰۹ Hz و ۳۶/۴۵۴ Hz محاسبه شده‌اند. در شکل ۱۱، نتایج تحلیل مودال برای شکل مد تیر در فرکانس طبیعی اول برای مدل دوم (تیر با عرض ۲۵ mm) و مدل سوم (تیر با عرض ۱۶/۶ mm) نشان داده شده است.



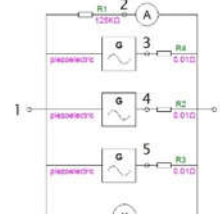
شکل ۱۱- شکل مد و فرکانس طبیعی اول تیر با عرض‌های مختلف، (الف) تیر در مدل دوم (تیر با عرض ۲۵ mm) و (ب) تیر در مدل سوم (تیر با عرض ۱۶/۶ mm)

در جدول ۴، مقدار محاسبه شده برای فرکانس طبیعی اول تیر پیزوالکتریک یکسرگیردار با عرض ۵۰ mm، ۲۵ mm و ۱۶/۶ mm در حل عددی و حل نظری در این پژوهش و آزمایش تجربی [۱۶] جهت مقایسه در هر سه مدل ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل

قرار داده شده است. در شکل ۸-ب، با توجه به این که منابع تغذیه را نمی‌توان مستقیماً با هم موازی در نظر گرفت با در نظر گرفتن مقاومت‌های سری با مقدار ناچیز 0.01Ω سه تیر برداشت انرژی در حالت موازی نشان داده شده‌اند.



(الف)

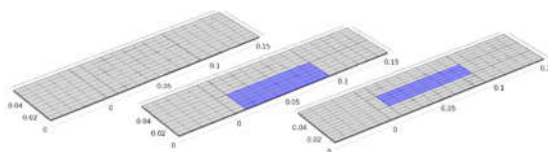


(ب)

شکل ۸- مدار الکتریکی تیر سه نواره برداشت کننده انرژی، (الف) - مدار سری و (ب) - مدار موازی

۲-۲-۱۰- مش بندی

در شکل ۹، المان بندی منظم کلیه بلوک‌ها در سه نوع مدل تیر آلومینیومی نشان داده شده است.



(الف)

(ب)

(پ)

شکل ۹- مش بندی تیر برداشت کننده انرژی، (الف) تیر واحد، (ب) تیر دو نواره و (پ) تیر سه نواره

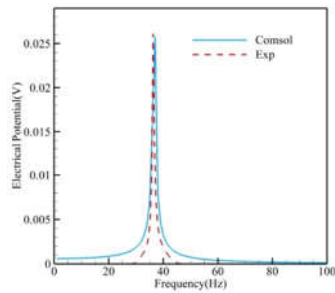
۳- نتایج تحلیل عددی تیر پیزوالکتریک برداشت

کننده انرژی

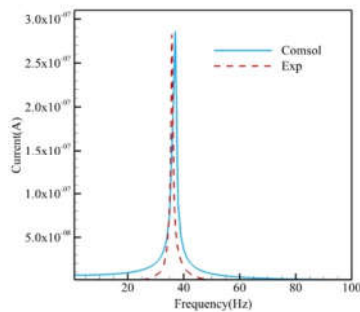
۱-۳- تحلیل مودال

در تحلیل مودال، مقدار فرکانس‌های طبیعی تیر با توجه به مشخصات هندسی، خواص مکانیکی و فیزیکی ماده آن محاسبه می‌گردد. در شکل ۱۰، شکل مود اول تیر یکسر گیردار برداشت کننده انرژی با عرض برابر با ۵۰ mm با فرکانس طبیعی اول برابر با ۳۶/۶۴ Hz نشان داده شده است. از آنجایی که بیشترین جابجایی و کرنش در فرکانس تشدید رخ می‌دهد بنابراین بیشینه ولتاژ نیز در این فرکانس اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که در مدل سازی عددی مساله، مقدار فرکانس تشدید برابر با ۳۶ Hz در نظر گرفته شده است.

پیزوالکتریک به عنوان پتانسیل صفر به عنوان شرط مرزی ground در نرم‌افزار معرفی کرده و همچنین صفحه بالایی پیزوالکتریک به عنوان پتانسیل مرجع به صورت شرط مرزی terminal که ارتباط بین این فیزیک و فیزیک مدار می‌باشد معرفی می‌گردد. در فیزیک electrical circuit منابع تغذیه هارمونیک که همان بلوک مربوط به پیزوالکتریک می‌باشند و نرم‌افزار آن را تحت عنوان terminal می‌شناسد وارد نموده و مقادیر resistant، voltmeter و همچنین ammeter برای مدار بستن مدار وارد می‌شوند (آزمایش تجربی [۱۶]). در شکل ۱۳، با اعمال تابع تحریک پایه سینوسی وابسته به زمان (شرط مرزی جابجایی هارمونیک) در تکیه‌گاه گیردار، تحلیل زمانی سه‌تیر برداشت کننده انرژی (مدل سوم) در ثانیه اول تحریک پایه (تکیه‌گاه) نشان داده شده‌است.

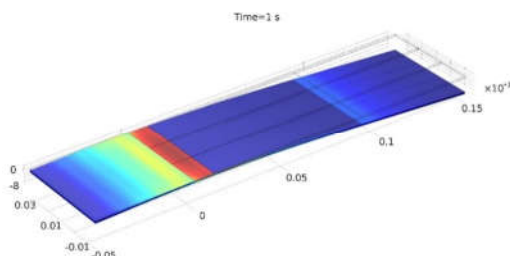


(الف)



(ب)

شکل ۱۲- ولتاژ و جریان خروجی تیر شامل لایه پیزوالکتریک در حوزه فرکانس، (الف) ولتاژ بر حسب فرکانس و (ب) جریان بر حسب فرکانس



شکل ۱۳- توزیع جابجایی زمانی تیر یکسرگیردار در مدل سوم (سه تیر با عرض ۱۶/۶ mm) تحت تاثیر ارتعاش هارمونیک پایه گیردار

در شکل ۱۴، نتایج پاسخ زمانی ولتاژ الکتریکی (بخش گذرا و و پایایی پاسخ) با استفاده از روش حل عددی نشان داده شده‌است. مشاهده

ماهیت روش‌ها در آزمایش تجربی و حل عددی مقداری خطا بین نتایج وجود دارد و معیار سنجش درصد خطا نسبت به نتایج در حل تحلیلی می‌باشد.

جدول ۴- فرکانس طبیعی اول تیر در حل عددی، تحلیلی و آزمایش تجربی [۱۶]

نام مدل	فرکانس طبیعی اول ω_1 بر حسب Hz			خطای نسبی بر حسب درصد	
	حل تحلیلی	حل عددی	آزمایش تجربی [۱۶]	حل عددی	آزمایش تجربی
مدل اول (تیر با عرض ۵۰ mm)	۳۶/۲۹۰	۳۶/۶۴۰	۳۶/۵	۰/۹۶	۰/۵۸
مدل دوم (تیر با عرض ۲۵ mm)	۳۶/۲۹۰	۳۶/۵۰۹	۳۵/۲	۰/۶۰	-۱/۳
مدل سوم (تیر با عرض ۱۶/۶ mm)	۳۶/۲۹۰	۳۶/۴۵۴	۳۵/۸	۰/۴۵	-۱/۳

۲-۳- نتایج تحلیل عددی برداشت انرژی تیر

پیزوالکتریک در حوزه فرکانس

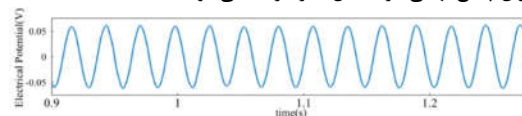
با توجه به اینکه بیشترین کرنش و برداشت انرژی در فرکانس طبیعی رخ می‌دهد، بنابراین تحریک تکیه‌گاه (پایه تیر) در فرکانس طبیعی در نظر گرفته شده‌است. بر مبنای تحلیل در حوزه فرکانس در نرم‌افزار Comsol نیروهای حجمی وارد بر تیر یکسرگیردار با لایه‌ای از پیزوالکتریک (ناشی از تاثیر جرم تیر و شتاب حاصل از جابجایی هارمونیک تکیه‌گاه گیردار) با معرفی پهنای باند فرکانسی (در فرکانس‌هایی با مقادیر متفاوت و متعدد) محاسبه می‌گردد. در نرم‌افزار هر کدام از فرکانس‌ها به نیروهای حجمی اعمال شده‌است. با اعمال این نیرو در فرکانس‌های مختلف کرنش نیز تغییر کرده و در فرکانس شدید، بیشینه کرنش در لایه پیزوالکتریک و در نتیجه بیشینه برداشت انرژی اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب، به ترتیب نمودار ولتاژ و جریان خروجی از تیر یکسرگیردار با لایه پیزوالکتریک در حوزه فرکانس نشان داده شده‌است.

۳-۳- نتایج تحلیل عددی برداشت انرژی تیر

پیزوالکتریک در حوزه زمان

در این بخش به مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش تجربی [۱۶] پرداخته می‌شود. برای بررسی برداشت انرژی از مواد پیزوالکتریک در نرم‌افزار Comsol با انتخاب ماژول piezo devices، مدل سه‌بعدی تیر طراحی شده و در فیزیک Solid mechanics، در بخش مربوط به شرط مرزی prescribed displacement، تابع تحریک $0.003 \sin(226t)$ (رابطه (۱۰)) به نگره‌دارنده تکان‌دهنده که در بخش انتهای گیردار تیر می‌باشد اعمال می‌شود [۱۶]. در فیزیک electro statics که مربوط به خود پیزوالکتریک می‌باشد، صفحه پایینی

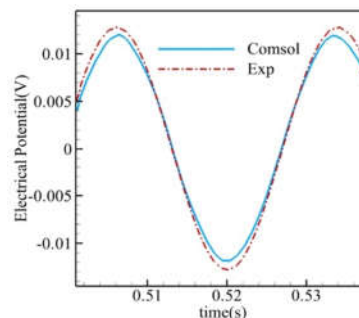
می‌شود که بخش پایا از زمان 0.9 s به بعد شروع شده و ولتاژ آن به عنوان پاسخ نهایی در تحلیل نظر گرفته می‌شود.



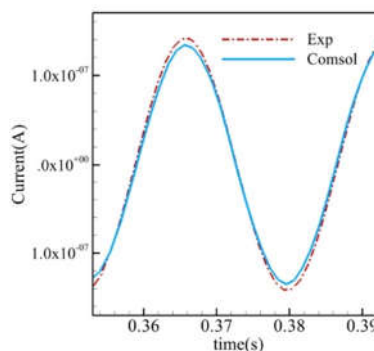
شکل ۱۴- ولتاژ الکتریکی متناوب خروجی برحسب زمان

۳-۱- نتایج تحلیل تیر برداشت کننده انرژی به عرض 50 mm

با استفاده از شبیه‌سازی حل عددی در نرم‌افزار Comsol و آزمایش تجربی [۱۶] در شکل ۱۵-الف و ۱۵-ب، به ترتیب مقایسه تغییرات ولتاژ و جریان الکتریکی برحسب زمان (جریان متناوب) برای تیر واحد (تیر تک نواره) به عرض 50 mm که با مقاومت 90 k Ω موازی قرار داده شده نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۱۵، مقدار اختلاف ولتاژ و جریان خروجی متناوب بین مقادیر بیشینه تا کمینه به ترتیب برابر با مقادیر 273 nA و 0.2465 می‌باشند.



(الف)



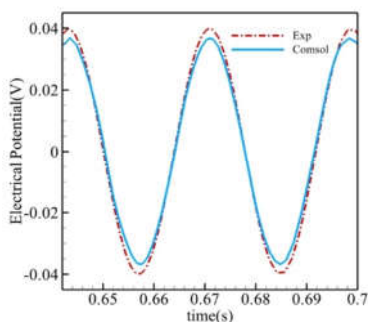
(ب)

شکل ۱۵- ولتاژ و جریان خروجی هارمونیک برحسب زمان برای تیر واحد (تک نواره)، (الف) ولتاژ خروجی، (ب) جریان خروجی

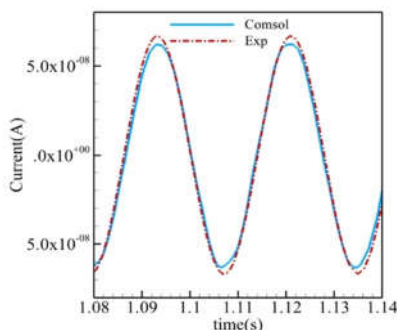
۳-۲- نتایج تحلیل دو تیر (تیر دو نواره) برداشت کننده انرژی به عرض 25 mm

الف- تیر دو نواره سری
در شکل ۱۶-الف و ۱۶-ب، به ترتیب مقایسه تغییرات ولتاژ و جریان الکتریکی متناوب برحسب زمان برای دو تیر سری به عرض 25 mm (که هر کدام آنها نقش منبع تغذیه متناوب را دارند) در حالتی که

مقاومت 60 k Ω با آنها موازی قرار داده شده، با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Comsol با آزمایش تجربی [۱۶] نشان داده شده‌است. اختلاف مقادیر بیشینه تا کمینه برای ولتاژ و جریان متناوب خروجی به ترتیب 144 nA و 0.086 V می‌باشند.



(الف)

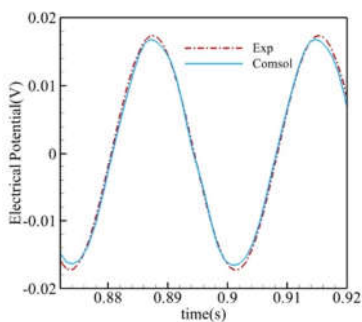


(ب)

شکل ۱۶- ولتاژ و جریان خروجی هارمونیک برحسب زمان برای تیر دو نواره در حالت سری، (الف) ولتاژ خروجی، (ب) جریان خروجی

ب- تیر دو نواره موازی

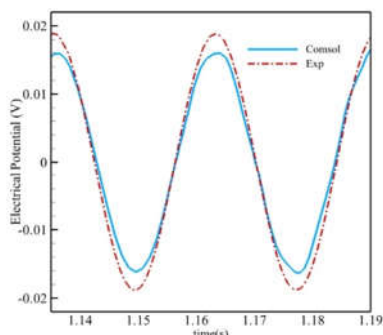
در شکل ۱۷-الف و ۱۷-ب، تغییرات ولتاژ و جریان الکتریکی برحسب زمان برای تیر دو نواره برداشت کننده انرژی در حالتی که این دو نوار (تیر) به عنوان منبع تغذیه با مقاومتی به اندازه 150 k Ω موازی شده‌اند نشان داده شده‌است. نتایج به دست آمده برای اختلاف مقادیر بیشینه تا کمینه از ولت‌متر و آمپرمتری که به صورت موازی با تیرها در مدار قرار گرفته به ترتیب برابر با 0.364 V و 242 nA می‌باشند. در این شکل اختلاف ناچیزی برای ولتاژ و جریان خروجی بین دو روش حل عددی و آزمایش تجربی [۱۶] مشاهده می‌شود.



(الف)

ب- تیر سه نواره موازی

در شکل ۱۹-الف و ۱۹-ب، تغییرات ولتاژ و جریان الکتریکی برحسب زمان در حل عددی برای تیر سه نواره (سه تیر) برداشت‌کننده انرژی (که نقش منبع تغذیه دارند) که با یکدیگر موازی و همچنین با مقاومت برابر با $125 \text{ k}\Omega$ موازی قرار داده شده نشان داده شده است. مقادیر اختلاف بین بیشینه تا کمینه ولتاژ و جریان متناوب به ترتیب 0.352% و 28 nA می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان دهنده تطابق مناسبی بین روش عددی و روش تجربی را نشان می‌دهند.



(ب)

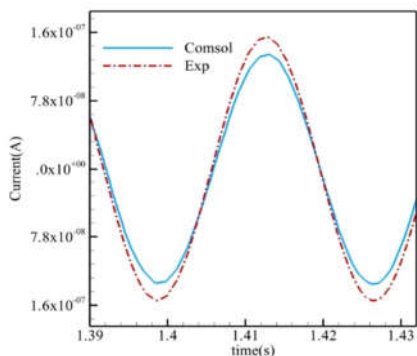
شکل ۱۷- ولتاژ و جریان خروجی هارمونیک برحسب زمان برای دو تیر در حالت موازی، (الف) ولتاژ خروجی، (ب) جریان خروجی

۳-۳-۳- نتایج تحلیل سه تیر (تیر سه نواره) برداشت کننده

انرژی به عرض $16/6 \text{ mm}$

الف- تیر سه نواره سری

در شکل ۱۸-الف و ۱۸-ب، به ترتیب مقایسه تغییرات ولتاژ و جریان الکتریکی هارمونیک برحسب زمان در حل عددی با نتایج به دست آمده از آمایش [۱۶] برای تیر سه نواره برداشت‌کننده انرژی که با یکدیگر سری و با مقاومت $1/45 \text{ M}\Omega$ موازی قرار داده شده نشان داده شده است. ولت‌متر و آمپر‌متر قرار داده شده در مدار اختلاف بین مقادیر بیشینه تا کمینه برای ولتاژ و جریان خروجی متناوب را به ترتیب 0.1235% و 85 nA نشان می‌دهند. نتایج ارائه شده نشان دهنده تطابق مناسب بین نتایج روش عددی و روش تجربی می‌باشد.



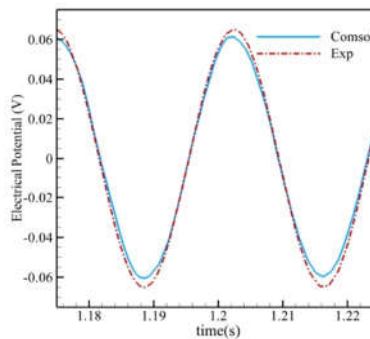
(ب)

شکل ۱۹- ولتاژ و جریان خروجی هارمونیک برحسب زمان برای تیر سه نواره در حالت موازی، (الف) ولتاژ خروجی، (ب) جریان خروجی

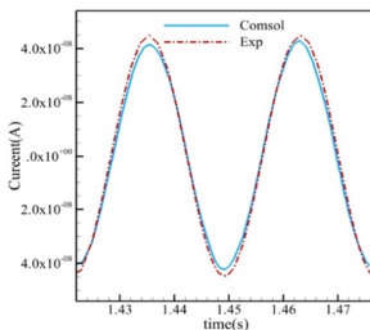
۴-۳- بررسی نتایج مدارهای معادل با تیر پیزوالکتریک

برداشت کننده انرژی

در جدول ۵، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از تحلیل عددی در نرم‌افزار Comsol با نتایج آزمایش‌های تجربی [۱۶] ارائه شده است. ولتاژ و جریان نشان داده شده در جدول ۵ اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینه هارمونیک می‌باشند. لازم به ذکر است که خطاهای آزمایش تجربی شامل افت مکانیکی و الکتریکی است که ناشی از اتصالات مکانیکی و مقاومت الکتریکی می‌باشند. همچنین، می‌توان به خطای دستگاه‌های موجود نیز اشاره نمود. با این حال اختلاف نتایج حل عددی با نتایج آزمایش تجربی در تمامی مراحل کمتر از ۱۰ درصد بوده که این نشان دهنده صحت روش شبیه‌سازی و حل عددی در نرم‌افزار Comsol با نتایج آزمایش تجربی [۱۶] می‌باشد. لازم به ذکر است که در جدول ۵، نتایج به دست آمده برای تیر واحد (مدل اول) و تیرهای دو



(الف)



(ب)

شکل ۱۸- ولتاژ و جریان خروجی هارمونیک برحسب زمان برای سه تیر در حالت سری، (الف) ولتاژ خروجی، (ب) جریان خروجی

نواره (مدل دوم) و تیر سه نواره (مدل سوم) به تفکیک سری موازی بودنشان ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که نتایج گزارش شده در مرجع [۱۶] برای میانگین ولتاژ و جریان خروجی برداشت شده از تیر دو پنج بار تکرار آزمایش بوده‌است.

موازی، مقدار جریان به‌دست آمده بیشتر از یک تیر تک نواره می‌باشد. ۴- از نتایج تحلیل مودال مشاهده گردید که فرکانس طبیعی تیر به عرض تیر وابسته نبوده و با تقسیم نمودن عرض آن به دو و سه نواره تغییر نمی‌کند.

جدول ۵- درصد خطا بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش

تجربی						
نام کمیت	یک تیر با عرض ۵۰ mm		دو تیر با عرض ۲۵ mm		سه تیر با عرض ۱۶/۶ mm	
	تیر واحد	سری	موازی	سری	موازی	سری
مقاومت (kΩ)	۹۰	۶۰۰	۱۵۰	۱۴۵۰	۱۲۵	۱۴۵۰
بیشینه جریان (nA)	حل عددی	۲۷۳	۱۴۴	۲۴۲	۸۵	۲۸۱
	آزمایش تجربی [۱۶]	۲۸۴	۱۳۳/۶	۲۳۱	۹۰	۳۰۲
بیشینه ولتاژ (mV)	حل عددی	۲۴/۶۵	۸۶	۳۶/۴	۱۲۳/۵	۳۵/۲
	آزمایش تجربی [۱۶]	۲۵/۶	۸۰/۲	۳۴/۷	۱۳۰/۵	۳۷/۸
خطا برحسب %	۳/۷	۷/۶	۰/۳	۵/۳	۸	۸

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل‌سازی المان محدود برداشت انرژی تیر یکسره‌گیردار پیزوالکتریک از ماده EAPap تحت تحریک هارمونیک پایه‌گیردار توسط نرم‌افزار Comsol انجام شد. با تقسیم نمودن عرض بلوک پیزوالکتریک تیر واحد به دو و یا سه نواره عرضی مستطیل شکل که با یکدیگر به صورت چیدمان سری و یا موازی در مدار معادل الکتریکی معادل قرار می‌گیرند میزان برداشت انرژی الکتریکی (جریان و ولتاژ الکتریکی) و فرکانس‌های طبیعی و شکل مدار تعاشبات تیر پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده عبارتند از:

۱- مشاهده گردید که ولتاژ خروجی در حالت تیر سه نواره در حالت مدار موازی و یا سری از ولتاژ خروجی از یک تیر تک نواره به میزان قابل توجهی بیشتر می‌باشد.

۲- مشاهده گردید که در دو مدل برداشت‌کننده انرژی شامل تیر پیزوالکتریک دو نواره و سه نواره در مدار الکتریکی حالت سری، مقدار ولتاژ خروجی ایجاد شده بیشتر از حالت موازی قرار دادن تیرها می‌باشد و با افزایش تعداد تقسیم‌های عرض تیر از یک نواره به سه نواره این روند افزایشی در دو حالت سری و موازی بیشتر گردید.

۳- مشاهده گردید که برای تیر دو نواره و تیر سه نواره در حالت موازی مقدار جریان الکتریکی بیشتر از مقدار جریان در حالت سری آنها می‌باشد. همچنین، مشاهده گردید که با افزایش تعداد تقسیمات عرض تیر به دو و سه نواره، مقدار جریان الکتریکی در حالت الف- تیر دو نواره سری/موازی و ب- تیر سه نواره سری، کمتر از مقدار جریان نسبت به یک تیر تک نواره می‌باشد. ولی در مورد تیر سه نواره در حالت مدار

۵- منابع

- [1] Yang Z., Zhou, S., Zu, J. and Inman, D.J., High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications, Joule, Vol. 2, No. 4, pp. 642-697, 2018.
- [2] Erturk, A. and Inman, D.J., Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters, Smart Materials and Structures, Vol. 17, No. 6, pp. 065016-065030, 2008.
- [3] Cha Y., Energy harvesting using flexible piezoelectric materials from human walking motion: Theoretical analysis, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 28, No. 20, pp. 3006-3015, 2017.
- [4] Karimi, M., Tikani, R. and Ziari-Rad, S., Piezoelectric energy harvesting from bridge vibrations under moving consecutive masses, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 108-118, 2016. (in Persian)
- [5] Suhag, S., and Chhabra, D., Design of a closed channel fluid flow system for piezoelectric energy harvesting, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 5, No. 4, pp. 1960-1963, 2018.
- [6] Orrego, S. et al., Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag, Applied Energy, Vol. 194, pp. 212-222, 2017.
- [7] Wang, Z.L. and Song, J., Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays, Science, Vol. 312, No. 5771, pp. 242-246, 2006.
- [8] Priya, S. et al., A review on piezoelectric energy harvesting: materials methods and circuits, Energy Harvesting and Systems, Vol. 4, No. 1, pp. 3-39, 2017.
- [9] Abdeljaber, O., Avci, O. and Inman, D.J., Active vibration control of flexible cantilever plates using piezoelectric materials and artificial neural networks, Journal of sound and Vibration, Vol. 363, pp. 33-53, 2016.
- [10] Salmani, H., Rahimi, G. and Hosseini Kordkheili, S.A., An exact analytical solution to exponentially tapered piezoelectric energy harvester, Shock and Vibration, Article ID 426876, pp. 1-13, Vol. 2015, 2015.
- [11] Ando, B., Baglio, F. and Trigona, M.C., Analysis of two dimensional wide-band bistable vibration energy harvester, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 202, pp. 176-182, 2013.
- [12] Borthakur, D., Baishya, S. and Chander, S., Optimization of piezoelectric energy harvesting structure by segmenting the piezoelectric Layer(s), 2017 IEEE 12th Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), 2017.
- [13] Dayou J., Kim, J., Im, J., Chuan How, A.-T. and Liew, W.Y.H., The effects of width reduction on the damping of a cantilever beam and its application in increasing the harvesting power of piezoelectric energy harvester, Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 4, pp. 045006, 2015.
- [14] Abas, Z., Kim, S., Zhai, L. and Kim, J., Experimental study of vibrational energy harvesting using Electro-Active paper, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 16, No. 6, pp. 1187-1193, 2015.
- [15] Hosseini R., Hamed, M., Im, J., Kim, J. and Dayou, J., Analytical and experimental investigation of partially covered piezoelectric cantilever energy harvester, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 18, No. 3, pp. 415-424, 2017.
- [16] Hosseini R., Mamaghani, A.E. and M., Nouri, An experimental investigation into width reduction effect on the efficiency of piezopolymer vibration energy harvester, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol.8, No. 3, pp. 41-51, 2017. (in Persian)
- [17] Hosseini R., Hamed, M., Mamaghani, A.E., Kim, H.C., Kim, J. and Dayou, J., Parameter identification of partially covered piezoelectric cantilever power scavenger based on the coupled distributed parameter solution, International Journal of Smart and Nano Materials, Vol.8, No. 2-3, pp. 110-124, 2017.