

## بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریکی تحت ارتعاشات هارمونیک پایه با استفاده از مدلسازی تحلیلی و روش اجزا محدود

آرمان کیانپور  
کمال جهانی\*

کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
دانشیار، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

در این مقاله، برداشت انرژی الکتریکی از ارتعاشات پایه تیر یکسر گیردار مد نظر قرار گرفته است. با توجه به بالا بودن کوپلینگ الکترومکانیکی مواد پیزوالکتریک نسبت به سایر روش‌های برداشت انرژی از ارتعاشات، ساختار سیستم برداشت‌کننده انرژی به صورت یک تیر سه لایه متشکل از یک لایه فلزی و دو لایه پیزوالکتریک در طرفین آن، به همراه یک جرم اضافه شده در انتهای آزاد تیر در نظر گرفته شده است. برداشت‌کننده انرژی مذکور در نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS و با یکارگیری تکنیک CPC-FEM مدلسازی شده و چگونگی تأثیر پارامترهای هندسی برداشت‌کننده بر رفتار مکانیکی و الکتریکی آن بررسی شده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، هندسه بهینه برداشت‌کننده ارائه گردیده و نتایج حاصل از بهینه‌سازی با نتایج روش‌های تقریبی پیش‌بینی رفتار برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریکی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بیانگر تطابق قابل قبول بین روش اجزا محدود و روش تحلیلی می باشد، ولی دقت روش اجزا محدود بخاطر استفاده از رابطه تنش- کرنش در کل طول دارای الکتروود برداشت‌کننده، دقیقتر می باشد. برداشت‌کننده انرژی با هندسه بهینه قادر به برداشت توان الکتریکی ۴/۴ میلی‌وات، ولتاژ ۹/۳ ولت در فرکانس ۱۲۵ هرتز و مقاومت الکتریکی ۱۰ کیلو اهم خواهد بود که این میزان توان و ولتاژ الکتریکی جهت تغذیه شبکه‌های سنسوری بی‌سیم کفایت می کند.

**واژه‌های کلیدی:** برداشت‌کننده انرژی، مواد پیزوالکتریک، روش اجزا محدود، بهینه‌سازی، پارامترهای هندسی.

## Investigating the Effects of Geometrical Parameters on the Performance of Piezoelectric Energy Harvesters under Harmonic Base Vibration Using Analytical and Finite Element Modeling

A. Kianpoor

M.Sc. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

K. Jahani

Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

In this paper, energy harvesting from base vibration of cantilever beam is considered. With taking into account the high electromechanical coupling of piezoelectric materials in comparison to other vibration energy harvesting methods, the considered structure of energy harvester is a three layers beam that consists of one metal substrate layer and two piezoelectric layers at up and down of it and a proof mass at free end. The considered harvester is modeled in ANSYS finite element software using CPC-FEM technique and effects of geometrical parameters of energy harvester on mechanical and electrical behavior of it are investigated. The optimized dimensions of harvester by using genetic algorithm (GA) are presented and the achieved results from CPC-FEM technique are compared with analytical method counterparts. Results indicate that finite element and analytical methods have an acceptable adaptation. But, because of considering the stress strain relation at whole of beam length with electrode, finite element method presents the accurate results. Also, results show that piezoelectric energy harvester can harvest 4.4 mW power and 9.3 V voltage at optimum electrical resistance of 10kohm that is sufficient to power sensor nodes and other low consumer electronic equipments.

**Keywords:** Energy harvesting, Finite Element Method, Piezoelectric, Optimizing, Geometrical Parameters.

## ۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های اخیر، حجم و اندازه و بدنبال آن مصرف انرژی تجهیزات الکترونیکی نظیر بوردهای الکترونیکی و شبکه‌های سنسوری بی‌سیم بطور مرتب رو به کاهش بوده است. در نتیجه تامین انرژی این‌گونه سیستم‌ها با استفاده از باتری‌های معمولی حجیم که دارای عمر محدود بوده و نیاز به تعویض یا شارژ مجدد دارند، از چالش‌های اصلی این سیستم‌های کم مصرف می‌باشد. بنابراین تلاش‌هایی در جهت برداشت انرژی<sup>۱</sup> از منابع انرژی محیط نظیر خورشید، باد، ارتعاشات ارتعاشات مکانیکی و ... به عنوان جایگزینی برای باتری‌های معمولی جهت تغذیه سیستم‌های الکترونیکی کوچک صورت گرفته است [۱]. در میان منابع انرژی مذکور، انرژی ناشی از ارتعاشات مکانیکی به دلیل موجود بودن در اکثر مکان‌های دور از دسترس نظیر هواپیماهای بدون سرنشین<sup>۲</sup> (UAVs)، تجهیزات نظامی، کانال‌های تهویه و... جهت تامین انرژی نسبت به سایر منابع انرژی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۲]. چندین مکانیزم برای برداشت انرژی از ارتعاشات محیط وجود دارد. الکترومغناطیس [۳، ۴]، الکترواستاتیک [۵، ۶] و پیزوالکتریک [۷، ۸] از جمله مکانیزم‌های موجود جهت تبدیل انرژی ارتعاشی به انرژی الکتریکی می‌باشند. هر یک از این مکانیزم‌ها دارای محاسن و معایبی می‌باشند. مواد پیزوالکتریک به دلیل قابلیت تولید توان الکتریکی بیشتر و داشتن کوپلینگ الکترومکانیکی بالاتر و همچنین بی‌نیاز بودن به منبع ولتاژ مجزا؛ بیشتر از روش‌های دیگر مورد توجه می‌باشد [۹]. اندازه برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریکی از چند میلیمتر مکعب ( $\text{mm}^3$ ) تا چند سانتی‌متر مکعب ( $\text{cm}^3$ ) و مقدار توان الکتریکی برداشت شده از آن از چند میکرو وات ( $\mu\text{W}$ ) تا چند میلی وات ( $\text{mW}$ ) بوده که این میزان انرژی وابسته به پارامترهایی نظیر فرکانس، جنس، شتاب پایه و هندسه برداشت کننده می‌باشد [۱۰، ۱۱]. به عنوان نمونه، روندی و همکارانش [۱۲] توان برداشت شده از تیرهای پیزوالکتریکی با حجم  $1\text{cm}^3$  در ابعاد مختلف را بررسی نمودند. و با ارائه روش معادلسازی الکتریکی برداشت کننده‌ها روابط تحلیلی قابل اتکائی جهت انجام محاسبات مربوطه ارائه نمودند که در کار حاضر نیز از نتایج به دست آمده استفاده می‌شود.

به دو دلیل برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریکی را به صورت یک سرگیردار در نظر می‌گیرند، اول آنکه پیکربندی یک سرگیردار بیشترین مقدار کرنش را در اثر اعمال یک نیروی معین ایجاد می‌کند و چون توان برداشت شده رابطه مستقیمی با میزان کرنش ایجاد شده در برداشت کننده دارد، در نتیجه میزان انرژی برداشت شده افزایش می‌یابد. دومین دلیل این است که پیکربندی

مذکور پایین‌ترین فرکانس طبیعی را در یک سایز مشخص نتیجه می‌دهد و از آنجاییکه منابع معمول ارتعاشی محیط دارای محدوده فرکانسی پایینی هستند، در نتیجه استفاده از این پیکربندی در اکثر کاربردها مناسب می‌باشد.

روش‌های تحلیلی متفاوتی جهت پیش بینی رفتار برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریکی ارائه شده است که در اینجا به اختصار ذکر شده‌اند. متیو و مول [۱۳] یک مدل تحلیلی برای برداشت حداکثر انرژی از یک تیر پیزوالکتریکی قرار گرفته در پاشنه کفش ارائه کردند. روندی و همکارانش [۲، ۱۲] یک روش تحلیلی جهت طراحی و بهینه‌سازی برداشت انرژی توسط مواد پیزوالکتریک با استفاده از تکنیک جرم و فنر معادل و استفاده از مدار الکتریکی معادل ارائه کردند. شوو و لین [۱۴] نیز یک مدل تحلیلی برای برداشت کننده‌های پیزوالکتریکی ارائه کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که توان برداشت شده به مشخصه‌های ارتعاشی (نظیر فرکانس و دامنه شتاب) جرم برداشت کننده، مقاومت الکتریکی و ثابت الکترومکانیکی سیستم بستگی دارد. لوو و همکارانش [۱۵] روشی تحلیلی بر مبنای تمرکز بر مقاومت الکتریکی و بررسی تأثیر مقدار آن بر میزان انرژی برداشت شده از برداشت کننده‌های پیزوالکتریکی ارائه کردند. اخیراً ارتورک و اینمن [۱۶] و ژوو و همکارانش [۱۷] که پیش‌بینی رفتار برداشت کننده‌های پیزوالکتریکی با استفاده مدل یک درجه آزادی را فاقد دقت کافی دانسته‌اند، یک روش تحلیلی جدید به اسم پارامترهای الکترومکانیکی توزیع شده<sup>۳</sup> ارائه کردند. اصغرزاده و همکاران بررسی برداشت انرژی از ارتعاشات یک تیر پیزوالکتریک تک لایه با ترکیب ذورنقه‌ای را با استفاده از روش پارامترهای توزیع شده با روش تحلیلی مورد بررسی قرار دادند [۱۸].

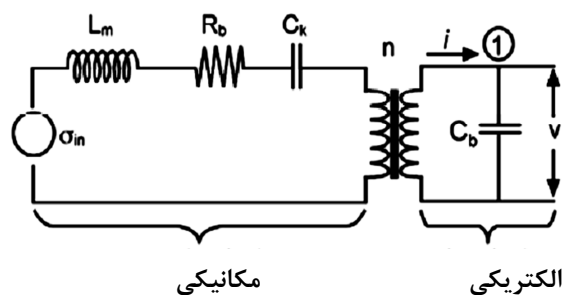
روش اجزا محدود یکی از روش‌های پیشرفته و قابل اعتماد عددی برای شبیه‌سازی سنسورها و محرک‌ها می‌باشد. همچنین این روش قابلیت محاسبه جریان الکتریکی در حالت‌های مدار باز و مدار بسته برداشت کننده‌های انرژی الکتریکی را دارد [۱۵]. ژوو و همکارانش [۱۷] با بکارگیری نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS برداشت کننده انرژی پیزوالکتریکی را با بکارگیری تکنیک مدار کوپله پیزوالکتریک<sup>۴</sup> (CPC-FEM) در حالیکه یک مقاومت الکتریکی به عنوان بار الکتریکی به آن متصل بود را مدلسازی کرده و با استفاده از این روش مقدار توان و ولتاژ الکتریکی برداشت شده را تعیین کردند. لازم به ذکر است که نمونه آزمایشگاهی برداشت کننده پیزوالکتریکی نیز توسط آنان مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج آن با نتایج حاصل از روش اجزا محدود مطابقت قابل قبولی داشت و بدین ترتیب روش مدلسازی با استفاده از تکنیک اجزایمحدود نیز مورد صحت‌گذاری قرار گرفت.

<sup>3</sup> distributed electromechanical parameters

<sup>4</sup> Coupled Piezoelectric Circuit-Finite Element Method (CPC-FEM)

<sup>1</sup> Energy Harvesting

<sup>2</sup> Unmanned Aerial Vehicles



شکل ۲- مدار الکتریکی معادل در حالت مدار بسته [۱۲]

در مدار شکل ۲، القاگر  $L_m$  معادل جرم یا اینرسی جرمی مبدل، مقاومت الکتریکی  $R_b$  معادل میرایی سیستم، خازن  $C_k$  معادل سختی سیستم،  $\sigma_{in}$  نشان دهنده تنش ایجاد شده در تیر در اثر ارتعاش پایه،  $n$  دور ترانسفورمر معادل نسبت تنش به ولتاژ (در شرایط کرنش صفر)، خازن  $C_b$  نشان دهنده ظرفیت خازنی پیزوالکتریک و ولتاژ عبوری از پیزوالکتریک می‌باشد، البته در معادلسازی الکتریکی  $\sigma_{in}$  با یک منبع ولتاژ و نرخ کرنش با شدت جریان نشان داده شده است. روندی و رایت [۱۲] با در نظر گرفتن روش مدار الکتریکی معادل، ولتاژ و توان الکتریکی برداشت شده برای یک بای‌مورف مستطیلی را بترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) ارائه کردند.

$$V = \frac{j\omega \left( \frac{2C_p d_{31} t_p}{a \varepsilon^s} \right) A_{in}}{j\omega \left( \omega^2 k_{31}^2 + \frac{2\zeta \omega}{RC_b} \right) - 2\zeta \omega^3 k_2} A_{in} \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{2\omega^2} \frac{RC_b^2 \left( \frac{k_{31} t_p}{k_2} \right)^2 \frac{C_p}{\varepsilon} A_{in}^2}{(4\zeta^2 + (k_{31})^4)(RC_b \omega)^2 + 4\zeta k_{31}^2 (RC_b \omega) + 4\zeta^2} \quad (2)$$

پارامترهای موجود در معادلات ارائه شده، شامل  $d_{31}$  ضریب کرنش پیزوالکتریک،  $t_p$  ضخامت لایه پیزوالکتریک،  $a$  وابسته به نحوه اتصال لایه های پیزوالکتریک که می‌تواند ۱ (برای اتصال سری) یا ۲ (برای اتصال موازی) باشد،  $k_{31}$  ثابت کوپلینگ الکترومکانیکی پیزوالکتریک بوده که به صورت رابطه (۳) می‌باشد،  $C_p$  مدول الاستیسیته لایه پیزوالکتریک،  $\varepsilon^s$  ثابت دی-الکتریک ماده پیزوالکتریک در کرنش ثابت،  $A_{in}$  شتاب ارتعاش وارده به پایه،  $k_2$  ضریب میرایی سیستم،  $R$  مقاومت الکتریکی بار و  $C_b$  ظرفیت خازن معادل پیزوالکتریک است که مطابق رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2 C_p}{\varepsilon^s} \quad (3)$$

$$C_b = \frac{a^2 \varepsilon^s w l_e}{2 t_p} \quad (4)$$

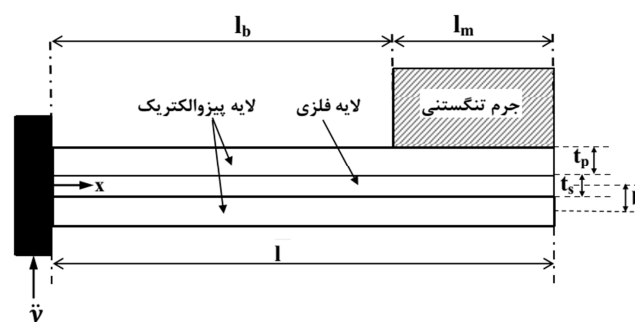
در معادلات مذکور جهت رسیدن به حداکثر توان و ولتاژ، فرکانس محیط  $\omega$  با فرکانس طبیعی سیستم  $\omega_n$  برابر فرض شده

با توجه به اهمیت پارامترهای هندسی و محدودیت‌های موجود در اندازه برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک، انتخاب یک هندسه بهینه امری مهم به شمار می‌آید. از آنجایی که پارامترهای هندسی تأثیر بسزایی در عملکرد برداشت‌کننده دارد، بنابراین بررسی تأثیر پارامترهای هندسی نظیر عرض، ضخامت، طول تیر و همچنین ابعاد جرم اضافه شده انتهای آزاد تیر بر میزان توان و ولتاژ الکتریکی برداشت شده لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله دو مطالعه اصلی انجام شده است: الف) تأثیر پارامترهای هندسی بر پارامترهای الکتریکی برداشت‌کننده با استفاده از تکنیک GPC-FEM (ب) هندسه بهینه شده برای منبع ارتعاشی با فرکانس ۱۲۵ هرتز و شتاب با دامنه  $1.6g$  (خواص ارتعاشی موتور یک نوع هواپیمای بدون سرنشین کوچک) [۱۹] توسط الگوریتم ژنتیک ارائه شده که هر دو مورد مذکور نوآوری این مقاله می‌باشد. در ادامه، جهت انجام صحنه‌گذاری نتایج، نتایج تحلیلی و اجزا محدودی برداشت‌کننده با هم مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مبانی و روش‌ها

### ۲-۱- ساختار برداشت‌کننده

پیکربندی مورد توجه در این مقاله برای برداشت‌کننده، یک تیر سه لایه متشکل از دولایه پیزوالکتریک در طرفین با ضخامت یکسان و یک لایه فلزی در وسط آن‌ها که آن را به اسم بای‌مورف<sup>۱</sup> می‌شناسند مطابق شکل ۱ می‌باشد. فرض بر آن شده است که تیر تحت ارتعاش پایه بوده و تحت خمش خالص است. یکی از روش‌های تحلیلی که به خوبی رفتار الکترومکانیکی سیستم را نشان می‌دهد استفاده از آنالوژی الکترومکانیکی و مدار الکتریکی معادل می‌باشد که رفتار مکانیکی و الکتریکی را ارائه می‌دهد. در شکل ۲ مدار الکتریکی معادل به همراه یک مقاومت الکتریکی نشان داده شده است.



شکل ۱- برداشت‌کننده پیزوالکتریک تحت ارتعاش پایه

<sup>1</sup> Bimorph

است که فرکانس طبیعی سیستم مطابق رابطه (۵) به دست خواهد آمد [۱۲].

$$\omega_n = \sqrt{\frac{E_p}{mk_1 k_2}} \quad (5)$$

جدول ۱- مشخصات مکانیکی لایه برنجی و جرم تنگستنی

| برنج | آلیاژ تنگستن |                               |
|------|--------------|-------------------------------|
| ۸۸۰۰ | ۱۷۰۰۰        | چگالی<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| ۱۱۰  | ۴۰۰          | مدول الاستیسیته<br>(GPa)      |
| ۰٫۳۵ | ۰٫۲۸         | ضریب پواسون (ν)               |

در رابطه‌های ارائه شده،  $E_p$  مدول الاستیسیته پیزوالکتریک و  $k_1$  و  $k_2$  ضرایبی هستند که به هندسه برداشت کننده وابسته می‌باشند.  $k_1$  نسبت تنش میانگین  $\sigma_{in}$  به نیروی اعمال شده به تیر در اثر جرم اضافه شده  $m$  به انتهای تیر و  $k_2$  نسبت جابجایی مرکز جرم اضافه شده به کرنش میانگین می‌باشد. این پارامترها برای هندسه مستطیلی با عرض  $w$  به فرم روابط (۶) و (۷) بیان می‌شوند.

$$k_1 = b(2l_b + l_m - l_e)/2I \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{(l_b + \frac{l_m}{2})^3}{3K_1 I} \quad (7)$$

که در آن  $l_e$  طول الکتروود پوشش داده شده روی لایه پیزوالکتریک بوده و  $l_b \leq l_e$  برقرار است.  $I$  ممان اینرسی سطح مقطع تیر می‌باشد که مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$I = 2 \left( \frac{wt_p^3}{12} + wt_p b^2 \right) + \eta_s \frac{wt_s^3}{12} \quad (8)$$

که در آن  $\eta_s$  نسبت مدول الاستیسیته لایه فلزی به مدول الاستیسیته لایه پیزوالکتریک  $\frac{E_s}{E_p}$  و  $\eta_s = \frac{Es}{E_p}$  میانگین ضخامت کل تیر  $b = \frac{t_p + t_s}{2}$  می‌باشد.

لازم به ذکر است که حداکثر توان برداشت شده از سیستم، در یک مقاومت الکتریکی رخ می‌دهد. در واقع مقاومت بهینه، مقدار مقاومت الکتریکی مدار است که قادر به برداشت حداکثر انرژی الکتریکی می‌باشد. مقدار این مقاومت از برابر صفر قرار دادن مشتق رابطه (۲) نسبت به  $R$  مطابق رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$R_{opt} = \frac{1}{\omega_n C_b} \frac{2\zeta}{\sqrt{4\zeta^2 + (k_{31})^4}} \quad (9)$$

## ۲-۲ تحلیل اجزا محدودی

در این مرحله، تحلیل اجزا محدودی برداشت کننده انرژی مورد نظر که تحت ارتعاش هارمونیک پایه قرار گرفته است مدنظر می‌باشد. نمونه مبدل مورد نظر یک تیر سه لایه می‌باشد که از دو لایه پیزوالکتریک از جنس PSI-5H4E و یک لایه فلزی به عنوان لایه‌ی وسطی از جنس برنج تشکیل شده است و در انتهای آزاد تیر نیز یک جرم از جنس آلیاژ تنگستن جهت تنظیم فرکانس اضافه شده است (مطابق شکل ۱). مشخصات مکانیکی و الکتریکی لایه‌های مذکور مطابق جدول ۱ و جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی و الکتریکی لایه‌های پیزوالکتریک [۱۷]

| PSI-5H4E                                                                                      |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| ۷۸۰۰                                                                                          | چگالی (kg/m <sup>3</sup> )       |
| $d_{31} = -32 \times 10^{-12} \text{ m/Volt}$<br>$d_{33} = 65 \times 10^{-12} \text{ m/Volt}$ | ثوابت پیزوالکتریک                |
| $\epsilon_{33} = 3800$                                                                        | ضریب دی الکتریک نسبی             |
| $Q = 32$                                                                                      | فاکتور کیفیت                     |
| $E_{11} = 62 \text{ GPa}$<br>$E_{33} = 50 \text{ GPa}$                                        | مدول الاستیسیته (GPa)            |
| $C_{11} = 110/8$<br>$C_{12} = 49/8$<br>$C_{33} = 110/8$<br>$C_{13} = 49/8$<br>$C_{44} = 30/5$ | مولفه‌های سفتی پیزوالکتریک (GPa) |

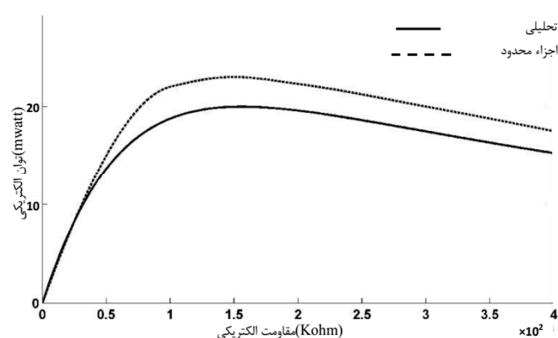
در این مرحله برای مدل‌سازی پایه جهت تحریک، از روش LMM [۲۰] استفاده شده است، در این روش به جای مدل کردن کل پایه، جهت کاهش حجم محاسبات، کافی است که پایه را به عنوان یک جرم بزرگ (در مقایسه با جرم برداشت کننده) مدل‌سازی نمود. البته این روش هنگامی قابل قبول است که جرم تکیه گاه حداقل ۴ یا ۵ برابر جرم برداشت کننده باشد، که در این مساله صادق است. پس از مدل‌سازی تکیه گاه به صورت یک المان جرم متمرکز (از المان MASS21 استفاده شده است)، جهت اعمال قید گیردار بودن از دستور Rigid Region استفاده شده است. با استفاده از این دستور درجات آزادی سر گیردار تیر به

<sup>1</sup> Large Mass Method

برای اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام شده در نرم افزار Ansys، مقایسه توان برداشت شده از هندسه مستطیلی با ابعاد ارائه شده توسط روندی [۱۲]، با دو روش مدار معادل و استفاده از Ansys در شکل ۵ آمده است، که با توجه به آن می‌توان از صحت مدل‌سازی انجام شده اطمینان حاصل کرد. ابعاد هندسه مورد نظر در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- ابعاد ارائه شده توسط روندی [۱۲]

| ابعاد بر حسب میلی‌متر | $t_s$ | $t_p$ | $w$ | $l_e$ | $l_b$ | $w_m$ | $h_m$ | $l_m$ |
|-----------------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| ۰.۱                   | ۰.۱۴  | ۳.۲   | ۶.۵ | ۶.۵   | ۶.۵   | ۶.۷   | ۷.۷   | ۸.۵   |



شکل ۵- اعتبار سنجی روش آمان محدود

درجات آزادی آلمان جرم بزرگ مقید شده و از آنجایی که آلمان جرم بزرگ می‌باشد، تکیه‌گاه گیردار کامل مدل‌سازی خواهد شد و جهت انجام تحلیل هارمونیک کافیسیت دامنه نیرو به آلمان جرم اعمال شود. البته باید توجه شود فقط درجات آزادی مکانیکی گره‌های سر گیردار به آلمان جرم بزرگ مقید شود. در شکل ۳، مدل‌سازی تکیه‌گاه و کلیات سیستم نشان داده شده است.

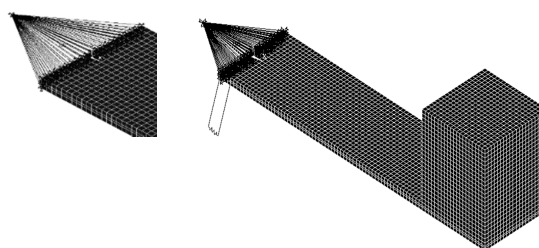
در شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل ۳، از آلمان SOLID5 که یک آلمان کوپله ۸ گره‌ای با در نظر گرفتن درجات آزادی  $U_x, U_y, U_z, Volt$  می‌باشد جهت مدل کردن لایه‌های پیزوالکتریک استفاده شده است و همچنین برای مدل کردن لایه فلزی وسط و جرم اضافه شده در انتهای آزاد تیر از آلمان SOLID185 که یک آلمان سازه‌ای ۸ گره‌ای با سه درجه آزادی می‌باشد استفاده شده است. برای مدل کردن جرم بزرگ از آلمان MASS21 با ۶ درجه آزادی و جرم ۱۰ کیلوگرم، استفاده شده است.

برای محاسبه ولتاژ ایجاد شده در بای‌مورف لازم است که سطوح الکترود لایه‌های پیزوالکتریک مدل‌سازی شود. مدل کردن الکترودها با کوپل کردن درجه آزادی ولتاژ با استفاده از دستور couple انجام می‌شود. شبیه‌سازی مدار الکتریکی متصل شده به بای‌مورف توسط آلمان CIRC94 جهت محاسبه توان تلف شده در مقاومت الکتریکی و در نتیجه میزان توان برداشت شده انجام شده است. شکل ۴ کانتور توزیع ولتاژ پس از انجام آنالیز هارمونیک را نشان می‌دهد.

## ۱- ۳- نتایج

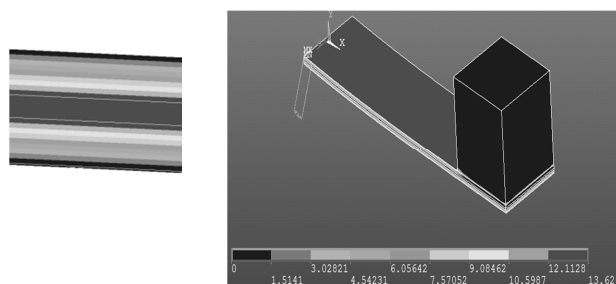
### ۱-۳ بررسی تأثیر پارامترهای هندسی

در این بخش به بررسی نحوه تأثیر پارامترهای هندسی بر پارامترهای الکتریکی پرداخته خواهد شد. برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی نیاز به یک هندسه مبنا خواهد بود که در این مطالعه، مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است که با توجه به فرکانس منبع ارتعاشی (۱۲۵Hz) و محدودیت‌های انتخاب اندازه‌نظیر کوچک بودن اندازه سنسورهای الکتریکی و بالتبع لزوم استفاده از برداشت‌کننده‌هایی با ابعادی در اندازه‌ای مشابه آن‌ها که معمولاً کمتر از یک سانتی‌متر مکعب هستند، در نظر گرفته شده است البته این ابعاد در بخش بعدی بهینه خواهد شد. شبیه‌سازی‌های انجام شده بر اساس بررسی تغییرات پارامترهای الکتریکی با تغییرات طول، عرض، نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک بر ضخامت کل بای‌مورف و تغییرات طول، عرض و ارتفاع جرم اضافه شده در انتهای آزاد تیر انجام شده است. نحوه تغییر پارامترها در هر بخش بدین صورت است که در هر بخش یک پارامتر طی چند مرحله افزایش یا کاهش داده شده و سایر پارامترها مطابق هندسه مبنا، ثابت فرض شده است.

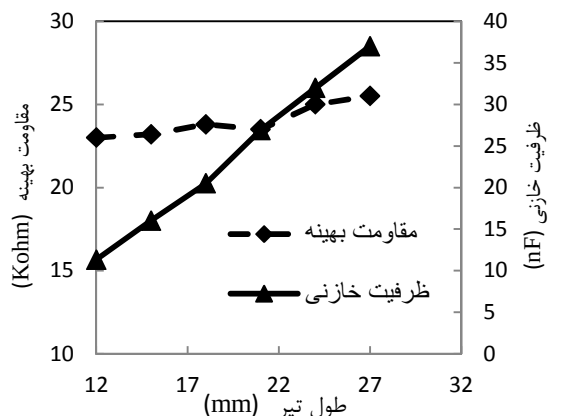


شکل ۳- مدل‌سازی اجزاء محدود برداشت کننده توسط نرم‌افزار

ANSYS



شکل ۴- کانتور توزیع ولتاژ در سطوح پیزوالکتریک



شکل ۸- تغییرات مقاومت الکتریکی بهینه و ظرفیت خازنی بر حسب طول تیر

همانطور که از نمودارهای فوق بر می آید، شدت جریان  $I$ ، ولتاژ  $V$  و توان اتلافی در مقاومت الکتریکی  $P$  به ترتیب از ۲/۴۹ میلی آمپر، ۵۶ ولت و ۷۰ میلی وات در تیر به طول ۱۲ میلی متر تا ۰/۳۴ میلی آمپر، ۹/۲ ولت و ۱/۶ میلی وات در تیر با طول ۲۷ میلی متر تغییر می کند. آنچه که از نمودارهای ارائه شده مشهود است آن است که تغییر طول تیر، تأثیر بسزایی در پارامترهای الکتریکی را سبب می شود، دلیل این امر آن است که با کاهش طول تیر، فرکانس طبیعی آن افزایش یافته و با توجه به متناسب بودن توان الکتریکی با توان سوم فرکانس  $\omega$  [۱۱]، میزان توان برداشت شده به شدت افزایش می یابد این وابستگی را می توان به راحتی در مدل های یک درجه آزادی و مدار الکتریکی معادل نیز مشاهده کرد. البته بایستی در نظر داشت که ارتعاشات وارده به پایه با دامنه ثابت  $25/94 (A)$  میکرومتر در نظر گرفته شده است و در نتیجه مطابق رابطه شتاب به صورت  $(2\pi\omega)^2 A$  با افزایش فرکانس سیستم، میزان شتاب وارده به پایه جهت به تشدید رساندن سیستم، افزایش می یابد، در نتیجه توان تلف شده در مقاومت نیز با افزایش روبرو خواهد بود. دلیل افزایش ظرفیت خازنی نیز این است که با افزایش طول تیر، مساحت پوشش داده شده با الکترون نیز افزایش می یابد و در نتیجه با افزایش طول تیر، و بدلیل وجود رابطه عکس بین مقاومت الکتریکی بهینه و ظرفیت خازنی و فرکانس، مقاومت الکتریکی بهینه تغییرات چندانی نخواهند داشت در نتیجه برای برداشت انرژی بیشتر استفاده از تیرهای با طول کمتر ترجیح داده می شوند.

### ۳-۱-۲- تغییرات عرض بای مورف

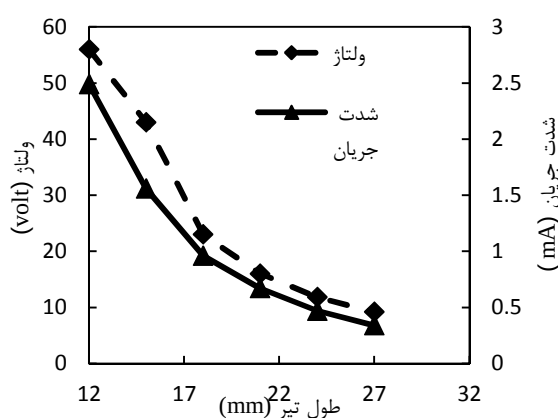
تغییرات شدت جریان و ولتاژ الکتریکی عبوری از بار الکتریکی بهینه  $R_{opt}$  در فرکانس تشدید بر اساس تغییر عرض تیر در شکل ۹ نشان داده شده است و همچنین تغییرات توان تلف شده در مقاومت الکتریکی  $P$ ، تغییرات بار الکتریکی  $R$  و ظرفیت خازنی بای- مورف  $C_b$  در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ آمده است.

جدول ۴- برداشت کننده مبنا

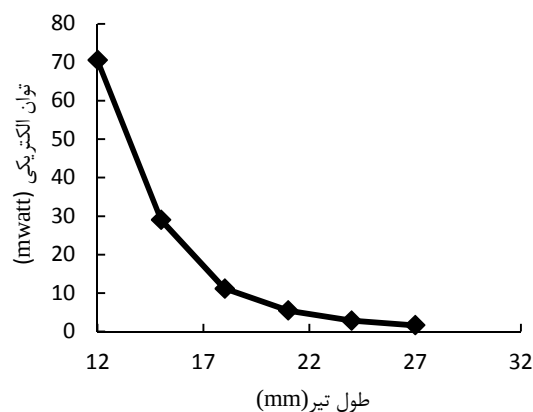
| ابعاد بر حسب میلی متر | $t_s$ | $t_p$ | $w$ | $w_m$ | $l_m$ | $h_m$ | $l_e$ | $l_b$ | $l$ |
|-----------------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| حساب                  | ۰/۲   | ۰/۲   | ۵   | ۵     | ۵     | ۵/۷   | ۱۶    | ۱۶    | ۲۱  |

### ۳-۱-۱- تغییرات طول بای مورف

تغییرات شدت جریان و ولتاژ الکتریکی عبوری از بار الکتریکی بهینه  $R_{opt}$  در فرکانس تشدید بر اساس تغییر طول تیر در شکل ۶ نشان داده شده است و همچنین تغییرات توان تلف شده در مقاومت الکتریکی  $P$ ، تغییرات بار الکتریکی  $R$  و ظرفیت خازنی بای مورف  $C_b$  در شکل ۷ و شکل ۸ آمده است.

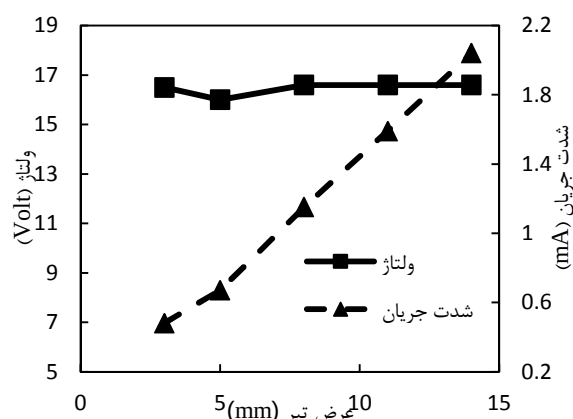


شکل ۶- تغییرات شدت جریان و ولتاژ با طول تیر

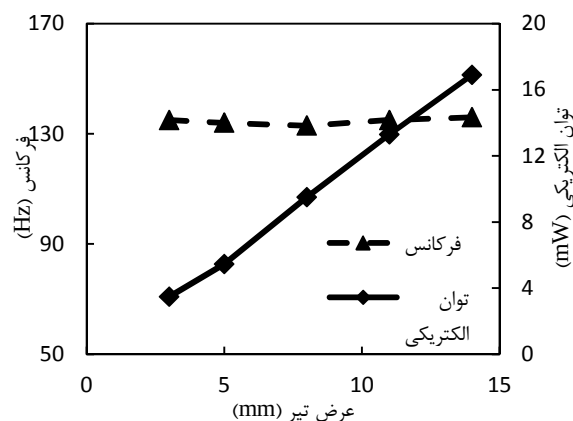


شکل ۷- تغییرات توان بر حسب طول تیر

فرض شده است) فرکانس تیر افزایش یافته و در نتیجه میزان توان برداشت شده نیز افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش عرض تیر، ظرفیت خازنی سیستم افزایش یافته و با توجه به افزایش فرکانس طبیعی تیر، بار الکتریکی بهینه کاهش می‌یابد. ولتاژ مدار بسته نیز به دلیل وابسته بودن همزمان به فرکانس طبیعی، ظرفیت خازنی و مقاومت الکتریکی (همان طور که در مدل مدار الکتریکی معادل واضح است) تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ تغییرات میزان ولتاژ، شدت جریان و توان الکتریکی برداشت شده با تغییر همزمان عرض تیر و عرض جرم نشان داده شده است.

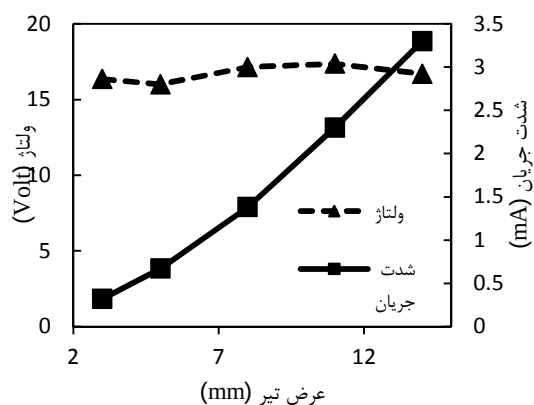


شکل ۱۲ - تغییرات شدت جریان و ولتاژ بر حسب عرض تیر و عرض جرم

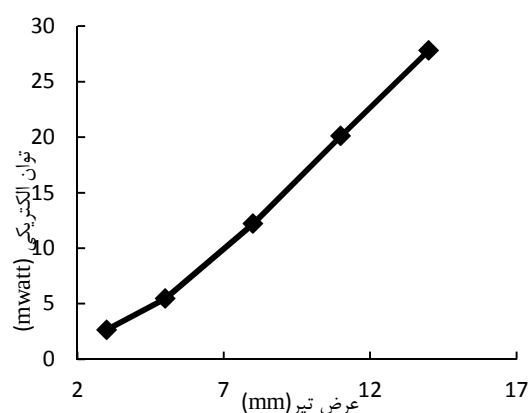


شکل ۱۳ - تغییرات توان بر حسب عرض تیر و عرض جرم

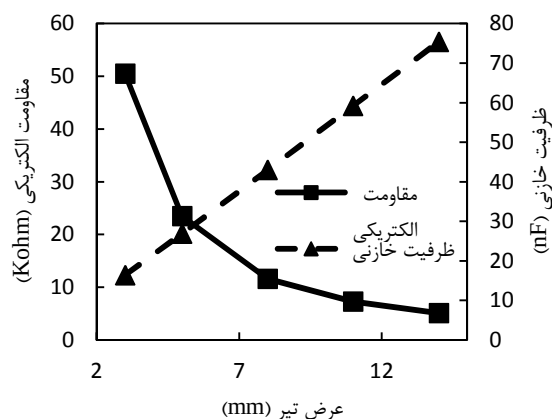
نکته قابل توجه در شکل ۱۳ آن است که می‌توان بدون تغییر در فرکانس سیستم و در نتیجه بدون افزایش شتاب وارده به پایه، توان برداشت شده را با افزایش همزمان عرض تیر و عرض جرم افزایش داد. این روش برای تنظیم فرکانس تشدید نیز بسیار مورد توجه می‌باشد.



شکل ۹ - تغییرات شدت جریان و ولتاژ با عرض تیر



شکل ۱۰ - تغییرات توان بر حسب عرض تیر

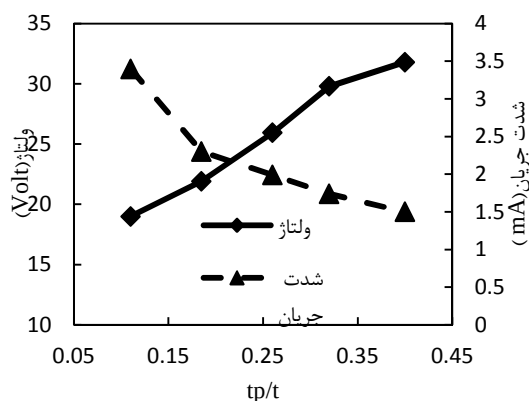


شکل ۱۱ - تغییرات مقاومت الکتریکی بهینه و ظرفیت خازنی بر حسب عرض تیر

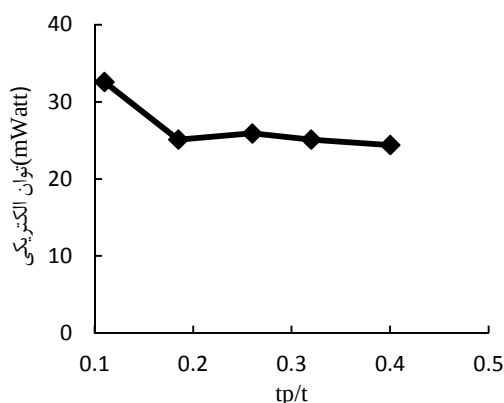
از نمودارهای ارائه شده در این قسمت می‌توان استنباط کرد که با افزایش عرض بای‌مورف، نقطه پیک ولتاژ مدار بسته تقریباً ثابت باقی می‌ماند اما با افزایش عرض تیر، شدت جریان عبوری و میزان توان تلف شده در بار الکتریکی افزایش یافته است و میزان تغییر در توان و شدت جریان نسبت به حالت تغییر طول تیر بسیار قابل ملاحظه‌تر است، با افزایش عرض تیر (طول جرم ثابت

### ۳-۱-۳- تغییر نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل بای‌مورف

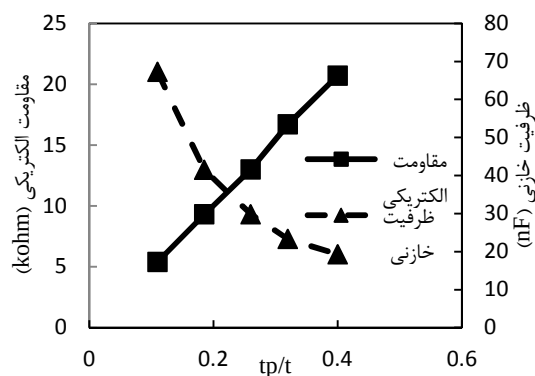
تغییرات شدت جریان و ولتاژ الکتریکی عبوری از مقاومت (بار الکتریکی) بهینه  $R_{opt}$  در فرکانس تشدید بر اساس تغییر نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل تیر در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همچنین تغییرات توان اتلاف شده در مقاومت الکتریکی  $P$ ، تغییرات بار الکتریکی  $R$  و ظرفیت خازنی بای‌مورف  $C_b$  در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ آمده است.



شکل ۱۴- تغییرات شدت جریان و ولتاژ بر حسب نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل بای‌مورف



شکل ۱۵- تغییرات توان بر حسب نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل بای‌مورف



شکل ۱۶- تغییرات مقاومت الکتریکی بهینه و ظرفیت خازنی بر حسب نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل بای‌مورف

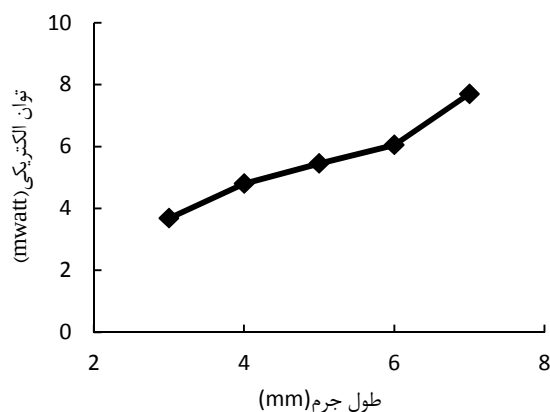
در نمودارهای فوق، نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل تیر  $tp/t$  نمایش داده شده است که در آن  $tp=0.08-0.28mm$  و  $t=2tp+ts=0.7mm$  در نظر گرفته شده است. از نمودارهای ارائه شده به روشنی مشخص است که با افزایش  $tp/t$  ولتاژ الکتریکی دو سر مقاومت الکتریکی افزایش یافته و شدت جریان عبوری از آن کاهش می‌یابد در نتیجه، توان تلف شده در بار الکتریکی تقریباً ثابت می‌ماند. دلیل آن این است که با افزایش  $tp/t$  فرکانس طبیعی سیستم کاهش یافته و به دلیل وابستگی شدید توان به فرکانس، توان برداشت شده نیز کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به کاهش فرکانس و کاهش ظرفیت خازنی بای‌مورف، بار الکتریکی بهینه نیز با افزایش نسبت ضخامت، افزایش می‌یابد. از نمودار توان بر حسب تغییر ضخامت بر می‌آید که تغییرات نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل تیر تأثیر چندانی در میزان توان برداشت شده ندارد اما به طور کلی هر چه میزان ضخامت لایه پیزوالکتریک کمتر باشد، بای‌مورف قادر به تولید شدت جریان و توان الکتریکی بیشتری می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر در نمودار ولتاژ و شدت جریان این است که تغییر نسبت ضخامت سبب افزایش ولتاژ و کاهش شدت جریان عبوری از مقاومت الکتریکی می‌شود. بنابراین با تغییر نسبت ضخامت ها می‌توان به نسبت ولتاژ به جریان مورد نظر دست یافت.

### ۳-۱-۴- تأثیر ظرفیت خازنی بای‌مورف

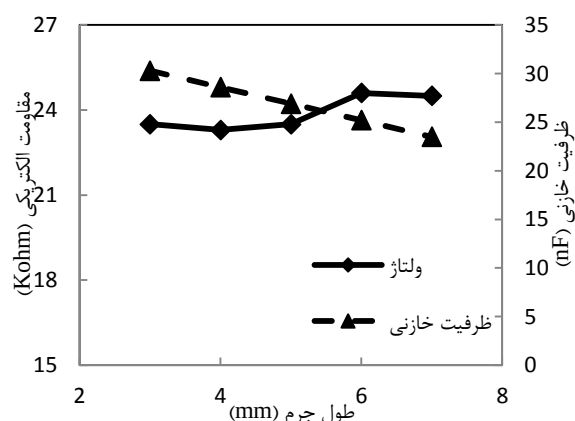
با تغییر پارامترهای هندسی، ظرفیت خازنی برداشت کننده انرژی  $C_b$  نیز دچار تغییر خواهد شد. تغییرات  $C_b$  در برابر تغییر پارامترهای هندسی در شکل ۸، شکل ۱۱ و شکل ۱۶ نشان داده شده است. برای موارد تغییر عرض تیر و تغییرات نسبت ضخامت، شدت جریان و توان الکتریکی نیز مشابه با تغییرات  $C_b$  تغییر می‌کنند، در نتیجه، در این موارد  $C_b$  پارامتر تعیین کننده می‌باشد؛ اما در مورد تغییرات طول تیر، کمیت‌های الکتریکی برخلاف تغییرات  $C_b$  تغییر می‌کنند و این بدان معنی است که پارامتر تعیین کننده میزان کمیت‌های الکتریکی عاملی غیر از  $C_b$  بوده و تنها پارامتری که می‌تواند چنین تأثیری بگذارد فرکانس طبیعی سیستم می‌باشد.

### ۳-۲- بررسی تأثیر ابعاد جرم اضافه شده در انتهای آزاد تیر

در این قسمت با استفاده از روشی مشابه با بررسی تأثیر پارامترهای هندسی تیر بر متغیرهای الکتریکی  $(P, i, V, C_b, R_{opt})$ ، تأثیر تغییرات مشخصه‌های هندسی جرم اضافه شده در انتهای آزاد تیر را شبیه سازی و بررسی می‌کنیم. نتایج این بررسی در دو بخش ارائه شده است. در بخش اول طول و ارتفاع جرم اضافه شده متغیر بوده و عرض آن ثابت فرض شده (حجم ثابت در نظر گرفته



شکل ۱۹- تغییرات توان بر حسب طول جرم



شکل ۲۰- مقاومت الکتریکی بهینه و ظرفیت خازنی بر حسب طول جرم

آنچه که از نمودار شکل ۱۸ و شکل ۱۹ مشخص است آن است که با افزایش طول جرم و کاهش ارتفاع آن شدت جریان و ولتاژ عبوری از بار الکتریکی و توان الکتریکی برداشت شده افزایش می‌یابد، دلیل اصلی این امر آن است که با افزایش طول جرم  $l_m$ ، طول سطح تحت پوشش الکتروود  $l_b$  کاهش یافته و در نتیجه فرکانس سیستم افزایش می‌یابد. تأثیر این پارامترها را می‌توان به وضوح در مدل مدار الکتریکی معادل مشاهده کرد به طوری که افزایش  $l_m$  سبب افزایش  $k_1, k_2$  و در نتیجه کاهش فرکانس طبیعی سیستم می‌شود ( $\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, k = \frac{c_p}{k_1 k_2}$ ). نکته قابل توجه در شکل ۲۰ آن است که مقدار بار الکتریکی بهینه تقریباً ثابت می‌ماند ولی توان الکتریکی آن افزایش می‌یابد که از این امر می‌توان برای بالا بردن توان الکتریکی در بار ثابت استفاده کرد.

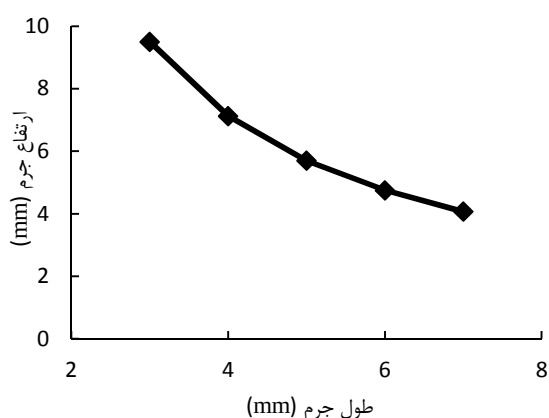
### ۳-۲-۲- عرض و ارتفاع جرم متغیر

تغییرات شدت جریان و ولتاژ الکتریکی عبوری از بار الکتریکی بهینه  $R_{opt}$  در فرکانس تشدید بر اساس تغییر عرض جرم (و در نتیجه تغییر ارتفاع جرم) در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

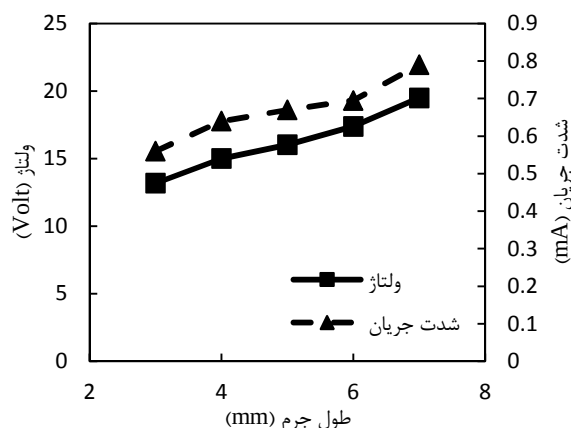
شده است) و در بخش دوم طول ثابت و عرض و ارتفاع متغیر در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲-۱- طول و ارتفاع جرم متغیر باشد

نحوه تغییرات طول و ارتفاع جرم در نظر گرفته شده در این بخش در شکل ۱۷ آمده است. همچنین تغییرات شدت جریان و ولتاژ الکتریکی عبوری از بار الکتریکی بهینه  $R_{opt}$  در فرکانس تشدید بر اساس تغییر طول جرم (و در نتیجه تغییر ارتفاع جرم) در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همچنین تغییرات توان اتلاف شده در مقاومت الکتریکی  $P$ ، تغییرات بار الکتریکی  $R$  و ظرفیت خازنی بای‌مورف  $C_b$  در شکل ۱۹ و شکل ۲۰ آمده است.

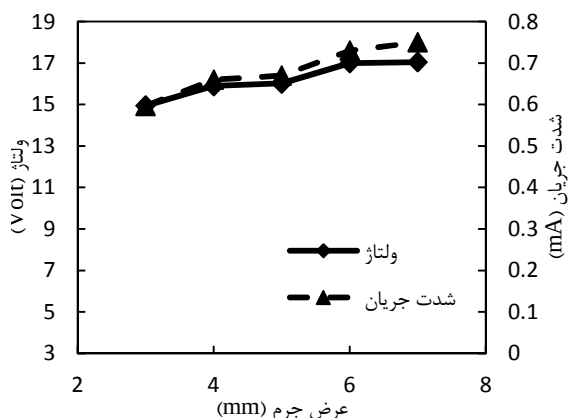


شکل ۱۷- تغییرات ارتفاع جرم بر حسب طول جرم

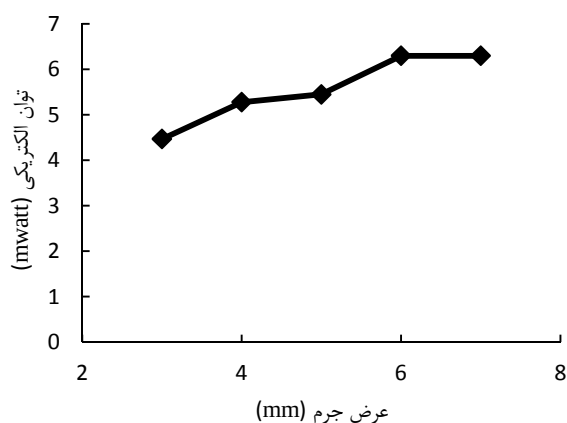


شکل ۱۸- تغییرات شدت جریان و ولتاژ بر حسب طول جرم

همچنین تغییرات توان اتلاف شده در مقاومت الکتریکی  $P$ ، در شکل ۲۲ آمده است.



شکل ۲۱- تغییرات شدت جریان و ولتاژ بر حسب تغییر عرض جرم



شکل ۲۲- تغییرات توان بر حسب تغییر عرض جرم

با افزایش عرض جرم  $C_m$  از عدد ۱ (که برای حالت جرم متمرکز در نظر گرفته شده است) فاصله بیشتری گرفته در نتیجه باعث افزایش فرکانس طبیعی سیستم می‌شود. در نتیجه با افزایش عرض جرم، می‌توان ولتاژ، جریان و توان الکتریکی بیشتری برداشت کرد. البته باید توجه کرد که با افزایش عرض جرم، استفاده از روش‌های تحلیلی فاصله بیشتری با واقعیت دارد.

### ۳-۳- بهینه‌سازی

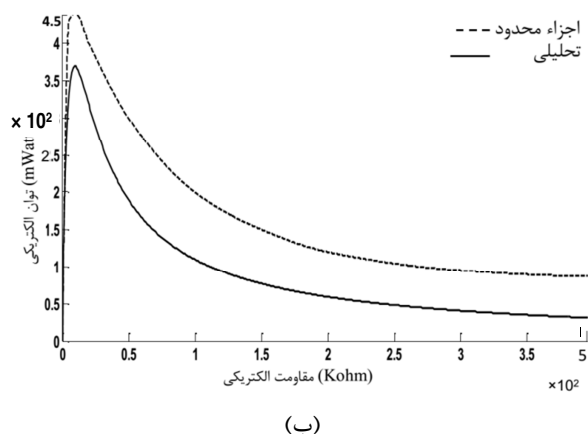
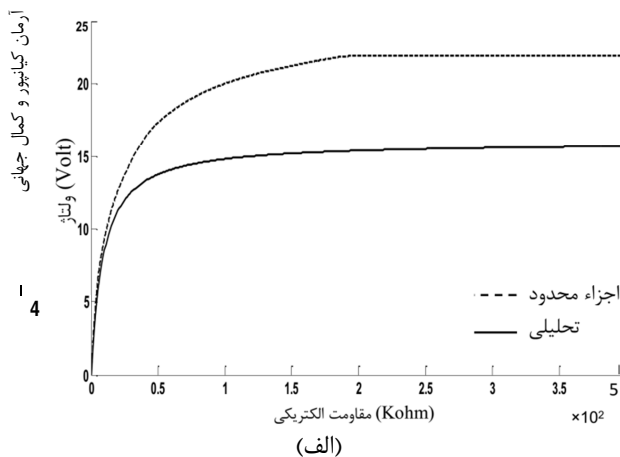
همانطور که از فرمول‌های ارائه شده در بخش‌های قبلی برمی‌آید، توان و ولتاژ الکتریکی برداشت شده تابعی از ابعاد برداشت‌کننده می‌باشد. بنابراین جهت رسیدن به حداکثر انرژی برداشت شده، بهینه کردن ابعاد برداشت‌کننده لازم و ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی که روش‌های بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های کلاسیک ریاضی دارای محدودیت‌هایی نظیر رسیدن به نقاط بهینه محلی به جای بهینه‌های سراسری و ... می‌باشند، در بسیاری از مسائل مهندسی استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی<sup>۲</sup> جهت بهینه‌سازی نسبت به روش‌های کلاسیک ریاضی ترجیح داده می‌شود. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی است که بر مبنای استفاده از علم ژنتیک، وراثت، جهش، انتخاب تصادفی و تقاطع عمل می‌کند. در اینجا با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و اعمال الگوریتم ژنتیک جهت رسیدن به حداکثر توان الکتریکی با در نظر گرفتن شرایط مرزی مطابق جدول ۵، هندسه بهینه شده برای برداشت‌کننده انرژی مطابق جدول ۶ به دست آمده است. لازم به ذکر است که جنس لایه‌های پیژوالکتریک PSI-5H4E، لایه وسط برنج، جرم اضافه شده در انتهای تیر آلیاژ تنگستن در نظر گرفته شده است.

جهت رسیدن به حداکثر توان برداشت شده فرض بر آن شده که فرکانس ارتعاشات محیط و بای‌مورف با هم برابر است، ارتعاشات فقط در جهت  $y$  در نظر گرفته شده است که ۱۲۵ هرتز می‌باشد. دامنه شتاب هارمونیک پایه  $16 \text{ m/s}^2$  در نظر گرفته شده است. در نمودارهای نشان داده شده در شکل ۲۳ نحوه تغییر ولتاژ و توان الکتریکی برداشت شده در مقاومت‌های الکتریکی متفاوت با استفاده از روش تحلیلی مدار الکتریکی معادل و روش شبیه‌سازی اجزا محدود نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲۳ قابل مشاهده است، نتایج بیانگر همخوانی کلی بین روش ۱ جزء محدود و روش تحلیلی می‌باشد ولی دقت روش اجزاء محدود بخاطر استفاده از رابطه تنش- کرنش در کل طول دارای الکتروود برداشت‌کننده، دقیقتر می‌باشد. همچنین با توجه به این شکل، توان و ولتاژ الکتریکی برداشت شده توسط برداشت‌کننده انرژی بهینه شده ۴٫۴ میلی‌وات و ۹٫۳ ولت در مقاومت الکتریکی ۱۰ کیلو اهم می‌باشد. لازم به ذکر است که

شکل ۲۱ و شکل ۲۲ نشان می‌دهد که افزایش عرض و کاهش ارتفاع جرم اضافه شده در انتهای آزاد تیر، سبب افزایش شدت جریان عبوری و ولتاژ دو سر مقاومت الکتریکی و در نتیجه سبب افزایش توان برداشت شده از سیستم می‌شود. دلیل این امر افزایش یافتن فرکانس طبیعی سیستم با افزایش عرض تیر می‌باشد. نکته قابل توجه در اینجا آن است که مشاهده نحوه تغییرات پارامترهای الکتریکی با عرض و ارتفاع تیر در روش‌های تحلیلی ممکن نیست زیرا در مدل‌های ارائه شده در بخش قبل جرم به صورت متمرکز در نظر گرفته شده است. همانطور که می‌دانید هر چه ارتفاع جرم بیشتر و عرض آن کمتر باشد این فرضیه به واقعیت نزدیکتر خواهد بود اما هرچه ارتفاع جرم کمتر و عرض آن بیشتر باشد، رفتار جرم از حالت متمرکز فاصله گرفته و بیشتر به رفتار صفحه<sup>۱</sup> نزدیک می‌شود، اگر رابطه فرکانس طبیعی سیستم را به صورت  $\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{C_m}}$  که در آن  $C_m \leq 1$  می‌باشد

<sup>2</sup> Evolutionary Algorithms

<sup>1</sup> Plate



شکل ۲۳- نحوه تغییرات ولتاژ (الف) و توان الکتریکی (ب) برداشت شده از هندسه بهینه در مقاومت‌های الکتریکی متفاوت

جدول ۷- ابعاد چند هندسه برداشت کننده بر حسب (mm)

| $l$ | $l_b$ | $l_e$ | $l_m$ | $h_m$ | $w_m$ | $w$ |                    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--------------------|
| ۲۵  | ۱۸    | ۱۸    | ۷     | ۴     | ۸     | ۱۲  | هندسه بهینه شده    |
| ۲۱  | ۱۸    | ۱۸    | ۳     | ۷     | ۱۰    | ۸   | هندسه بهینه نشده ۱ |
| ۲۹  | ۲۴    | ۲۴    | ۵     | ۶     | ۶     | ۱۹  | هندسه بهینه نشده ۲ |
| ۲۵  | ۱۳    | ۱۳    | ۱۲    | ۲     | ۶     | ۷   | هندسه بهینه نشده ۳ |

تعداد المان‌های مدلسازی انجام شده حدود ۱۵۰۰۰ المان می‌باشد. نکته قابل توجه در این نمودار آن است که مقدار توان برداشت شده کمتر از مقدار توان برداشت شده از نمودارهای قبل از بهینه‌سازی است و این امر بدان دلیل است که محدودیت‌های اندازه، فرکانس و... که در حالت بهینه در نظر گرفته شده و اینکه پارامترهای الکتریکی به شدت به آن‌ها وابسته است، در حالت‌های قبلی در نظر گرفته نشده است و صرفاً جهت مشاهده روند تغییرات ارائه شده‌اند. بدین منظور چند هندسه بهینه نشده برداشت‌کننده که دارای فرکانس ۱۲۵ هرتز و محدودیت حجم ۱ سانتیمتر مکعب و دیگر محدودیت‌های ذکر شده در جدول ۵ می‌باشد جهت مشاهده روند تغییرات تا قبل از بهینه‌سازی و مقایسه با حالت بهینه در جدول ۷ ارائه شده و نمودار مقایسه توان برداشت شده از آن‌ها در شکل ۲۴ نیز قابل مشاهده است. همانگونه که از این شکل مشخص است، هندسه بهینه شده دارای بیشترین توان می‌باشد.

جدول ۵- قیود الگوریتم ژنتیک

$$P = \frac{1}{2\omega^2} \frac{RC_b^2 \left( \frac{k_{31}t_p}{k_2} \right)^2 \frac{C_F A_{in}^2}{\epsilon}}{(4\zeta^2 + (k_{31})^4)(RC_b\omega)^2 + 4\zeta k_{31}^2 (RC_b\omega) + 4\zeta^2}$$

تابع هدف

$$\omega = 125 \text{ Hz}, \text{ حجم} \leq 1 \text{ cm}^3$$

$$2 \leq l \leq 50, 1 \leq l_b \leq 30, 1 \leq l_e \leq 30, 1 \leq l_m \leq 15$$

قیود (واحدها بر حسب mm است)

$$1 \leq h_m \leq 10, 5 \leq w_m \leq 20, 5 \leq w \leq 20$$

$$t_p = 0.2 \text{ mm}, t_s = 0.1 \text{ mm}, A_{in} = 16 \text{ m}^2/\text{s}^2, \zeta = 0.015$$

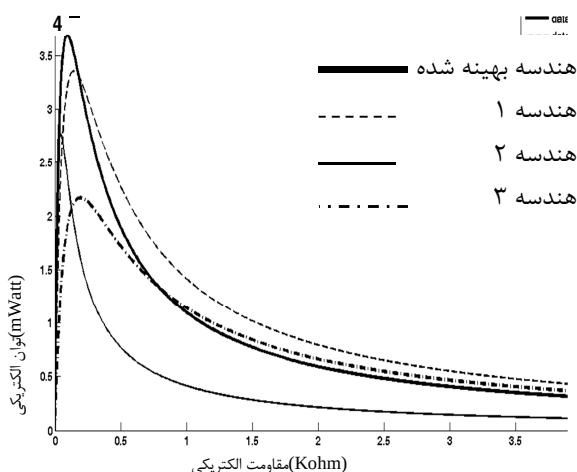
جدول ۶- ابعاد بهینه شده (بر حسب mm)

| $l$ | $l_b$ | $l_e$ | $l_m$ | $h_m$ | $w_m$ | $w$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| ۲۵  | ۱۸    | ۱۸    | ۷     | ۴     | ۸     | ۱۲  |

<sup>1</sup> Fitness function

## مراجع

- [1] Shen D., Ajitsria J., ChoeS Y., Kim D. J., "Evaluation and Modeling of Power Generator with Bimorph PZT Cantilever", MRS Symposia Proceedings Materials Research Society, Pittsburgh, vol. 966, pp. 7–29, 2007.
- [2] Roundy S., Leland Eli S., Baker J. , Carleton Eric , Reilly Elizabeth ,LaiElaine, OtisBrian, Jan. M. Rabaey, Paul Wright K.,SundararajanV., "Improving power output for vibration-based energy scavengers", IEEE Pervasive Computing vol. 4, pp. 28-36, 2005.
- [3] Amirtharajah R., Chandrakasan A. P., "Self-powered signal processing using vibration-based power generation", IEEE J. Solid-State Circuits vol. 33 no. 5, pp. 687–695, 1998.
- [4] Elhami M., Glynn-Jones P., White N. M., Hill M., Beeby S., James E., Brown A. D., Ross J. N., "Design and fabrication of a new vibration-basedelectromechanical power generator Sensors Actuators", A Phys vol. 91 pp. 335–342, 2001.
- [5] Meninger S., Mur-Miranda J. O., Amirtharajah R., Chandrakasan A. P. and Lang J. H., "Vibration-to-electric energy conversion", IEEE Trans Very Large Scale Integr. (VLSI) Syst,vol. 9, pp. 64–76, 2001.
- [6] Roundy S., Wright P. K., PisterK. S. J., "Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters", ASME IMECE, New Orleans, LA, Nov, 2002.
- [7] Shenck N. S., ParadisoJ., "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectricsMicro", IEEE, vol. 21, no.3pp. 30–41, 2001.
- [8] Glynn-Jones P., BeebyS. P., James E. P. and White N. M., "The modeling of a piezoelectric vibration powered generator for microsystems",In: 11th international conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, 10-14 June, Transducers 01/Euro sensors XV, 2001.
- [9] Jeon Y. B., Sood R., Jeong J. H., Kim S. G., "MEMSpower generator with transverse mode thin film PZT Sens Actuators", A Phys vol. 122, pp. 16-22, 2005.
- [10] Mitchson P. D., Yeatman E. M., RaoG. K., Holmes A. S., Green T. C., "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices", Proc. IEEE, vol. 96, no. 9, pp. 1457–1486, 2008.
- [11] Beeby S. P., Tudor M. J., White N. M., "Energy harvesting vibration sources for micro systems applications", MeasSciTechnol, Vol. 17, pp. 175-195, 2006.
- [12] Roundy S., Wright P. K., "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics", Smart Mater Struct, Vol. 13, pp. 1131–1142, 2004.
- [13] Mateu L., Moll F., "Optimum piezoelectric bending beam structure for energy harvesting using shoe inserts", J. Intell Mater SystStruct vol. 16 no. 10, pp. 835–845, 2005.
- [14] Shu Y. C., Lien I. C., "Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems", Smart Mater Struct, vol. 15, pp. 1499–1512, 2006.



شکل ۲۴- مقایسه توان برداشت شده از چند هندسه بهینه نشده و بهینه شده

## ۳- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، چگونگی تأثیر پارامترهای هندسی بر پارامترهای الکتریکی بررسی شده که نتایج بررسی مذکور به طور خلاصه بدین قرار است:

برای تیر: طول کوتاه‌تر، عرض بیشتر و نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل کمتر با در نظر گرفتن جرم ثابت در انتهای تیر، ترجیح داده می‌شود.

برای پارامترهای جرم: طول جرم بیشتر و ارتفاع کمتر، در حالتی که عرض جرم ثابت فرض شود و در نظر گرفتن عرض بزرگتر و ارتفاع کمتر جهت رسیدن به توان الکتریکی بیشتر، با فرض ثابت بودن کل جرم انتهای تیر، ترجیح داده می‌شود.

پس از بهینه سازی ابعاد بای‌مورف با بکارگیری الگوریتم ژنتیک و مدلسازی آن در نرم‌افزار ANSYS و مقایسه نتایج آن با روش تحلیلی می‌توان به نتایج زیر دست یافت

همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصله تطابق قابل قبولی با هم دارند و اختلاف مشاهده شده بین نتایج تحلیلی و اجزا محدود ناشی از آن است که در روش تحلیلی (روش مدار الکتریکی معادل) از تنش میانگین به جای تنش واقعی استفاده شده لذا در منابع ارتعاشی با دامنه شتاب بالا این اختلاف بیشتر می‌شود لذا استفاده از روش اجزا محدود در این حالت نتایج دقیق‌تری را نتیجه خواهد داد و همانطور که نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند، می‌توان ۴/۴ میلی‌وات توان الکتریکی در ۹/۳ ولت از منبع ارتعاشی هارمونیک پایه مورد نظر، انرژی برداشت کرد. که این مقدار انرژی برای تغذیه شبکه‌های سنسوری بی‌سیم کافی می‌باشد.

- [15] Lu F., Lee H. P., Lim S. P., "Modelling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications", Smart Mater Struct vol. 13, no. 1, pp. 57–63, 2004.
- [16] Erturk A., Inman D. J., "A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters", J VibraAcoust vol. 130, no. 4, 041002, 2008.
- [17] Zhu M., Worthington E., NjugunaJ., "Analyses of power output of piezoelectric energy harvesting devices directly connected to a load resistor using a coupled piezoelectric-circuit finite element method", IEEE Trans UltrasonFerroelectrFreq Control vol. 56, no. 7, pp. 1309–1318, 2009.
- [18] Asgharzadeh M. R., Jahani K., Kianpoor A., SadeghiM. H., "Energy Harvesting Investigation from Unimorph Trapezoidal Beam Vibrations using Distributed Parameters Method", Modares Mechanical Engineering, vol. 14, no. 15, pp. 96-102, 2015 (In Persian).
- [19] "DLE-55 Operator's Manual Hobbico, Inc", 2010.
- [20] David H., Harmonic sweep. <http://ansys.net/tips/harmonic-large-massmethod.pdf>, 2000.