مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 233-241

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی استحصال‌کننده انرژی از ارتعاشات ناشی از گلوپینگ به کمک مواد پیزوالکتریک

سیما سبحانی‌راد[1]، عارف افشارفرد[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 9177948974، afsharfard@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 مرداد 1396

پذیرش: 25 شهریور 1396

ارائه در سایت: 28 مهر 1396

کلید واژگان:

استحصال انرژی

بررسی تجربی

گلوپینگ

مواد پیزوالکتریک

چکیده

در این پژوهش یک سیستم برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از گلوپینگ با استفاده از سینک‌های غیرخطی استحصال انرژی طراحی شده است. به همین منظور معادلات حرکت و سیستم برداشت کننده انرژی نوشته شده و نتایج تئوری با نتایج آزمایش تجربی مقایسه شده است. سپس سه گام برای عملکرد موثر سیستم ارائه شده است. در گام اول، سه هندسه سطح مقطع برای جسم بلاف بررسی و نتایج با روش هارمونیک بالانس تأیید شده است. این نتایج نشان می‌دهد که سطح مقطع مثلثی می‌تواند انرژی بیشتری را تولید کند. با استفاده از این نتیجه در گام دوم تأثیر مقاومت الکتریکی بر سیستم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین انرژی برای مقدار مقاومت الکتریکی بیش از 1 MΩ تولید می‌شود. در سومین گام، تأثیر مقدار جرم نوک بر سیستم بررسی و نشان داده شده است که افزایش مقدار جرم نوک توان تولیدی را افزایش می‌دهد، در صورتی که دامنه ارتعاشات جسم بلاف ثابت باقی می‌ماند؛ بنابراین سیستم برای حداکثر مقدار ممکن جرم نوک یعنی 35.3 gr طراحی می‌شود. در نهایت این سیستم با مقطع مثلثی جسم بلاف و مقدار مقاومت الکتریکی میانگین 10 MΩ و در سرعت باد 2.5 m/s می‌توان‌د ولتاژ 700 mV را تولید کند. این سیستم با جرم کل کمتر از 500 gr و ارتعاشات با دامنه پایین طراحی شده است تا در سرعت‌های پایین باد مناسب عمل کند و مدلی کارآمد را برای سیستم‌های استحصال انرژی با توان کم معرفی نماید.

Experimental study of galloping-based energy harvesting system using piezoelectric materials

Sima Sobhanirad[1], Aref Afsharfard[1*]

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 9177948974, Mashhad, Iran, afsharfard@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 August 2017
Accepted 16 September 2017
Available Online 20 October 2017

Keywords:
Energy harvesting
Experimental study
Galloping
Piezoelectric material

ABSTRACT

In this study, a galloping-based energy harvesting system is designed using a nonlinear energy harvesting sink (NES). In doing so, electromechanical equations of motion for the energy harvesting system are derived and the theoretical results are validated with experimental results. Then, three steps are presented to make the system work efficiently. In the first step, several cross-section geometries for the bluff body are investigated and the results are verified by the Harmonic Balance Method. These results indicate that isosceles triangular section can harvest more energy than the other ones. In the second step, effect of changing the electrical load resistance on electromechanical behavior of the system is investigated and it is demonstrated that the maximum energy is harvested for load resistance values of more than 1 MΩ. In the third step, influence of changing the tip mass on the system is studied and it is shown that increasing the tip mass leads to increase in the output voltage while the bluff body amplitudes remain constant. Consequently, the system is designed to work with the maximum possible tip mass which is about 35.3 gr. Finally, this system with a bluff body of isosceles triangular section can generate 700 mV using the load resistance value of 10 MΩ in the wind speed of 2.5 m/s. This system with the total mass of less than 500 gr and low-amplitude oscillations is designed to work properly in low wind speeds and presents an efficient application for low-power energy harvesting systems.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر بسیاری از محققان به بررسی روش‌های استحصال انرژی از منابع جبران‌پذیر مانند منابع انرژی مکانیکی، حرارتی، زمین- گرمایی، خورشیدی و غیره پرداخته‌اند. از میان منابع یادشده استفاده از منابع ارتعاشات مکانیکی آسان‌تر و در دسترس‌تر است و یکی از منابع شناخته شده آن ارتعاشات ناشی از جریان است. در این نوع از ارتعاشات جسمی که در برابر جریان سیال قرار می‌گیرد، در جهت عمود بر حرکت سیال می‌تواند ارتعاش کند. ارتعاشات ناشی از گردابه[1] [1]، فلاتر[2] [2] و گلوپینگ[3] [3] به عنوان سه مکانیزم اصلی ارتعاشات ناشی از جریان محسوب می‌شوند.

[1] Vortex Induced Vibration (VIV)
[2] Flutter
[3] Galloping

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Sobhanirad, A. Afsharfard, Experimental study of galloping-based energy harvesting system using piezoelectric materials, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 207-216, 2017 (in Persian)

در ارتعاشات ناشی از گردابه با افزایش سرعت جریان برای بازه‌ای خاص، فرکانس سیال با فرکانس سیستم برابر می‌شود و پدیده قفل‌شدگی[1] اتفاق می‌افتد. در این بازه دامنه ارتعاشات سیستم افزایش قابل توجهی یافته و پس از آن با افزایش سرعت سیال دامنه ارتعاشات به تدریج کاهش می‌یابد. این ارتعاشات می‌تواند یک بعدی، دو بعدی و یا سه بعدی باشد.

در ارتعاشات ناشی از پدیده گلوپینگ، مدل‌سازی ارتعاشات سیستم به صورت یک بعدی انجام می‌شود و با افزایش سرعت جریان سیال، دامنه ارتعاشات سیستم برای سرعت خاصی افزایش ناگهانی دارد. این سرعت خاص سرعت شروع گلوپینگ[2] نام دارد. دامنه ارتعاشات با افزایش سرعت جریان سیال افزایش می‌یابد تا زمانی که میرایی سیستم آن را محدود کند و یا سیستم از بین برود.

فلاتر نیز به عنوان پدیده‌ای دوبعدی شناخته می‌شود که در آن جسم علاوه‌بر ارتعاشات عمود بر حرکت جریان سیال در جهت دورانی نیز ارتعاش می‌کند. از میان سه پدیده یادشده فلاتر و گلوپینگ رفتار رزونانسی ندارند و در نتیجه روند استحصال انرژی از آن‌ها به بازه خاصی از فرکانس محدود نمی‌شود [4].

به طور کلی برای استفاده از این منابع سه روش برداشت انرژی شامل استفاده از مبدل‌های الکترومگنتیک [5]، الکترواستاتیک [6] و پیزوالکتریک [7-11] معرفی شده است. از میان روش‌های یادشده مبدل‌های پیزوالکتریک برای بازه وسیعی از فرکانس قابل استفاده است و می‌توان نتیجه گرفت که گزینه مناسبی برای استحصال انرژی از منابع ارتعاشاتی محسوب می‌شوند [12]. همچنین اتصال جرم نوک[3] به تیر با وصله پیزوالکتریک می‌تواند بازده برداشت انرژی از این منابع را بهبود دهد [13]. این نکته نیز قابل بیان است که برای برداشت انرژی با استفاده از مواد پیزوالکتریک، منابع ارتعاشات گلوپینگ کارآمدتر از فلاتر است، چون درجه آزادی دورانی موجود در فلاتر برای این نوع برداشت انرژی قابل استفاده نیست [14].

با توجه به مطالب بالا برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از گلوپینگ با استفاده از مواد پیزوالکتریک به عنوان یکی از بهترین روش‌های استحصال انرژی معرفی می‌شود و تمرکز این پژوهش بار این روش است. در ادامه به چند نمونه از پژوهش‌های بررسی رفتار سیستم و پارامترهای مؤثر بر آن در برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از گلوپینگ پرداخته می‌شود.

نخستین بار دن‌هارتوگ در سال 1934 [15] مدلی برای ارتعاشات ناشی از گلوپینگ مطرح کرد. براساس این مدل معیار شروع گلوپینگ زمانی است که میرایی سیستم منفی شده و حرکت سیستم ناپایدار شود. پس از او پژوهشگران بسیاری به مدل‌سازی این پدیده پرداخته‌اند که مدل سیال الاستیک رایج‌ترین آن است. در این مدل نیروهای وارد بر جسم بلاف[4] به صورت تابعی از سرعت سیال، سرعت جسم بلاف، تصویر مقطع عمود بر جریان، طول جسم بلاف و چگالی سیال ارائه می‌شود. با استفاده از این تابع مدل‌هایی توسط نواک [16] برای سطح مقطع مربع و سیستم پیوسته، پارکینسون و همکاران [17] برای سطح مقطع مربع در جریان سیال با بازه عدد رینولدز 33000 تا 66000، نواک [18] برای مقاطع مستطیل و نیم دایره در جریان سیال با عدد رینولدز 10^5، بارروگیل و همکاران [19] برای مقطع مربع و جریان سیال با اعداد رینولدز کمتر از 200 ارائه شده است.

بارروگیل و همکاران [20] به گردآوری اطلاعات چند سطح مقطع رایج پرداختند و برای هر مورد ضرایب مورد استفاده در تابع را محاسبه و امکان برداشت انرژی از آن را بررسی کردند.

عبدالکفی و همکاران [21] امکان استحصال انرژی از جسم بلاف را با استفاده از نتایج پژوهش بارروگیل و همکاران [19] برای مقطع مربع و جریان سیال با اعداد رینولدز کمتر از 200 بررسی کردند و به ازای سرعت سیال 15m/s، حداکثر توان تولیدی 1.8W را به‌دست آوردند. نتیجه دیگر این پژوهش را می‌توان امکان استحصال انرژی در در اعداد رینولدز پایین با بهینه‌سازی مقدار مقاومت الکتریکی دانست.

لیا و همکاران [22] از نتایج پژوهش نواک و همکاران [18] استفاده کرده و امکان برداشت انرژی از جسم بلاف با مقطع مربع متصل به تیر همراه با پیزوالکتریک را بررسی کردند. آن‌ها نتایج حل تئوری را با نتایج آزمایش تجربی مقایسه کردند و حداکثر توان الکتریکی 8.4mW را برای سرعت باد 8m/s به‌دست آوردند.

در دو پژوهش دیگر نیز عبدالکفی و همکاران از نتایج پژوهش بارروگیل [20] استفاده و تأثیر سطح مقطع جسم بلاف صلب [23] و جسم بلاف متصل به تیر همراه با پیزوالکتریک [24] بر توان تولیدی را بررسی کردند. در هر دو پژوهش مشخص شد که بیشترین توان را جسم بلاف با مقطع مثلث متساوی‌الساقین با زاویه رأس 30 درجه و نیم‌دایره به ترتیب برای سرعت‌های پایین و بالای باد تولید می‌کند.

ژائو و یانگ [25] عملکرد مدارهای الکتریکی را بر رفتار سیستم استحصال‌کننده انرژی ناشی از پدیده گلوپینگ را بررسی و عبارت صریحی برای میزان توان خروجی و دامنه نوسانات جسم مرتعش ارائه کردند. در پژوهش آن‌ها سرعت شروع پدیده گلوپینگ به هنگام استفاده از مدارهای الکتریکی مختلف ارائه شده است.

در مطالعات دیگری نیز به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر برداشت انرژی از جریان پرداخته شده است که از آن جمله می‌توان به نسبت جرمی[5] و میرایی [26]، ابعاد طول تیر [27]، سرعت سیال [21]، نحوه تحریک پایه [29,28]، دما [30]، ظرفیت الکتریکی و القاء مغناطیسی [31]، جرم ثانویه[6] [33,32] و آرایش پشت سرهم دو استوانه[7] [34] اشاره کرد.

در پژوهشی دیگر دای و همکاران [35] به صورت تئوری برداشت انرژی از نوسانات یک تیر یکسرگیردار با وصله پیزوالکتریک و جرم نوک که در داخل جسم بلاف در جریان سیال تعبیه شده است را بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش به مطالعه تأثیر مقدار جرم نوک و مقاومت الکتریکی بر سرعت شروع گلوپینگ و توان خروجی پرداختند. سیستم ارائه شده توسط آن‌ها می‌تواند هم‌زمان انرژی تولید و ارتعاشات جسم بلاف را نیز کنترل کند.

در مقاله حاضر برداشت انرژی از ارتعاشات تیر یکسر درگیر– یکسر راهنما[8] با وصله پیزوالکتریک و جرم نوک در داخل جسم بلاف در جریان سیال مطالعه شده است. در این راستا تأثیر شکل هندسی سطح مقطع جسم بلاف، تغییر مقاومت الکتریکی و تغییر مقدار جرم نوک بر ولتاژ خروجی بررسی خواهد شد. در پژوهش‌های پیشین استحصال انرژی از ارتعاشات تیر یکسر درگیر- یکسر راهنما که در در داخل جسم بلاف تعبیه شده باشد؛ مورد بررسی قرار نگرفته است. البته باید در نظر داشت که شرط مرزی یادشده به دلیل شرایط خاصی که انحناء تیر به وجود می‌آورد، تغییرات مهمی را در رفتار الکترومکانیکی سیستم به وجود خواهد آورد که به آن اشاره خواهد شد.

[1] Lock-in
[2] Onset speed of galloping
[3] Tip mass
[4] Bluff body
[5] Mass ratio
[6] Dual mass
[7] Tandem arrangement
[8] Clamped-guided

از این‌رو به طور کلی رفتار سیستم‌های استحصال کننده انرژی با شرایط مرزی متفاوت از یکسر درگیر به صورت گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته است. این در حالی است که این سیستم‌ها با توجه به قیدهای بیشتر حرکتی کاربردهای بیشتری در تجهیزات واقعی استحصال انرژی خواهند داشت. سیستم مورد مطالعه در این پژوهش می‌تواند نمونه‌ای از کاربرد این سیستم‌ها باشد، همچنین در این پژوهش درستی حل عددی با نتایج حاصل از روش نیمه‌تحلیلی بالانس هارمونیک و آزمایش تجربی سنجیده شده است.

2- معادلات حرکت حاکم بر مسأله

مدل شماتیک برداشت‌کننده انرژی در شکل 1 نشان داده شده است. در این شکل دو تیر یکسر گیردار- یکسر درگیر با وصله پیزوالکتریک سراسری و جرم نوک M_{tip} در وسط نشان داده شده است. این تیر در داخل جسم بلاف با جرم M_{bb} در معرض جریان قرار دارد و به وسیله میراگر ویسکوز با مقدار ضریب میرایی C و فنر با سختی K به زمین متصل است. در این شکل t، w و L به ترتیب ضخامت، عرض و طول است و بالانویس یا زیرنویس b، p و bb به ترتیب به تیر، وصله پیزوالکتریک و جسم بلاف اشاره دارد. جابه‌جایی جسم بلاف با w_1 و جابه‌جایی تیر با w_2 نشان داده شده است. شکل مقطع جسم بلاف نیز می‌تواند به صورت مربعی، مثلثی و نیم‌دایره باشد.

معادله انرژی پتانسیل سیستم بالا به صورت رابطه (1) نوشته می‌شود. در این رابطه V، E_{b}، E_{p}، d_{31} و L_{e} به ترتیب ولتاژ، مدول الاستیسیته تیر و وصله پیزوالکتریک، ثابت کرنش پیزوالکتریک و طول مؤثر بر ضریب کوپل الکترومکانیکی را نشان می‌دهد.

$$\pi = \int_0^L E_{\text{b}} w_{\text{b}} t_{\text{b}} \left(-z\frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}\right)^2 dx + \int_0^L E_{\text{p}} w_{\text{p}} t_{\text{p}} \left(-z\frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}\right)^2 dx + \int_0^{L_{\text{e}}} E_{\text{p}} d_{31} w_{\text{p}} V \left(-z\frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}\right) dx + \frac{1}{2} K w_1^2 \tag{1}$$

معادله انرژی جنبشی سیستم نیز به صورت رابطه (2) نوشته می‌شود و ρ چگالی را نشان می‌دهد.

$$\text{T} = \int_0^L \rho_{\text{b}} w_{\text{b}} t_{\text{b}} (\dot{w}_2 + \dot{w}_1)^2 dx + \int_0^L \rho_{\text{p}} w_{\text{p}} t_{\text{p}} (\dot{w}_2 + \dot{w}_1)^2 dx + \frac{1}{2} M_{\text{bb}} \dot{w}_1^2 + \frac{1}{2} M_{\text{tip}} \left(\dot{w}_1 + \frac{\partial w_2}{\partial t}\bigg|_{x=L}\right)^2 \tag{2}$$

انرژی الکتریکی داخلی با توجه به قانون گاوس به صورت رابطه (3) نوشته

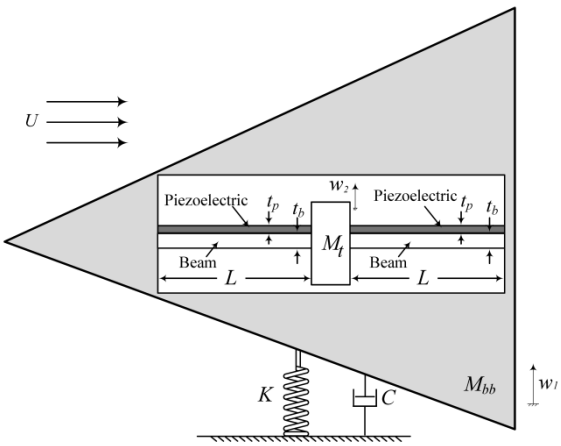

Fig. 1 Schematic model of the energy harvester

شکل 1 مدل شماتیک برداشت‌کننده انرژی

می‌شود که در آن $\bar{e}_{31}$ و e_{33} به ترتیب ثابت تنش مؤثر پیزوالکتریک و مؤلفه القاگر در ثابت کرنش نامیده می‌شود.

$$W_{\text{ie}} = \int_0^{L_{\text{e}}} E_{\text{p}} d_{31} w_{\text{p}} V \left(-z\frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}\right) dx - e_{33} w_{\text{p}} \frac{V^2}{t_{\text{p}}} \int_0^L dx \tag{3}$$

معادله کار مجازی غیرپایستار سیستم نیز به صورت رابطه (4) است که در آن c_{a} و Q به ترتیب ضریب میرایی ویسکوز و شارژ الکتریکی خروجی است که از خواص لایه پیزوالکتریک به شمار می‌روند، F نیز نیروی عمودی سیال بر جسم بلاف را نشان می‌دهد.

$$\delta W_{\text{nc}} = F\delta w_1 - C\dot{w}_1 \delta w_1 - 2\int_0^L c_{\text{a}} \dot{w}_2 dx \delta w_2 - Q\delta V \tag{4}$$

تابع جابه‌جایی تیر نیز با استفاده از تابع شکل مود نرمالیزه شده $\phi_i(x)$ و تابع پاسخ زمانی $q_i(t)$ در مود i-ام به صورت رابطه (5) نوشته می‌شود.

$$w_2(x,t) = \sum_{i=1}^{n} \phi_i(x)\, q_i(t) \tag{5}$$

با توجه به استفاده از پیزو سرامیک‌ها در پژوهش حاضر و با توجه به شکننده بودن این دسته از مواد پیزوالکتریک، گذر سیستم از مود نخست ارتعاشی، منجر به بروز لطمه به سیستم و ناتوانی آن در تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی می‌شود. برای جلوگیری از این رویداد ناخوشایند لازم است سیستم استحصال‌کننده انرژی در فرکانسی کمتر از فرکانس طبیعی اول تیر با لایه پیزوسرامیک مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو می‌توان م رابطه (5) را به صورت رابطه (6) ساده نمود که در آن $\phi(x)$ و $q(t)$ برای مود اول ارتعاشات تیر نوشته شده است.

$$w_2(x,t) = \phi(x)\, q(t) \tag{6}$$

روابط لاگرانژ برای سیستم بالا به صورت روابط (7-9) نوشته می‌شود.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{w}_1}\right) - \frac{\partial T}{\partial w_1} + \frac{\partial \pi}{\partial w_1} - \frac{\partial W_{\text{ie}}}{\partial w_1} = F - C\dot{w}_1 \tag{7}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial \pi}{\partial q} - \frac{\partial W_{\text{ie}}}{\partial q} = -2\dot{q}\int_0^L c_{\text{a}} \phi^2 dx \tag{8}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{V}}\right) - \frac{\partial T}{\partial V} + \frac{\partial \pi}{\partial V} - \frac{\partial W_{\text{ie}}}{\partial V} = Q \tag{9}$$

با جای‌گذاری روابط (1-4) در معادلات لاگرانژ و استفاده از اصل تعامد مودهای ارتعاشی، معادلات نهایی حرکت سیستم به صورت روابط (12,10) نوشته می‌شود.

$$M_{\text{eq}}\ddot{w}_1 + C\dot{w}_1 + Kw_1 = F - m^*\ddot{q} \tag{10}$$

$$m_{\text{eq}}\ddot{q} + c_{\text{eq}}\dot{q} + k_{\text{eq}} q - \theta V = -m^*\ddot{w}_1 \tag{11}$$

$$2C_{\text{p}}\dot{V} + \frac{V}{R} + \theta\dot{q} = 0 \tag{12}$$

ثابت‌های معادلات بالا به صورت روابط (13-19) است. در این معادلات θ ضریب کوپل الکترومکانیکی و C_{P} ظرفیت خازنی لایه پیزوالکتریک است.

$$M_{\text{eq}} = 2(\rho_{\text{b}} w_{\text{b}} t_{\text{b}} + \rho_{\text{p}} w_{\text{p}} t_{\text{p}})L + M_{\text{tip}} + M_{\text{bb}} \tag{13}$$

$$m^* = 2(\rho_{\text{b}} w_{\text{b}} t_{\text{b}} + \rho_{\text{p}} w_{\text{p}} t_{\text{p}}) \int_0^L \phi dx + M_{\text{tip}} \phi|_{x=L} \tag{14}$$

$$m_{\text{eq}} = 2(\rho_{\text{b}} w_{\text{b}} t_{\text{b}} + \rho_{\text{p}} w_{\text{p}} t_{\text{p}}) \int_0^L \phi^2 dx + M_{\text{tip}} \phi^2|_{x=L} \tag{15}$$

$$c_{\text{eq}} = 2c_{\text{a}} \int_0^L \phi^2 dx = 2\zeta\sqrt{k_{\text{eq}} m_{\text{eq}}} \tag{16}$$

$$k_{\text{eq}} = 2\{E_{\text{b}} I_{\text{b}} + E_{\text{p}} I_{\text{p}}\} \int_0^L (\phi'')^2 dx \tag{17}$$

$$\theta = 2w_{\mathrm{p}}z(E_{\mathrm{p}}d_{31})\int_0^{L_{\mathrm{e}}}\phi''dx \tag{18}$$

$$C_{\mathrm{p}} = w_{\mathrm{p}}Le_{33}/t_{\mathrm{p}} \tag{19}$$

کوپل الکترومکانیکی که با جای گذاری معادله انرژی پتانسیل سیستم در معادلات لاگرانژ حاصل شده است؛ با داشتن شکل مود سیستم و جای‌گذاری آن در رابطه (18) قابل محاسبه است. در نظر داشته باشید که این مقدار با توجه به تغییر تقعر لایه پیزوالکتریک متصل‌شده بر تیر یکسر درگیر- یکسر راهنما و در اثر تغییر جهت میدان الکتریکی در طول تیر پیزوالکتریک متغیر است. از این‌رو میزان کوپل الکترومکانیکی به طول مؤثر وابسته است که این مقدار متأثر از محل نصب الکترودهاست [36]، همچنین شکل مود تیر با استفاده از شرایط مرزی روابط (20-23) به صورت روابط (25,24) نوشته می‌شود. در این روابط λ به صورت تابعی از فرکانس طبیعی سیستم بوده که در رابطه (26) نشان داده شده است.

$$\phi(0) = 0 \tag{20}$$

$$\phi'(0) = 0 \tag{21}$$

$$EI\phi'''(L)q(t) = \frac{M_{\mathrm{tip}}}{2}\phi(L)\ddot{q}(t) \tag{22}$$

$$\phi'(L) = 0 \tag{23}$$

$$\phi(x) = C\{\cos\left(\frac{\lambda x}{L}\right) - \cosh\left(\frac{\lambda x}{L}\right) + \sigma(\sin\left(\frac{\lambda x}{L}\right) - \sinh\left(\frac{\lambda x}{L}\right))\} \tag{24}$$

$$\sigma = \frac{(\sin(\lambda) - \sinh(\lambda)) + \frac{M_{\mathrm{tip}}\lambda}{\rho AL}(\cos(\lambda) - \cosh(\lambda))}{(\cos(\lambda) + \cosh(\lambda)) - \frac{M_{\mathrm{tip}}\lambda}{\rho AL}(\sin(\lambda) - \sinh(\lambda))} \tag{25}$$

$$(\frac{\lambda}{L})^4 = \frac{\rho A\omega^2}{EI} \tag{26}$$

3- برپاسازی آزمایش

در این بخش سیستم استحصال‌کننده انرژی با استفاده از لرزاننده الکترومکانیکی و در شرایط استاندارد آزمایشگاهی تحریک شده و نتایج حل تئوری با نتایج تجربی مقایسه شده است. در این راستا میزان دامنه ارتعاشی و ولتاژ خروجی سیستم در اثر تحریک پایه جرم اصلی بررسی شده است. این عمل به منظور اطمینان از صحت معادلات حاکم بر رفتار الکترومکانیکی سیستم مورد بررسی انجام گرفته است. در بخش‌های بعدی پاسخ الکترومکانیکی سیستم استحصال‌کننده انرژی که معادلات حاکم بر آن در این قسمت تصدیق شده است، در معرض ارتعاشات ناشی از پدیده گلوپینگ بررسی خواهد شد.

آزمایش تجربی مطابق شکل 2 انجام گرفته که در آن رفتار الکترومکانیکی تیری یکسر درگیر- یکسر راهنما بر اثر تحریک پایه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از لرزاننده الکترومکانیکی استفاده شده که با استفاده از سیگنال ایجاد شده توسط سیگنال‌ساز[1] و تقویت‌کننده توان[2] راه‌اندازی شده است. ارتعاشات پایه و جرم نوک به ترتیب با استفاده از آمپدانس هد[3] و شتاب‌سنج[4] اندازه‌گیری و با استفاده از سیستم آنالیزگر[5] با نرخ داده‌برداری ده کیلوسمبل بر ثانیه به نمایش در آمده است، همچنین تیر با لایه پیزوالکتریک مورد استفاده از نوع پیزوسرامیک[6]ساخت شرکت گولین است. الکترود لحیم‌شده بر لایه پیزوالکتریک در فاصله 0.6mm از نقطه آغازین آن قرار گرفته که مبین طول مؤثر بر ضریب کوپل الکترومکانیکی است. بر این اساس اندازه ضریب کوپل الکترومکانیکی معادل 124.93μN/V محاسبه می‌شود. میزان ظرفیت خازنی لایه پیزوالکتریک با استفاده از مولتی‌متر معادل 184nF اندازه‌گیری شده است.

به منظور محاسبه ضریب میرایی سیستم، با توجه به این‌که سیستم به صورت تک مود ارتعاشی مورد بررسی است، پاسخ ارتعاشات آزاد سیستم به صورت تجربی استخراج شده است. نمودار پاسخ ارتعاشات آزاد سیستم در شکل 3 نشان داده شده است. در نهایت میزان ضریب میرایی سیستم با استفاده از روابط کاهش لگاریتمی محاسبه شده است. این مقدار و دیگر مشخصات سیستم در جدول 1 ارائه شده است.

در شکل‌های 5,4 مقایسه نتایج حاصل از آزمایش تجربی و نتایج تئوری به ترتیب برای مقدار شتاب جرم نوک و مقدار ولتاژ استحصال شده به نمایش در آمده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نتایج حاصل از حل عددی معادلات حاکم و نتایج تجربی از هم‌خوانی مناسبی برخوردار است.

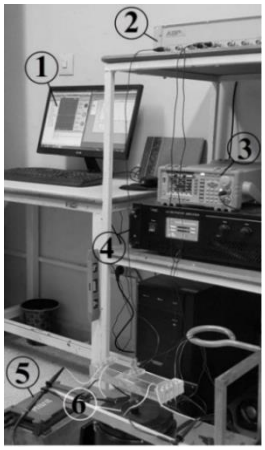

Fig. 2 Experimental used to validate equations of motion and energy harvester

1- Frequency response analyzer
2- Data acquisition system
3- Signal generator
4- Power amplifier
5- Oscilloscope
6- Card Shaker

شکل 2 تجهیزات آزمایش تجربی برای صحت‌سنجی معادلات حرکت و برداشت کننده انرژی

1- آنالیزکننده پاسخ فرکانسی
2- سیستم گیرنده داده
3- تولیدکننده سیگنال
4- تقویت کننده توان
5- کارت نوسان‌سنج
6- شیکر

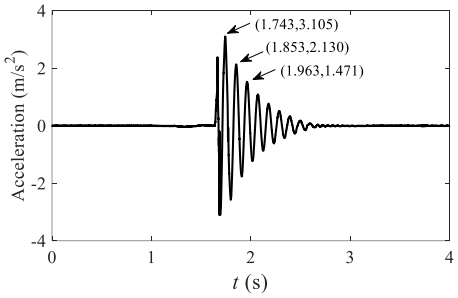

Fig. 3 Free vibration response of the system

شکل 3 پاسخ زمانی سیستم در اثر ارتعاشات آزاد

[1] Megatek-MFG2205 signal generator
[2] YMC- LA200 amplifier
[3] YMC-504F01 impedance head
[4] GT-AP2037 accelerometer
[5] ABP-Vibrorack1000 analyzer
[6] PZT

جدول 1 مقادیر عددی پارامترهای سیستم

Table 1 properties of the system

پارامتر فیزیکی	نماد	مقدار
مدول یانگ تیر	E_b (GPa)	170
مدول یانگ پیزوالکتریک	E_p (GPa)	62.5
چگالی تیر	ρ^b (kg/m^3)	8500
چگالی پیزوالکتریک	ρ^p (kg/m^3)	7500
طول تیر	L^b (mm)	54
طول پیزوالکتریک	L^p (mm)	54
ضخامت تیر	t^b (μm)	150
ضخامت پیزوالکتریک	t^p (μm)	90
عرض تیر	w^b (mm)	37
عرض پیزوالکتریک	w^p (mm)	36
جرم جسم بلاف	M_{bb} (gr)	276
ثابت کشش پیزوالکتریک	d_{31} (pC/N)	-280
جزء القاگر در کرنش ثابت	e_{33} (nF/m)	6.5
نسبت میرایی تیر	ξ	0.06
نسبت میرایی جسم بلاف	ξ_{bb}	0.012
سختی تیر	K(N/m)	100
چگالی سیال	ρ_{air} (kg/m^3)	1
تصویر مقطع عمود بر جریان	D(m)	0.1
طول جسم بلاف	L_{bb}(m)	1

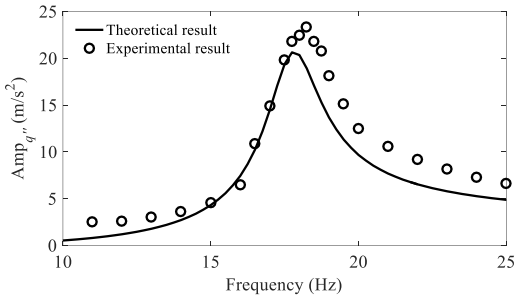

Fig. 4 Comparison of experimental results and theoretical results for vibration amplitudes of tip mass acceleration

شکل 4 مقایسه نتایج آزمایش تجربی و نتایج تئوری برای دامنه ارتعاشات شتاب جرم نوک

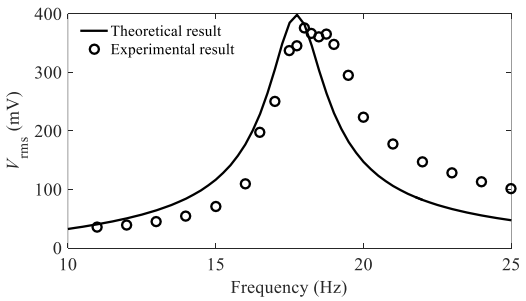

Fig. 5 Comparison of experimental results and theoretical results for RMS output voltage of each piezoelectric layer

شکل 5 مقایسه نتایج آزمایش تجربی و نتایج تئوری برای ولتاژ تولیدی هر کدام از لایه‌های پیزوالکتریک

4- معادله نیروی آیرودینامیکی سیال

مطابق شکل 6 جسم بلاف در داخل سیال هوا با سرعت U قرار دارد؛ به طوری که α زاویه سرعت نسبی U_{Rel} با سرعت جریان است و رابطه $\dot{w}_1 = U.\tan(\alpha)$ برقرار است. نیروی برآ و پسای وارد بر جسم بلاف به ترتیب با F_{L} و F_{D} نشان داده شده است. همچنین D نشان‌دهنده تصویر مقطع عمود بر جریان است و شکل سطح مقطع نیز می‌تواند مربع، مثلث یا نیم‌دایره باشد.

نیروی عمودی وارد بر جسم بلاف به صورت رابطه (27) نوشته می‌شود؛ که در آن C_{l} و C_{d} به ترتیب ضریب برآ و پساست [15].

$$F = \frac{1}{2}\rho_{\mathrm{air}} U_{\mathrm{Rel}}^2 L_{\mathrm{bb}} D\{C_{\mathrm{l}}\cos\alpha + C_{\mathrm{d}}\sin\alpha\} \tag{27}$$

این رابطه به صورت روابط (29,28) نوشته می‌شود؛ به طوری که C_{z} ضریب نیروی عمودی سیال است، همچنین با فرض $\tan(\alpha) \approx \alpha$ بسط سری تیلور آن به صورت رابطه (30) نوشته می‌شود.

$$F = \frac{1}{2}\rho_{\mathrm{air}} U^2 L_{\mathrm{bb}} D C_{\mathrm{z}} \tag{28}$$

$$C_{\mathrm{z}} = \frac{(C_{\mathrm{l}} + C_{\mathrm{d}}\tan\alpha)}{\cos\alpha} \tag{29}$$

$$C_{\mathrm{z}} = a_1\left(\frac{\dot{w}_1}{U}\right) + a_3\left(\frac{\dot{w}_1}{U}\right)^3 \tag{30}$$

ضرایب a_1 و a_3 را با توجه به شرایط سیستم با استفاده از برپاسازی آزمایش یا شبیه‌سازی سیستم در جریان سیال قابل محاسبه است. در این پژوهش از ضرایب به‌دست‌آمده در پژوهش بارروگیل [20] استفاده شده است. این ضرایب با توجه به سطح مقطع جسم بلاف متغیر بوده و مقادیر عددی آن در جدول 2 ارائه شده است.

بنابراین نیروی آیرودینامیکی در جهت عمود بر جریان سیال به صورت رابطه (31) نوشته می‌شود.

$$F = \frac{1}{2}\rho_{\mathrm{air}} U^2 D L_{\mathrm{bb}}\left\{a_1\left(\frac{\dot{w}_1}{U}\right) + a_3\left(\frac{\dot{w}_1}{U}\right)^3\right\} \tag{31}$$

5- حل تحلیلی

در این بخش حل تحلیلی روابط (10-12) با استفاده از روش هارمونیک بالانس ارائه شده است. روابط (32-34) با فرض این‌که پاسخ زمانی سیستم فرم سینوسی دارد، نوشته شده است. در این روابط A دامنه حرکت جسم بلاف و B دامنه حرکت جرم نوک و v دامنه ولتاژ را نشان می‌دهد، همچنین β و ψ اختلاف فاز و ω فرکانس را نشان می‌دهند.

$$w_1(t) = A\sin(\omega t) \tag{32}$$

$$q(t) = B\sin(\omega t + \beta) \tag{33}$$

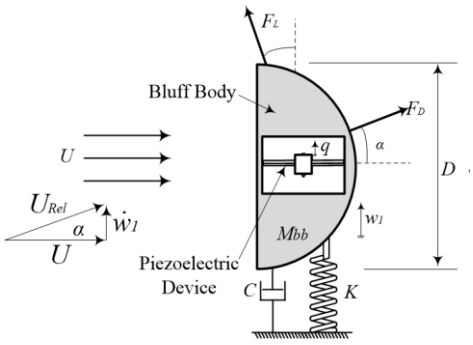

Fig. 6 Schematic model of the energy harvester and its forces in fluid flow

شکل 6 مدل شماتیک برداشت‌کننده انرژی و نیروهای وارد بر آن در جریان سیال

جدول 2 مقادیر عددی ضرایب a_1 و a_3

Table 2 Coefficients of a_1 and a_3

سطح مقطع	a_1	a_3
مربع	2.3	-18
نیم دایره	0.79	-0.19
مثلث متساوی الساقین با زاویه راس 30 درجه	2.9	-6.2

$$V(t) = v\sin(\omega t + \psi) \tag{34}$$

با جای‌گذاری معادلات بالا در رابطه (12)، روابط (36,35) به‌دست می‌آید.

$$v = \frac{\theta B\omega R\cos(\omega t + \beta)}{2C_{\mathrm{p}}\omega R\cos(\omega t + \psi) + \sin(\omega t + \psi)} \tag{35}$$

$$\sin(\psi) = \frac{2C_{\mathrm{p}}R\omega\sin(\beta) + \cos(\beta)}{\sqrt{4C_{\mathrm{p}}^2R^2\omega^2 + 1}} \tag{36}$$

با جای‌گذاری روابط بالا در رابطه (11)، ولتاژ از رابطه حاصل حذف می‌شود. سپس با حل آن، روابط (38,37) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned}\mathrm{Sin}(\beta) = {} & \frac{-A}{B}\left\{m^*\omega^3\left(4C_{\mathrm{p}}^2R^2\omega^2c_{\mathrm{eq}} + R\theta^2 + c_{\mathrm{eq}}\right)\right\} / \\ & \{4C_{\mathrm{p}}^2R^2\omega^6m_{\mathrm{eq}}^2 + 4C_{\mathrm{p}}^2R^2\omega^4c_{\mathrm{eq}}^2 - 8C_{\mathrm{p}}^2R^2\omega^4k_{\mathrm{eq}}m_{\mathrm{eq}} - \\ & 4C_{\mathrm{p}}R^2\omega^4m_{\mathrm{eq}}\theta^2 + 4C_{\mathrm{p}}^2R^2\omega^2k_{\mathrm{eq}}^2 + 4C_{\mathrm{p}}R^2\omega^2k_{\mathrm{eq}}\theta^2 + \\ & R^2\omega^2\theta^4 + 2Rc_{\mathrm{eq}}\omega^2\theta^2 + m_{\mathrm{eq}}^2\omega^4 + c_{\mathrm{eq}}^2\omega^2 - 2k_{\mathrm{eq}}m_{\mathrm{eq}}\omega^2 \\ & + k_{\mathrm{eq}}^2\}\end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned}\frac{B}{A} = {} & \left\{4m^*\sin(\omega t)\,\omega^4C_{\mathrm{p}}^2R^2 + m^*\sin(\omega t)\,\omega^2\right\} / \\ & \{-4C_{\mathrm{p}}^2\sin(\omega t + \beta)\,R^2m_{\mathrm{eq}}\omega^4 - m_{\mathrm{eq}}\omega^2\sin(\omega t + \beta) \\ & + 4C_{\mathrm{p}}^2\cos(\omega t + \beta)\,R^2c_{\mathrm{eq}}\omega^3 + c_{\mathrm{eq}}\omega\cos(\omega t + \beta) + \\ & 4C_{\mathrm{p}}^2\sin(\omega t + \beta)\,R^2k_{\mathrm{eq}}\omega^2 + k_{\mathrm{eq}}\sin(\omega t + \beta) + \\ & 2\theta^2R^2C_{\mathrm{p}}\omega^2\sin(\omega t + \beta) + \theta^2\omega R\cos(\omega t + \beta)\}\end{aligned} \tag{38}$$

با جای‌گذاری روابط بالا در روابط (31,10) و استفاده از تقریب $\cos^3(\omega t) = 0.75\cos(\omega t)$، فرکانس و دامنه حرکت سیستم به‌دست می‌آید.

6- طراحی سیستم به وسیله بررسی تأثیر پارامترهای مختلف

در این بخش تأثیر تغییر هندسه سطح مقطع، مقدار جرم نوک و مقاومت الکتریکی بر رفتار الکترومکانیکی سیستم بررسی می‌شود. برای این منظور نخست نتایج حاصل از حل عددی معادلات حاکم بر رفتار سیستم، با نتایج حل تحلیلی راستی آزمایی می‌شود. در تمامی نتایج این بخش ولتاژ الکتریکی برای هر کدام از وصله پیزوها به صورت جداگانه محاسبه شده است.

6-1- بررسی تأثیر هندسه سطح مقطع بر سیستم و انرژی تولید شده

با تغییر ضرایب a_1 و a_3 در رابطه (31) تأثیر تغییر نیروی آیرودینامیک سیال بر رفتار ارتعاشی جسم بلاف بررسی می‌شود. در شکل‌های 7-9 به ترتیب جابه‌جایی جسم بلاف، جابه‌جایی جرم نوک و ولتاژ تولید شده برای سه مقطع مختلف هندسی رسم و نتایج نیز با حل هارمونیک بالانس مسأله مقایسه شده است، همچنین مقدار مقاومت 10MΩ و مقدار جرم نوک 35gr درنظر گرفته شده است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که دامنه نوسان جسم بلاف، جرم نوک و ولتاژ به ترتیب برای مقاطع مثلثی، مربعی و نیم‌دایره بیشترین مقدار را دارد؛ بنابراین سطح مقطع مثلثی برای برداشت انرژی از دو مقطع دیگر مناسب‌تر است.

این نکته قابل بیان است که چون الگوی رفتار سیستم برای مقاطع مربعی و نیم‌دایره نسبت به تغییر مقاومت و جرم نوک مشابه رفتار سیستم با سطح مقطع مثلثی است؛ تمرکز بخش‌های بعدی بر مدل جسم بلاف با سطح مقطع مثلثی است.

6-2- بررسی تأثیر تغییر مقدار مقاومت الکتریکی بر دامنه سیستم و ولتاژ تولیدی

در شکل‌های 11,10 به ترتیب تأثیر تغییر مقدار مقاومت الکتریکی بر دامنه

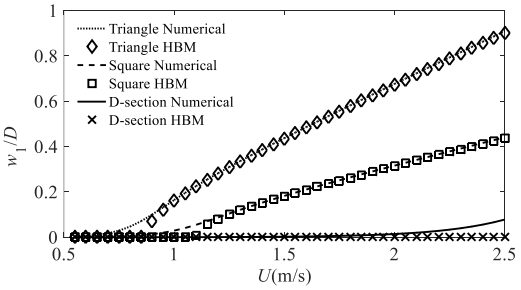

Fig. 7 Comparison of vibration amplitudes of the bluff body for different cross-section geometries for numerical and analytical solutions

شکل 7 مقایسه دامنه نوسان جسم بلاف برای مقاطع مختلف سطح مقطع برای حل عددی و تحلیلی

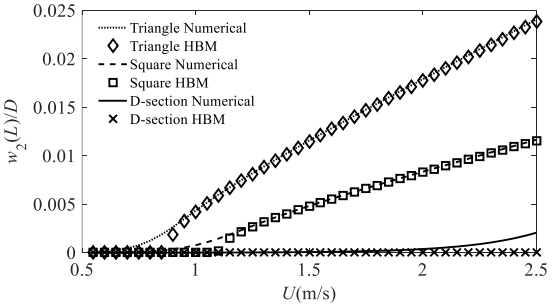

Fig. 8 Comparison of vibration amplitudes of the tip mass for different cross-section geometries for numerical and analytical solutions

شکل 8 مقایسه دامنه نوسان جرم نوک برای مقاطع مختلف سطح مقطع برای حل عددی و تحلیلی

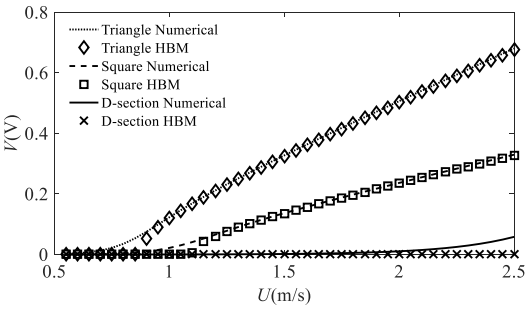

Fig. 9 Comparison of the output voltage for different cross-section geometries for numerical and analytical solutions

شکل 9 مقایسه ولتاژ تولیدی برای مقاطع مختلف سطح مقطع برای حل عددی و تحلیلی

ارتعاشات جسم بلاف با سطح مقطع مثلثی و جرم نوک 35gr نشان داده شده است. افزایش مقدار مقاومت الکتریکی بر دامنه نوسان جسم بلاف و جرم نوک تأثیر بسزایی ندارد. از آن‌جایی که تغییر مقاومت الکتریکی در مورد سطوح مقطع مربعی و نیم‌دایروی، رفتاری مشابه را منتج می‌گردد؛ از ارائه نمودار مربوط به این سطوح صرف‌نظر شده است.

با توجه به شکل 12 افزایش مقاومت الکتریکی می‌تواند مقدار ولتاژ استحصال شده را تا حد معینی افزایش دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار مقاومت الکتریکی به بیش از 1MΩ تأثیر افزایش مقاومت بر افزایش مقدار ولتاژ از بین می‌رود. با توجه به رابطه (12) دلیل این مشاهده را می‌توان در این مورد دانست که با افزایش مقدار مقاومت الکتریکی بیش از 1MΩ تأثیر ترم V/R به شدت کاهش می‌یابد که این به عدم تغییر میزان ولتاژ خروجی در اثر تغییر مقاومت الکتریکی ختم خواهد شد. با توجه به حل تحلیلی مسأله که در رابطه (35) ارائه شده مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار مقاومت الکتریکی، حد رابطه، عددی ثابت خواهد شد. این عدد ثابت متناسب با ضریب کوپل الکترومکانیکی، دامنه حرکت نسبی جرم نوک و معکوس ظرفیت خازنی وصله پیزوالکتریک است.

در شکل‌های 14,13 نیز الگوی رفتاری مشابهی با آن‌چه در شکل 12 مشاهده شد برای مقاطع هندسی مربع و نیم‌دایره پیش‌بینی شده است.

3-6- بررسی تأثیر تغییر مقدار جرم نوک بر سیستم و ولتاژ تولیدی

با توجه به نتایج دو بخش پیشین بررسی رفتار مدل با تغییر مقدار جرم نوک برای سطح مقطع مثلثی و مقدار مقاومت 10MΩ در این بخش بررسی می‌شود. حداکثر مقدار جرم نوک قابل تحمل برای تیرها 35gr در نظر گرفته

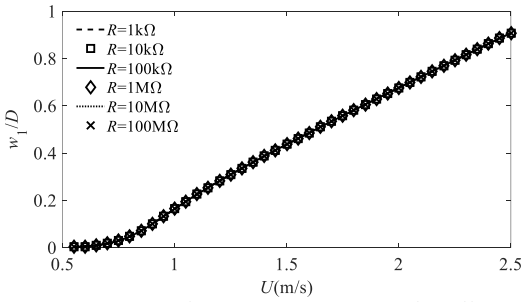

Fig. 10 Comparison of vibration amplitudes of bluff body with triangle cross-section for different electrical resistances

شکل 10 مقایسه دامنه نوسان جسم بلاف برای مقاومت‌های الکتریکی مختلف برای سطح مقطع مثلثی

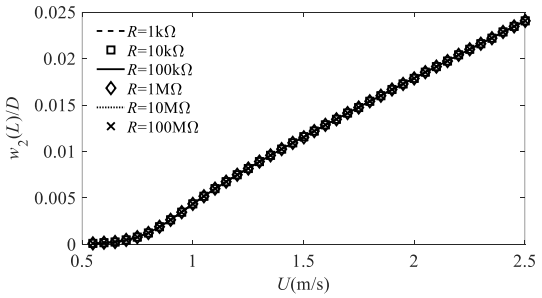

Fig. 11 Comparison of vibration amplitudes of the tip mass with triangle cross-section for different electrical resistances

شکل 11 مقایسه دامنه نوسان جرم نوک برای مقاومت‌های الکتریکی مختلف برای سطح مقطع مثلثی

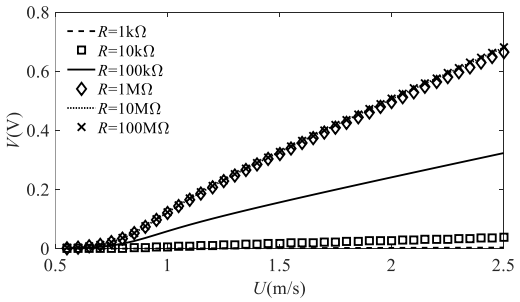

Fig. 12 Comparison of the output voltage with triangle cross-section for different electrical resistances

شکل 12 مقایسه ولتاژ تولیدی برای مقاومت‌های الکتریکی مختلف برای سطح مقطع مثلثی

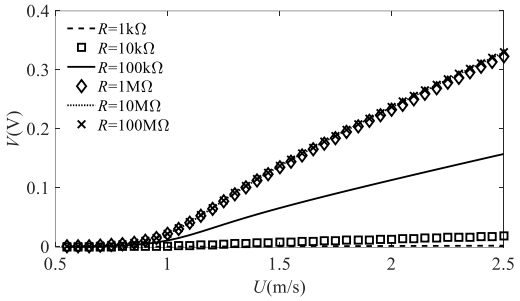

Fig. 13 Comparison of the output voltage with square cross-section for different electrical resistances

شکل 13 مقایسه ولتاژ تولیدی برای مقاومت‌های الکتریکی مختلف برای سطح مقطع مربعی

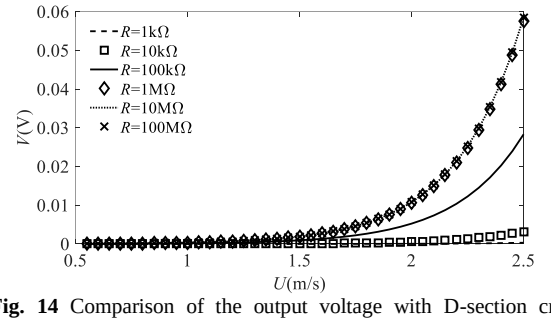

Fig. 14 Comparison of the output voltage with D-section cross-section for different electrical resistances

شکل 14 مقایسه ولتاژ تولیدی برای مقاومت‌های الکتریکی مختلف برای سطح مقطع نیم دایره‌ای

شده است تا سیستم را با دقت قابل قبولی مدل شود. به عبارت دیگر مقدار $M_{tip}/(2m_{beam}+2m_{piezo})$ کمتر از 5.5 در نظر گرفته شده است. با توجه به این که مقدار جرم جسم بلاف 276gr است، افزایش مقدار جرم نوک بر دامنه نوسانات جسم بلاف تأثیر بسزایی ندارد (شکل 15). با توجه به حل تحلیلی مسأله مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار جرم نوک در رابطه (38)، دامنه نوسانات جرم نوک افزایش می‌یابد (شکل 16). علاوه‌بر آن با توجه به رابطه (35) و شکل 16 مقدار ولتاژ تولیدی با افزایش این پارامتر افزایش خواهد یافت (شکل 17).

4-6- بررسی هم‌زمان تأثیر تغییر مقدار جرم نوک و مقاومت الکتریکی بر سیستم و ولتاژ تولیدی

با توجه به نتایج بخش‌های پیشین نمودار تأثیر هم‌زمان تغییر مقدار جرم نوک و مقاومت الکتریکی بر ولتاژ تولیدی با مقطع مثلثی و برای سرعت

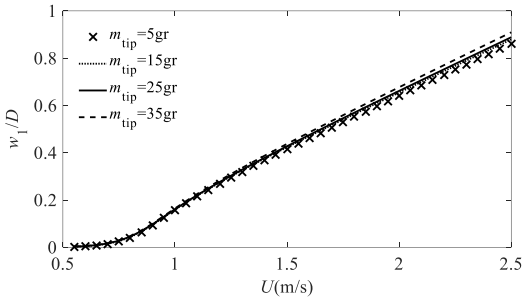

Fig. 15 Comparison of vibration amplitudes of bluff body with triangle cross-section for different quantities of tip mass

شکل 15 مقایسه دامنه نوسان جسم بلاف برای مقادیر مختلف جرم نوک برای سطح مقطع مثلثی

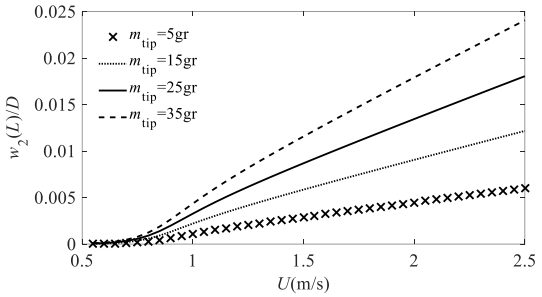

Fig. 16 Comparison of vibration amplitudes of tip mass with triangle cross-section for different quantities of tip mass

شکل 16 مقایسه دامنه نوسان جرم نوک برای مقادیر مختلف جرم نوک برای سطح مقطع مثلثی

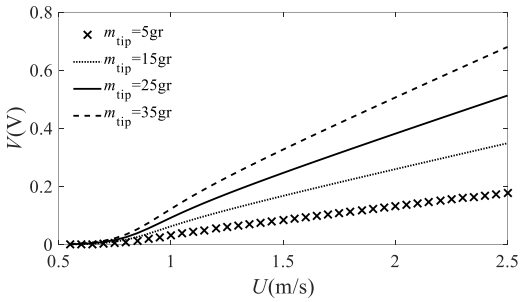

Fig. 17 Comparison of the output voltage with triangle cross-section for different quantities of tip mass

شکل 17 مقایسه ولتاژ تولیدی برای مقادیر مختلف جرم نوک برای سطح مقطع مثلثی

جریان معادل با 2.5m/s در شکل 18 رسم شده است. با توجه به این شکل برای تمامی مقادیر جرم نوک با افزایش مقدار مقاومت الکتریکی بیش از 1MΩ مقدار ولتاژ تولیدی ثابت باقی می‌ماند. از طرفی برای تمامی مقادیر مقاومت الکتریکی بیش از 1MΩ با افزایش مقدار جرم نوک مقدار ولتاژ تولیدی افزایش می‌یابد.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله، امکان استحصال انرژی از ارتعاشات ناشی از گلوپینگ به وسیله مواد پیزوالکتریک بررسی شد. سیستم مطرح شده در این پژوهش قیدها و محدودیت‌های حرکتی بیشتری نسبت به سیستم‌های مشابه دارد و می‌تواند نمونه‌ای از کاربرد سیستم‌های کوچک و با توان کم در تجهیزات واقعی برداشت انرژی به شمار آید. در این راستا ابتدا رفتار الکترومکانیکی سیستمی

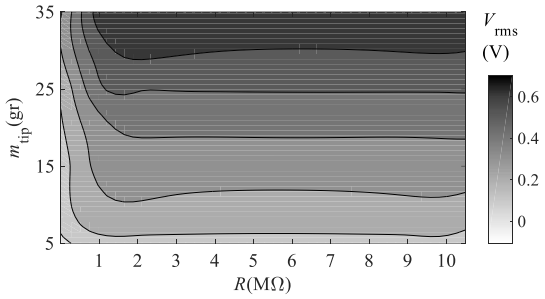

Fig. 18 Variation of the RMS output voltage with tip mass and load resistance for triangle cross-section

شکل 18 توزیع مقدار ولتاژ تولیدی به ازای مقادیر مقاومت الکتریکی و جرم نوک برای سطح مقطع مثلثی

متشکل از یک تیر یکسر درگیر- یکسر راهنما با وصله پیزوالکتریک و جرم نوک تعبیه‌شده در داخل جسم بلاف استخراج گردید؛ سپس اثر تغییر پارامترهای قابل تغییر سیستم شامل هندسه سطح مقطع جسم بلاف، مقدار مقاومت الکتریکی و مقدار جرم نوک، بر رفتار الکترومکانیکی آن بررسی شد. به طور کلی با توجه به موارد ارائه شده در این مقاله نتایج زیر قابل برداشت است:

1- با استفاده از بررسی تأثیر هندسه سطح مقطع جسم بلاف مشخص گردید که از میان سه سطح مقطع مثلثی، مربعی و نیم‌دایره‌ای، سطح مقطع مثلثی توان الکتریکی بیشتری تولید می‌کند.

2- با بررسی تأثیر مقدار مقاومت الکتریکی بر رفتار الکترو مکانیکی سیستم نشان داده شد که برای استحصال‌کننده انرژی با هر سه سطح مقطع یادشده، به ازای افزایش مقدار مقاومت الکتریکی، توان تولیدی تا مقدار مشخصی افزایش یافته و سپس ثابت باقی می‌ماند.

3- با استفاده از نتایج دو مرحله پیشین و بررسی تأثیر مقدار جرم نوک بر رفتار سیستمی که با استفاده از دو گام پیشین بهینه شده است؛ می‌توان نتیجه گرفت که به ازای افزایش مقدار جرم نوک، ولتاژ تولیدی افزایش می‌یابد.

در نهایت سیستم یادشده به ازای سه پارامتر قابل‌تغییر مورد بحث بهینه گردید تا ضمن کنترل دامنه ارتعاشات جسم بلاف، حداکثر توان الکتریکی تولید شود.

8- مراجع

[1] A. Farshidianfar, H. Zanganeh, A modified wake oscillator model for vortex-induced vibration of circular cylinders for a wide range of mass-damping ratio, *Fluids and Structures*, Vol. 26, No. 3, pp. 430-441, 2010.

[2] A. Abdelkefi, A. Nayfeh, M. Hajj, Enhancement of power harvesting from piezoaeroelastic systems, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 68, No. 4, pp. 531-541, 2012.

[3] P. Hémon, X. Amandolese, T. Andrianne, Energy harvesting from galloping of prisms: A wind tunnel experiment, *Fluids and Structures*, Vol. 70, pp. 390-402, 2017.

[4] A. Bibo, *Investigation of Concurrent Energy Harvesting from Ambient Vibrations and Wind*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Clemson University, South Carolina, 2014.

[5] D. P. Arnold, Review of microscale magnetic power generation, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol .43, No. 11, pp. 3940-3951, 2007.

[6] P. D. Mitcheson, P. Miao, B. H. Stark, E. Yeatman, A. Holmes, T. Green, MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 115, No. 2, pp. 523-529, 2004.

[7] S. R. Anton, H. A. Sodano, A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006), *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 3, pp. R1, 2007.

[8] K. Cook-Chennault, N. Thambi, A. Sastry, Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 4, pp. 043001, 2008.

[9] A. Afsharfard, A. Farshidianfar, Application of single unit impact dampers to harvest energy and suppress vibrations, *Intelligent Material Systems and Structures*, pp. 1045389X14535012, 2014.

[10] M. Asgharzadeh, K. Jahani, A. Kianpoor, M. Sadeghi, 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 فارسی)

[11] M. Karimi, R. Tikani, S. Ziaei-Rad, Piezoelectric energy harvesting from bridge vibrations under moving consecutive masses, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 108-118, 2016. (in Persian فارسی)

[12] A. Abdelkefi, Aeroelastic energy harvesting: A review, *Engineering Science*, Vol. 100, pp. 112-135, 2016.

[13] H. Akaydin, N. Elvin, Y. Andreopoulos, The performance of a self-excited fluidic energy harvester, *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, No. 2, pp. 025007, 2012.

[14] Z. Yan, A. Abdelkefi, Nonlinear characterization of concurrent energy harvesting from galloping and base excitations, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 77, No. 4, pp. 1171-1189, 2014.

[15]D. J. Hartog, *Mechanical Vibrations*, 4th Eddition, pp. 299-305, New York, McGraw-Hill Book Company, 1956.

[16] M. Novak, Aeroelastic galloping of prismatic bodies, *the Engineering Mechanics Division*, Vol. 95, No. 1, pp. 115-142, 1969.

[17] G. Parkinson, J. Smith, The square prism as an aeroelastic non-linear oscillator, *Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 17, No. 2, pp. 225-239, 1964.

[18] M. Novak, H. Tanaka, Effect of turbulence on galloping instability, *the Engineering Mechanics Division*, Vol. 100, No. 1, pp. 27-47, 1974.

[19] A. Barrero-Gil, A. Sanz-Andres, M. Roura, Transverse galloping at low Reynolds numbers, *Fluids and Structures*, Vol. 25, No. 7, pp. 1236-1242, 2009.

[20] A. Barrero-Gil, G. Alonso, A. Sanz-Andres, Energy harvesting from transverse galloping, *Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 14, pp. 2873-2883, 2010.

[21] A. Abdelkefi, M. R. Hajj, A. H. Nayfeh, Power harvesting from transverse galloping of square cylinder, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 70, No. 2, pp. 1355-1363, 2012.

[22]Z. Liya, T. Lihua, Y. Yaowen, Small wind energy harvesting from galloping using piezoelectric materials, *Proceedings of the ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, Stone Mountain, Georgia, USA, September 19-21, 2012.

[23] A. Abdelkefi, M. Hajj, A. Nayfeh, Piezoelectric energy harvesting from transverse galloping of bluff bodies, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 1, pp. 015014, 2012.

[24] A. Abdelkefi, Z. Yan, M. R. Hajj, Performance analysis of galloping-based piezoaeroelastic energy harvesters with different cross-section geometries, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 2, pp. 246-256, 2014.

[25] L. Zhao, Y. Yang, Analytical solutions for galloping-based piezoelectric energy harvesters with various interfacing circuits, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 7, pp. 075023, 2015.

[26] J. Xu-Xu, A. Barrero-Gil, A. Velazquez, Experimental study on transverse flow-induced oscillations of a square-section cylinder at low mass ratio and low damping, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, pp. 286-295, 2016.

[27] J. Xu-Xu, D. Vicente-Ludlam, A. Barrero-Gil, Theoretical study of the energy harvesting of a cantilever with attached prism under aeroelastic galloping, *Mechanics-B/Fluids*, Vol. 60, pp. 189-195, 2016.

[28] A. Bibo, A. Abdelkefi, M. F. Daqaq, Modeling and characterization of a piezoelectric energy harvester under combined aerodynamic and base excitations, *Vibration and Acoustics*, Vol. 137, No. 3, pp. 031017, 2015.

[29] Z. Yan, A. Abdelkefi, M. R. Hajj, Piezoelectric energy harvesting from hybrid vibrations, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 025026, 2014.

[30] A. Abdelkefi, Z. Yan, M. R. Hajj, Temperature impact on the performance of galloping-based piezoaeroelastic energy harvesters, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 5, pp. 055026, 2013.

[31] H. Abdelmoula, A. Abdelkefi, The potential of electrical impedance on the performance of galloping systems for energy harvesting and control applications, *Sound and Vibration*, Vol. 370, pp. 191-208, 2016.

[32] D. Vicente-Ludlam, A. Barrero-Gil, A. Velazquez, Enhanced mechanical energy extraction from transverse galloping using a dual mass system, *Sound and Vibration*, Vol. 339, pp. 290-303, 2015.

[33] Y. Nishi, K. Fukuda, W. Shinohara, Experimental energy harvesting from fluid flow by using two vibrating masses, *Sound and Vibration*, Vol. 394, pp. 321-332, 2017.

[34] Y. Nishi, Y. Ueno, M. Nishio, L. A. R. Quadrante, K. Kokubun, Power extraction using flow-induced vibration of a circular cylinder placed near another fixed cylinder, *Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 10, pp. 2863-2880, 2014.

[35] H. L. Dai, H. Abdelmoula, A. Abdelkefi, L. Wang, Towards control of cross-flow-induced vibrations based on energy harvesting, *Nonlinear Dynamics*, pp. 1-18, 2017.

[36] D. L. DeVoe, Piezoelectric thin film micromechanical beam resonators, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 88, No. 3, pp. 263-272, 2001.