Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(1) (2022) 7-10
DOI: 10.22060/mej.2021.19490.7037

Finite Element Modeling of Fluid-Solid-Piezoelectric for Investigating the Ways of Improving the Performance of the Micro Energy Harvester in the Fluid Flow

M. Salari, H. Afrasiab*, M. H. Pashaei, R. Akbari Alashti

Department of of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT: A coupled fluid-solid-piezoelectric model has been developed by finite element method to study and improve the performance of a micro piezoelectric transducer designed for fluid flow energy harvesting. In this harvester, when the turbulence flow of water passes over a bluff body, the vortex shedding phenomenon occurs and applies a periodical lift force to a piezoelectric beam placed in the downstream region. The resulting oscillations in the piezoelectric beam lead to electrical power generation. Navier-Stokes equations and large-eddy simulation method have been used to describe the fluid turbulence flow, and equations of conservation of linear momentum along with piezoelectric constitutive relations have been employed to obtain solid deformation and electric field intensity. Numerical experiments designed by Taguchi's method have been used to study the effect of different parameters on the harvester performance. The results have shown that using a triangular or D-shape bluff body, and selecting the minimum possible values for the length to height ratio of the bluff body, the distance between the beam and the bluff body, and eccentricity of the beam relative to the bluff body is beneficial for better performance. Furthermore, the shape of the bluff body has been the most influential parameter on the harvester performance.

Review History:

Received: Jan. 12, 2021
Revised: Oct. 10, 2021
Accepted: Oct. 11, 2021
Available Online: Oct. 13, 2021

Keywords:

Piezoelectric energy harvester
Micro scale
Vortex shedding phenomenon
Finite element method

1- Introduction

The environmental problems of using fossil fuels have made the generation of clean and renewable energy a serious challenge in the new millennium. In this regard, significant attention has been drawn towards the micro energy harvesters that generate electrical power in the flow of fluids such as air and water. Recently, different techniques have been developed for energy harvesting from the fluid flow. One of these techniques uses the Vortex Induced Vibration (VIV) to convert the flow kinetic energy in the wake of a bluff body to mechanical oscillations of a piezoelectric beam for extracting electrical energy. This method has been studied extensively in the literature. Investigations made by Gu et al. [1], Sun and Seok [2], and Su and Lin [3] are some of the most recent studies to mention. In the present study, a finite element model is developed in the COMSOL software to simulate the coupled problem of the fluid flow, the solid beam deformation, and the piezoelectric effect in a VIV harvester and to investigate the effect of different parameters such as the shape and dimensions of the bluff body and the location of the piezoelectric beam behind the bluff body on the harvester performance.

2- Methodology

The Navier-Stokes equations have been used to model the time-dependent incompressible flow of the fluid in the arbitrary Lagrangian-Eulerian coordinates:

$$\nabla.\mathbf{v}=0 \tag{1}$$

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}+\rho_f \nabla.\left(\left(\mathbf{v}-\mathbf{v}^m\right)\mathbf{v}\right)= -\nabla p+\mu_f \nabla.\left(\nabla\mathbf{v}+\left(\nabla\mathbf{v}\right)^T\right) \tag{2}$$

where ρ_f, μ_f, $\mathbf{v}$, and p are the fluid density, viscosity, velocity vector, and pressure field, respectively. t denotes time, and $\mathbf{v}^m$ is the mesh velocity. For a water flow with $\rho_f = 1000\ \mathrm{kg/m^3}$, $\mu_f = 8.9\times10^{-4}$ Pa.s, and $v_{\mathrm{ave}} = 0.7\ \mathrm{m/s}$ passing over a bluff body of 10 mm diameter, the Reynolds number is equal to:

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho_f v_{\mathrm{ave}} D}{\mu_f}=\frac{1000\times0.7\times10\times10^{-3}}{8.9\times10^{-4}}=7865 \tag{3}$$

Consequently, the fluid flow is turbulent and the large

*Corresponding author's email: afrasiab@nit.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

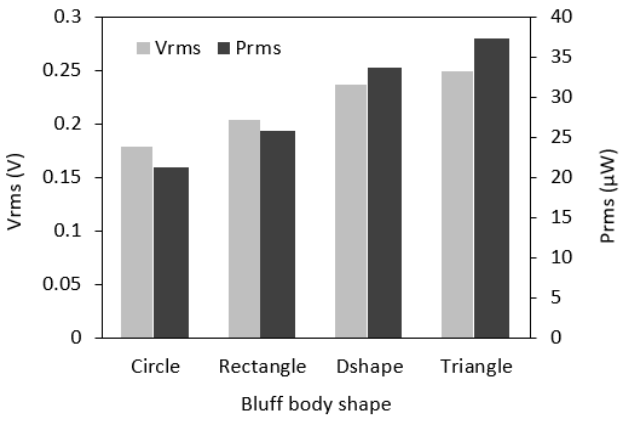


Fig. 1. effect of the bluff body shape on the harvester performance

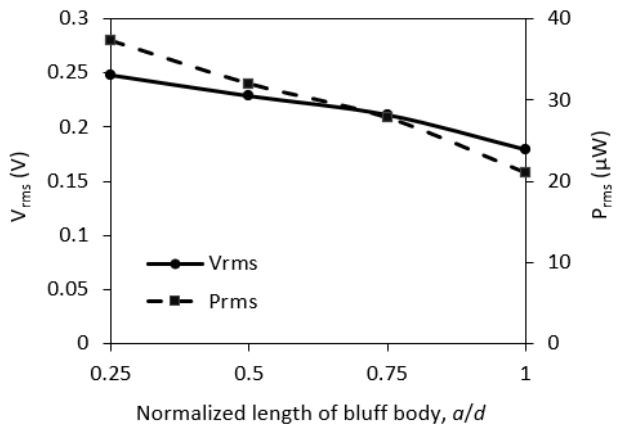


Fig. 2. Effect of the length to height ratio on the harvester performance

eddy simulation method has been employed for its simulation.

The law of conservation of momentum is used for characterization of the solid structure behavior:

$$\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla . \boldsymbol{\sigma}_s + \rho_s \mathbf{b}_s \tag{4}$$

In this equation, ρ_s is the solid density, $\mathbf{u}$ denotes its displacement vector, $\mathbf{b}_s$ represents the body force vector, and σ_s is the Cauchy stress tensor.

Generally, the piezoelectric effect is expressed in the strain-charge form given by:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{s}_\mathbf{E} \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{d}^T \mathbf{E}_p \tag{5}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{\varepsilon}_\mathbf{T} \mathbf{E}_p \tag{6}$$

where ε is the strain tensor, $\mathbf{s}_\mathbf{E}$ represents the elastic compliance tensor at the constant electric field, $\mathbf{d}$ is the coupling matrix (charge constants) of the piezoelectric, $\mathbf{E}_p$ denotes the electrical field strength, and $\varepsilon_\mathbf{T}$ is the permittivity tensor. The Lead Zirconate-Titanate/ Polydimethylsiloxane (PZT-PDMS) piezoelectric material is employed in this study the properties of which are presented in Table 1.

The shape of the bluff body, its length to height ratio, the distance between the beam and the bluff body, and eccentricity of the beam relative to the bluff body are the parameters investigated in this study. Four different levels have been considered for these four parameters. Consequently, an orthogonal array of L16 should be used for Taguchi's based design of experiment [4].

Table 1. Properties of the piezoelectric material

Property	Density (kg/m^3)	Compliance (1/Pa)	Charge coefficient (pC/N)	Relative permittivity
Value	3000	10^{-7}	3000	10

3- Results and Discussion

The root mean square of the harvester output voltage and electrical power are presented in Fig. 1 for different shapes of the bluff body. Based on this figure, the maximum voltage and power are generated by harvesters with triangular, D-shape, rectangular, and circular bluff bodies, respectively.

The harvester output voltage and power are shown in Fig. 2 for different length to height ratios of the bluff body. According to this figure, increasing the length of the bluff body leads to a decrease in the harvester output voltage and power.

Similar diagrams have also been obtained for the remaining two parameters and it was observed that by increasing the distance between the beam and the bluff body, and the eccentricity of the beam relative to the bluff body the amount of voltage and power generated by the harvester decreases.

4- Conclusions

In this paper, the finite element method modeling was employed to study and improve the performance of a micro energy harvester which uses the piezoelectricity effect to harvest energy and generate electricity from the vortex shedding phenomenon in the fluid flow. It was observed that the maximum amount of the harvester output voltage and power is obtained by triangular and D-shape bluff bodies. Moreover, by decreasing the bluff body length to height ratio, the distance between the beam and the bluff body, and the beam eccentricity, the output voltage and electrical power are reduced. Furthermore, the bluff body shape is the most influential parameter on the harvester performance, while the length to height ratio, the distance between the beam and the bluff body, and the beam eccentricity are the next influential parameters, respectively.

References

[1] M. Gu, B. Song, B. Zhang, Z. Mao, W. Tian, The effects of submergence depth on Vortex-Induced Vibration (VIV) and energy harvesting of a circular cylinder, Renewable Energy, 151 (2020) 931–945.

[2] W. Sun, J. Seok, A novel self-tuning wind energy harvester with a slidable bluff body using vortex-induced vibration, Energy Conversion and Management, 205 (2020) 112–122.

[3] W.-J. Su, W.-Y. Lin, Design and analysis of a vortex-induced bi-directional piezoelectric energy harvester, International Journal of Mechanical Sciences, 173 (2020) 105–117.

[4] G. Taguchi, Y. Yokoyama, Taguchi Methods: Design of Experiments, Amer Supplier Inst, Dearborn, Mich, 1993.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Salari, H. Afrasiab , M. H. Pashaei, R. Akbari Alashti , Finite Element Modeling of Fluid-Solid-Piezoelectric for Investigating the Ways of Improving the Performance of the Micro Energy Harvester in the Fluid Flow, Amirkabir J. Mech Eng., 54(1) (2022) 7-10.

DOI: 10.22060/mej.2021.19490.7037

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۱، سال ۱۴۰۱، صفحات ۳۱ تا ۵۴
DOI: 10.22060/mej.2021.19490.7037

مدلسازی اجزاء محدود سیال-جامد-پیزوالکتریک به منظور بررسی راه‌های بهبود عملکرد میکرو جاذب انرژی پیزوالکتریک در جریان سیال

معصومه سالاری، حامد افراسیاب*، محمدهادی پاشایی، رضا اکبری آلاشتی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

خلاصه: در این مقاله با کمک روش اجزاء محدود، یک مدل کوپل سیال- جامد- پیزوالکتریک برای مطالعه و بهبود عملکرد یک میکرو مبدل پیزوالکتریکی توسعه یافته که برای جذب انرژی از جریان سیال طراحی شده است. در این جاذب انرژی، عبور جریان لزج و آشفته سیال از روی یک مانع سبب وقوع پدیده جدایش گردابه می‌گردد. جدایش گردابه‌ها موجب اعمال یک نیروی برآی نوسانی به تیر پیزوالکتریکی می‌شود که در پایین دست مانع قرار گرفته است. نوسانات حاصله در تیر با توجه به خاصیت پیزوالکتریکی منجر به تولید جریان و انرژی الکتریکی خواهد شد. معادلات ناویر- استوکس و روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ برای توصیف رفتار جریان آشفته سیال، و معادلات پیوستگی مومنتوم خطی به همراه روابط ساختاری پیزوالکتریک برای تعیین تغییر شکل جامد و شدت میدان الکتریکی تولیدی به کار گرفته شده‌اند. با طراحی آزمون‌های عددی به روش تاگوچی، تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد برداشت کننده مطالعه شده است. مطابق با نتایج بدست آمده، انتخاب شکل مثلثی یا دی-شکل برای مانع و اتخاذ کمترین مقدار ممکن برای نسبت طول به ارتفاع مانع، فاصله تیر تا مانع جسم، و خروج از مرکز تیر نسبت به مانع برای بهبود عملکرد جاذب سودمند است. ضمن اینکه شکل مانع مؤثرترین پارامتر مورد بررسی بوده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

کلمات کلیدی:
جاذب انرژی پیزوالکتریک
مقیاس میکرو
پدیده جدایش گردابه
روش اجزاء محدود

۱- مقدمه

مشکلات زیست- محیطی ناشی از بکارگیری سوخت‌های فسیلی، تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر را تبدیل به یکی از چالش‌های پیش روی بشر در هزاره جدید میلادی کرده است. از سوی دیگر با پیشرفت فن‌آوری و کوچک شدن ادوات الکترونیکی، توان مورد نیاز برای کارکرد آن‌ها کاهش یافته است. هرچند استفاده از باتری راهکاری قابل اطمینان برای تأمین انرژی این ادوات است اما مشکلاتی مانند نیاز به شارژ یا تعویض منظم و نیز قیمت بالای باتری‌ها تدبیر برای یافتن گزینه‌های جایگزین را ناگزیر ساخته است. در همین راستا، برداشت کننده‌های انرژی میکرو که با استفاده از مبدل پیزوالکتریک اقدام به تولید انرژی الکتریکی از جریان سیالاتی مانند هوا و آب می‌کنند بدلیل مزایای متعدد مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند.

در طراحی سیستم‌های مکانیکی، کاهش ظهور پدیده برهمکنش سیال- جامد یا لااقل کمینه کردن اثرات آن اغلب یکی از اهداف طراحی است. زیرا این پدیده سبب ایجاد ارتعاشات ناخواسته در قطعات مختلف شده و ضمن تضعیف عملکرد سیستم، ممکن است سایش و خستگی قطعات را در بلند مدت بدنبال داشته باشد. با این حال در سال‌های اخیر، رویکرد متفاوتی در بسیاری پژوهش‌های علمی ظهور کرده که هدف آن به جای تضعیف پدیده برهمکنش سیال-جامد، تقویت اثرات آن بویژه تشدید ارتعاشات حاصله است. به این ترتیب می‌توان انرژی جنشی جریان عبوری را جذب کرده و آن را به نوع مفیدتری از انرژی مثلاً انرژی الکتریکی تبدیل نمود. ایده اصلی در این راه بهره‌گیری از پدیده‌هایی مانند ارتعاشات ناشی از گردابه (وی‌آی‌وی)[1] یا گالوپینگ جانبی برای تبدیل انرژی جنبشی جریان به نوسانات مکانیکی و سپس استفاده از مبدل‌های الکترومغناطیس، پیزوالکتریک یا الکتروستاتیک برای تبدیل این انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی است. به دلیل هزینه اندک و کارآیی بالای سامانه‌های جذب انرژی از وی‌آی‌وی [۱]، طراحی این سامانه‌ها و نیز شیوه‌های شبیه‌سازی آن توسط پژوهشگران بسیاری در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

فرانزینی و بونزل [۲]در سال ۲۰۱۸ با بهره‌گیری از یک مدل عددی و

1 Vortex Induced Vibration (VIV)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: afrasiab@nit.ac.ir

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

کوپل سیستم سیال–جامد–الکتریک به بررسی دینامیک یک استوانه صلب پرداختند که روی پایه‌ای الاستیک با خاصیت پیزوالکتریک سوار شده و با قرارگیری در جریان سیال، برای استحصال انرژی از پدیده وی‌آی‌وی کمک می‌گرفت. ژانگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۸ با روش عددی نقش ضریب منظر مانع مستطیلی شکل را بر عملکرد برداشت کننده مبتنی بر وی‌آی‌وی بررسی نمودند. سان و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۸ از فنرهای غیرخطی برای بهینه‌سازی نوسانات برداشت کننده انرژی از جدایش گردابه مانع دایره‌ای پرداختند. وانگ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۹ برای بهبود عملکرد یک برداشت کننده پیزوالکتریک، پیشنهاد اتصال زایده‌های وای–شکل به مانع را مطرح نمودند. شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی حکایت از موفقیت طرح پیشنهادی برای جذب انرژی با مکانیزم وی‌آی‌وی داشت. بادهورشاه و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۹ پدیده وی‌آی‌وی را برای یک سیلندر دایره‌ای متصل به فنرهای دوپایا در جریان یکنواخت مطالعه کردند تا درک بهتری از تأثیر غیرخطی بودن فنر بر پهنای محدوده قفل‌شدگی و نقش آن در میزان برداشت انرژی جریان بدست آورند. ژانگ و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۹ از شبیه‌سازی عددی دو بعدی برای آشکار ساختن اثر شکل سطح مقطع مانع بر برداشت انرژی با پدیده وی‌آی‌وی بهره گرفته و سطح مقطع‌های مثلثی، مستطیلی و دایره‌ای را مورد کاوش قرار دادند. ژنگ و همکاران [۸]در سال ۲۰۲۰ جذب انرژی از طریق وی‌آی‌وی را در خطوط لوله انتقال جریان به روش عددی کاوش کردند. آن‌ها به منظور افزایش دامنه ارتعاشات تیر و بهبود برداشت انرژی در محدوده وسیع‌تری از سرعت جریان، اثر پارامترهایی مانند مدول الاستیک ماده، نسبت جرم و شکل سطح مقطع مانع (دایره‌ای، نیم‌دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای برعکس) را بررسی نمودند. سو و لین [۹] در سال ۲۰۲۰ یک برداشت کننده پیزوالکتریک دوجهته مبتنی بر وی‌آی‌وی پیشنهاد کردند که با تیری یو–شکل قابلیت جذب انرژی باد در جهت وزش افقی و عمودی را دارا بود. آن‌ها ضمن اثبات کارایی طرح پیشنهادی به روش تحلیلی، نقش ضریب منظر تیر را بر عملکرد برداشت کننده مطالعه کردند. سان و سئوک [۱۰] در سال ۲۰۲۰ یک برداشت کننده انرژی مبتنی بر وی‌آی‌وی ابداع کردند که از یک مانع لغزنده برای ایجاد قابلیت خودتنظیمی استفاده کرده و راندمان برداشت انرژی را افزایش می‌داد. گو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰ از شبیه‌سازی عددی دوبعدی برای بررسی اثر عمق نصب برداشت کننده وی‌آی‌وی بر عملکرد آن بهره گرفتند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد اگر عمق نصب بیشتر از نیم متر باشد سطح آزاد جریان بر کارکرد برداشت کننده تأثیری نخواهد داشت.

هرچند فن‌آوری برداشت انرژی از وی‌آی‌وی دارای مزایای بسیاری است اما چالش‌های زیادی در مسیر تجاری‌سازی آن موجود است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از وی‌آی‌وی یافتن راه‌هایی برای افزایش توان قابل برداشت از نوسانات جریان است. از این رو پژوهش‌های متعددی برای بیشینه کردن دامنه و فرکانس ارتعاشات انجام گرفته است که در قسمت قبل به برخی از تلاش‌های اخیر در این زمینه اشاره گردید. با این وجود، هنوز راهی طولانی برای رسیدن این فن‌آوری به جایگاهی مطلوب در پیش است که نیازمند تلاش‌های بیشتری در این زمینه می‌باشد. در همین راستا، تدوین یک پژوهش که با در نظر گرفتن همزمان اثرات جریان سیال، تغییر شکل جامد و خاصیت پیزوالکتریک به یک مطالعه پارامتریک نظام‌مند بپردازد بسیار سودمند خواهد بود. با عنایت به این مسأله، هدف از پروژه جاری مطالعه و بهبود عملکرد یک برداشت کننده انرژی جریان است که با قرار دادن یک تیر پیزوالکتریک در دنباله جریان یک مانع از پدیده وی‌آی‌وی برای استحصال انرژی بهره می‌گیرد. به این منظور با توسعه یک مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار کمسول، مسأله کوپل تشکیل شده از جریان سیال، تغییر شکل تیر جامد و اثر پیزوالکتریک شبیه‌سازی شده و تأثیر پارامترهای مختلف همانند شکل و ابعاد مانع و محل قرارگیری تیر پیزو در پشت مانع مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. شایان ذکر است تأثیر پارامترهایی مانند شکل و ابعاد مانع در برخی پژوهش‌های گذشته بررسی شده بود اما مطالعه جامعی که بصورت نظام‌مند حالت‌های مختلف این دو پارامتر را در ترکیب با یکدیگر مورد توجه قرار داده باشد در مراجع مشاهده نگردید. ضمن اینکه تحلیل اثر محل قرارگیری افقی و عمودی تیر در پشت مانع در ترکیب با دو پارامتر شکل و ابعاد مانع نوآوری دیگر پژوهش حاضر است.

۲- روش مدلسازی

با توجه به هزینه محاسباتی بالای شبیه‌سازی سه‌بعدی مسائل ارتعاشات ناشی از گردابه بویژه در رژیم جریان آشفته، بسیاری از مقالات از مدل‌های عددی دوبعدی به این منظور استفاده کرده‌اند [۱۱]. در پژوهش حاضر نیز با فرض اینکه طول تیر و ناحیه سیال در راستای عمود بر صفحه زیاد بوده و متغیرهای مختلف در این راستا تغییر نمی‌کنند مدل‌سازی بصورت دوبعدی انجام شده است. جزئیات مدل‌سازی در بخش‌های زیر تشریح شده است.

۲- ۱- معادلات حاکم بر سیال

معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر وابسته به زمان یک سیال، معادلات پایستگی جرم، مومنتوم و انرژی هستند که معادلات پایستگی جرم

(پیوستگی) و مومنتوم را می‌توان بصورت زیر در مختصات لاگرانژی–اویلری اختیاری بیان کرد:

$$\nabla.\mathbf{v}=0 \qquad \text{(الف)}$$
$$\rho_f\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}+\rho_f\nabla.\left(\left(\mathbf{v}-\mathbf{v}^m\right)\mathbf{v}\right)=-\nabla p+\mu_f\nabla.\left(\nabla\mathbf{v}+\left(\nabla\mathbf{v}\right)^T\right) \qquad \text{(ب)} \qquad (۱)$$

دو معادله بالا در کنار هم معادلات ناویر–استوکس نامیده می‌شوند. در این معادلات ρ_f و μ_f به ترتیب چگالی و لزجت سیال، t زمان و $\mathbf{v}$ بردار سرعت سیال و p میدان فشار آن است. $\mathbf{v}^m$ نیز بردار سرعت نقاط شبکه سیال است. در این پژوهش سیال مورد بررسی آب با چگالی $\rho_f=۱۰۰۰\,kg/m^۳$ و لزجت $\mu_f=۸/۹\times۱۰^{-۴}\,Pa.s$ فرض شده است. ضمن اینکه با بررسی مراجع مختلف در خصوص سرعت متوسط آب در رودخانه‌ها مانند [۱۴–۱۲] مقدار $۰/۷\,m/s$ برای سرعت ورودی آب در نظر گرفته شده است. بنابراین در صورت استفاده از مانعی با قطر ۱۰ میلی‌متر، رینولدز سیال در شبیه‌سازی‌ها برابر خواهد بود با:

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho_f v_{\mathrm{ave}}D}{\mu_f}=\frac{1000\times0.7\times10\times10^{-3}}{8.9\times10^{-4}}=7865 \qquad (۲)$$

با توجه به مقدار عدد رینولدز بدست آمده، جریان آشفته بوده و در شبیه‌سازی جریان سیال باید از مدل آشفتگی مناسب بهره گرفت. دقیق‌ترین روش برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته شبیه‌سازی مستقیم عددی[1] است که با حل مستقیم و کامل معادلات ناویر–استوکس با استفاده از شبکه‌ای بسیار ریز، تمامی مقیاس‌های موجود در جریان از کوچک‌ترین تا بزرگ‌ترین گردابه‌ها در نظر گرفته می‌شود. اما این روش هزینه محاسباتی سنگینی داشته و در حال حاضر فقط برای جریان‌هایی با رینولدز پایین و هندسه‌های ساده بکار می‌رود. بنابراین در برخی موارد که مطالعه ویژگی‌های جریان در حالت پایا مدنظر است از روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر–استوکس[2] استفاده می‌شود که در آن تنها کمیت‌های میانگین حل شده و تأثیر تمام مقیاس‌های لحظه‌ای حرکت آشفته با مدل آشفتگی مدلسازی می‌گردد. به این ترتیب هزینه محاسباتی شبیه‌سازی به شدت کاهش می‌یابد. با این حال در مواردی که آگاهی از رفتار گذرای جریان ضروری باشد بکارگیری این روش از دقت مناسبی برخوردار نیست. در این گونه مسائل، استفاده از روش دیگری به نام شبیه‌سازی گردابه بزرگ پیشنهاد می‌شود که در آن حرکت‌های با مقیاس بزرگ (گردابه‌های بزرگ) بصورت مستقیم محاسبه شده و تنها حرکت‌های با مقیاس‌های کوچک مدل می‌شوند. در نتیجه روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ امروزه تبدیل به یکی از موفق‌ترین روش‌های شبیه‌سازی جریان‌های آشفته گردیده است [۱۵]. لذا در پژوهش حاضر از این روش بهره گرفته شده است. در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، معادلات ناویر–استوکس در فضا فیلتر می‌شوند طوری که گردابه‌های بزرگ حامل انرژی حل شده و گردابه‌های کوچک اتلافی با یک مدل مقیاس زیر– شبکه (SGS)[3] مدل‌سازی شوند. بعد از انجام عملیات فیلتر کردن و مدل‌سازی SGS، معادلات ناویر–استوکس را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\nabla.\bar{\mathbf{v}}=0 \qquad \text{(الف)}$$
$$\mathrm{Re}=\frac{\rho_f v_{\mathrm{ave}}D}{\mu_f}=\frac{1000\times0.7\times10\times10^{-3}}{8.9\times10^{-4}}=7865 \qquad \text{(ب)} \qquad (۳)$$

در این معادله علامت خطی که روی متغیرهای مختلف قرار گرفته است مشخص کننده عملیات فیلتر کردن می‌باشد. ضمن اینکه لزجت گردابه آشفته[4]، μ_t، بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t=\rho_f C\Delta^2\left|\bar{\mathbf{S}}\right| \qquad (۴)$$

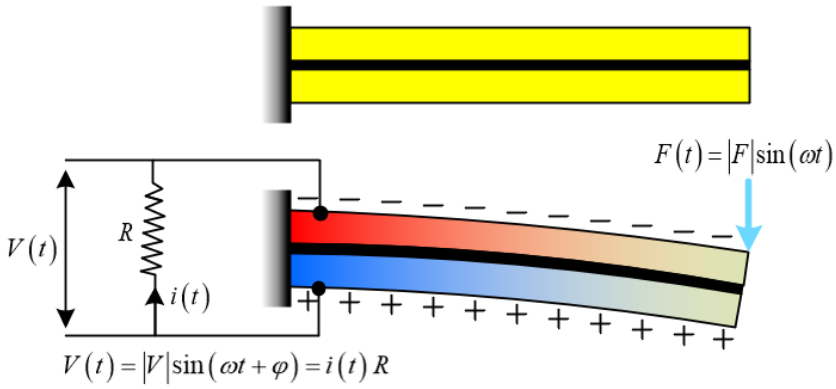
در رابطه اخیر، Δ طول فیلتر بوده، C ضریبی وابسته به نوع جریان است و $\left|\bar{\mathbf{S}}\right|$ برحسب تانسور نرخ کرنش فیلتر شده[5] یعنی $\bar{\mathbf{S}}=\frac{۱}{۲}\left(\nabla\bar{\mathbf{v}}+\left(\nabla\bar{\mathbf{v}}\right)^T\right)$ بیان می‌گردد:

$$\left|\bar{\mathbf{S}}\right|=\sqrt{2\bar{\mathbf{S}}.\bar{\mathbf{S}}} \qquad (۵)$$

۲– ۲– معادلات حاکم بر جامد

روابط حاکم بر ساختار جامد معادلات پایستگی مومنتوم خطی هستند که بر مبنای قانون دوم نیوتن بدست می‌آیند:

1 Direct Numerical Simulation (DNS)
2 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)
3 Subgrid scale (SGS) model
4 Turbulent eddy viscosity
5 Filtered strain rate tensor



شکل ۱. عملکرد یک تیر پیزوالکتریک برای برداشت انرژی

Fig. 1. Performance of a piezoelectric beam for energy harvesting

$$\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla.\boldsymbol{\sigma}_s + \rho_s \mathbf{b}_s \qquad (۶)$$

در این معادله ρ_s چگالی جامد است. $\mathbf{u}$ بردار جابجایی جامد بوده و $\mathbf{b}_s$ بردار نیروهای جسمی وارد بر آن را نشان می‌دهد. تانسور تنش کوشی σ_s نیز بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\boldsymbol{\sigma}_s = \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \qquad (۷)$$

در این رابطه $\mathbf{c}$ تانسور سختی الاستیک ماده و $\boldsymbol{\varepsilon}$ تانسور کرنش است که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}\left[(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}\right] \qquad (۸)$$

۲- ۳- شرایط فصل مشترک سیال- جامد

شرایط فصل مشترک سیال-جامد شامل قیود سینماتیکی و دینامیکی است که بصورت زیر در فصل مشترک مشخص می‌گردد:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{v} \qquad \text{(الف)}$$
$$\boldsymbol{\sigma}_s.\mathbf{n} + \boldsymbol{\sigma}_f.\mathbf{n} = 0 \qquad \text{(ب)} \qquad (۹)$$

در معادله اخیر $\mathbf{n}$ بردار نرمال خروجی از مرز جامد است. ضمناً روابط اول و دوم در این معادله به ترتیب بیانگر یکسان بودن سرعت سیال و جامد، و تعادل نیرویی در فصل مشترک هستند.

۲- ۴- معادلات حاکم بر پیزوالکتریک

پیزوالکتریک‌ها مواد دی‌الکتریکی هستند که تغییر شکل مکانیکی را به اختلاف پتانسیل و بار الکتریکی تبدیل می‌کنند. وقتی این مواد تحت کرنش مکانیکی قرار گیرند از نظر الکتریکی قطبی شده و اختلاف پتانسیلی بین دو سر آن‌ها ایجاد می‌شود. بدین ترتیب یکی از سطوح ماده دارای بار منفی و سطح مقابل آن دارای بار مثبت خواهد شد. در صورت اتصال دو الکترود به این سطوح، بارهای الکتریکی از طریق مدار مربوطه از یک سطح به سطح دیگر جریان می‌یابند تا تعادل بار بین دو سطح برقرار شود. با برعکس شدن جهت اعمال تنش جهت میدان الکتریکی و جریان بار نیز معکوس خواهد شد. بنابراین با تغییر پریودیک تنش می‌توان یک جریان متناوب در مدار ایجاد کرد. اصول عملکرد یک طراحی مرسوم از مبدل پیزوالکتریک در شکل ۱ نمایش داده شده است.

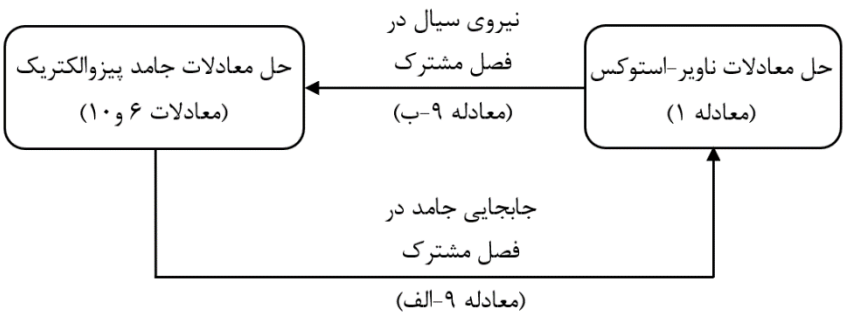
رفتار ماده پیزوالکتریک نیز با استفاده از قانون دوم نیوتن که در معادله (۶) داده شده قابل توصیف است. البته تانسور تنش σ_s در سمت راست این معادله باید به جای روابط تنش-کرنش داده شده در (۷)، از روابط مناسب تنش-بار[1] محاسبه گردد. برای یک ماده پیزوالکتریک خطی، روابط تنش-بار را می‌توان بصورت زیر نوشت:

1 Stress-charge relations

جدول ۱. خواص ماده پیزوالکتریک

Table 1. Properties of the piezoelectric material

خاصیت	چگالی (kg/m^3)	نرمی ($1/Pa$)	ثابت بار (pC/N)	گذردهی نسبی
مقدار	۳۰۰۰	10^{-7}	۷۸/۳۳	۱۰



شکل ۲. فلوچارت حل معادلات در نرم‌افزار

Fig. 2. Flowchart of solving the equations in the software

$$\boldsymbol{\sigma}_s = \mathbf{c}_{\mathbf{E}}\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{e}^T\mathbf{E}_p \quad \text{(الف)}$$
$$\mathbf{D} = \mathbf{e}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{S}}\mathbf{E}_p \quad \text{(ب)} \qquad (۱۰)$$

در این معادله $\mathbf{c}_{\mathbf{E}}$ ماتریس سختی در میدان الکتریکی ثابت، $\mathbf{e}$ ماتریس ثوابت دی‌الکتریک و $\varepsilon_{\mathbf{S}}$ ماتریس گذردهی در کرنش مکانیکی ثابت است. $\mathbf{D}$ جابجایی الکتریکی[1] بوده و $\mathbf{E}_p$ نمایانگر شدت میدان الکتریکی است. عموماً خواص مواد پیزوالکتریک به فرم کرنش-بار گزارش می‌شوند. بنابراین استفاده از روابط کرنش-بار که در زیر آورده شده متداول‌تر از روابط تنش-بار است:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{s}_{\mathbf{E}}\boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{d}^T\mathbf{E}_p \quad \text{(الف)}$$
$$\mathbf{D} = \mathbf{d}\boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{T}}\mathbf{E}_p \quad \text{(ب)} \qquad (۱۱)$$

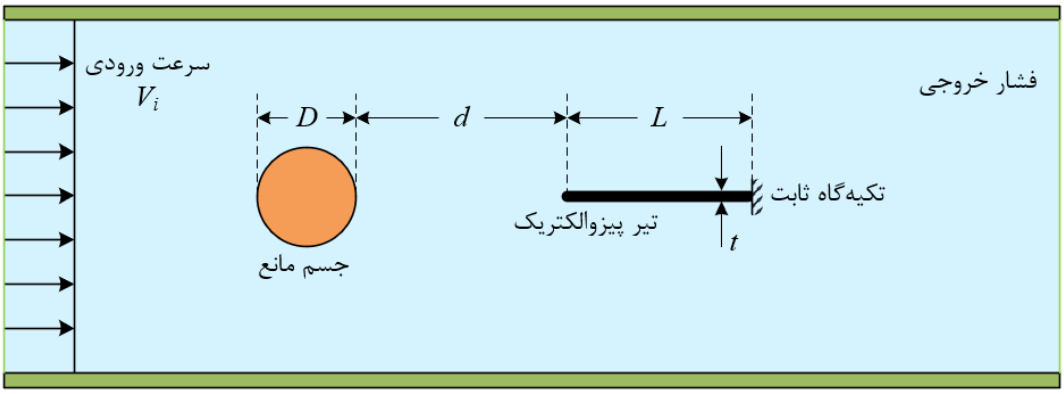
در این معادله $\mathbf{s}_{\mathbf{E}}$ ماتریس نرمی در میدان الکتریکی ثابت، $\mathbf{d}$ ماتریس کوپلینگ (ثوابت بار) پیزوالکتریک و $\varepsilon_{\mathbf{T}}$ ماتریس گذردهی است.

1 Electric displacement

در مقاله حاضر، ماده پیزوالکتریک از جنس پی‌زدتی-پی‌دی‌ام‌اس[2] انتخاب شده است که بدلیل سفتی پایین و در نتیجه قابلیت تغییر شکل قابل ملاحظه در جریان سیال اخیراً مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱۹-۱۶]. بدلیل اینکه رفتار ناهمسانگرد ماده تأثیری در نتایج این پژوهش ندارند ماده همسانگرد فرض شده و خواص آن مطابق با تحقیقات ساپاتری و بهادرا [۱۷] انتخاب گردیده و در جدول ۱ آورده شده است. ضمناً چگالی و مدول الاستیک ماده پایه‌ای که لایه پیزوالکتریک روی آن چسبانده شده عیناً شبیه ماده پیزوالکتریک انتخاب شده است.

روند محاسبات در نرم‌افزار در فلوچارت شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق با این فلوچارت، در تکرار کلی اول، ابتدا معادلات ناویر- استوکس برای جریان سیال بصورت تکراری حل می‌شوند تا زمانی که تفاوت میدان سرعت و فشار بدست آمده برای سیال در دو تکرار متوالی کمتر از مقدار تعیین شده باشد. بعد از حل مسأله سیال، نیروی وارده از سیال بر فصل مشترک آن با جامد محاسبه شده و حرکت و تغییر شکل جامد پیزوالکتریک در اثر این نیرو و سایر نیروهای وارده محاسبه می‌گردد. جابجایی جامد به

2 Lead Zirconate-Titanate/Polydimethylsiloxane (PZT-PDMS)



شکل ۳. مسأله مورد بررسی توسط پان و همکاران [۲۰]

Fig. 3. The problem considered by Pan et al. [20]

نوبه خود سبب تغییر فصل مشترک و در نتیجه مرز سیال شده و حل مجدد مسأله سیال را ضروری می‌نماید. در تکرار کلی دوم، حل مسأله سیال و جامد همانند تکرار کلی اول انجام می‌شود. حال اگر تفاوت بین حل سیال (میدان سرعت و فشار) و حل جامد (جابجایی) بین دو تکرار کلی اول و دوم از مقادیر مشخص شده کمتر باشد که حل مسأله برهمکنش سیال- جامد همگرا شده است. در غیر اینصورت لازم است تکرارهای کلی دیگر تا زمان همگرایی مسأله انجام پذیرد.

۲- ۵- اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود

در پژوهش حاضر برای ایجاد مدل اجزاء محدود برداشت کننده انرژی، از نرم‌افزار کمسول استفاده گردیده است. همچنین جهت ارزیابی عملکرد این مدل از نتایج تحقیق پان[1] و همکاران [۲۰] بهره گرفته شده است. در مقاله مذکور، مطابق با شکل ۳، مسأله‌ای مشابه با مسأله مورد بررسی در پژوهش حاضر با نرم‌افزار کمسول شبیه‌سازی گردیده و اعتبار مدل توسعه یافته در مقایسه با نتایج تجربی تأیید شده بود.

مقدار پارامترهای مختلف شکل ۳ در جدول ۲ آمده است.

جنس تیر پایه از پلی‌استر و جنس لایه پیزوالکتریک از پی‌وی‌دی‌اف[2] فرض شد که خواص آن‌ها در جدول ۳ فهرست شده است.

ضمناً رینولدز مسأله برابر است با:

جدول ۲. مقدار پارامترهای داده شده در شکل ۳

Table 2. The value of parameters given in Fig. 3

پارامتر	مقدار
قطر مانع D	۰/۰۲ m
فاصله مانع تا نوک تیر d	۰/۰۵ m
طول تیر L	۰/۰۳ m
ضخامت تیر t	۰/۱۵۷ mm
طول لایه پیزوالکتریک	۰/۰۳ m
ضخامت لایه پیزوالکتریک	۰/۰۲۸ mm
سرعت ورودی V_i	۰/۵ m/s

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho VD}{\mu}=\frac{1000\times0.5\times0.02}{8.9\times10^{-4}}=11236 \qquad (۱۲)$$

در نتیجه جریان مورد بررسی آشفته است. نمودار تغییرات نیروی برآی وارد بر تیر و ولتاژ خروجی برداشت کننده بر حسب زمان در شکل‌های ۴ و ۵ برای این پژوهش با نتایج پان و همکاران [۲۰] مقایسه شده است. مطابق با شکل، همخوانی بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد و این امر مؤید اعتبار مدل‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر است.

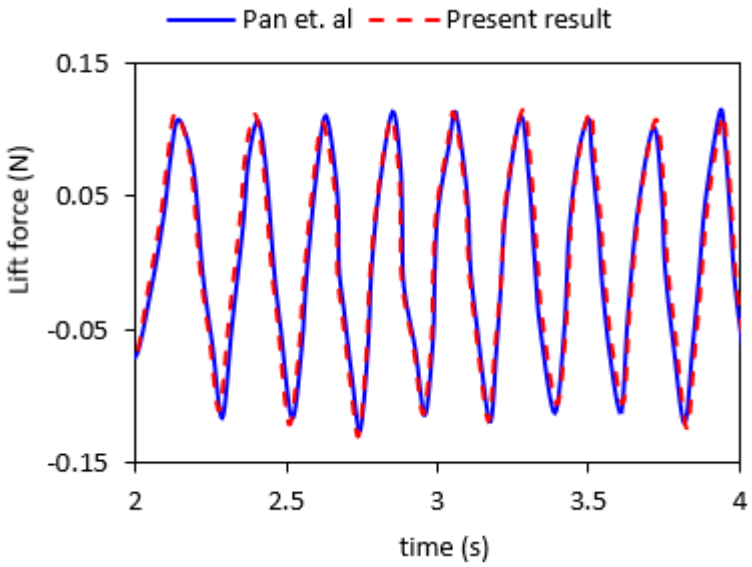
جهت اطمینان بیشتر از اعتبار مدل پیشنهادی، مسأله‌ای که هندسه

1 Pan
2 Polyvinylidene Difluoride (PVDF)

جدول ۳. خواص ماده تیر و لایه پیزوالکتریک

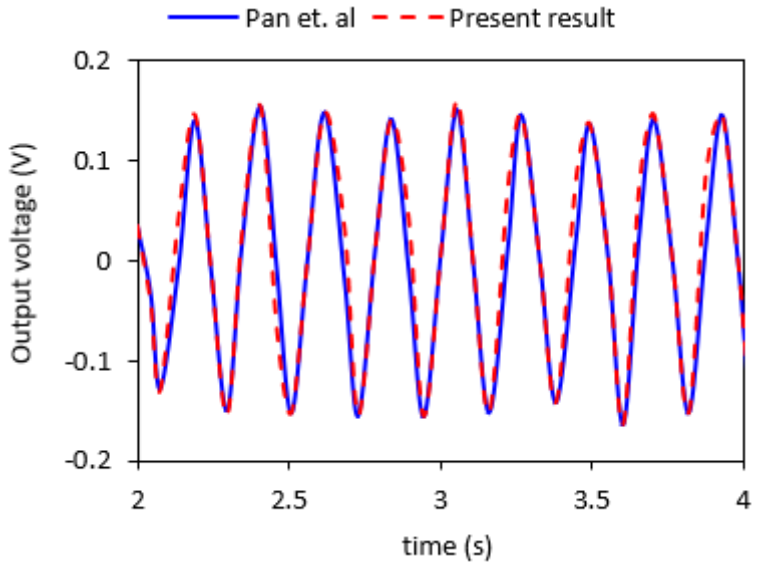
Table 3. Properties of the beam material and the piezoelectric layer

ماده	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیک (GPa)		ثابت بار (pC/N)	گذردهی نسبی
پلی‌استر	۱۳۸۰	۳۰		-	-
PVDF	۱۷۸۰	۱۷	۲/۵	۹/۵	



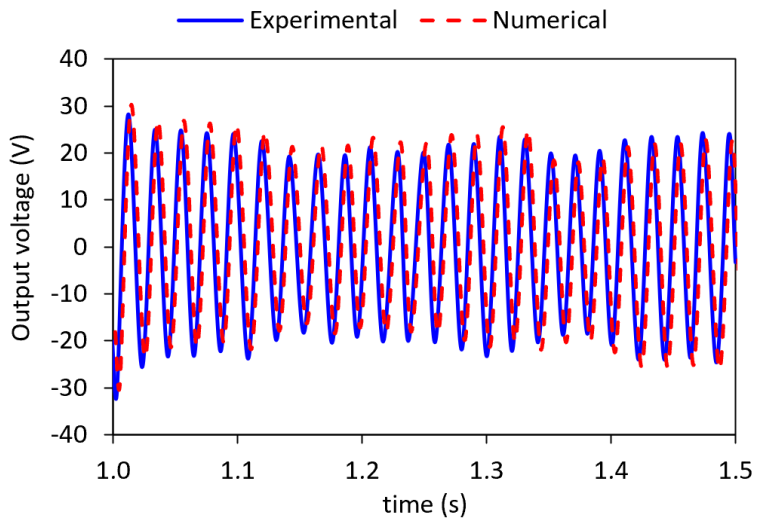
شکل ۴. مقایسه نتایج بدست آمده برای نیروی برآی وارد بر تیر در پژوهش حاضر با نتایج پان و همکاران [۲۰]

Fig. 4. Comparison of the results of the present study and Pan et al. [20] for the lift force on the beam



شکل ۵. مقایسه نتایج بدست آمده برای ولتاژ خروجی برداشت کننده انرژی در پژوهش حاضر با نتایج پان و همکاران [۲۰]

Fig. 5. Comparison of the results of the present study and Pan et al. [20] for the output voltage



شکل ۶. مقایسه نتایج بدست آمده برای ولتاژ خروجی برداشت کننده انرژی در پژوهش حاضر با نتایج آکایدین و همکاران [۲۱]

Fig. 6. Comparison of the results of the present study and Akaydın et al. [21] for the output voltage of the harvester

جدول ۵. خواص ماده پایه تیر و لایه پیزوالکتریک

Table 5. Properties of the beam base material and the piezoelectric layer

ماده	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیک (GPa)	ثابت بار (pC/N)	گذردهی نسبی
میلار	۱۳۹۰	۳/۷۹	-	-
PVDF	۱۷۸۰	۳	۰/۰۷	۱/۳۸

آن مشابه با مسأله قبلی (شکل ۳) بوده اما از روش تجربی برای بررسی آن استفاده شده بود از نتایج آکایدین و همکاران [۲۱] انتخاب گردید. ضمن اینکه سیال کاری در این مسأله هوا می‌باشد. پارامترهای مربوط به این مسأله در جدول ۴ آورده شده است:

جنس تیر پایه از میلار[1] و جنس لایه پیزوالکتریک از پی‌وی‌دی‌اف است که خواص آن‌ها مطابق با جدول ۵ است.

در این مسأله رینولدز جریان برابر است با:

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho VD}{\mu}=\frac{1.225\times 7.3\times 0.03}{1.81\times 10^{-5}}=14800 \qquad (۱۳)$$

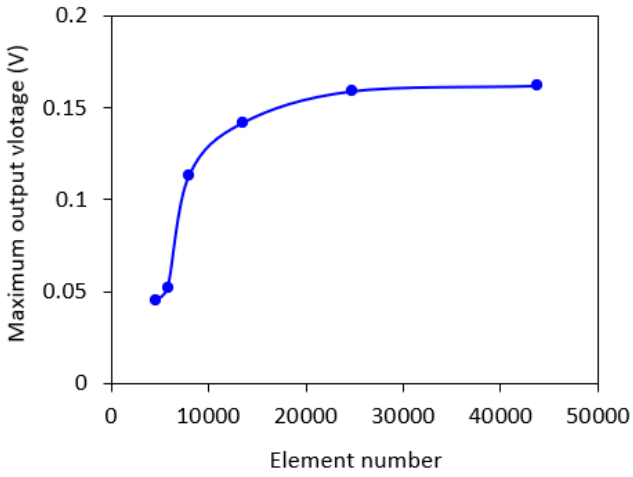
در نتیجه جریان مورد بررسی در این مسأله نیز آشفته است. نمودار تغییرات ولتاژ خروجی برداشت کننده بر حسب زمان در شکل ۶ برای این پژوهش با نتایج آکایدین و همکاران [۲۱] مقایسه شده است. مطابق با شکل،

1 Mylar

جدول ۴. مقدار پارامترهای داده شده در شکل ۳ برای مقایسه با تحلیل تجربی

Table 4. The value of parameters given in Fig. 3 for comparison with experimental analysis

پارامتر	مقدار
قطر مانع D	۰/۰۳ m
فاصله مانع تا نوک تیر d	۰/۰۶ m
طول تیر L	۰/۰۳ m
ضخامت تیر t	۰/۲ mm
طول لایه پیزوالکتریک	۰/۰۳ m
ضخامت لایه پیزوالکتریک	۰/۰۲۸ mm
سرعت ورودی V_i	۷/۳ m/s



شکل ۷. وابستگی ولتاژ خروجی به تعداد المان‌ها

Fig. 7. Dependence of the output voltage on the elements number

همخوانی نسبتاً قابل قبولی بین نتایج وجود دارد.

ضمناً با محاسبه میانگین مجموع مربعات[1] برای ولتاژ خروجی برداشت کننده در شکل ۶، به ترتیب مقادیر $v_{rms}=۲۲/۱۰\ \mathrm{V}$ و $v_{rms}=۲۲/۱۵\ \mathrm{V}$ برای روش تجربی و عددی بدست آمدند که حدود ۰/۲ درصد با هم اختلاف دارند. ضمناً اختلاف فاز بین نتایج تجربی و عددی ناشی از تفاوت بین این نتایج در آغاز نوسانات تیر در مرحله گذرای ارتعاشات است. هر چند با گذشت زمان و رسیدن به حالت پایدار، دامنه و فرکانس ارتعاشات در دو روش به هم نزدیک شده است اما اختلاف فاز اولیه همچنان در نتایج باقیمانده است.

۲- ۶- آزمون همگرایی

برای اطمینان از استقلال نتایج شبیه‌سازی از اندازه المان‌ها و نیز گام زمانی، آزمون همگرایی در دو حوزه مکان و زمان برای مسأله بخش قبلی که برای اعتبارسنجی به کار رفته بود انجام گرفت. این مسأله بدلیل شباهت بسیار زیاد به مسأله مورد مطالعه در پژوهش حاضر انتخاب گردید و بررسی‌های انجام شده نیز نشان داد نتایج این آزمون همگرایی برای کلیه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این پژوهش معتبر است.

نمودار تغییرات بیشینه ولتاژ خروجی برداشت کننده بر حسب تعداد المان‌ها در شکل ۷ آورده شده است. مطابق با این نمودار، تعداد ۲۴۶۹۴ المان مثلثی سه گرهی برای انجام شبیه‌سازی انتخاب گردید.

1 Root mean value

جدول ۶. وابستگی بیشینه ولتاژ خروجی سیستم به اندازه گام زمانی شبیه‌سازی

Table 6. Dependence of the system output voltage on the simulation time step size

اندازه گام زمانی (s)	ولتاژ خروجی (V)
۰/۰۵	۰/۱۰۸
۰/۰۱	۰/۱۴۵
۰/۰۰۵	۰/۱۶۷
۰/۰۰۱	۰/۱۵۹
۰/۰۰۰۵	۰/۱۶۱
۰/۰۰۰۱	۰/۱۶۰

وابستگی بیشینه ولتاژ خروجی سیستم به اندازه گام زمانی شبیه‌سازی در جدول ۶ گزارش شده است. همانطور که دیده می‌شود برای اندازه گام زمانی $\Delta t=۰/۰۰۱s$ و کوچک‌تر، مقدار ولتاژ خروجی مستقل از اندازه گام زمانی خواهد بود. لذا استفاده از این اندازه گام زمانی برای انجام شبیه‌سازی‌ها مناسب است.

۲- ۷- پارامترهای مورد بررسی

در این پژوهش، تأثیر چهار پارامتر هندسی مختلف یعنی شکل مانع، نسبت طول مانع به ارتفاع آن، فاصله تیر تا مانع و خروج از مرکز تیر نسبت به مانع بر عملکرد برداشت کننده مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. ضمن اینکه چهار حالت مختلف برای هر کدام از چهار پارامتر هندسی بررسی خواهد گردید. چهار حالت منتخب برای شکل مانع در شکل ۸ به نمایش در آمده است.

در چهار حالتی که برای نسبت طول مانع به ارتفاع آن در نظر گرفته شده ارتفاع مانع یعنی d که بعد عمود بر جریان سیال و تعیین کننده عدد رینولدز است ثابت فرض شده و طول مانع یعنی a تغییر می‌کند. به طوری که نسبت طول به ارتفاع، چهار مقدار $\frac{a}{d}=۰/۲۵, ۰/۵, ۰/۷۵, ۱$ را اختیار کند. این چهار حالت برای مانع دایره‌ای در شکل ۹ آورده شده است.

پارامتر بعدی فاصله تیر تا مانع می‌باشد که در شکل ۱۰ با δ نشان داده شده است. این پارامتر نسبت به بعد مشخصه مانع یعنی d بی‌بعد شده و چهار مقدار $\frac{\delta}{d}=۰, ۰/۵, ۱, ۲$ برای آن انتخاب شده است.

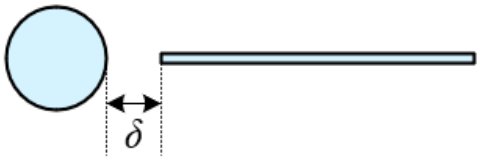
چهارمین پارامتر مورد بررسی، خروج از مرکز تیر نسبت به مانع است. این پارامتر که در شکل ۱۱ با e نشان داده شده است بصورت فاصله خط

شکل ۸. چهار هندسه منتخب برای شکل مانع

Fig. 8. Four geometries selected for the bluff body shape

شکل ۹. چهار نسبت طول به ارتفاع مختلف برای مانع دایره‌ای

Fig. 9. Four different length to height ratios for the circular bluff body



شکل ۱۰. فاصله تیر تا مانع

Fig. 10. The distance between the beam and the bluff body

شکل ۱۱. خروج از مرکز تیر نسبت به مانع

Fig. 11. The beam eccentricity with respect to the bluff body

جدول ۷. حالت‌های شبیه‌سازی مختلف مطابق با روش طراحی آزمون تاگوچی

Table 7. Different simulation cases based on the Taguchi's method of experiment design

حالت	هندسه	شکل پایه	نسبت طول	نسبت فاصله	نسبت خروج از مرکز
۱		●	۰/۲۵	۰	۰
۲		●	۰/۵	۰/۵	۰/۲
۳		●	۰/۷۵	۱	۰/۴
۴		●	۱	۲	۰/۶
۵		■	۰/۲۵	۰/۵	۰/۴
۶		■	۰/۵	۰	۰/۶
۷		■	۰/۷۵	۲	۰
۸		■	۱	۱	۰/۲
۹		◗	۰/۲۵	۱	۰/۶
۱۰		◗	۰/۵	۲	۰/۴
۱۱		◗	۰/۷۵	۰	۰/۲
۱۲		◗	۱	۰/۵	۰
۱۳		▶	۰/۲۵	۲	۰/۲
۱۴		▶	۰/۵	۱	۰
۱۵		▶	۰/۷۵	۰/۵	۰/۶
۱۶		▶	۱	۰	۰/۴

تقارن افقی تیر تا خط تقارن افقی مانع تعریف می‌شود. چهار مقدار مختلف e طوری انتخاب شده‌اند که نسبت خروج از مرکز به ارتفاع مانع برابر با چهار مقدار $\frac{e}{d} = ۰, ۰/۲, ۰/۴, ۰/۶$ شود. این محدوده مقادیر با احتساب این قید انتخاب شده‌اند که تیر از محدوده پشت مانع خارج نشده و در مقابل جریان مستقیم سیال قرار نگیرد.

با توجه به موارد مذکور، چهار پارامتر هندسی مختلف برای برداشت کننده انرژی در نظر گرفته شده است که هر کدام از آن‌ها خود دارای چهار حالت مختف هستند. لذا اگر طراحی آزمون با استفاده از روش تاگوچی انجام شود، استفاده از یک آرایه ۱۶ تایی[1] برای انجام شبیه‌سازی‌ها مناسب خواهد بود [۲۲]. حالت‌های مختلف این آرایه در جدول ۷ آورده شده است. شرایط مرزی تیر پیزوالکتریک در تمام حالت‌ها به این ترتیب است که کلیه مؤلفه‌های جابجایی در انتهای سمت چپ تیر که تکیه‌گاه ثابت دارد برابر با صفر قرار داده شده و در سایر سطوح شرایط مرزی برهمکنش سیال-جامد مطابق با معادله (۹) در نظر گرفته شده است.

شایان ذکر است در همه این حالت‌ها طول تیر طوری انتخاب شده است که یکی از فرکانس‌های طبیعی اول و دوم تیر با فرکانس تحریک یعنی

1 L16

جدول ۸. ولتاژ خروجی و توان تولیدی برای حالت‌های مختلف هندسه برداشت کننده انرژی

Table 8. The output voltage and power for different geometrical cases of the energy harvester

حالت	فرکانس اول		فرکانس دوم	
	ولتاژ خروجی (V)	توان تولیدی (μW)	ولتاژ خروجی (V)	توان تولیدی (μW)
۱	۰/۱۳۴	۱۶/۹۴۵	۰/۲۵۷	۳۹/۵۷۸
۲	۰/۰۸۹	۱۱/۰۹۰	۰/۲۰۱	۲۴/۴۷۰
۳	۰/۰۴۷	۵/۹۲۱	۰/۱۶۰	۱۵/۵۳۴
۴	۰/۰۳۹	۴/۹۶۵	۰/۰۹۶	۵/۶۸۵
۵	۰/۱۱۳	۱۴/۰۶۱	۰/۲۴۵	۳۶/۰۲۰
۶	۰/۰۳۸	۴/۸۵۵	۰/۲۱۶	۲۸/۴۱۴
۷	۰/۰۹۷	۱۲/۰۴۱	۰/۱۸۹	۲۱/۵۳۲
۸	۰/۰۶۷	۸/۴۱۲	۰/۱۶۸	۱۷/۱۱۳
۹	۰/۱۳۱	۱۶/۴۳۵	۰/۲۴۶	۳۶/۵۸۲
۱۰	۰/۱۱۹	۱۵/۰۱۵	۰/۲۳۰	۳۱/۸۳۶
۱۱	۰/۱۵۸	۱۹/۸۳۴	۰/۲۴۵	۳۶/۱۱۹
۱۲	۰/۱۱۵	۱۴/۵۵۷	۰/۲۲۵	۳۰/۴۰۰
۱۳	۰/۱۳۸	۱۷/۳۳۸	۰/۲۴۹	۳۷/۲۶۱
۱۴	۰/۱۵۷	۱۹/۶۶۴	۰/۲۶۹	۴۳/۱۴۳
۱۵	۰/۱۰۴	۱۳/۱۴۲	۰/۲۵۱	۳۸/۰۰۶
۱۶	۰/۱۰۹	۱۳/۵۳۹	۰/۲۲۷	۳۱/۰۷۶

فرکانس جدایش گردابه‌ها برابر شود. به این ترتیب بیشترین تغییر شکل در تیر ایجاد شده، ولتاژ و توان الکتریکی بالاتری تولید خواهد شد. با توجه به اینکه برای تحریک فرکانس‌های طبیعی بالاتر، نیاز به افزایش بسیار زیاد طول تیر بود این موارد مورد بررسی قرار نگرفت. ضمناً نتایج بدست آمده نشان داد عملکرد برداشت کننده در تحریک فرکانس طبیعی دوم به میزان قابل توجهی نسبت به تحریک فرکانس طبیعی اول برتری دارد. لذا در بخش بعد، ابتدا نتایج مربوط به تحریک فرکانس طبیعی دوم تیر به تفصیل ارائه شده و سپس در ادامه به اجمال به نتایج طراحی برای تحریک فرکانس اول تیر پرداخته خواهد شد.

۳- نتایج و بحث

مقادیر بدست آمده برای ولتاژ خروجی و توان تولیدی برداشت کننده در فرکانس اول و دوم تیر برای ۱۶ حالت مورد بررسی در جدول ۸ ارائه شده است. داده‌های این جدول در بخش‌های بعد برای بررسی اثر پارامترهای مختلف استفاده خواهد شد.

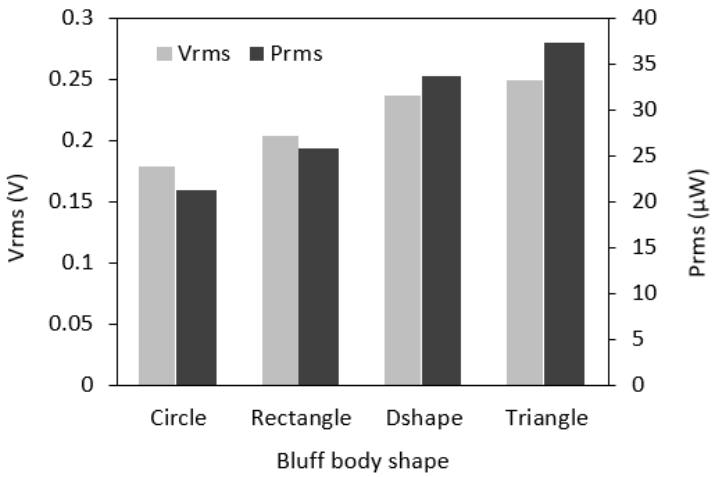
۳- ۱- طراحی برای تحریک فرکانس دوم تیر

۳- ۱- ۱- تأثیر شکل مانع

مقدار میانگین دامنه ولتاژ و توان برداشت کننده برای شکل‌های مختلف مانع در نمودار شکل ۱۲ مقایسه شده است.

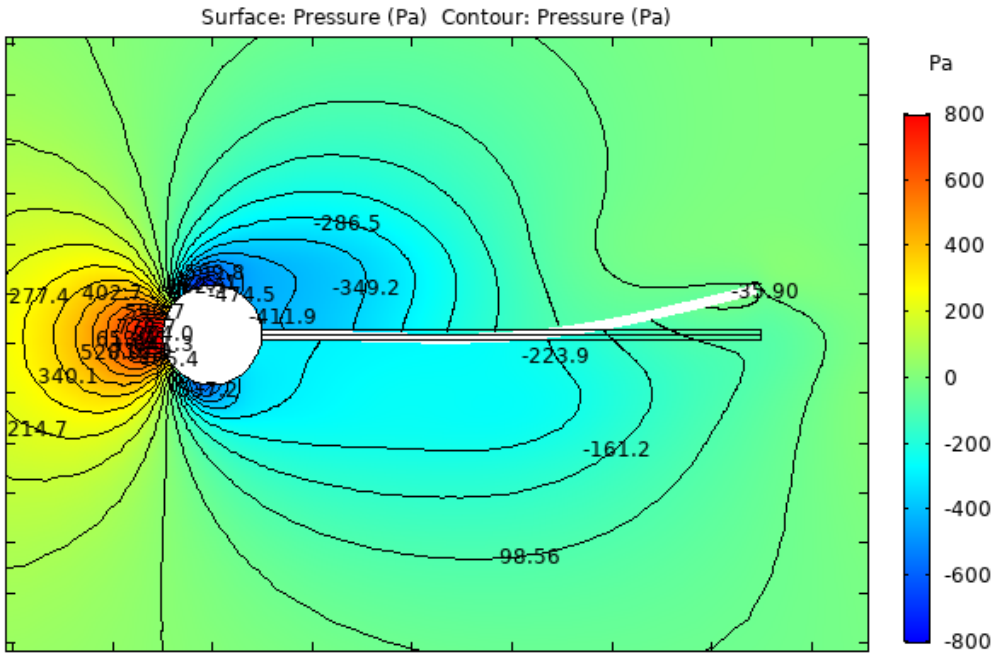
مطابق با این شکل‌ها، موانع مثلثی، دی-شکل، مستطیلی و دایره‌ای به ترتیب بالاترین میزان ولتاژ و توان الکتریکی را تولید می‌کنند. کانتور توزیع فشار ایجاد شده در اطراف تیر برای موانع دایره‌ای و مثلثی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. مطابق با شکل‌های ۱۳ و ۱۴، گرادیان‌های فشار ایجاد شده ناشی از جدایش جریان در پشت مانع برای مانع مثلثی بزرگ‌تر از مانع دایره‌ای شکل هستند. با توجه به اینکه اختلاف فشار در بالا و پایین تیر مهم‌ترین عامل ایجاد نیروی برآی وارد بر آن هستند لذا برآیند نیروی برآی وارد شده بر تیری که پشت مانع مثلثی قرار دارد بزرگ‌تر بوده و تغییر شکل بیشتری در آن ایجاد می‌کند.

خطوط جریان اطراف تیر و موانع دایره‌ای و مثلثی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به نمایش در آمده است. در این شکل‌ها مستطیل‌های قرمز رنگ نشان



شکل ۱۲. تأثیر شکل مانع بر ولتاژ خروجی و توان الکتریکی تولیدی

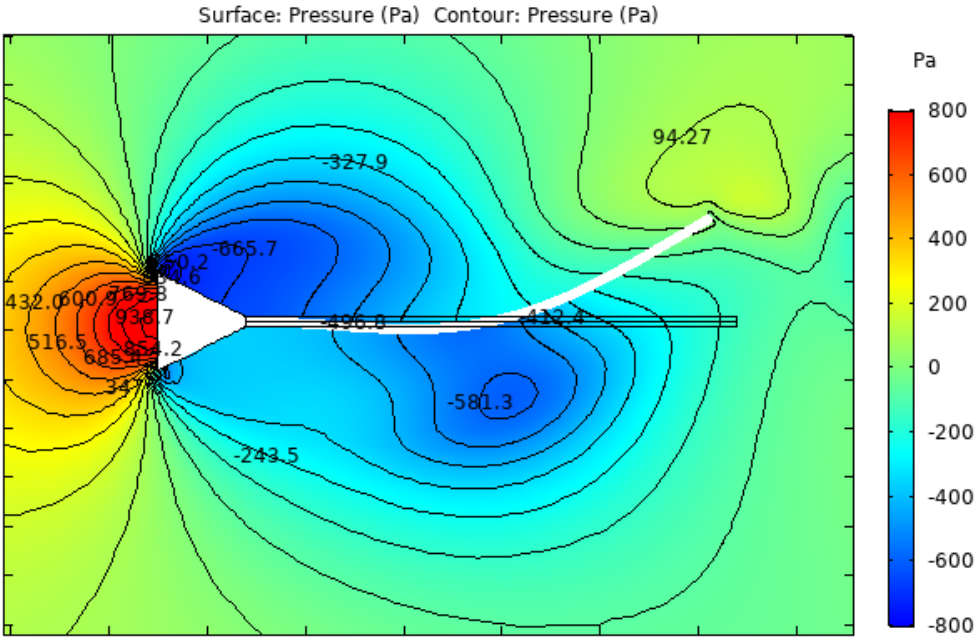
Fig. 12. The effect of the bluff body shape on the output voltage and electrical power



شکل ۱۳. توزیع فشار سیال برای مانع دایره‌ای

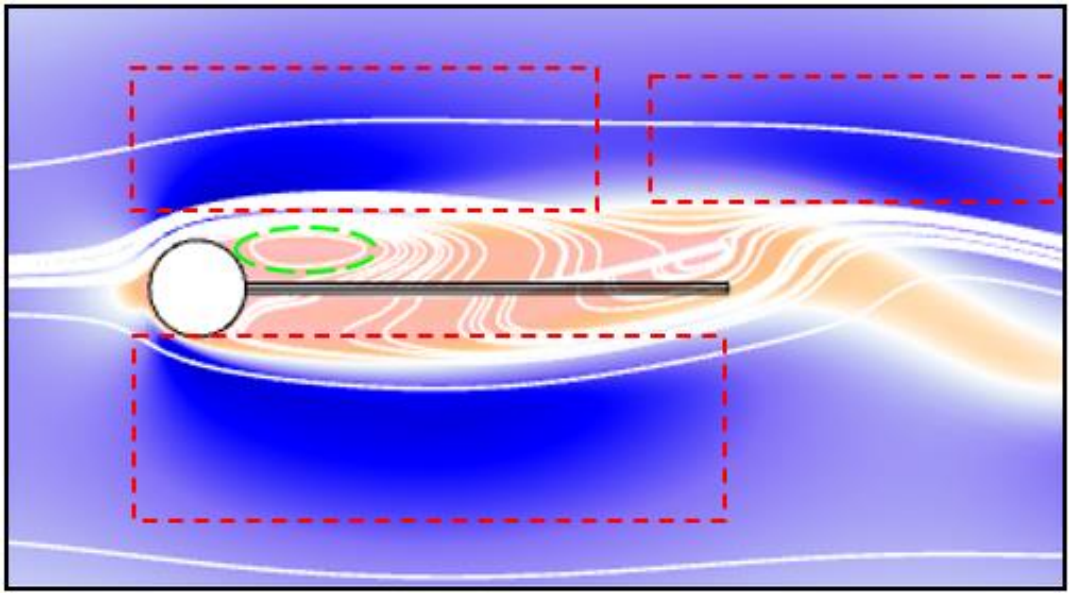
Fig. 13. The fluid pressure distribution for the circular bluff body

دهنده گردابه‌های جدا شده در تیر و بیضی سبز رنگ گردابه‌های کم فشار پشت مانع را نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود گردابه‌های جدا شده پشت مانع دایره‌ای با فاصله نزدیکی نسبت به هم قرار گرفته و انرژی آن‌ها در ناحیه بزرگ‌تری توزیع شده است. در حالی که گردابه‌های جدا شده در پشت مانع مثلثی از هم دور بوده و انرژی آن‌ها در ناحیه کوچکی از سیال متمرکز شده است. تمرکز بیشتر انرژی در این گردابه‌ها و فاصله زیادتر نآآن‌ها سبب اعمال نیرویی بزرگ‌تر و با ماهیت نوسانی بیشتر به تیر شده و تغییر شکل بزرگ‌تری در آن ایجاد می‌کند. این امر را می‌توان ناشی از لبه تیز مانع مثلثی دانست. چرا که پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند قدرت گردابه با کاهش شعاع لبه مانع افزایش می‌یابند [۲۳ و ۲۴]. ضمن اینکه مطابق با شکل‌های ۱۵ و ۱۶ گردابه‌های کم فشار ایجاد شده در پشت مانع دایره‌ای نسبت به مانع مثلثی کوچک‌ترند. بنابراین ناحیه کم فشار در پشت مانع مثلثی



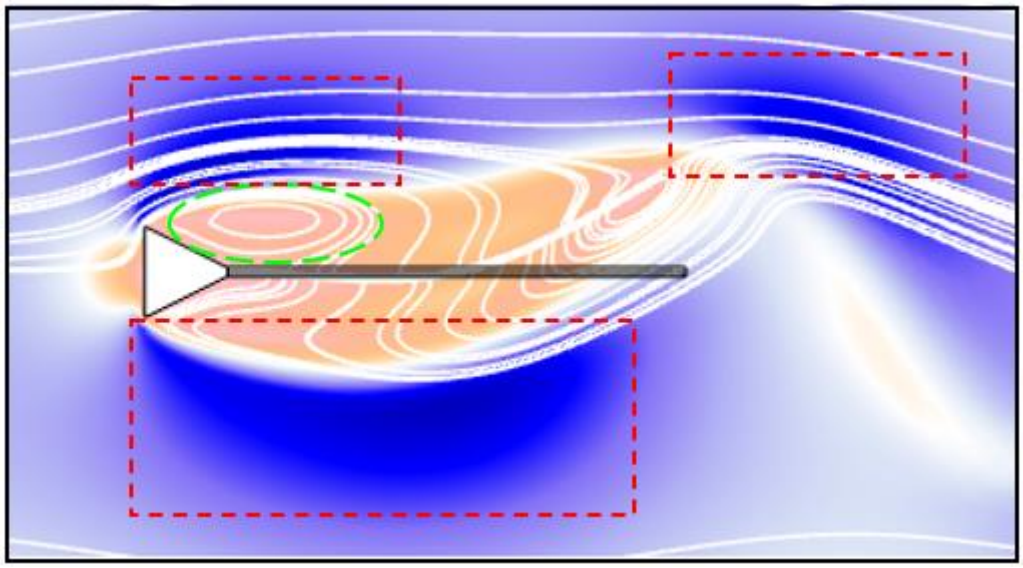
شکل ۱۴. توزیع فشار سیال برای مانع مثلثی

Fig. 14. The fluid pressure distribution for the triangular bluff body



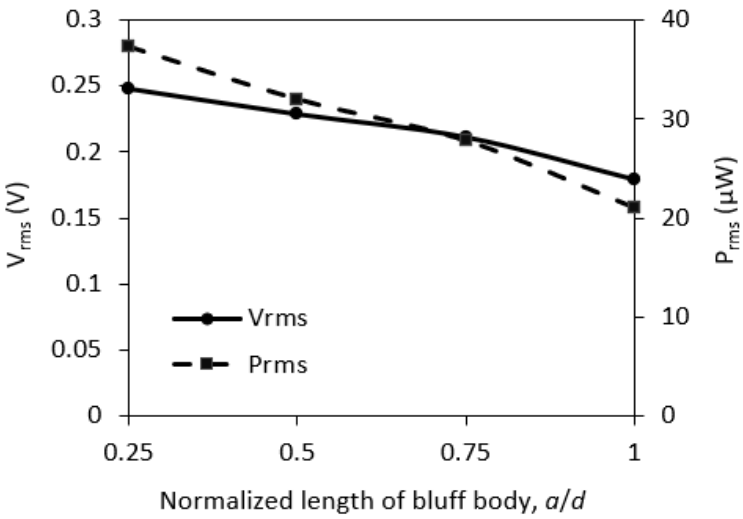
شکل ۱۵. خطوط جریان اطرف مانع دایره‌ای

Fig. 15. The flow streamlines around the circular bluff body



شکل ۱۶. خطوط جریان اطرف مانع مثلثی

Fig. 16. The flow streamlines around the triangular bluff body



شکل ۱۷. تأثیر نسبت طول به ارتفاع بر ولتاژ خروجی و توان الکتریکی تولیدی

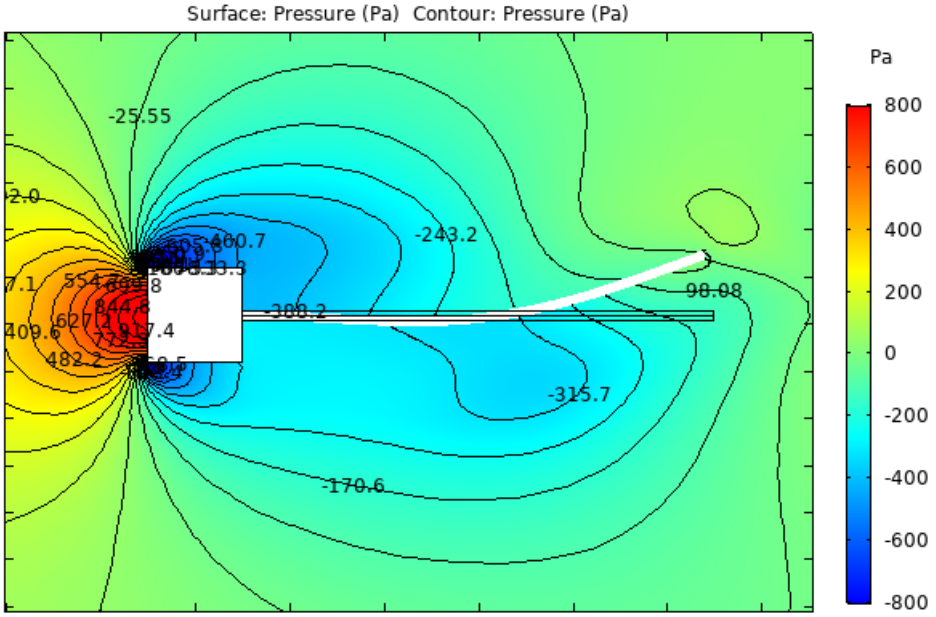
Fig. 17. The effect of the bluff body length to height ratio on the output voltage and electrical power

بزرگ‌تر بوده و این خود سبب تغییر شکل بیشتر تیر قرار گرفته در پشت این مانع می‌شود.

۳- ۱- ۲- تأثیر نسبت طول به ارتفاع مانع

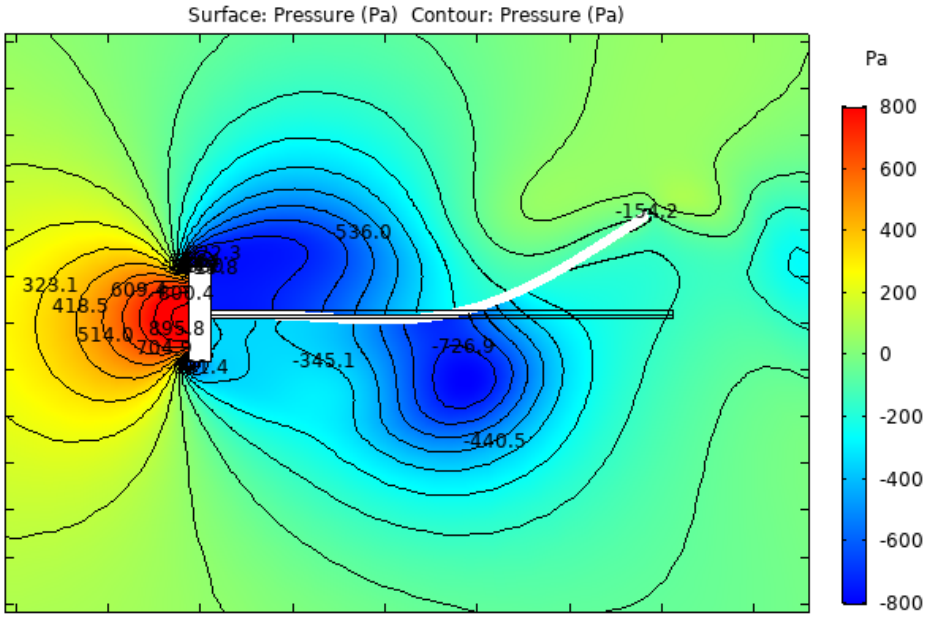
مقدار میانگین ولتاژ و توان برداشت کننده برای نسبت‌های مختلف طول به ارتفاع مانع در نمودار شکل ۱۷ مقایسه شده است.

مطابق با نمودار فوق، با افزایش طول مانع، ولتاژ و توان الکتریکی خروجی برداشت کننده کاهش پیدا می‌کند. کانتور توزیع فشار سیال در اطراف تیر برای موانع مستطیلی با نسبت طول به ارتفاع ۱ و ۰/۲۵ به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ آورده شده است. مطابق با این شکل‌ها گرادیان‌های فشار شکل گرفته در بالا و پایین تیری که پشت مانع باریک‌تر قرار گرفته‌اند بزرگ‌تر است که همین امر سبب افزایش نیروی برآی وارد بر این تیر و تغییر



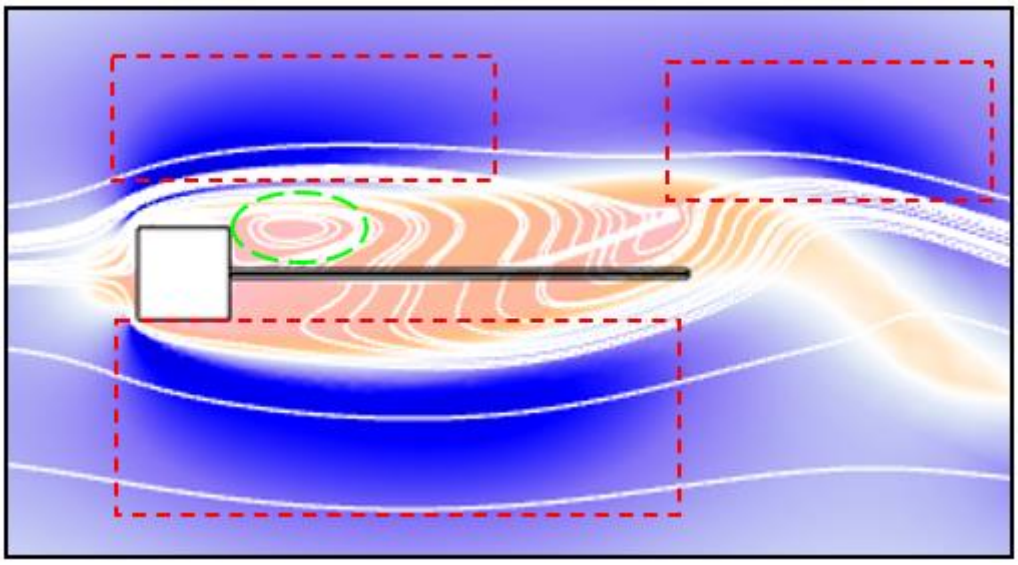
شکل ۱۸. توزیع فشار سیال برای مانع مستطیلی پهن

Fig. 18. The fluid pressure distribution for the wide rectangular bluff body



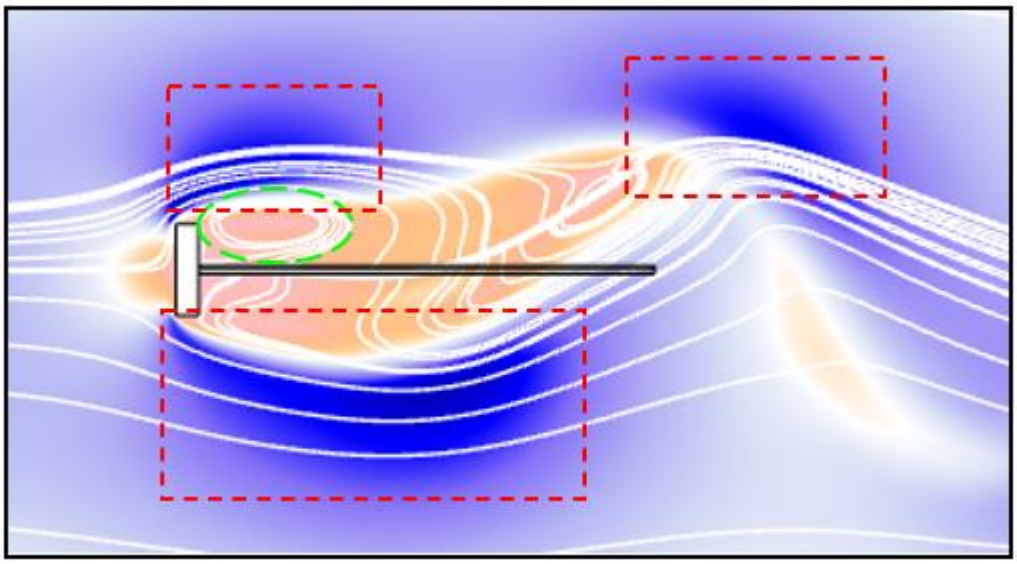
شکل ۱۹. توزیع فشار سیال برای مانع مستطیلی باریک

Fig. 19. The fluid pressure distribution for the slim rectangular bluff body



شکل ۲۰. خطوط جریان در اطراف مانع مستطیلی پهن

Fig. 20. The flow streamlines around the wide rectangular bluff body



شکل ۲۱. خطوط جریان در اطراف مانع مستطیلی باریک

Fig. 21. The flow streamlines around the slim rectangular bluff body

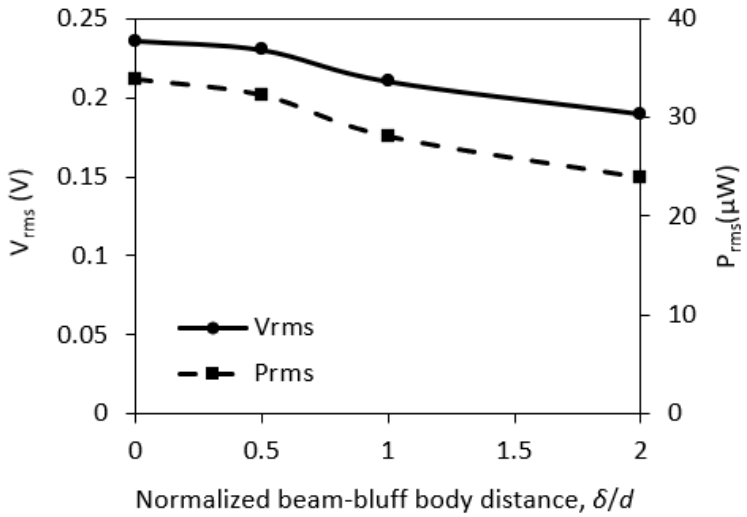
شکل بیشتر آن خواهد گردید.

خطوط جریان سیال هم که در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده‌اند از تشکیل گردابه‌هایی با تمرکز انرژی بیشتر و فاصله زیادتر در پشت مانع باریک‌تر حکایت دارند که مطابق با توضیحات داده شده در قسمت‌های قبل، تغییر شکل بیشتر تیر را سبب می‌شود.

۳- ۱- ۳- تأثیر فاصله تیر و مانع

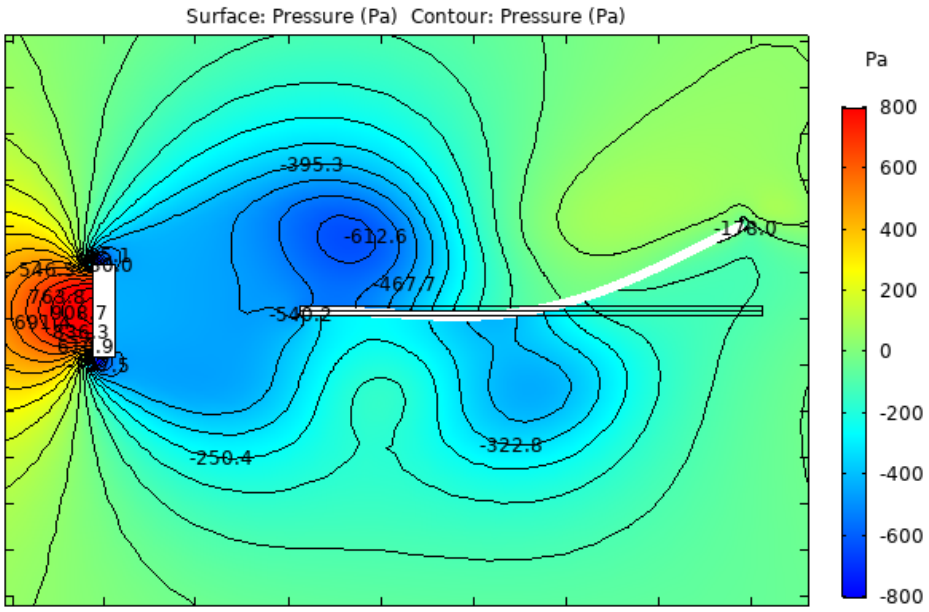
مقدار میانگین ولتاژ و توان برداشت کننده برای فواصل مختلف تیر با مانع در نمودار شکل ۲۲ مقایسه شده است.

مطابق با این نمودارها با افزایش فاصله بین تیر و مانع، ولتاژ و توان الکتریکی تولیدی برداشت کننده کاهش می‌یابد. کانتور توزیع فشار سیال و



شکل ۲۲. تأثیر فاصله تیر و مانع بر ولتاژ خروجی و توان الکتریکی تولیدی

Fig. 22. The effect of the distance between beam and bluff body on the output voltage and electrical power



شکل ۲۳. توزیع فشار سیال برای تیر دور از مانع

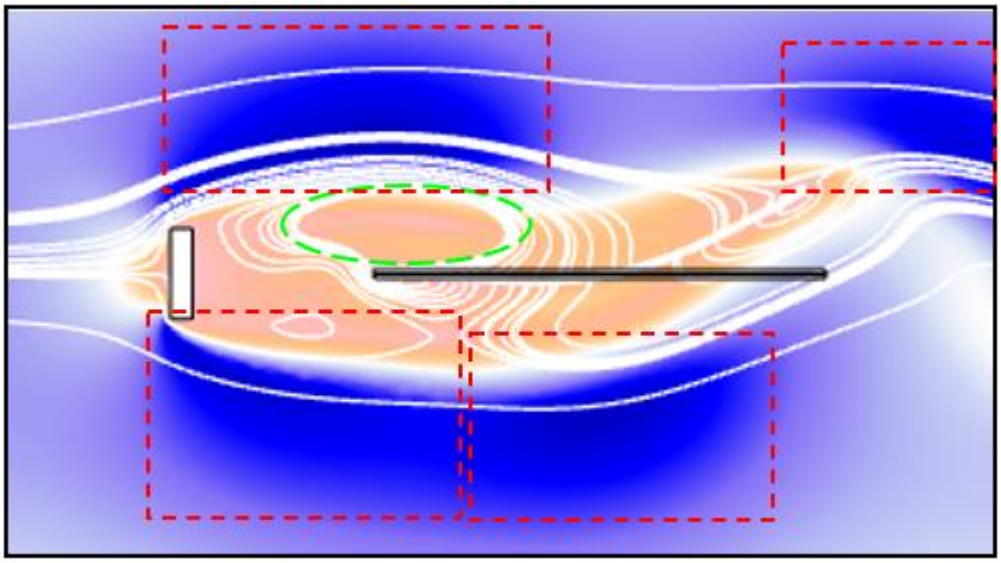
Fig. 23. The fluid pressure distribution for the beam far from the bluff body

خطوط جریان آن که در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ آورده شده‌اند نشان می‌دهند که تیر با فاصله گرفتن از مانع، کم و بیش از منطقه تشکیل گردابه‌ها و گرادیان‌های فشار خارج شده و در نتیجه نیروی برآی وارد بر آن کاهش پیدا می‌کند که این عامل کمتر شدن تغییر شکل تیر و تنزل عملکرد برداشت کننده است.

۳- ۱- ۴- تأثیر خروج از مرکز تیر

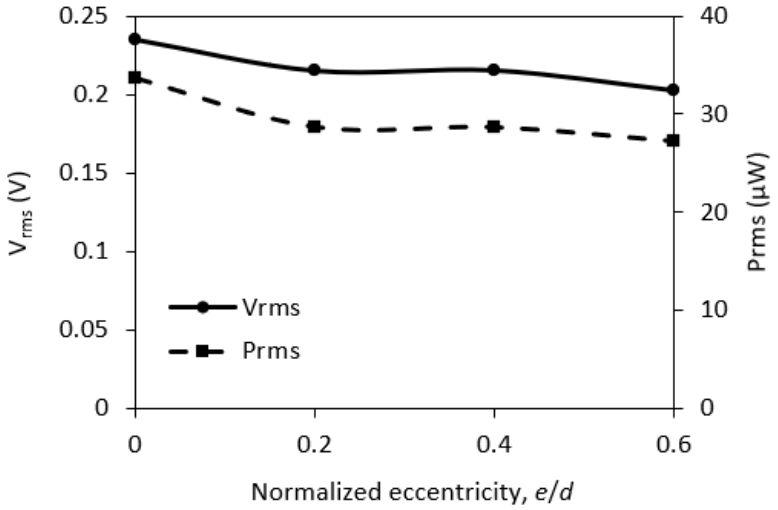
مقدار میانگین ولتاژ و توان برداشت کننده برای مقادیر مختلف خروج از مرکز تیر در نمودار شکل ۲۵ مقایسه شده است.

مطابق با این نمودارها با افزایش خروج از مرکز تیر، ولتاژ و توان الکتریکی خروجی کاهش می‌یابد. علت این مسأله را می‌توان در کانتور توزیع فشار تیر



شکل ۲۴. خطوط جریان سیال برای تیر دور از مانع

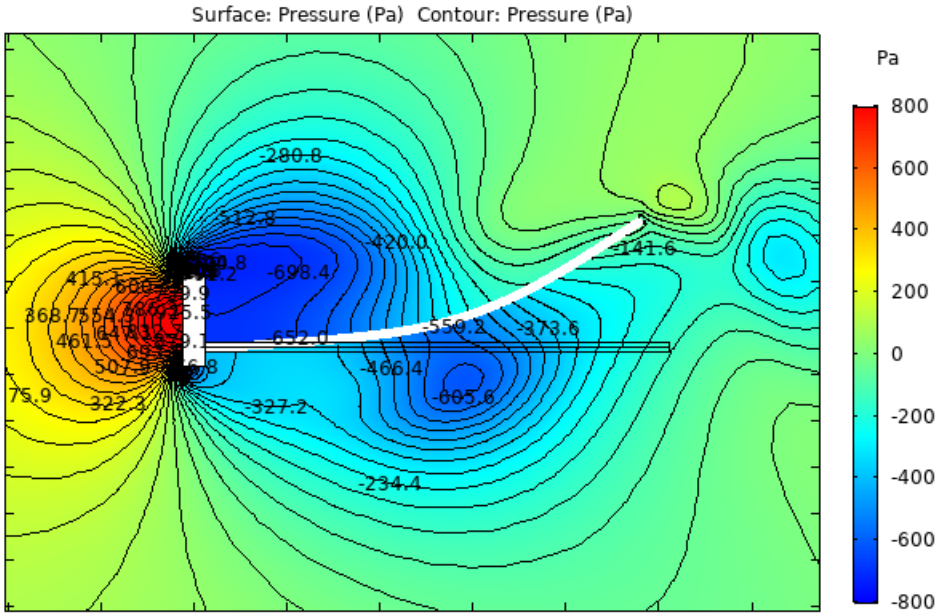
Fig. 24. The flow streamlines for the beam far from the bluff body



شکل ۲۵. تأثیر خروج از مرکز بر ولتاژ خروجی و توان الکتریکی تولیدی

Fig. 25. The effect of the beam eccentricity on the output voltage and electrical power

مستطیلی با خروج از مرکز صفر در شکل ۱۹ و تیر مستطیلی با خروج از مرکز ۰/۶ در شکل ۲۶ جستجو کرد. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد با افزایش خروج از مرکز تیر، ناحیه‌ای از آن که به جریان آزاد نزدیک‌تر شده است افت فشار کمتری را تجربه می‌کند در حالیکه ناحیه مقابل آن متحمل بیشترین افت فشار می‌شود. در نتیجه این مسأله، تمام قسمت‌های تیر به یک سمت خم شده و بیشترین جابجایی در نوک تیر رخ می‌دهد. اما در حالتی که خروج از مرکز صفر است نواحی کم فشار با قدرتی کم و بیش یکسان در هر دوسمت بالا و پایین تیر تشکیل می‌شوند. برآیند اثر این نواحی کم فشار بر تیر سبب می‌شود که میانه تیر به یک سمت و نوک تیر به سمت مقابل خم شود. این امر با وجود اینکه جابجایی نوک تیر را کم می‌کند اما تغییر شکل کلی تیر را افزایش خواهد داد. لذا با کم شدن مقدار خروج از مرکز عملکرد برداشت کننده را ارتقاء می‌دهد.



شکل ۲۶. توزیع فشار سیال برای تیر با بیشینه خروج از مرکز

Fig. 26. The fluid pressure distribution for the beam with maximum eccentricity

۳- ۱- ۵- مقایسه میزان اثر پارامترها

برای تعیین میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر عملکرد برداشت کننده از تحلیل واریانس استفاده شده است. به این ترتیب که برای هر پارامتر x، ابتدا میانگین خروجی‌های بدست آمده برای سطوح مختلف آن پارامتر از بین حالت‌های شبیه‌سازی جدول ۷ محاسبه شده و با x_i نمایش داده می‌شود. به عنوان مثال اگر پارامتر x را نسبت خروج از مرکز تیر ($\frac{e}{d}$) در نظر بگیریم سطوح i = ۱, ۲, ۳, ۴ به ترتیب مربوط به نسبت‌های خروج از مرکز x = ۰, ۰/۲, ۰/۴, ۰/۶ خواهد بود. لذا می‌توان نوشت:

$$x_1 = \frac{x_{C1} + x_{C7} + x_{C12} + x_{C14}}{4}$$
$$x_2 = \frac{x_{C2} + x_{C8} + x_{C11} + x_{C13}}{4}$$
$$x_3 = \frac{x_{C3} + x_{C5} + x_{C10} + x_{C16}}{4} \qquad (۱۴)$$
$$x_4 = \frac{x_{C4} + x_{C6} + x_{C9} + x_{C15}}{4}$$

در گام بعد میانگین x_i ها محاسبه می‌شود:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} \qquad (۱۵)$$

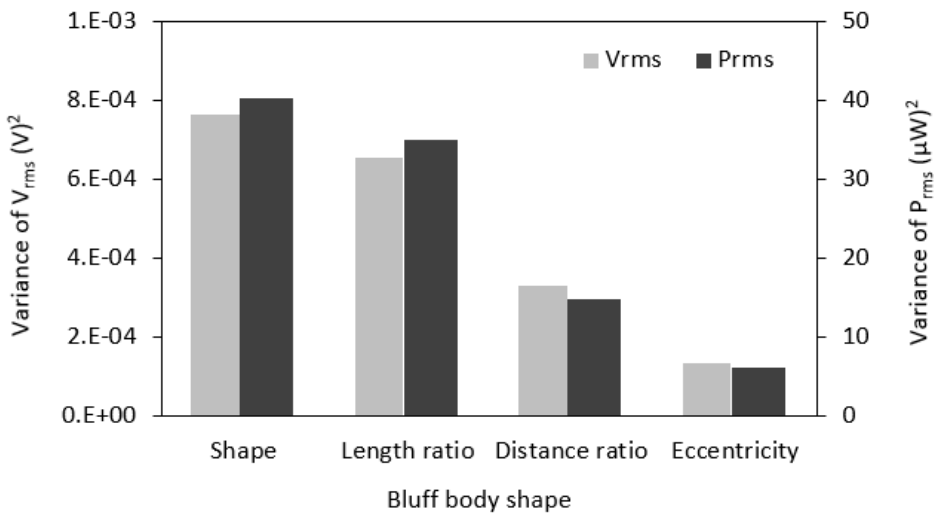
و در نهایت واریانس مربوط به پارامتر مورد نظر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\mathrm{Var} = \frac{\sum_{i=1}^{4} (x_i - \bar{x})^2}{4} \qquad (۱۶)$$

با این وصف هر چه واریانس مربوط به یک پارامتر بیشتر باشد می‌توان گفت با تغییر سطوح آن پارامتر تغییر بیشتری در خروجی اتفاق افتاده و در نتیجه آن پارامتر تأثیر بیشتری بر خروجی مسأله خواهد داشت.

شکل ۲۷ واریانس ولتاژ و توان خروجی برداشت کننده را برای پارامترهای ورودی مختلف نشان می‌دهد.

وزن همه پارامترهای مورد بررسی برابر با یک گرفته شد چرا که هیچکدام از پارامترها بر پارامتر دیگر برتری ندارد. مطابق با نمودار شکل ۲۷، بیشترین واریانس ولتاژ و توان خروجی مربوط به شکل مانع است.



شکل ۲۷. واریانس ولتاژ و توان الکتریکی خروجی برای پارامترهای ورودی مختلف

Fig. 27. The variance of output voltage and power for different input parameters

این بدان معناست که با تغییر دادن شکل مانع بیشترین تغییرات در ولتاژ و توان خروجی برداشت کننده انرژی رخ می‌دهد. لذا شکل مانع تأثیرگذارترین پارامتر بر عملکرد برداشت کننده می‌باشد. ضمن اینکه نسبت طول به ارتفاع مانع، فاصله تیر تا مانع و خروج از مرکز تیر نسبت به مانع به ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند.

۳- ۲- طراحی برای تحریک فرکانس اول تیر

بررسی انجام گرفته برای طراحی انجام شده برای تحریک فرکانس اول تیر نیز نشان داد بیشترین دامنه نوسانات نوک تیر در این حالت با استفاده از مانع دی-شکل بدست می‌آید و مانع مثلثی با فاصله کمی از این حیث در جایگاه دوم قرار می‌گیرد. ضمن اینکه دامنه نوسانات حاصل از موانع دایره‌ای و مستطیلی بسیار به هم نزدیک و کوچک‌تر از دو مانع دیگر است. مضافاً مثل وقتی که طراحی برداشت کننده برای تحریک فرکانس طبیعی اول دوم انجام شده بود افزایش نسبت طول به ارتفاع مانع، زیاد شدن فاصله تیر با مانع و نیز افزایش خروج از مرکز تیر سبب کاهش دامنه نوسانات نوک تیر و تضعیف کارایی برداشت کننده می‌گردد. ضمن اینکه انجام تحلیل واریانسی نشان داد بیشترین تأثیر مربوط به شکل مانع بوده و خروج از مرز، نسبت طول به ارتفاع و فاصله تیر و مانع در رده‌های بعدی قرار دارند.

میانگین پارامترهای خروجی برداشت کننده برای طراحی اول و دوم در جدول ۹ با هم مقایسه شده است.

جدول ۹. مقایسه عملکرد برداشت کننده در طراحی اول و دوم

Table 9. Comparison of the harvester performance in the 1st and 2nd designs

طراحی	ولتاژ خروجی (V)	توان تولیدی (μW)
اول	۰/۱۰۳	۱۲/۹۸۸
دوم	۰/۲۱۷	۲۹/۵۴۸

همان گونه که جدول ۹ نشان می‌دهد عملکرد برداشت کننده در طراحی دوم به میزان قابل توجهی از عملکرد آن در طراحی اول بهتر است. البته این مسأله، با توجه به طول بیشتر و در نتیجه تغییر شکل بیشتر تیر در طراحی دوم به نوعی قابل پیش‌بینی بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از روش اجزاء محدود برای مطالعه و بهبود عملکرد یک جاذب انرژی میکرو که از خاصیت پیزوالکتریکی برای برداشت انرژی از پدیده جدایش گردابه در جریان سیال و تبدیل آن به انرژی الکتریکی بهره می‌گیرد استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد بالاترین ولتاژ و توان الکتریکی تولیدی برداشت کننده با استفاده از مانع مثلثی و دی-شکل بدست می‌آید. ضمن اینکه با کاهش نسبت طول به ارتفاع مانع، کاهش فاصله بین

تیر و مانع، و نیز کاهش خروج از مرکز تیر، ولتاژ و توان الکتریکی خروجی کاهش می‌یابد. مضاف بر این، طبق نتایج حاصله، شکل مانع تأثیرگذارترین پارامتر بر عملکرد برداشت کننده است و نسبت طول به ارتفاع مانع، فاصله تیر تا مانع و خروج از مرکز تیر نسبت به مانع به ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین مشاهده شد وقتی طول تیر طوری انتخاب شود که فرکانس طبیعی دوم آن با فرکانس جدایش گردابه برابر شود عملکرد جاذب به مراتب بهتر از وقتی است که طول تیر برای مساوی شدن فرکانس طبیعی اول تیر با فرکانس جدایش گردابه انتخاب گردد.

منابع

[1] [1] Y. Gong, X. Shan, X. Luo, J. Pan, T. Xie, Z. Yang, Direction-adaptive energy harvesting with a guide wing under flow-induced oscillations, Energy, 187 (2019) 115–128.

[2] G.R. Franzini, L.O. Bunzel, A numerical investigation on piezoelectric energy harvesting from Vortex-Induced Vibrations with one and two degrees of freedom, Journal of Fluids and Structures, 77 (2018) 196–212.

[3] B. Zhang, K.-H. Wang, B. Song, Z. Mao, W. Tian, Numerical investigation on the effect of the cross-sectional aspect ratio of a rectangular cylinder in FIM on hydrokinetic energy conversion, Energy, 165 (2018) 949–964.

[4] H. Sun, C. Ma, M.M. Bernitsas, Hydrokinetic power conversion using Flow Induced Vibrations with nonlinear (adaptive piecewise-linear) springs, Energy, 143 (2018) 1085–1106.

[5] J. Wang, S. Zhou, Z. Zhang, D. Yurchenko, High-performance piezoelectric wind energy harvester with Y-shaped attachments, Energy Conversion and Management, 181 (2019) 645–652.

[6] R. Badhurshah, R. Bhardwaj, A. Bhattacharya, Lock-in regimes for Vortex-Induced Vibrations of a cylinder attached to a bistable spring, Journal of Fluids and Structures, 91 (2019) 102–131.

[7] B. Zhang, B. Song, Z. Mao, B. Li, M. Gu, Hydrokinetic energy harnessing by spring-mounted oscillators in FIM with different cross sections: From triangle to circle, Energy, 189 (2019) 116–132.

[8] M. Zheng, D. Han, S. Gao, J. Wang, Numerical investigation of bluff body for vortex induced vibration energy harvesting, Ocean Engineering, 213 (2020) 107–124.

[9] W.-J. Su, W.-Y. Lin, Design and analysis of a vortex-induced bi-directional piezoelectric energy harvester, International Journal of Mechanical Sciences, 173 (2020) 105–117.

[10] W. Sun, J. Seok, A novel self-tuning wind energy harvester with a slidable bluff body using vortex-induced vibration, Energy Conversion and Management, 205 (2020) 112–122.

[11] M. Gu, B. Song, B. Zhang, Z. Mao, W. Tian, The effects of submergence depth on Vortex-Induced Vibration (VIV) and energy harvesting of a circular cylinder, Renewable Energy, 151 (2020) 931–945.

[12] A.M. El-Otify, I.A. Iskaros, A.M. El-Otify, I.A. Iskaros, Water quality and potamoplankton evaluation of the Nile River in Upper Egypt, Acta Limnologica Brasiliensia, 27 (2015) 171–190.

[13] R. Clasing, E. Muñoz, Estimating the Optimal Velocity Measurement Time in Rivers' Flow Measurements: An Uncertainty Approach, Water, 10 (2018) 1010–1025.

[14] A. Eltner, H. Sardemann, J. Grundmann, Flow velocity and discharge measurement in rivers using terrestrial and UAV imagery, Rivers and Lakes/Remote Sensing and GIS, 2019.

[15] Y. Zhiyin, Large-eddy simulation: Past, present and the future, Chinese Journal of Aeronautics, 28 (2015) 11–24.

[16] I. Babu, G. de With, Enhanced electromechanical properties of piezoelectric thin flexible films, Composites Science and Technology, 104 (2014) 74–80.

[17] K.K. Sappati, S. Bhadra, Flexible Piezoelectric 0–3 PZT-PDMS Thin Film for Tactile Sensing, IEEE Sensors Journal, 20 (2020) 4610–4617.

[18] S.W. Ma, Y.J. Fan, H.Y. Li, L. Su, Z.L. Wang, G. Zhu, Flexible Porous Polydimethylsiloxane/Lead

Zirconate Titanate-Based Nanogenerator Enabled by the Dual Effect of Ferroelectricity and Piezoelectricity, ACS Applied Materials & Interfaces, 10 (2018) 33105–33111.

[19] I. Babu, G. de With, Highly flexible piezoelectric 0–3 PZT–PDMS composites with high filler content, Composites Science and Technology, 91 (2014) 91–97.

[20] F. Pan, Z. Xu, L. Jin, P. Pan, X. Gao, Designed Simulation and Experiment of a Piezoelectric Energy Harvesting System Based on Vortex-Induced Vibration, IEEE Transactions on Industry Applications, 53 (2017) 3890–3897.

[21] H.D. Akaydın, N. Elvin, Y. Andreopoulos, Wake of a cylinder: a paradigm for energy harvesting with piezoelectric materials, Experiments in Fluids, 49 (2010) 291–304.

[22] G. Taguchi, Y. Yokoyama, Taguchi Methods: Design of Experiments, Amer Supplier Inst, Dearborn, Mich, 1993.

[23] N. Verhaagen, B. VanBossuyt, Flow on a 65-deg Blunt Apex, in: 24th AIAA Applied Aerodynamics Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.

[24] M. Elsayed, F. Scarano, N.G. Verhaagen, Leading-Edge Shape Effect on the Vortex Flow Over Non-Slender Delta Wings, 2008.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Salari, H. Afrasiab , M. H. Pashaei, R. Akbari Alashti, Finite Element Modeling of Fluid-Solid-Piezoelectric for Investigating the Ways of Improving the Performance of the Micro Energy Harvester in the Fluid Flow, Amirkabir J. Mech Eng., 54(1) (2022) 31-54.

DOI: 10.22060/mej.2021.19490.7037

این صفحه عمداً خالی است