Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 55(10) (2024) 249-252
DOI: 10.22060/mej.2023.22347.7604

Energy harnessing from water waves using a piezoelectric energy harvester with and without ore-like tip: an experimental study

H. R. Adabzadeh, M. M. Mohammadi*, J. Ghazanfarian

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ABSTRACT: In this article, the piezoelectric energy harvester of cantilever type with the ability to be angled relative to the vertical direction, and also with rectangular fins attached to the end of the harvester has been investigated. The purpose of this study is to investigate the effect of design parameters such as the angle of inclination of the energy harvester, its distance from the wave source, the depth of the beam, and the presence or absence of fins at the end of the beam, on the effective output voltage of the energy harvester. Low efficiency is the most important limitation for the advancement of piezoelectric energy harvesters, and for this reason, it is necessary to use methods based on tests and optimization to increase the efficiency of piezoelectric energy harvesters. To carry out the experimental study, experiments have been designed using the central composite design (CCD) and the design parameters have been optimized using the response surface methodology (RSM). Also, the effect of equipping the energy harvester with a fin on the final voltage has been investigated. It was observed that the optimal conditions for both finned and non-finned harvesters occur when the distance ratio of the beam from the wave-maker is minimum and the depth of penetration ratio is maximum.

Review History:

Received: Apr. 27, 2023
Revised: Oct. 16, 2023
Accepted: Nov. 22, 2023
Available Online: Dec. 09, 2023

Keywords:

Piezoelectric energy harvester
Ore-like tip
Tilt angle
Empirical modeling
Central composite design

1- Introduction

Harvesting energy from water waves is one of the new methods of producing clean energy with the help of piezoelectric materials. In this method, the mechanical energy of water waves is converted into electrical energy. Piezoelectric energy harvesters are made in various configurations, and one of the most common configurations is the uni-morph cantilever configuration [1]. Attempts to improve the efficiency of piezoelectric cantilever energy harvesters have been a common theme in most studies [2]. In this article, a new experimental study is conducted on the design of piezoelectric cantilever harvesters. The energy harvester under study has a uni-morph cantilever structure, and the distance of the harvester from the wave maker, the depth of its penetration in the water, as well as the angle of the harvester concerning the vertical axis, are the main input variables. Also, a rectangular fin is used at the end of the piezoelectric harvester, and all the experiments are performed for both finned and non-finned harvesters, and the effect of the presence of fins at the end of the harvester is investigated. An empirical model is extracted using response surface methodology, based on which the input parameters are optimized to achieve the maximum effective voltage.

2- Materials and Procedures

All experiments were carried out in a water channel with a length of 3.7 meters and, a width and height of 0.6 meters. Two types of cantilever structures, according to Figure 1, were used in the experiments.

The energy harvester is in the form of a cantilever beam connected to a piezoelectric disc (see Figure 1) and placed at a variable distance from the central axis of the wave generator using a fixture that can rotate and adjust the angle relative to the vertical axis.

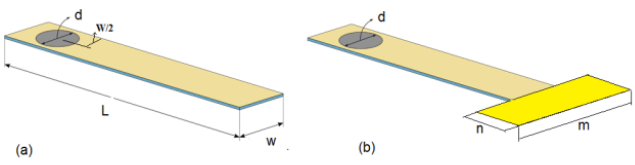


Fig. 1. Schematic picture of finless (part a) and finned cantilever energy harvester (part b)

*Corresponding author's email: Dr.mohammadi@znu.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.

Table 1. Input factors in the experimental runs

Test Order	Test number	Length ratio(%)	Depth ratio (%)	Tilt angle (degree)
17	1	60	6	30
15	2	60	6	30
16	3	60	6	30
5	4	40	3	45
14	5	60	12	60
11	6	60	0	30
12	7	60	12	30
6	8	80	3	45
20	9	60	6	30
13	10	60	6	0
19	11	60	6	30
3	12	40	9	15
18	13	60	6	30
2	14	80	3	15
7	15	40	9	45
9	16	20	6	30
4	17	80	9	15
8	18	80	9	45
10	19	100	6	30
1	20	40	3	15

3- Design of Experiments by CCD method

The design variables are the dimensionless ratio of the distance of the cantilever from the wave maker, the dimensionless ratio of the depth of the cantilever in the water, and the angle of the tilted cantilever.

The response surface methodology uses second-order models to develop the response surfaces of the model and optimize the design parameters. The CCD method is one of the best experimental design methods for defining the necessary experiments to fit the second-order models. The number of tests for the CCD method is calculated by the relation ($n = 2^k + 2k + 1$), where k is the number of input factors. On the other hand, to analyze the precision and adequacy of the model, it is necessary to repeat the tests multiple times at a single point in the experiment. In this article, the experiments have been repeated 5 times at the central point of experiments, and due to the presence of 3 input variables and 5 repetitions, the number of experiments is equal to 20.

4- Extracted Empirical Model

Using the RSM, the effective output voltage of the piezoelectric energy harvester was expressed as a second-order mathematical function of the input variables. Equation 1 represents the extracted second-order empirical models for the energy harvesters with the end fin:

Table 2. Results of ANOVA for the empirical models

Statistic quantity	S	R^2	$R^2_{adjusted}$	$R^2_{predicted}$
Without end-tip	0.353553	99.94%	99.89%	99.54%
With end-tip	0.157592	99.98%	99.97%	99.87%

$$V_{rms} = 87.801 - 1.0571L + 0.242H - 0.1098\theta + 0.004307L^2 + 0.069H^2 - 0.005288\theta^2 + 0.0043L \times H + 0.004458L \times \theta + 0.00916H \times \theta \quad (1)$$

The empirical model for the energy harvesters without the end fin is expressed as:

$$V_{rms} = 104.88 - 1.2563L + 0.041H - 0.1583\theta + 0.005000L^2 + 0.0832H^2 - 0.005556\theta^2 + 0.0083L \times H + 0.005L \times \theta + 0.01111H \times \theta \quad (2)$$

where V_{rms} , L, H, and ɵ are the effective voltage (in mV), length ratio (in percent), depth ratio (in percent), and tilt angle of the cantilever, respectively. An analysis of variance has been applied to check the precision and adequacy of the model, and the summary of the analysis of variance is reported in Table 3 for both types of energy harvesters.

A high value of R^2 and a very small difference between adjusted and predicted R^2 indicates the appropriate accuracy of modeling [3].

Figure (2) shows three-dimensional response surfaces fitted based on relations (1) and (2). Parts a and b of figure (2) are related to the piezoelectric cantilever without the fin, and parts d and e are related to the cantilever with the end fin. As it is evident, the parameters of the distance from the wave-maker and the depth of the cantilever underwater penetration are the most important parameters affecting the output voltage. Reducing the distance from the wave maker and increasing the depth of the depression has increased the effective voltage in the piezoelectric harvester. The effect of the tilt angle is less than the other two parameters, and there is an optimum angle to achieve the highest effective voltage. The effect of all three parameters is non-linear, and all the input parameters interact with each other. Optimization of the design and setting parameters to maximize the effective voltage was done using the response surface methodology for both finned and non-finned modes. It was observed that the optimal conditions for both finned and non-finned harvesters occur when the distance ratio of the beam from the wave-maker is minimum and the depth of penetration ratio is maximum.

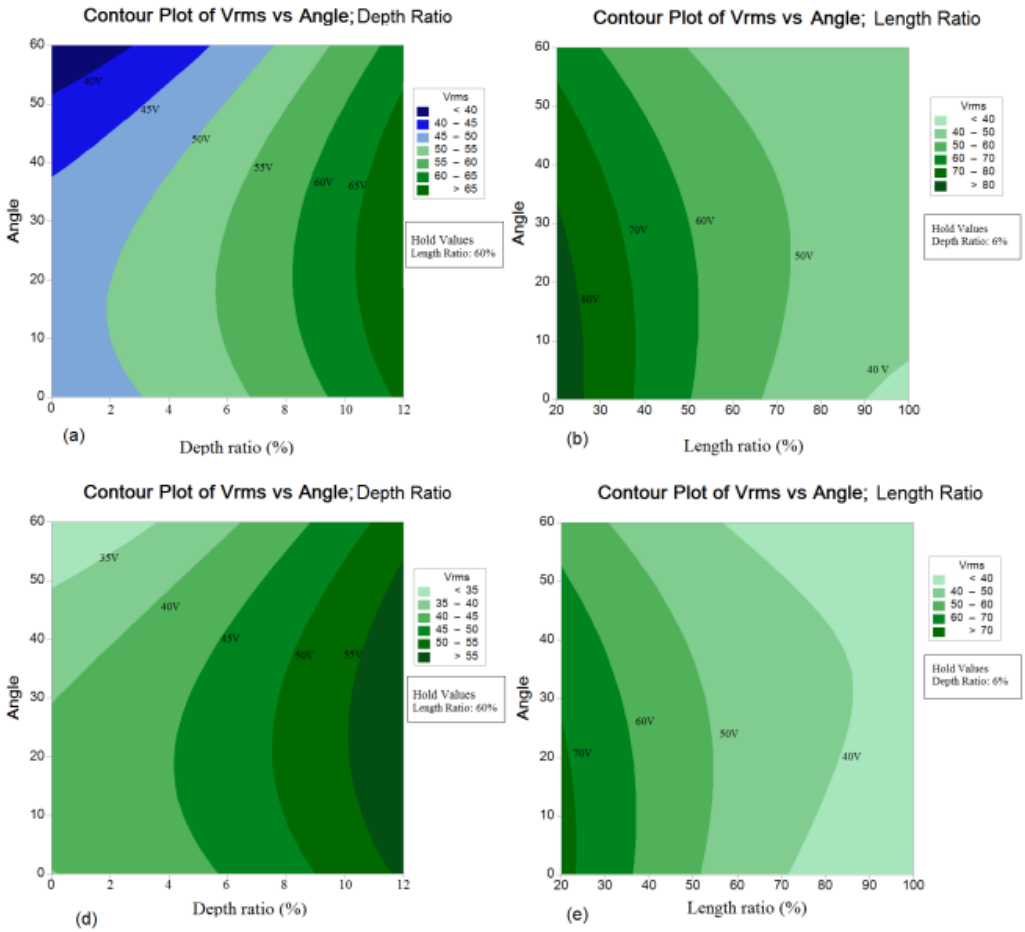


Fig. 2. Contour diagrams of effective voltage changes concerning the design parameters

5- Conclusion

In this article, the central composite method and response surface methodology were used to study the effects of the design and adjustment parameters of the piezoelectric energy harvester from water waves. An analysis of variance showed that all three input variables, including tilt angle, distance ratio, and indentation depth ratio, have a nonlinear effect on the output voltage. On the other hand, all three mentioned parameters interact with each other. The effect of the distance ratio is greater than that of the other two variables on the effective voltage. Using an ore-like end tip did not change the overall behavior of the energy harvester; however, it reduced the harvester's maximum output by 14.5%.

References

[1] J. Ghazanfarian, M.M. Mohammadi, K. Uchino, Piezoelectric Energy Harvesting: A Systematic Review of Reviews, Actuators, MDPI, 10(12))2021(312.

[2] Y. Belkourchia, H. Bakhti, L. Azrar, Optimization approach for piezoelectric energy harvesting from ocean waves and beams, in: 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), IEEE, 2019, pp. 1-5.

[3] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John wiley & sons, 2017.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. R. Adabzadeh, M. M. Mohammadi, J. Ghazanfarian, Energy harnessing from water waves using a piezoelectric energy harvester with and without ore-like tip: an experimental study, Amirkabir J. Mech Eng., 55(10) (2024) 249-252.

DOI: 10.22060/mej.2023.22347.7604

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱۰، سال ۱۴۰۲، صفحات ۱۱۹۵ تا ۱۲۰۶
DOI: 10.22060/mej.2023.22347.7604

برداشت انرژی از امواج آب با تیر پیزوالکتریک باله‌دار و بدون باله: مطالعه تجربی

حمیدرضا ادب زاده، محمد مصطفی محمدی*،جعفر غضنفریان

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

خلاصه: در این مقاله، برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک از نوع تیرهای یک‌سرگیردار با قابلیت زاویه‌دار شدن نسبت به راستای عمودی و همچنین همراه با بالهای مستطیلی شکل متصل به انتهای برداشت‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثر پارامترهای طراحی مانند زاویه تمایل برداشت‌کننده انرژی، فاصله آن از منبع موجی، عمق فرورفتگی تیر و وجود یا عدم وجود باله در انتهای تیر، روی ولتاژ مؤثر خروجی برداشت‌کننده انرژی است. بازدهی پایین مهمترین محدودیت پیشروی برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک است و به همین دلیل استفاده از روشهای مبتنی بر طراحی آزمایش و بهینه‌سازی با هدف افزایش بازدهی برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک، ضروری است. جهت اجرای مطالعه تجربی، طراحی آزمایشها با استفاده از روش مرکب مرکزی و آنالیز مدل تجربی و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی با استفاده از روش رویه‌های پاسخ صورت‌گرفته است. همچنین اثر تجهیز برداشت‌کننده انرژی به باله روی ولتاژ نهایی بررسی شده است. مشاهده شد که شرایط بهینه برای هر دو حالت برداشت‌کننده باله‌دار و بدون باله، معادل فاصله تیر از موجساز برابر با ۲۰ سانتیمتر و عمق نفوذ ۶ سانتیمتر است. همچنین زاویه تمایل بهینه در حالت بدون باله برابر با ۶/۷ درجه و در حالت باله‌دار برابر با ۸/۵ درجه است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

کلمات کلیدی:
برداشت‌کننده انرژی
تیر یکسرگیردار باله‌دار
زاویه انحراف
مدل‌سازی تجربی

۱- مقدمه

مزایای برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک شامل ساختار مکانیکی ساده، دوستدار محیط‌زیست بودن، قابلیت حمل و نقل ساده، امکان استفاده در قالب اجزای پوشیدنی، عدم نیاز به منبع تغذیه بیرونی، قابلیت هماهنگ‌شدن با ساختارهای ممز، چگالی توان خروجی بالا نسبت به سایر روش‌های برداشت انرژی، هزینه ساخت نسبتاً پایین و قابلیت زیاد کوچک‌سازی، باعث مطرح‌شدن آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های برداشت انرژی قابل‌جایگزینی با باطری‌های معمولی شده است. با وجود این مزایای نسبی مهم، همچنان محدودیت مهم کوچک بودن انرژی الکتریکی تولید شده، باعث شده این سیستم‌ها نتوانند در بسیاری از کاربردها جایگزین باطری‌ها شوند. از همین رو، اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک به روی افزایش بازدهی توانی این سیستم‌ها تمرکز دارند [۱].

برداشت انرژی از امواج آب، یکی از روش‌های نوین تولید انرژی پاک به کمک موادپیزوالکتریک به شمار می‌رود. در این روش، انرژی مکانیکی امواج آب به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. از میان انواع پیکربندی‌های برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک، شامل برداشت کننده‌های دیافراگمی[1]، پوسته ای[2]، سیمبل[3]، استک[4] و ستونیک سری یکسرگیردار[5]، نوع آخر یعنی برداشت کننده‌هایی که به شکل ستون‌های یکسرگیردار هستند از رایج‌ترین پیکربندی‌ها به شمار می‌روند. محققان بسیاری از این نوع پیکربندی برای برداشت کننده پیزوالکتریک آبی استفاده کرده‌اند [۲]. تلاش برای افزایش بازدهی برداشت کننده‌های پیزوالکتریک ستونی، فصل مشترک اکثر این تحقیقات بوده است. در این میان، با توجه به فرکانس پایین امواج آب دریاها و اقیانوس‌ها در برخی از تحقیقات، تلاش‌هایی برای ایجاد گردابه‌های موضعی در مقابل تیر شده است [۳-۵]. به واسطه ایجاد گردابه‌های موضعی، فرکانس ارتعاشات تیر متصل به ماده پیزوالکتریک افزایش یافته و مقدار ولتاژ خروجی

1 - circular diaphragm
2 - shell type
3 - cymbal
4 - stack type
5 - cantilever

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dr.mohammadi@znu.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.

بهبود می‌یابد. تغییرات پارامترهای طراحی از جمله جهت فضایی قرارگیری تیر یک سرگیردار، ابعاد تیر، موقعیت مکانی تیر یکسرگیردار، هندسه تیر و جنس و ابعاد ماده پیزوالکتریک نیز موضوع آنالیز و بهینه‌سازی و شبیه‌سازی عددی محققان بوده است [۶-۹]. در بیشتر تحقیقات صورت گرفته از شبیه‌سازی عددی و مدلسازی ریاضی، برای پیش‌بینی رفتار برداشت کننده، از ماده پیزو استفاده شده است و مطالعات تجربی به نسبت کمتری برای آنالیز پارامترهای طراحی برداشت کننده‌های انرژی پیزو انجام شده است. علت این امر نیاز به انجام تعداد زیاد آزمایش‌های تجربی برای آنالیز کامل رفتار سیستم برداشت کننده انرژی در داخل آب، و همچنین غیرخطی بودن اثرات پارامترهای طراحی روی خروجی برداشت کننده پیزوالکتریک و برهمکنش احتمالی پارامترهای طراحی با یکدیگر است که باعث دشواری مدلسازی تجربی سیستم می‌شود. از میان مطالعات تجربی سیستماتیک روی طرح برداشت کننده، می‌توان به مقاله الرشدان اشاره کرد که در آن اثر متغیرهای طراحی شامل مقدار و ابعاد جرم متصل به انتهای ستون پیزوالکتریک، ضخامت، طول و عرض لایه پیزوالکتریک، جنس لایه پیزوالکتریک و عایق بستر را روی چگالی توان و ولتاژ خروجی برداشت کننده پیزوالکتریک میکروبعدی بصورت تجربی بررسی نموده است. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از آرایه L18 روش تاگوچی صورت گرفته و جنس ماده پیزوالکتریک و ضخامت آن به ترتیب به عنوان مهمترین فاکتورهای طراحی تعیین شده‌اند [۱۰]. السادی و عبدالله شیرازدر با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، مطالعه‌ای روی اثرات پارامترهای طراحی بر خروجی برداشت کننده پیزوالکتریک با پیکربندی ستونی دو طرفه[1] انجام دادند. آنها اثرات ضخامت لایه پیزوالکتریک، شتاب و فرکانس تحریک ورودی را روی توان خروجی برداشت کننده سنجیدند. در میان پارامترهای طراحی مورد مطالعه، ضخامت لایه پیزوالکتریک بیشترین اثر را روی توان خروجی داشت [۱۱].

در مقاله حاضر مطالعه تجربی جدیدی روی پارامترهای طراحی و تنظیمی برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک ستونی صورت می‌گیرد. برداشت‌کننده انرژی تحت مطالعه، از نوع ستونی یکسرگیردار با اتصال یک‌طرفه ماده پیزوالکتریک است و فاصله برداشت‌کننده از موج‌ساز، عمق فروروی آن در آب و همچنین زاویه قرارگیری برداشت‌کننده نسبت به محور عمودی، متغیرهای اصلی ورودی را در بر می‌گیرد. در مطالعات پیشین اثر متغیرهای فوق‌الذکر روی خروجی برداشت‌کننده بررسی نشده است. همچنین از یک باله مستطیلی در انتهای برداشت‌کننده استفاده می‌شود و کلیه آزمایش‌ها در دو حالت برداشت‌کننده با باله و بدون باله انجام می‌شود و اثر وجود باله در انتهای برداشت‌کننده بررسی می‌شود. مدل تجربی حاکمه با استفاده از روش سطح پاسخ[2]، استخراج شده و بر اساس آن بهینه‌سازی پارامترهای ورودی جهت دستیابی به بیشترین ولتاژ مؤثر صورت می‌گیرد. روش سیستماتیک مطالعه تجربی حاضر که مشخص‌کننده برهم‌کنش اثرات پارامترهای طراحی و تنظیمی با یکدیگر در ولتاژ مؤثر خروجی است از دیگر نوآوری‌های مقاله محسوب می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

کلیه آزمایش‌ها در یک کانال آب با طول ۳/۷ متر، عرض و ارتفاع ۰/۶ متر و از جنس پلکسی گلاس صورت گرفته است. از دو نوع تیر یکسرگیردار با باله و بدون باله مطابق با شکل ۱ در آزمایش‌ها استفاده شد. در این شکل، طول تیر با L، عرض تیر با w، قطر دیسک پیزوالکتریک با d، طول باله با m و عرض باله با n نشان داده شده است. در هر دو تیر دیسک پیزوالکتریک در وسط عرض تیر و با فاصله ثابت نسبت به لبه تیر قرار گرفته است.

در میان این پارامترهای هندسی، تنها طول تیر متغیر و باقی پارامترها ثابت در نظر گرفته شدند که در جدول ۱ مقدار پارامترهای ثابت آزمایش نشان داده شده است. نقطه مرکزی سطح باله به کمک پیچی به تیر استیل بسته شد به نحوی که لبه انتهای باله با لبه انتهای تیر مماس گشت. بدین ترتیب طول مؤثر تیر با قرار دادن باله تغییری نمی‌کرد.

شکل ۲ تصویر برداشت کننده پیزوالتریک بدون باله را در کانال آب نشان می‌دهد. برداشت کننده انرژی که به شکل یک تیر یکسرگیردار متصل به دیسک پیزوالکتریک است، به وسیله یک فیکسچر که قابلیت چرخش و تنظیم زاویه نسبت به محور عمودی را دارد، در فاصله ۱ متری از محور مرکزی موج سازِ نشان داده شده در شکل ۲ قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری ولتاژ موثر خروجی از اسیلوسکوپ با مدل جی-پی-اس لمیتید[3] دوکاناله استفاده شد. این اسیلوسکوپ قابلیت ذخیره خروجی ولتاژی و محاسبه برخط ولتاژ موثر را داشت.

۳- روش طراحی آزمایش و بهینه‌سازی

پارامترهای متغیر طراحی در تمامی آزمایش‌ها نسبت فاصله تیر از موج‌ساز به فاصله بیشینه یک متر به درصد، نسبت عمق فرورفتگی تیر در آب به عمق آب در موج‌ساز (۵۰ سانتی‌متر) به درصد و زاویه تیر با محور

1 - Bimorph cantilever configuration

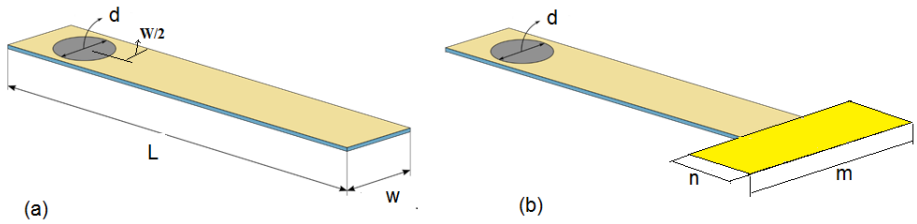
2 - Response surface methodology (RSM)

3 - GPS-1072B

جدول ۱. پارامترهای ثابت در برداشت کننده‌های پیزوالکتریک باله‌دار و بدون باله

Table 1. Constant design parameters of finned and finless cantilever piezoelectric energy harvestes

پارامتر	مقدار
جنس ماده پیزوالکتریک	PZT4
ضخامت دیسک پیزوالکتریک	۰/۱ میلیمتر
قطر دیسک پیزوالکتریک (d)	۳ سانتیمتر
جنس بستر دیسک پیزوالکتریک	برنج
جنس تیر یکسرگیردار	فولاد زنگ‌نزن ۴۳۰
عرض تیر یکسرگیردار (w)	۴ سانتیمتر
ضخامت تیر یکسرگیردار	۰/۴ میلیمتر
طول باله	۱۰ سانتیمتر
عرض باله	۳سانتیمتر
بیشترین فاصله تیر از موج‌ساز	۱ متر

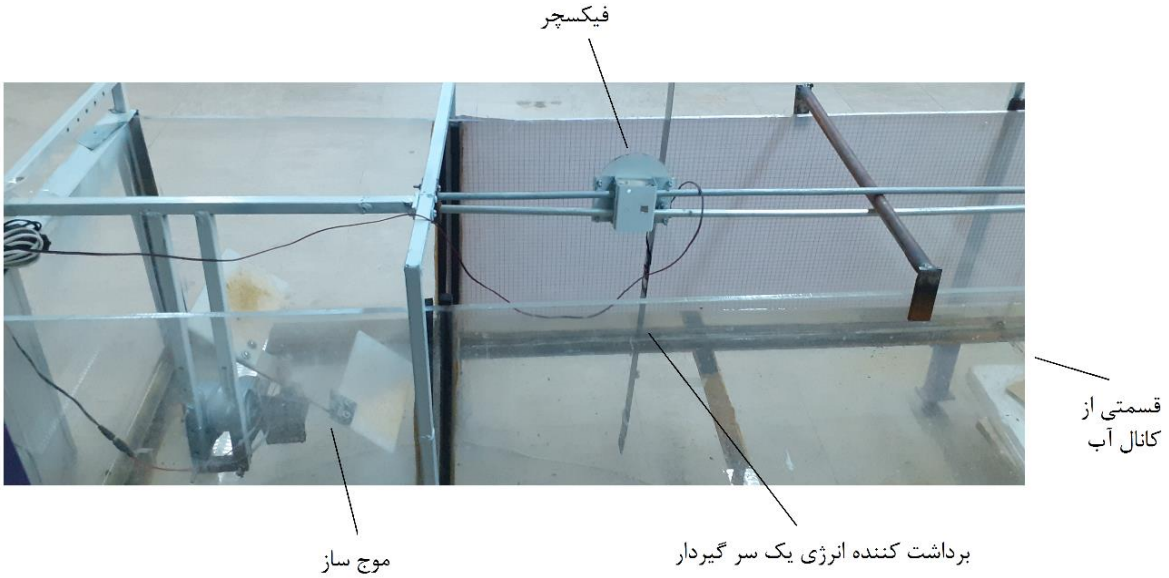


شکل ۱. تصویر شماتیک برداشت کننده‌های یکسرگیردار بدون باله (a)، با باله (b).

Fig. 1. Schematic picture of finless (part a) and finned cantilever energy harvester (part b)

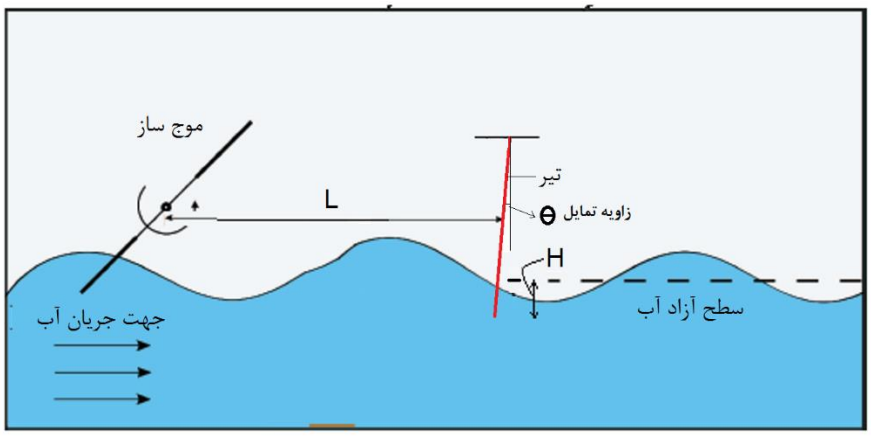
عمودی هستند. تغییرات نسبت فاصله تیر از موج‌ساز در بازه ۲۰ الی ۱۰۰ درصد، تغییرات زاویه تمایل از ۰ تا ۶۰ درجه و تغییرات عمق از ۳ الی ۱۲ درصد در نظر گرفته شد. حد پایینی فاصله تیر از موج‌ساز (۲۰ درصد) به‌گونه‌ای انتخاب شده است که تیر با وجود اعمال زاویه تمایل برخوردی به موج ساز نداشته باشد تا از آسیب مکانیکی ناشی از برخورد دو سازه محافظت شود. از طرفی در فواصل بیش از ۱۰۰ سانتیمتر امواج به طور چشمگیری ضعیف هستند؛ لذا حد بالایی نسبت فاصله ۱۰۰ درصد انتخاب شده است. مقدار عمق تیر با توجه به عمق کانال آب و ارتفاع فیکسچر تیر پیزوالکتریک نسبت به کانال اخذ شده است. ارتفاع امواج آب به‌گونه‌ای است که در صورت تنظیم عمق تیر کمتر از ۱/۵ سانتی متر، عملاً تیر پیزو در لحظاتی از زمان برخوردی با آب نخواهد داشت. بازه تغییرات زاویه تمایل تیر نیز به‌گونه‌ای انتخاب شده است که تیر از حالت عمودی (با زاویه تمایل صفر) حداکثر به میزانی تمایل پیدا کند که در آستانه خروج از آب قرار گیرد و این حد بحرانی در زاویه تمایل ۶۰ درجه برای تیر فوق‌الذکر رخداده است.

متدولوژی سطح پاسخ یکی از روش‌های ریاضی مهم برای مشخص‌کردن نحوه اثرات پارامترهای ورودی یک مسئله روی متغیر خروجی آن است. در روش سطح پاسخ، فرض می‌شود که ارتباط میان متغیرهای ورودی و خروجی را می‌توان با استفاده از چند جمله‌ای‌های مرتبه ۱ یا ۲ برقرار نمود. صحت این فرض با استفاده از روش‌های آماری مانند آنالیز واریانس سنجیده می‌شود. در بیشتر مسائل، ارتباط میان متغیرهای ورودی (x_i) و پاسخ خروجی



شکل ۲. برداشت کننده بدون باله در کانال آب.

Fig. 2. Finless cantilever piezoelectric energy harvesters in water channel



شکل ۳. تصویر شماتیک پارامترهای طراحی.

Fig. 3. Shematic representation of the design parameters

y با رابطه مرتبه ۲ نظیر رابطه (۱) برقرار می‌گردد.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (۱)$$

در این رابطه، کلیه ضرایب β ضرایب مجهول مسئله‌اند و ε خطای مدل است. یکی از اهداف اصلی روش سطح پاسخ، محاسبه ضرایب β در کنار کمینه‌سازی خطای مدلسازی است. سؤال مهمی که در این گام مطرح است تعداد آزمایش‌های لازم است. مشخصات نقاط آزمایش برای محاسبه ضرایب مجهول در عین حداقل بودن خطای مدلسازی می‌باشد و روش‌های طراحی آزمایش مانند فاکتریل کامل، فاکتریل جزئی، باکس بنکن، مرکب

جدول ۲. پارامترهای ورودی در آزمونهای طراحی شده با روش مرکب مرکزی برای هر دو حالت با باله و بدون باله

Table 2. Input parameters in the experiments designed with the CCD method for both finned and finless cantilever energy harvesters

ترتیب استاندارد	شماره	زاویه	نسبت عمق (درصد)	نسبت طول (درصد)
۱۷	۱	۳۰	۶	۶۰
۱۵	۲	۳۰	۶	۶۰
۱۶	۴	۳۰	۶	۶۰
۵	۴	۴۵	۳	۴۰
۱۴	۵	۶۰	۱۲	۶۰
۱۱	۶	۳۰	۰	۶۰
۱۲	۷	۳۰	۱۲	۶۰
۶	۸	۴۵	۳	۸۰
۲۰	۹	۳۰	۶	۶۰
۱۳	۱۰	۰	۶	۶۰
۱۹	۱۱	۳۰	۶	۶۰
۳	۱۲	۱۵	۹	۴۰
۱۸	۱۳	۳۰	۶	۶۰
۲	۱۴	۱۵	۳	۸۰
۷	۱۵	۴۵	۹	۴۰
۹	۱۶	۳۰	۶	۲۰
۴	۱۷	۱۵	۹	۸۰
۸	۱۸	۴۵	۹	۸۰
۱۰	۱۹	۳۰	۶	۱۰۰
۱	۲۰	۱۵	۳	۴۰

مرکزی[1] و سایر روش‌های مشابه فضای آزمایش‌های لازم برای محاسبه ضرایب مجهول معادله (۱) را تعریف می‌کنند. روش مرکب مرکزی یکی از بهترین روش‌های طراحی آزمایش برای مدل‌های مرتبه ۲ مانند مدل تعریف شده در رابطه (۱) است [۱۲].

این روش، فضای آزمایش‌ها را به یک نقطه مرکزی، تعدادی نقاط عاملی و تعدادی نقاط محوری افراز می‌کند. فاصله نقاط محوری از نقطه مرکزی برابر با $\pm\alpha$ واحد بوده که در این مقاله مقدار آلفا برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. تعداد آزمایش‌ها در روش مرکب مرکزی حداقل برابر با $(۲^k + ۲k + ۱)$ عدد است که در این رابطه k تعداد فاکتورهای ورودی می‌باشد. برای آنالیز واریانس و سنجش دقت مدلسازی، لازم است که در یک نقطه از آزمایش، چند مرتبه آزمایش‌ها را تکرار نمود. در این مقاله در نقطه مرکزی، آزمایش‌ها به تعداد ۵ مرتبه تکرار شده‌اند و با توجه به وجود ۳ متغیر ورودی و ۵ تکرار، تعداد آزمایش‌ها برابر با ۲۰ عدد می‌باشد. آزمون‌های طراحی شده با روش مرکب مرکزی در جدول ۲ برای هر دو حالت بدون باله و با باله نشان داده شده است. ستون‌های جدول شامل ترتیب استاندارد آزمایش‌ها، شماره آزمون و متغیرهای ورودی هستند. نقطه مرکزی آزمون‌ها با پارامترهای تنظیمی طول ۶۰ سانتی‌متر، عمق ۳ سانتی‌متر و زاویه ۳۰ درجه به تعداد پنج مرتبه تکرار شده است.

1 - Central composite design (CCD)

جدول ۳. خلاصه آنالیز واریانس سنجش کفایت دقتی مدل استخراج شده

Table 3. Results of ANOVA for analyzing the precision adequacy of the empirical model

آماره	S	R^2	$R^2_{adjusted}$	$R^2_{predicted}$
بدون باله	۰/۳۵۳۵۵۳	٪۹۹/۹۴	٪۹۹/۸۹	٪۹۹/۵۴
باله‌دار	۰/۱۵۷۵۹۲	٪۹۹/۹۸	٪۹۹/۹۷	٪۹۹/۸۷

۴- نتایج مدلسازی تجربی

با اندازه‌گیری ولتاژ مؤثر برای هر یک از آزمایش‌ها در حالت باله‌دار و بدون باله و واردکردن آن به نرم‌افزار مینی‌تب، مدلسازی تجربی با روش متدولوژی رویه‌های پاسخ و بر اساس چند جمله‌ای‌های مرتبه دوم صورت گرفت و مدل‌های تجربی مربوط به حالت بدون باله و باله‌دار استخراج شد. روابط (۱) و (۲) به ترتیب مدل‌های ریاضی استخراج شده را نشان می‌دهند. مقادیر متغیرهای نسبت عمق و نسبت طول بر حسب درصد وارد شده‌اند.

$$\begin{aligned} V_{rms} &= 104.88 - 1.2563L + 0.041H \\ &- 0.1583\theta + 0.005000L^2 + 0.0832H^2 \\ &- 0.005556\theta^2 + 0.0083L \times H \\ &+ 0.005L \times \theta + 0.01111H \times \theta \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} V_{rms} &= 87.801 - 1.0571L + 0.242H \\ &- 0.1098\theta + 0.004307L^2 + 0.069H^2 \\ &- 0.005288\theta^2 + 0.0043L \times H \\ &+ 0.004458L \times \theta + 0.00916H \times \theta \end{aligned} \quad (۳)$$

در روابط (۲) و (۳) ولتاژ بر حسب میلی‌ولت بوده و L ، H و θ به ترتیب نسبت فاصله از موج‌ساز، نسبت عمق فرورفتگی و زاویه تمایل می‌باشند. برای بررسی کفایت مدل از آنالیز واریانس استفاده شده و خلاصه آنالیز واریانس در جدول ۳ برای حالات باله‌دار و بدون باله گزارش شده است. آماره S نشان دهنده مجذور خطاهای باقی مانده، R^2 ضریب دترمینان چندگانه نام داشته و معیاری از مقدار کاهش تغییر پذیری یا پراکندگی در پاسخ خروجی بر اثر تغییر متغیرهای ورودی است. مقدار R^2 مابین صفر و یک است و بدین معنی است که با افزایش آن میزان پراکندگی خروجی ها کمتر می‌شود. البته مقدار زیاد و نزدیک به یک این پارامتر لزوماً به معنای مناسب بودن مدل رگرسیونی نیست. با اضافه شدن یک متغیر به مدل، مقدار R^2 افزایش می‌یابد. هر چند که این متغیر از نظر آماری اثر مهمی در خروجی نداشته باشد. بنابراین ممکن است مدل‌هایی شامل متغیرهای متعدد بوده و R^2 شان بالا باشد ولی مدل در کل ضعیف باشد. برای رفع این نقیصه، از آماره‌های $R^2_{adjusted}$ و $R^2_{predicted}$ استفاده می‌شود و اگر تفاوت این دو آماره کمتر از ۰/۲ باشد مدل دقت بالایی خواهد داشت [۱۲].

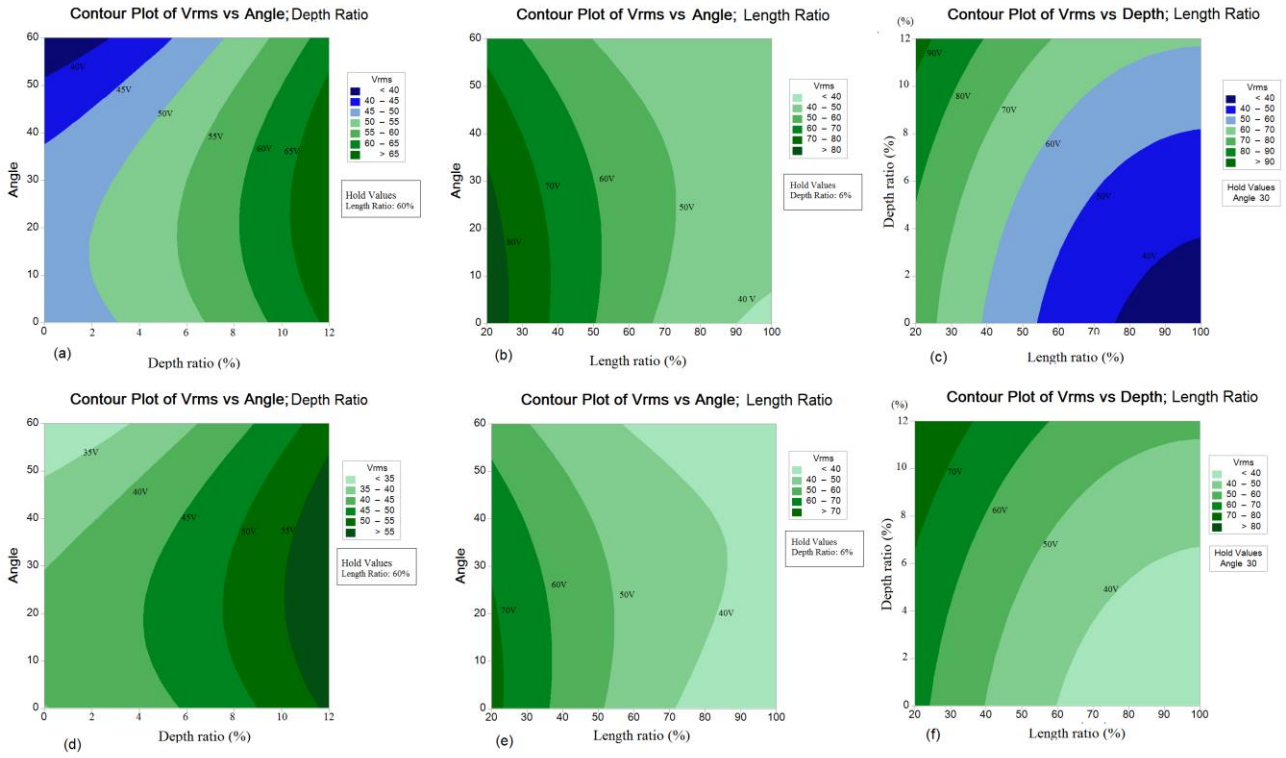
مقدار بالای R^2 و اختلاف بسیار کم $R^2_{adjusted}$ و $R^2_{predicted}$ نشان دهنده دقت مناسب مدلسازی است [۱۲]. کانتورهای دوبعدی اثرات پارامترهای آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. سه تصویر بالای شکل مربوط به تیر یکسرگیردار بدون باله و سه تصویر پایینی مربوط به تیر یکسرگیردار با باله است. همان طور که مشهود است، روند تأثیر پارامترهای آزمایش روی ولتاژ موثر خروجی برای هر دو حالت با باله و بدون باله یکسان است و اتصال باله رفتار برداشت کننده پیزوالکتریک را تغییر نداده است. نتایج تفصیلی آنالیز واریانس ۱ برای تیرهای یکسرگیردار بدون باله و با باله در جداول ۴ گزارش شده است. پارامترهایی از جدول ۴ که مقدار آماره پارامتر احتمالی p آنها کمتر از ۰/۰۵ و مقدار آماره احتمالی F آنها بیش از ۰/۰۵ است پارامتری موثر در مدل بحساب می آیند.

در شکل (۵) رویه‌های پاسخ سه‌بعدی برازش شده بر اساس روابط (۱) و (۲) نمایش داده شده‌اند. همانطور که مشهود است پارامترهای فاصله از موج‌ساز و عمق فرورفتگی تیر، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ولتاژ خروجی هستند. کاهش فاصله از موج‌ساز و افزایش عمق فرورفتگی باعث افزایش ولتاژ مؤثر در برداشت‌کننده پیزوالکتریک شده است. اثر زاویه تمایل، کمتر از دو پارامتر دیگر است و زاویه‌ای برای دستیابی به بیشترین ولتاژ مؤثر وجود دارد. اثر هر سه پارامتر، غیرخطی بوده و بر اساس آنالیز واریانس

جدول ۴. آنالیز واریانس متغیرهای طراحی برای دو حالت با باله و بدون باله.

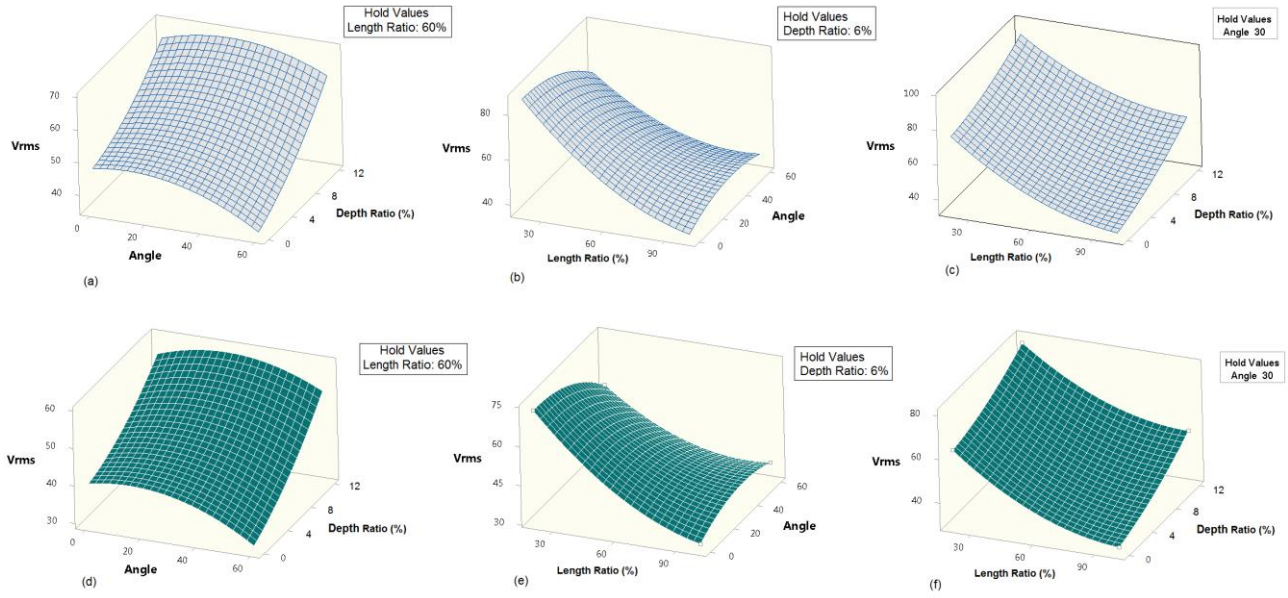
Table 4. Results of ANOVA for the design parameters of both types of cantilever energy harvesters

آماره	حالت بدون باله					حالت با باله				
	درجه آزادی	آماره F	میانگین مربعات تنظیم شده	مجموع مربعات تنظیم شده	آماره p	درجه آزادی	آماره F	میانگین مربعات تنظیم شده	مجموع مربعات تنظیم شده	آماره p
مدل	۹	۱۸۶۸/۴۰	۲۳۳/۵۵	۲۱۰۱/۹۵	۰/۰۰۰	۹	۶۷۱۵/۳۸	۱۶۶/۷۷۸	۱۵۰۱/۰۰	۰/۰۰۰
خطی	۳	۵۰۵۲/۶۷	۶۳۱/۵۸	۱۸۹۴/۷۵	۰/۰۰۰	۳	۱۷۹۶۵/۲۳	۴۴۶/۱۷۱	۱۳۳۸/۵۱	۰/۰۰۰
L	۱	۱۰۶۵۸/۰۰	۱۳۳۲/۲۵	۱۳۳۲/۲۵	۰/۰۰۰	۱	۳۷۲۷۲/۸۹	۹۲۵/۶۸۱	۹۲۵/۶۸	۰/۰۰۰
H	۱	۴۰۵۰/۰۰	۵۰۶/۲۵	۵۰۶/۲۵	۰/۰۰۰	۱	۱۵۰۳۷/۳۳	۳۷۳/۴۵۶	۳۷۳/۴۶	۰/۰۰۰
ɵ	۱	۴۵۰/۰۰	۵۶/۲۵	۵۶/۲۵	۰/۰۰۰	۱	۱۵۸۵/۴۷	۳۹/۳۷۶	۳۹/۳۸	۰/۰۰۰
مرتبه دو	۳	۴۹۳/۸۷	۶۱/۷۳	۱۸۵/۲۰	۰/۰۰۰	۳	۱۹۶۳/۱۵	۴۸/۷۵۵	۱۴۶/۲۷	۰/۰۰۰
L*L	۱	۸۰۴/۵۷	۱۰۰/۵۷	۱۰۰/۵۷	۰/۰۰۰	۱	۳۰۰۴/۵۵	۷۴/۶۱۹	۷۴/۶۲	۰/۰۰۰
H*H	۱	۱۱۳/۱۴	۱۴/۱۴	۱۴/۱۴	۰/۰۰۰	۱	۳۹۲/۵۹	۹/۷۵۰	۹/۷۵	۰/۰۰۰
ɵ * ɵ	۱	۳۱۴/۲۹	۳۹/۲۹	۳۹/۲۹	۰/۰۰۰	۱	۱۴۳۳/۰۹	۳۵/۵۹۱	۳۵/۵۹	۰/۰۰۰
برهمکنش دو تایی	۳	۵۸/۶۷	۷/۳۳	۲۲/۰۰	۰/۰۰۰	۳	۲۱۷/۷۵	۵/۴۰۸	۱۶/۲۲	۰/۰۰۰
L*H	۱	۱۶/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۰/۰۰۳	۱	۲۲/۲۰	۰/۵۵۱	۰/۵۵	۰/۰۰۱
L* ɵ	۱	۱۴۴/۰۰	۱۸/۰۰	۱۸/۰۰	۰/۰۰۰	۱	۵۷۶/۲۵	۱۴/۳۱۱	۱۴/۳۱	۰/۰۰۰
H* ɵ	۱	۱۶/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۰/۰۰۳	۱	۵۴/۸۱	۱/۳۶۱	۱/۳۶	۰/۰۰۰
خطا	۱۰		۰/۱۲	۱/۲۵		۱۰		۰/۰۲۵	۰/۲۵	
کمبود برازش	۵	*	۰/۲۵	۱/۲۵	*	۵	۲۸/۸۰	۰/۰۴۸	۰/۲۴	۰/۰۰۱
خطای خالص	۵		۰/۰۰	۰/۰۰		۵		۰/۰۰۲	۰/۰۱	
کل	۱۹			۲۱۰۳/۲۰		۱۹			۱۵۰۱/۲۵	



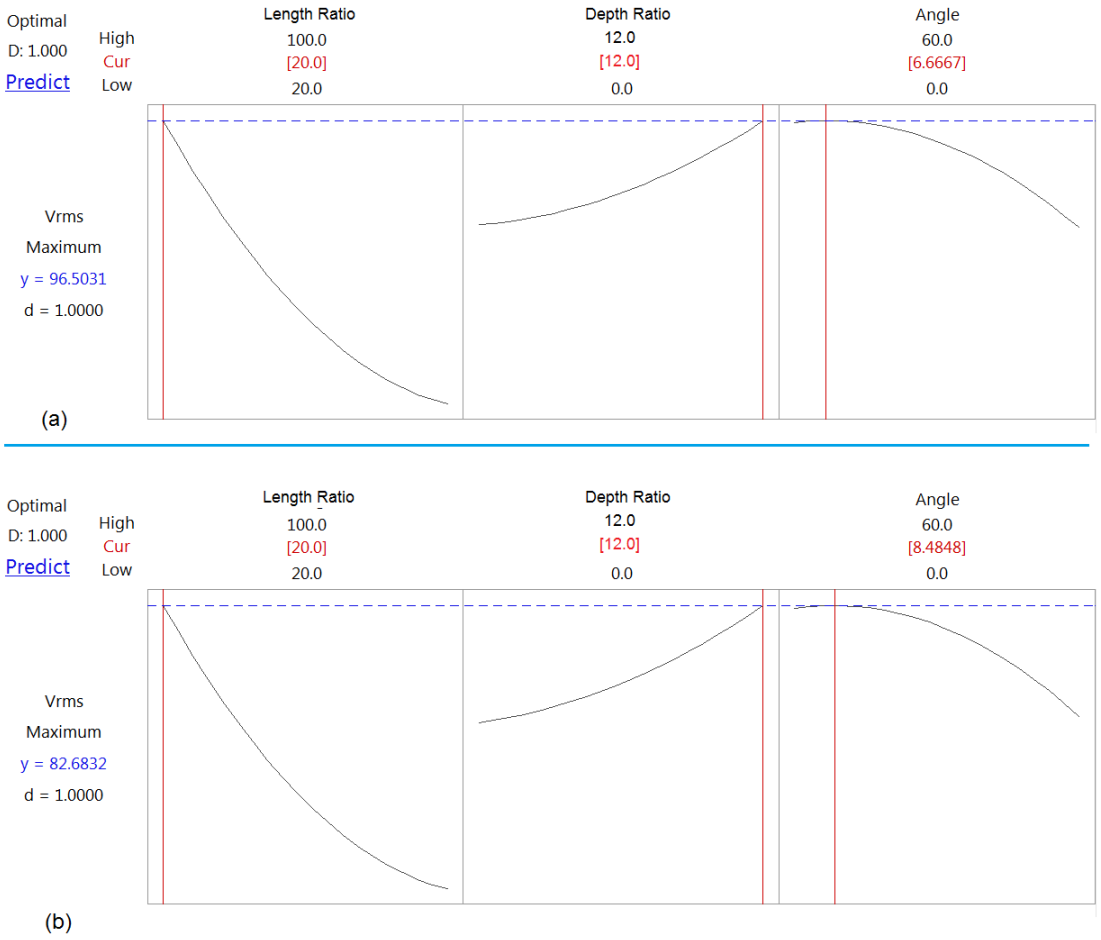
شکل ۴. نمودارهای کانتوری تغییرات ولتاژ مؤثر نسبت به پارامترهای طراحی زاویه تمایل، طول تیر، و عمق فرورفتگی (a, b, c) مربوط به تیر بدون باله و (d ,e, f) مربوط به تیر با باله.

Fig. 4. Contour diagrams of effective voltage changes in relation to the design parameters of tilt angle, distance ratio, and depth ratio related to the finless cantilever (a, b, c) andrelated to the finned cantilever (d, e, f)



شکل ۵. نمودارهای رویههای پاسخ ولتاژ مؤثر برای حالت بدون باله (a تا c) و حالت با باله (d تا f)

Fig. 5. response surfaces of effective voltage changes related to the finless cantilever energy harvester (a, b, c) and to the finned cantilever energy harvester (d, e, f)



شکل ۶. نمودارهای نتایج بهینه سازی برای حالت بدون باله (a) و حالت با باله (b).

Fig. 6. Optimization of input parameters for the finless cantilever (a) and finned cantilever energy harvester (b)

گزارش شده در جدول ۴ تمامی پارامترهای ورودی با هم برهم‌کنش دارند.

بهینه‌سازی پارامترهای طراحی و تنظیمی با هدف بیشینه‌کردن ولتاژ مؤثر و به‌وسیله روش متدولوژی سطح پاسخ، برای هر دو حالت باله‌دار و بدون باله، صورت گرفت و نتایج بهینه‌سازی در قالب نمودارهای شکل ۶ گزارش شدند. همان‌طور که مشهود است در شرایط بهینه برای هر دو حالت برداشت‌کننده باله‌دار و بدون باله، نسبت فاصله تیر از موج‌ساز برابر با ۲۰ درصد و نسبت عمق ۱۲ درصد است. از طرفی، زاویه تمایل بهینه در حالت بدون باله برابر با ۶/۷ درجه و در حالت باله‌دار برابر با ۸/۵ درجه است. مقدار بیشینه ولتاژ مؤثر در حالت بدون باله برابر با ۹۶/۵ میلی‌ولت و در حالت باله‌دار برابر با ۸۲/۶ میلی‌ولت است که در حدود ۱۴/۵ درصد کمتر از ولتاژ بیشینه حالت بدون باله است. مقدار تابع مطلوبیت در هر دو بهینه‌سازی برابر با ۱ است که بیشترین مقدار این پارامتر، کیفی بوده و نشان از صحت بهینه‌سازی دارد.

با افزایش میزان فرورفتگی تیر در داخل آب و نیز افزوده‌شدن باله به انتهای تیر، سطح در تماس تیر با آب (سطح خیس‌شده) و نیز مساحت در مقابل جریان افزایش می یابند. این دو پارامتر به‌صورت نیروی پسای وارده به تیر از طرف امواج آب ظاهر می‌شوند و با افزایش نیروی وارده میزان تعامل سازه با سیال و خمیدگی تیر تشدید می‌شوند. این روند زمانی که تیر با زاویه مخالف صفر در داخل آب وارد می‌شود، مهم‌تر است. از این رو میزان تورفتگی تیر در حالتی که زاویه فرورفتگی مخالف صفر باشد، دارای اهمیت

بیشتری است. زاویه برخورد امواج در سطح آزاد به سطح تیر یکی از عوامل مهم در تعیین میزان ولتاژ مؤثر خروجی سیستم است. یکی از پارامترهایی که در تعیین زاویه اصابت امواج به تیر مهم است زاویه فرورفتگی تیر در داخل آب است. پارامترهای دیگر، فاصله تیر از موج‌ساز و همچنین قدرت موج تولیدشده است. میزان استهلاک دامنه موج که به طور مستقیم با فاصله طی شده توسط موج رابطه دارد و نیز قدرت اولیه موج تولیدشده توسط موج‌ساز، باعث ایجاد تغییر در زاویه برخورد موج با سطح بیرونی تیر پیزو خواهد شد.

از طرف دیگر با توجه به طبیعت وابسته به زمانِ نیروی وارده از طرف امواج به تیر، جرم مجازی یا جرم افزوده نیز دارای اهمیت است. جرم افزوده تابعی از شکل هندسی تیر است که با افزودن باله دچار تغییر می‌شود. نیروی پسای وارده به تیر از نتایج لزج بودن جریان است و پدیده جرم افزوده یک پدیده مستقل از لزجت سیال است. با افزودن باله به تیر، حجم بزرگ‌تری از سیال پشت تیر باید همراه با حرکت شتاب‌دار تیر، جابه‌جا شود. با توجه به چگالی بالای آب و شکل غیرآیرودینامیک تیر، ضریب جرم افزوده دارای اهمیت است. از این رو با تغییر شکل تیر به کمک افزودن باله، دو روند خلاف هم ناشی از افزایش هم‌زمان نیروی پسا و ضریب جرم افزوده روی ولتاژ مؤثر خروجی مشاهده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از روش مرکب مرکزی و متدولوژی سطح پاسخ برای مطالعه اثرات پارامترهای طراحی و تنظیمی برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک از امواج آب استفاده شد. با استفاده از این روش سیستماتیک، اولاً مدل تجربی حاکم بر مسئله برای دو نوع برداشت‌کننده انرژی باله‌دار و بدون باله استخراج شد و در ادامه، میزان تأثیرات متغیرهای ورودی روی ولتاژ مؤثر مورد بررسی قرار گرفت.

آنالیز واریانس انجام شده، نشان می‌دهد هر سه متغیر ورودی زاویه تمایل، نسبت فاصله و نسبت عمقی فرورفتگی به‌صورت غیرخطی روی خروجی مسئله اثر گذارند و از طرفی، هر سه پارامتر ذکر شده با هم برهم‌کنش دارند. در این میان، اثر نسبت فاصله نسبت به دو متغیر دیگر روی ولتاژ مؤثر بیشتر است. اتصال باله، رفتار کلی برداشت‌کننده انرژی را تغییر نداده است؛ ولی در مجموع به میزان ۱۴/۵ درصد خروجی بیشینه برداشت‌کننده را کاهش داده است. در هر دو حالت برداشت‌کننده بدون باله و با باله، بیشترین ولتاژ مؤثر زمانی بدست می آید که نسبت عمق فرورفتگی بیشترین حد و نسبت فاصله طولی از موجساز در کمترین حد خود و مقدار زاویه تمایل بین ۶ و ۸ درجه باشد. از طرفی ولتاژ بیشینه تیر باله‌دار به میزان ۱۶/۵ درصد کمتر از تیر بدون باله است. به کاربردن باله، رفتار برداشت‌کننده انرژی را تغییر نداده است. آنالیز واریانس نشان‌دهنده دقت بالای مدل تجربی بوده و تمامی پارامترهای طراحی ورودی، اثرات غیرخطی روی خروجی داشته و برهمکنش این پارامترها نیز در خروجی مشاهده می‌شوند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از بنیاد علم ایرانیان بابت اعطای گرنت با شماره ۹۸۰۱۷۶۰۶ به پژوهش حاضر تشکر می نمایند.

منابع

[1] J. Ghazanfarian, M.M. Mohammadi, K. Uchino, Piezoelectric Energy Harvesting: A Systematic Review of Reviews, Actuators, MDPI, 10(12))2021(312.

[2] A. Naqvi, A. Ali, W.A. Altabey, S.A. Kouritem, Energy Harvesting from Fluid Flow Using Piezoelectric Materials: A Review, Energies, 15(19) (2022) 7424.

[3] P. Karami, A. Ariaei, K. Hasanpour, Optimum network configuration design of a multi-beam vortex-induced vibration piezoelectric energy harvester, Mechanical Systems and Signal Processing, 177 (2022) 109186.

[4] X. Du, Y. Wang, H. Chen, C. Li, Y. Han, D. Yurchenko, J. Wang, H. Yu, Vortex-induced piezoelectric cantilever beam vibration for ocean wave energy harvesting via airflow from the orifice of oscillation water column chamber, Nano Energy, 104 (2022) 107870.

[5] X. Li, D. Zhang, D. Zhang, Z. Li, H. Wu, Y. Zhou, B. Wang, H. Guo, Y. Peng, Solid-Liquid Triboelectric Nanogenerator Based on Vortex-Induced Resonance, Nanomaterials, 13(6) (2023) 1036.

[6] Y. Belkourchia, H. Bakhti, L. Azrar, Optimization approach for piezoelectric energy harvesting from ocean waves and beams, in: 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), IEEE, 2019, pp. 1-5.

[7] W.S. Hwang, J.H. Ahn, S.Y. Jeong, H.J. Jung, S.K. Hong, J.Y. Choi, J.Y. Cho, J.H. Kim, T.H. Sung, Design of piezoelectric ocean-wave energy harvester using sway

movement, Sensors and Actuators A: Physical, 260 (2017) 191-197.

[8] S. Kazemi, M. Nili-Ahmadabadi, M.R. Tavakoli, R. Tikani, Energy harvesting from longitudinal and transverse motions of sea waves particles using a new waterproof piezoelectric waves energy harvester, Renewable Energy, 179 (2021) 528-536.

[9] X. Xie, Q. Wang, A study on an ocean wave energy harvester made of a composite piezoelectric buoy structure, Composite Structures, 178 (2017) 447-454.

[10] M.H. Alrashdan, MEMS piezoelectric micro power harvester physical parameter optimization, simulation, and fabrication for extremely low frequency and low vibration level applications, Microelectronics Journal, 104 (2020) 104894.

[11] N. Alsaadi, M.A. Sheeraz, Design and optimization of bimorph energy harvester based on Taguchi and ANOVA approaches, Alexandria Engineering Journal, 59(1) (2020) 117-127.

[12] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John wiley & sons, 2017.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. R. Adabzadeh, M. M. Mohammadi, J. Ghazanfarian, Energy harnessing from water waves using a piezoelectric energy harvester with and without ore-like tip: an experimental study, Amirkabir J. Mech Eng., 55(10) (2024) 1195-1206.

DOI: 10.22060/mej.2023.22347.7604

این صفحه عمداً خالی است