Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 927-930
DOI: 10.22060/mej.2021.19169.6967

Experimental and numerical study of energy harvesting from sloshing of a liquid and its performance on shaper machine

R. Maroofiazar*, M. Fahimi Farzam, N. Pashaei

Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

ABSTRACT: In this study, a method for energy harvesting from sloshing of fluids has been proposed. In the first part, voltage and electrical power are measured experimentally. A magnet is floated on the liquid in the coiled container and the system is placed on a shaker table. According to Faraday's law of induction, the movement of the magnet inside the container induces voltage in the coil. The results show that the induced voltage increases with increasing frequency and reaches its maximum value at the natural frequency of the structure and container and decreases again. Also, the inductive voltage has increased with increasing both magnet strength and height of the liquid inside the container. The highest inductive voltage and power output in this study were 850mV and 400μW, respectively. To evaluate the efficiency of the proposed method, the system was installed on a shaper machine and the induced voltage and electrical power were measured. Also, the numerical method is used to simulate and analyze the proposed system. The results show that variations of interface parameters including its pressure, are consistent with experimental data and therefore this method can be used to design and predict the performance of the energy harvester.

Review History:

Received: Oct. 24, 2020
Revised: Jan. 30, 2020
Accepted: Mar. 31, 2021
Available Online: Apr. 04, 2021

Keywords:

Energy harvesting
Sloshing
Faraday's induction law
Coil
Volume of fluid method.

1- Introduction

Energy harvesting is the process by which energy is harvested and stored from external sources such as solar, thermal, wind and kinetic energy and used for small, wireless devices, such as those in wearable electronics and wireless sensor networks. Therefore, an energy harvester can be used both to charge existing batteries and to replace them, which will ultimately increase the life of the system [1,2]. Mechanical vibrations are among the most important sources of energy that exist in various systems and devices and are usually unused [3,4]. Various methods have been proposed to extract energy from mechanical vibrations, including electromagnetic, piezoelectric, and electrostatic [5]. Among the methods of energy harvesting from vibrations, the electromagnetic method has several advantages [6].

The previous studies show that using ferrofluids in the sloshing phenomenon is suitable for energy harvesting, but this method is not without its drawbacks. Nanoparticles deposition and their absorption to the magnets are the main disadvantages of those systems. In this paper, a method has been proposed for energy harvesting from mechanical vibrations by using ordinary liquid sloshing. In this method, the magnet is floated on the surface of the liquid and the liquid container is wrapped by copper wire. In the second part, numerical modeling has been used to analyze and predict the performance of the proposed system.

2- Materials and Methods

The schematic of the proposed system for energy harvesting is shown in Fig. 1. The liquid is poured into the container at different heights and a magnet is floated on it. In this study, the effect of different parameters on energy harvesting from the proposed system has been investigated. Output parameters are: induced voltage in the coil and harvested electrical power. The input parameters and their range of changes are given in Table 1.

The energy harvesting of the proposed system is based on the oscillations of the interface between the two fluids and the movements of the magnet relative to the coil, which ultimately induces voltage in the coil according to Faraday's law of induction. Therefore, it is expected that parameters

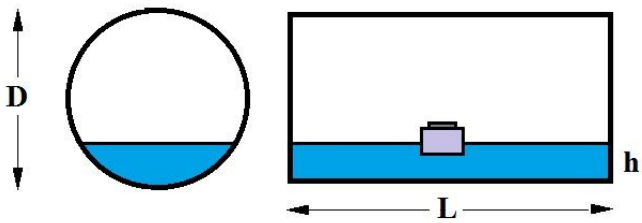


Fig. 1. Schematic diagram of the proposed system

*Corresponding author's email: assem@sharif.edu

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. Effective parameters in this study

parameter	*h/L*	Magnet strength (G)	Frequency (Hz)	Electrical resistance (Ω)
values	0.2 0.25 0.3	0.05 0.1 0.15	1-3	147 819

related to the interface such as pressure, can be used as a parameter to predict the performance of this system. The reason for this is that the greater the fluctuations in the interface, the more energy we should expect. For this purpose, in this study, numerical modeling has been used to simulate fluid sloshing

3- Results and Discussion

The effect of magnet strength and electrical resistance on harvested power is shown in Fig. 2. The values of B and R in this figure are given in Table 1.

It is observed that the highest power harvested in each state is related to the resonant frequency of the system, and between the first and second resonant frequencies, first decreases and then increases the power. Also, with increasing magnet strength, we see an increase in energy harvesting. The important point of this figure is the higher power output with smaller electrical resistance, which is consistent with the data in previous articles, including references [7,8]. The physical reason for this finding is that the electrical resistance is higher than the resistance of the coil itself, which reduces the electrical power.

To evaluate the performance of the system, the harvester was installed on a shaper machine and the harvested energy was measured in different modes of operation of this machine. The shaper machine and the system installed on it are shown in Fig. 3. Experimental data are extracted and plotted in Fig. 4. The results show that the proposed system has worked well on the machine. The inductive voltage has increased with increasing course length as well as the oscillation of the shaper movement. The maximum inductive voltage in the coil is 350mV, which is related to the course length of 26cm and the frequency of 1.25Hz.

Fig. 3. Shaper machine and installed system on it

To evaluate the efficiency of the numerical model used in this study, the changes in pressure of the interface resulting from the numerical method and the experimental voltage drawn with time have been done and shown in Fig. 5. It can be seen that there are many qualitative similarities between numerical graphs and experimental data.

4- Conclusions

In this study, a method for energy harvesting from mechanical vibrations was proposed. The findings indicated that: 1) The maximum harvested power was 400 microwatts. 2) As the frequency of oscillations increased, the power increased and had the highest value in a frequency called the resonant frequency. 3) Harvested power was higher for lower electrical resistance. 4) The proposed system was used in the shaper machine and an acceptable performance was observed

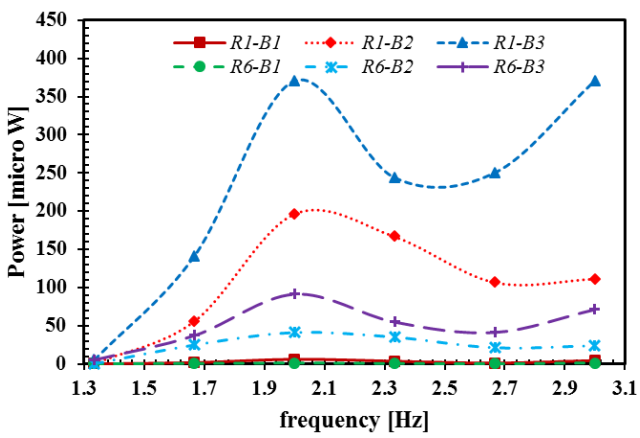


Fig. 2. Harvested electrical power for h/L=0.25

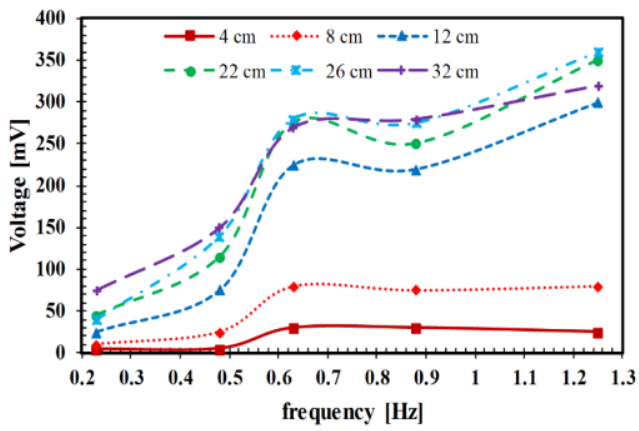


Fig. 4. Induced voltage in the shaper machine

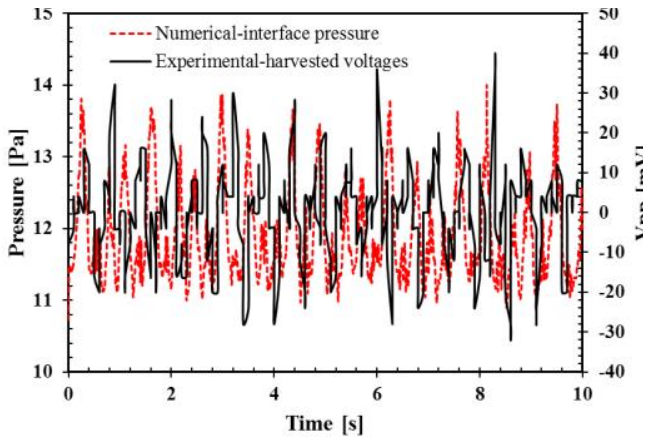


Fig. 5. Comparison of numerical results and harvested voltage variations with time at f=2Hz and h/L=0.25 with R1 and B1: (a) interface pressure

so that this system can be used in wireless sensors to precisely control the performance of this machine. 5) Considering that the main factor of energy harvesting in the studied system is the interface movements due to sloshing, so by numerical modeling, its performance can be designed and analyzed.

References

[1] D. Zhu, S. Roberts, M.J. Tudor, S.P. Beeby, Design and experimental characterization of a tunable vibration-based electromagnetic micro-generator, Sensors and Actuators A: Physical, 158(2) (2010) 284-293.

[2] M. El-hami, P. Glynne-Jones, N.M. White, M. Hill, S. Beeby, E. James, A.D. Brown, J.N. Ross, Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator, Sensors and Actuators A: Physical, 92(1) (2001) 335-342.

[3] A. Munaz, B.-C. Lee, G.-S. Chung, A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet, Sensors and Actuators A: Physical, 201 (2013) 134-140.

[4] D.W. Oh, D.Y. Sohn, D.G. Byun, Y.S. Kim, Analysis of electromotive force characteristics and device implementation for ferrofluid based energy harvesting system, in: 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014, pp. 2033-2038.

[5] C. Sravanthi, J.M. Conrad, A survey of energy harvesting sources for embedded systems, in: IEEE SoutheastCon 2008, 2008, pp. 442-447.

[6] S.P. Beeby, M.J. Tudor, N.M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, Measurement Science and Technology, 17(12) (2006) R175-R195.

[7] J.G. Monroe, O.T. Ibrahim, S.M. Thompson, N. Shamsaei, Energy harvesting via fluidic agitation of a magnet within an oscillating heat pipe, Applied Thermal Engineering, 129 (2018) 884-892.

[8] A. Bibo, R. Masana, A. King, G. Li, M.F. Daqaq, Electromagnetic ferrofluid-based energy harvester, Physics Letters A, 376(32) (2012) 2163-2166.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Maroofiazar, M. Fahimi Farzam, N. Pashaei , Experimental and numerical study of energy harvesting from sloshing of a liquid and its performance on shaper machine, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 927-930.

DOI: 10.22060/mej.2021.19169.6967

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۹۱۱ تا ۳۹۲۴
DOI: 10.22060/mej.2021.19169.6967

مطالعه تجربی و عددی برداشت انرژی از اسلاشینگ یک سیال و عملکرد آن در دستگاه صفحه تراش

رسول معروفی آذر*، مازیار فهیمی فرزام، ناصر پاشایی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

خلاصه: در این مطالعه روشی برای برداشت انرژی از اسلاشینگ مایعات پیشنهاد شده و تاثیر پارامترهای مختلف بر کارایی آن بررسی شده‌است. در بخش اول، ولتاژ و توان القایی بصورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده‌است. بدین منظور آهنربایی روی مایع موجود در ظرف سیم پیچی شده شناور گردیده و سیستم مورد بررسی روی یک میز لرزه قرار گرفته‌است. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد ولتاژ القایی با افزایش فرکانس افزایش یافته و در فرکانس طبیعی مجموعه سازه و مخزن به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین با افزایش قدرت آهنربا و افزایش ارتفاع سیال درون ظرف، ولتاژ القایی افزایش یافته‌است. بیشترین ولتاژ القایی و توان برداشت‌شده در این مطالعه به ترتیب ۸۵۰ mV و ۴۰۰ μW ثبت شده‌است. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، سیستم مورد نظر روی یک ماشین صفحه تراش نصب شده و ولتاژ القایی و توان برداشت‌شده اندازه‌گیری گردیده‌است. در بخش دوم، از روش عددی برای شبیه‌سازی و تحلیل سیستم پیشنهادی استفاده گردیده‌است. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهند روند تغییرات پارامترهای مربوط به مرز مشترک از جمله فشار و ارتفاع آن، منطبق بر داده‌های تجربی بوده و بنابراین می‌توان از این روش جهت طراحی و پیش‌بینی عملکرد برداشت‌کننده انرژی استفاده نمود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

کلمات کلیدی:
برداشت انرژی
القاء فارادی
اسلاشینگ
سیم‌پیچ
مدل حجم سیال

۱- مقدمه

در سالیان اخیر استفاده از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی مورد توجه بسیار قرار گرفته و بدین جهت تلاش‌های بسیاری جهت کاهش مصرف انرژی این تجهیزات انجام گرفته‌است تا بتواند مصرف انرژی آنها را از محدوده میلی وات تا محدوده میکروات کاهش دهد [۱]. کاربردهایی نظیر سنسورها در ساختمان‌ها، ایمپلنت‌های پزشکی، شبکه‌های سنسورهای بی‌سیم، سنسورهای مورد استفاده در صنایع نظامی و ... از جمله موارد استفاده این سیستم‌ها می‌باشد [۱و۲]. در حال حاضر از باتری‌ها جهت تامین انرژی این سیستم‌ها استفاده می‌شود که دارای محدودیت‌های مختلفی از قبیل عمر کوتاه، اندازه بزرگ، مشکلات در تعویض و جایگزینی، و وجود مواد سمی و خطرناک درون آنها می‌باشد. در صورت استفاده از یک برداشت‌کننده انرژی می‌توان بر مشکلات ناشی از باتری‌ها غلبه نمود [۳و۴]. برداشت انرژی فرآیندی است که از طریق آن انرژی از منابع خارجی از قبیل انرژی‌های خورشیدی، حرارتی، باد و جنبشی برداشت و ذخیره شده و برای دستگاه‌های کوچک و بی‌سیم، مانند آنهایی که در لوازم الکترونیکی پوشیدنی و شبکه حسگرهای بی‌سیم استفاده می‌شوند، بکار می‌رود. بنابراین یک برداشت‌کننده انرژی می‌تواند هم برای شارژکردن باتری‌های موجود و هم جایگزینی به جای آنها استفاده شود که در نهایت موجب افزایش طول عمر سیستم خواهدشد [۵و۶].

ارتعاشات مکانیکی از جمله مهمترین منابع انرژی هستند که در سیستم‌ها و دستگاه‌های مختلف وجود داشته و معمولاً بدون استفاده می‌باشند [۷و۸]. به طور مثال دوران موتور الکتریکی، انرژی باد، حرکت وسیله نقلیه، انرژی موج، زلزله و راه‌رفتن انسان از جمله عوامل تولید ارتعاش می‌باشند. روش‌های مختلفی جهت برداشت انرژی از ارتعاشات مکانیکی پیشنهاد شده‌است که عبارتند از الکترومغناطیس، پیزوالکتریک و الکترواستاتیک [۹]. در بین روش‌های برداشت انرژی از ارتعاشات، روش الکترومغناطیس دارای مزیت‌های مختلفی است [۳]. پدیده القای الکترومغناطیسی عبارتست از تولید نیروی محرکه الکتریکی در یک رسانا که در یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان قرار دارد. تغییر میدان مغناطیسی می‌تواند در اثر یک جریان متناوب یا حرکت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r.maroofi@gmail.com

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.

نسبی رسانا و میدان باشد. جریان تولیدشده را جریان القایی می‌نامند. هر عاملی که بتواند خطوط میدان و در نتیجه شار مغناطیسی را تغییر دهد می‌تواند منجر به القاء نیروی محرکه یا به عبارت دیگر جریان الکتریکی شود.

مطالعات مختلفی در مورد برداشت انرژی بر پایه قانون القاء فارادی انجام شده‌است [۱۰-۱۴]. در برخی از مطالعات از حرکت سیالات به عنوان عامل حرکت آهنربا و قطع خطوط میدان مغناطیسی استفاده گردیده‌است. از جمله در مطالعه‌ای که توسط مونرو و همکاران انجام شده، در اثر حرکت آهنربا درون لوله حرارتی نوسانی، برداشت انرژی صورت گرفته‌است. دو آهنربا با اندازه‌های متفاوت درون لوله استفاده شده و نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که آهنربای بزرگتر باعث افزایش توان برداشت انرژی می‌گردد ولی بخاطر کم‌کردن مقطع حرکت سیال، باعث کاهش عملکرد انتقال حرارتی آن می‌شود [۱۵].

فروسیالات مخلوطی از سیال پایه مانند آب و نانوذرات مغناطیسی هستند و با اعمال میدان مغناطیسی تحت تاثیر قرار می‌گیرند [۱۶]. یکی از روش‌های برداشت انرژی که در سالیان اخیر و بر اساس روش الکترومغناطیسی پیشنهاد شده‌است استفاده از اسلاشینگ فروسیالات است [۱۷-۱۹]. اگر ظرف نیمه‌پری از یک مایع تحت حرکات نوسانی قرار گیرد موج‌هایی در سطح مایع ایجاد می‌شود که در ادبیات فن به آن اسلاشینگ می‌گویند. در این روش فروسیال بصورت نیمه پر درون ظرفی که سیم‌پیچی شده‌است ریخته شده و مجموعه تحت اثر نیروی مغناطیسی قرار می‌گیرد. در اثر ارتعاشات مکانیکی، فروسیال درون ظرف شروع به حرکت و اسلاشینگ کرده و به دلیل تغییر خطوط میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در سیم پیچ القاء می‌شود. اولین بار بیبو و همکاران از فروسیالات در یک ژنراتور میکروتوان الکترومغناطیسی استفاده کرده و تاثیر پارامترهایی نظیر مقدار فروسیال، قدرت میدان مغناطیسی و میزان شتاب را در ولتاژ خروجی برداشت‌کننده مطالعه نموده‌اند. ایشان نتیجه گرفتند که میزان شتاب تاثیر بسزایی در ولتاژ خروجی داشته در حالیکه مقدار فروسیال تاثیر چندانی ندارد [۱۷]. اُه و همکاران تاثیر اسلاشینگ فروسیال بر میزان ولتاژ تولیدی در یک برداشت‌کننده انرژی را تحلیل کردند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که ولتاژ خروجی که در حد میکروولت است با افزایش سرعت ارتعاش افزایش یافته و با افزایش شار مغناطیسی کاهش می‌یابد [۸]. العظمی و همکاران اسلاشینگ فروسیالات را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که حرکت موجی فروسیال باعث تولید شار مغناطیسی متغیر با زمان و در نتیجه موجب تولید نیروی محرک الکتریکی در سیم پیچ می‌گردد [۱۸]. لیو و همکاران برداشت‌کننده انرژی از اسلاشینگ فروسیالات را بصورت عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه، معادلات ماکسول و ناویر-استوکس بصورت همزمان برای میدان مغناطیسی و جریان سیال حل شده‌اند. نتایج بدست‌آمده با داده‌های تجربی اعتباردهی شده‌است. نتایج ایشان بیانگر مناسب‌بودن مدل دوبعدی برای شبیه‌سازی و همچنین تاثیر کشش سطحی در نتایج بدست‌آمده می‌باشد [۱۹].

اگرچه مطالعات فوق نشان می‌دهد که استفاده از فروسیالات در پدیده اسلاشینگ جهت برداشت انرژی مناسب می‌باشد اما این روش خالی از اشکال نیست. از جمله مشکلات موجود در این روش، عدم پایداربودن پخش نانوذرات درون سیال پایه و در نتیجه رسوب آنها بعد از مدت زمان مشخصی است. با وجود مطالعات مختلفی که در مورد پایدارسازی پخش نانوذرات درون سیال پایه با روش‌های مختلف از جمله استفاده از سورفکتانت‌ها شده است ولی هیچکدام از روش‌های موجود پخش دائمی و بدون رسوب برای نانوذرات ایجاد نمی‌کند. دیگر مشکل مهم در استفاده از فروسیالات جهت برداشت انرژی، جذب نانوذرات مغناطیسی به سمت آهنرباهای اطراف ظرف می‌باشد که در نهایت منجر به کاهش نانوذرات پخش شده درون سیال پایه و کاهش بازده سیستم برداشت انرژی با زمان خواهد شد. جهت استفاده از مزایای این سیستم برداشت انرژی و حذف معایب موجود، روشی در این مقاله پیشنهاد گردیده‌است، بدینصورت که به جای استفاده از فروسیال، از مایعات معمول مانند آب به عنوان سیال عامل استفاده گردد. در این روش، آهنربایی با اتصال به یک ماده دیگر مانند یونولیت بر روی سطح مایع شناور شده و ظرف حاوی سیال سیم پیچی گردیده‌است. در واقع روش پیشنهادی، علاوه بر دارابودن مزایای سیستم برداشت انرژی ذکرشده در مطالعات فوق، با حذف مشکلات مورد اشاره باعث افزایش کارایی سیستم جدید خواهد بود. در ادامه، برای تحلیل و پیش بینی عملکرد سیستم پیشنهادی از مدلسازی عددی استفاده گردیده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

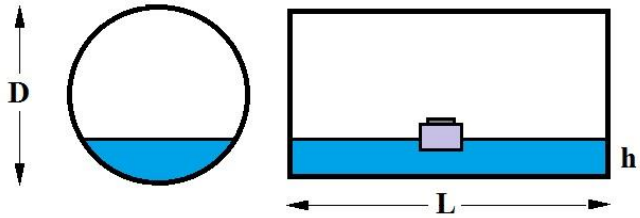
۲- ۱- بخش آزمایشگاهی

شماتیک سیستم پیشنهادی برای برداشت انرژی در شکل ۱ نشان داده شده‌است. مایع با ارتفاع‌های مختلف داخل ظرف ریخته شده و آهنربایی درون آن شناور گردیده‌است. در این مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان برداشت انرژی از سیستم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌است. متغیرهای ورودی عبارتند از: نسبت ارتفاع سیال به طول ظرف (ارتفاع بی بعد)، قدرت آهنرباهای مورد استفاده، فرکانس نوسان میز لرزه، و مقاومت‌های الکتریکی

جدول ۱. پارامترهای موثر در مطالعه

Table 1. Effective parameters in this study

پارامتر ورودی	نسبت ارتفاع آب به طول ظرف (h/L)	قدرت آهنربا (B [G])	فرکانس نوسان (Hz)	مقاومت الکتریکی (R [Ω])
مقادیر مورد بررسی	۰/۳، ۰/۲۵، ۰/۲	۰/۱۵، ۰/۱، ۰/۰۵	۱-۳ (با گام ۰/۳۳)	۸۱۹، ۱۴۷



شکل ۱. شکل شماتیکی سیستم پیشنهادی

Fig. 1. Schematic diagram of the proposed system

در مسیر جریان. پارامترهای خروجی نیز عبارتند از: ولتاژ القاءشده در سیم پیچ و توان الکتریکی برداشت‌شده. محدوده تغییرات هر یک از پارامترهای ورودی در جدول ۱ آورده شده‌است.

در این جدول h ارتفاع سیال درون ظرف و L طول ظرف می‌باشد. با توجه به جدول فوق، اگر هر آزمایش فقط یکبار انجام گیرد در مجموع ۱۲۶ آزمایش جهت استخراج کامل نتایج مورد نیاز بوده است، اما جهت اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌ها و حذف خطاهای احتمالی، هر آزمایش چهار بار انجام شده‌است که تعداد کل آزمایش‌های این مطالعه را به بیش از ۵۰۰ تست رسانده‌است. در نهایت میانگین داده‌های بدست‌آمده به عنوان داده نهایی در مقاله آورده شده‌است.

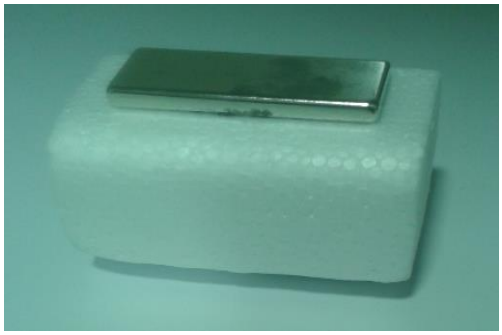
۲- ۲- تجهیزات مورد استفاده

تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از: میز لرزه، اسیلوسکوپ، ظرف سیم‌پیچی‌شده، و آهنربا با سه قدرت مختلف. میز لرزه مورد استفاده در این مطالعه ساخت شرکت پرزان پژوه بوده و با تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی کار می‌کند. محدوده سرعت دورانی این دستگاه ۵۰۰-۲۰ دور بر دقیقه، دامنه نوسان آن ۱۷ میلی‌متر و جهت نوسان در راستای محور x بوده و قابلیت تحمل وزن حداکثر تا ۱۲ کیلوگرم را دارد. جهت جلوگیری از تاثیر میدان مغناطیسی الکتروموتورِ میز لرزه بر سیم پیچ اطراف ظرف، سازه‌ای جهت فاصله‌گرفتن سیم‌پیچ از الکتروموتور ساخته شده‌است. برای ثبت و اندازه‌گیری ولتاژ القایی در دو سر سیم پیچ اطراف ظرف، از اسیلوسکوپ مدل Megatek-Dso5070 که اسیلوسکوپ دیجیتالی دو کاناله می‌باشد استفاده شده‌است. این دستگاه ساخت کشور تایوان بوده و محدوده فرکانسی آن تا ۷۰ MHz و خطای اندازه‌گیری ولتاژ آن برای ولتاژهای بیشتر از ۱۰ mV در حدود ۳٪ می باشد. همچنین این اوسیلوسکوپ می‌تواند داده‌ها را با سرعت ۱ GS/s نمونه‌برداری کرده و تاخیر زمانی آن در حدود ۵۰۰ ps می‌باشد. یک ظرف پلاستیکی به قطر ۹ cm و طول ۱۵ cm توسط سیم مسی به قطر ۱ mm و به تعداد ۵۰۰ دور به‌طور منظم سیم‌پیچی شده و دو سر سیم‌پیچ جهت اتصال به اسیلوسکوب آزاد نگه داشته شده است. همچنین از سه آهنربای نئودیمیومی با قدرت‌های مختلف استفاده شده‌است. نمونه‌ای از میز لرزه، سازه، ظرف و آهنربا در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچ بایستی تحت بار صورت گیرد از دو نوع مقاومت الکتریکی به اندازه‌های ۱۴۷ و ۸۱۹ اهم استفاده شده‌است. برای هر حالت، ولتاژ القاءشده به صورت فایل از اسیلوسکوپ استخراج و ذخیره شده و به کامپیوتر منتقل می‌گردد تا جهت مقایسه پارامترها مورد تحلیل قرار گیرد. شکل شماتیکی مدار الکتریکی مورد استفاده در این مطالعه تیز در شکل ۳ آورده شده‌است.

۲- ۳- بخش مدلسازی عددی

برداشت انرژی سیستم پیشنهادشده در این مطالعه، بر پایه نوسانات مرز مشترک بین دو سیال و حرکات آهنربا نسبت به سیم پیچ اطراف ظرف

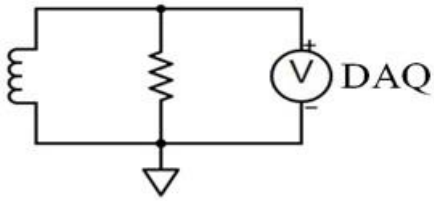
الف



ب

شکل ۲. الف) میز لرزه، سازه و ظرف سیم‌پیچی‌شده، ب) مجموعه آهنربا و یونولیت

Fig. 2. (a) Shaker, structure and coiled container, (b) magnet and frame unit



شکل ۳. شکل شماتیک مدار الکتریکی مورد استفاده

Fig. 3. Schematic diagram of the used electrical circuit

است که در نهایت با توجه به قانون القاء فارادی باعث القاء ولتاژ در سیم پیچ می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود بتوان از پارامترهای مربوط به مرز مشترک از جمله فشار و تغییرات آن نسبت به زمان به عنوان پارامترهایی جهت پیش‌بینی عملکرد این سیستم استفاده نمود. دلیل این امر آن است که هر چقدر نوسانات سطح مشترک دو سیال بیشتر باشد باید انتظار برداشت انرژی بیشتری نیز داشته باشیم. بدین منظور در این مطالعه از مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی اسلاشینگ سیال استفاده شده و معادلات ناویر–استوکس به عنوان معادلات حاکم بر اسلاشینگ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین از مدل دوفازی حجم سیال برای تعقیب سطح مشترک دو سیال استفاده گردیده که این کار را با حل یک مجموعه معادلات مومنتوم و ردیابی کسر حجمی هر یک از سیالات در دامنه محاسباتی انجام می‌دهد. در این مدل، هر دو فاز میدان سرعت و فشار یکنواختی را به اشتراک می‌گذارند [۲۰]. مرز مشترک بین مایع و گاز به عنوان یک ناپیوستگی فیزیکی که خواص آن بصورت ناگهانی تغییر می‌کنند در نظر گرفته می‌شود. با فرض سیالات نیوتنی و تراکم ناپذیر، معادلات حاکم عبارتند از [۲۱]:

$$\nabla . \boldsymbol{U} = 0 \tag{۱}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + \boldsymbol{U}.\nabla \boldsymbol{U}\right) = -\nabla p + \nabla . \mu\left[\nabla \boldsymbol{U} + \left(\nabla \boldsymbol{U}\right)^T\right] + \rho \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F} \tag{۲}$$

که عبارت دوم در سمت راست آن بیانگر نرخ تغییر شکل است. F نیروی کشش سطحی بین مرزی در واحد حجم بوده و در فصل مشترک مایع و گاز به کار می‌رود. این نیرو برابر مجموع تنش‌های سطحی عموی و مماسی می‌باشد:

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_n + \boldsymbol{F}_t \tag{۳}$$

که F_n و F_t به ترتیب تنش نرمال و مماسی در فصل مشترک فازها می‌باشد.

خواص بکاررفته در در معادلات (۱) و (۲) خواص متوسط بوده و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\rho = \alpha\rho_l + (1-\alpha)\rho_g \quad (۴)$$

$$\mu = \alpha\mu_l + (1-\alpha)\mu_g \quad (۵)$$

که ρ_l و ρ_g به ترتیب چگالی مایع (آب) و گاز (هوا) می باشند. همچنین در رابطه (۵)، μ_l و μ_g به ترتیب لزجت آب و هوا هستند. α کسر حجمی سیال است که برای آب مقدار ۱ و برای هوا صفر در نظر گرفته شده و در مرز مشترک بین دو سیال مقدار آن بین صفر و یک می‌باشد. کارکرد اصلی مدل حجم سیال در محاسبه α است. در این مدل برای هر فاز یک کسر حجمی در نظر گرفته شده و برای محاسبه آن از رابطه زیر استفاده می‌شود:

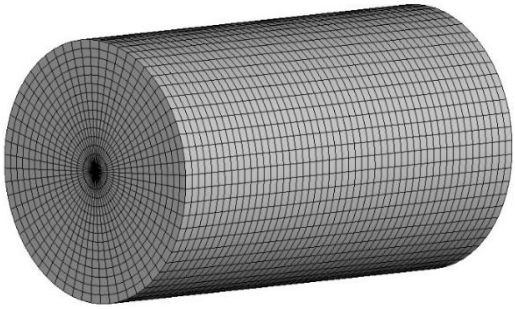
$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} + \nabla.(\alpha \boldsymbol{U}) = 0 \quad (۶)$$

لازم بذکر است معادله (۶) برای فاز اصلی حل نشده و فقط برای فاز ثانویه حل شده‌است. مجموع کسر حجمی دو فاز در حل سلول برابر یک بوده و برای محاسبه کسر حجمی فاز اولیه از رابطه زیر استفاده شده‌است:

$$\alpha_l + \alpha_g = 1 \quad (۷)$$

شرایط مرزی درنظرگرفته‌شده در این مطالعه برای تمامی مرزهای موجود در مسئله از نوع دیواره عایق می‌باشد. از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۷ برای حل معادلات حاکم استفاده گردیده‌است. از الگوریتم فشار-ضمنی با تقسیم عملگرها[1] برای حل میدان جریان، از طرح بالادست مرتبه دوم[2] برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و از طرح باز ساخت هندسی[3] برای معادله کسر حجمی استفاده گردیده‌است. شبکه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه از نوع شبکه‌بندی منظم بوده و در شکل ۴ نشان داده شده‌است.

1 Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)
2 Second Order Upwind
3 Geo-Reconstruct



شکل ۴. هندسه مورد بررسی و شبکه‌بندی بکاررفته

Fig. 4. Studied geometry and its mesh

تحریک اعمالی به مخزن در آزمایش‌های انجام‌شده بصورت سینوسی و در جهت افقی می‌باشد. رابطه ریاضی این تحریک و موقعیت مکانی مخزن از رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$x = A\sin(ft) \quad (۸)$$

که در A دامنه نوسان و f فرکانس نوسان می‌باشد. برای اعمال این تحریک در مدلسازی عددی، سرعت حرکت مخزن توسط رابطه (۹) محاسبه شده و به کل مخزن اعمال گردیده‌است:

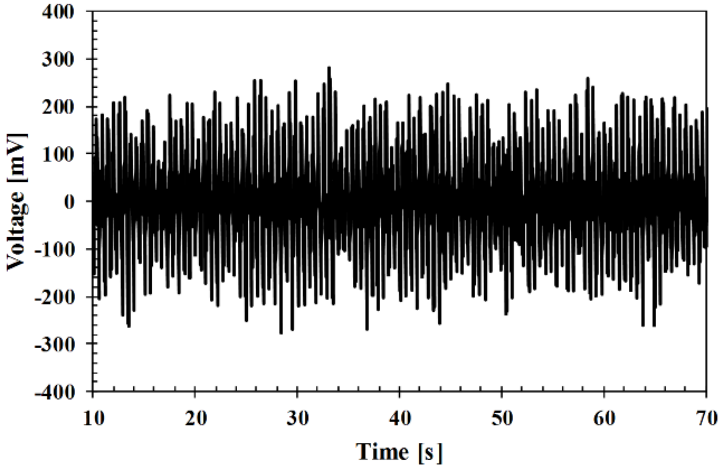
$$\dot{x} = Af\cos(ft) \quad (۹)$$

که در آن $\dot{x}$ مشتق زمانی تغییر مکان مخزن و در واقع سرعت حرکت آن می‌باشد.

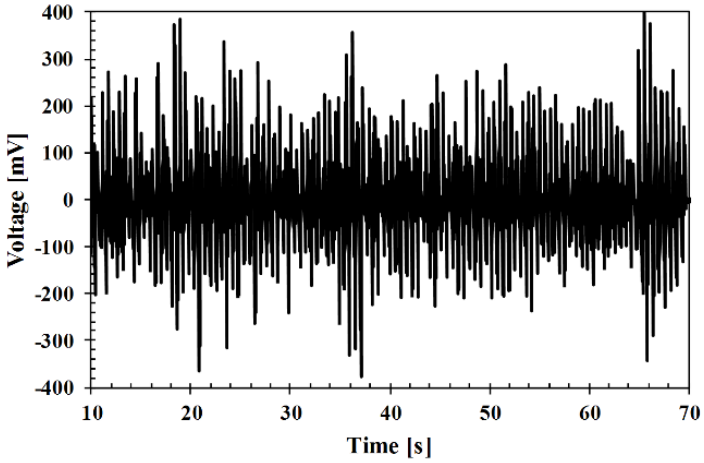
۳- نتایج

۳- ۱- بخش تجربی

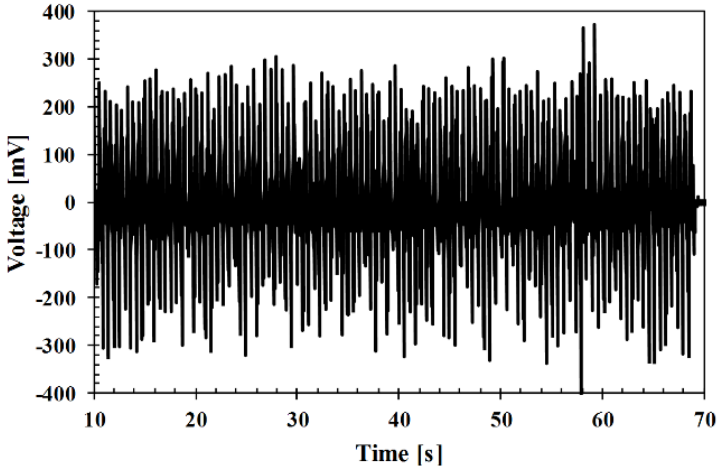
در شکل ۵، نمودار ولتاژ القاءشده در سیم پیچ در طول زمان آزمایش نشان داده شده‌است. این داده‌ها مربوط قوی‌ترین آهنربا (G ۰/۱۵)، و مقاومت ۸۱۹ اهمی در فرکانس ۲ هرتز می‌باشند. مشاهده می‌گردد که در اثر اسلاشینگ سیال و حرکت آهنربا در سطح آن، ولتاژی در سیم پیچ القاء می‌شود که به دلیل تغییر جهت حرکت آهنربا، ولتاژ القایی می‌تواند مثبت یا منفی باشد. همچنین در شرایط یکسان و با تغییر ارتفاع سیال، ولتاژ القاء شده دچار تغییر می‌گردد. برای تمامی حالت‌های متغیرهای ورودی، آزمایش‌ها تکرار شده و داده‌هایی مشابه این شکل بدست آمده‌است. برای



الف



ب



ج

شکل ۵. ولتاژ القاءشده با زمان با آهنربای ۰/۱۵ گاوسی و مقاومتی ۸۱۹ اهمی در فرکانس ۲ هرتز: الف) h/L=۰/۲، ب) h/L=۰/۲۵، ج) h/L=۰/۳

Fig. 5. Variation of induced voltage with time for magnet strength of 0.15G, Electrical ressistance of 819 at frequency of 2Hz: (a) h/L=0.2, (b) h/L=0.25, (c) h/L=0.3

سهولت در ایجاد نمودارهای بعدی، ولتاژهای بیشینه و کمینه القایی در هر یک از آزمایشها بدست آمده و با جمع قدر مطلق این مقادیر ولتاژی موسوم به ولتاژ قله به دره (Vpp) محاسبه شده و در بقیه شکل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است.

۳- ۲- تاثیر پارامترهای مختلف در برداشت انرژی

تاثیر قدرت آهنربا، ارتفاع سیال و مقاومت الکتریکی بر ولتاژ القایی و توان برداشت شده در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌است. مقادیر B و R موجود در این شکل‌ها در جدول ۱ آورده شده‌است.

از شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس نوسانات، ولتاژ القایی افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود می‌رسد که دلیل این موضوع، وقوع پدیده تشدید در آن فرکانس بخاطر انطباق فرکانس تحریک با فرکانس طبیعی مجموعه سازه و ظرف است. در این فرکانس، تلاطم سطح سیال بیشتر شده که باعث حرکات بیشتر و سریعتر آهنربا درون ظرف و در نتیجه منجر به افزایش ولتاژ القایی گردیده‌است. می توان دریافت که با افزایش ارتفاع سیال درون ظرف، فرکانس طبیعی مجموعه سازه و ظرف افزایش یافته‌است. فرکانس طبیعی مجموعه سازه و ظرف در نسبت‌های ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ برای h/L به ترتیب در حدود ۱/۷۵، ۲ و ۲/۳ هرتز می‌باشد. بعد از این نقطه و با افزایش فرکانس نوسانات، شاهد کاهش ولتاژ القایی و رسیدن به کمترین مقدار می‌باشیم. مجددا با افزایش فرکانس، ولتاژ القایی شروع به افزایش می‌نماید. دلیل این امر نزدیک‌شدن سیستم به فرکانس طبیعی در مد دوم است. البته با توجه به محدودیت‌های میز لرزه مورد استفاده، ادامه آزمایشات تا فرکانس‌های بالاتر امکان پذیر نبوده و فرکانس نوسانات تا Hz ۳ مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نکته دیگر قابل مشاهده در شکل ۶، تاثیر قدرت آهنربا بر ولتاژ القاء شده‌است بدینصورت که با افزایش قدرت آهنربا، ولتاژ القایی در سیم پیچ اطراف ظرف افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع بی بعد سیال از ۰/۲ به ۰/۲۵ شاهد افزایش ولتاژ القایی و با افزایش مجدد ارتفاع بی بعد از ۰/۲۵ به ۰/۳ تغییرات محسوسی اتفاق نمی‌افتد. برای توجیه این امر می‌توان اینگونه بیان کرد که با توجه به ثابت‌بودن وزن مجموع آهنربا و یونولیت، هر چقدر ارتفاع سیال بیشتر باشد بالطبع دارای جرم و لختی بیشتری نیز خواهد بود. به همین دلیل به ازای سایر شرایط یکسان، سیال با وزن بیشتر قادر به اعمال نیروی بیشتری به آهنربا بوده و باعث حرکت بیشتر آن درون ظرف خواهد شد. در نتیجه خطوط میدان بیشتری در این حالت قطع شده و ولتاژ بیشتری نیز در سیم پیچ القاء خواهد شد. مورد مهم دیگر، تاثیر مقاومت الکتریکی بر ولتاژ القاشده می‌باشد بدینصورت که تقریبا در تمامی حالات مورد مطالعه، با افزایش مقاومت الکتریکی، ولتاژ القاء شده افزایش می‌یابد. این یافته در تطابق با نتایج دیگر مقالات از جمله مرجع [۱۵] می باشد. با کاهش مقاومت الکتریکی، جریان الکتریکی افزایش یافته و با توجه به قانون اهم، ولتاژ القایی کاهش خواهد یافت. بیشترین ولتاژ القایی در حدود ۸۵۰ mV ثبت شده‌است.

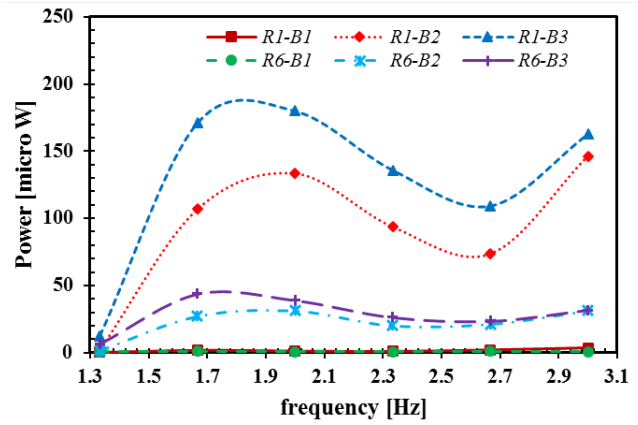
در شکل ۷، نتایج مربوط به توان الکتریکی برداشت‌شده نشان داده شده‌است. برای محاسبه توان الکتریکی از فرمول زیر استفاده شده‌است:

$$Power = \frac{V_{rms}^2}{R} \tag{۱۰}$$

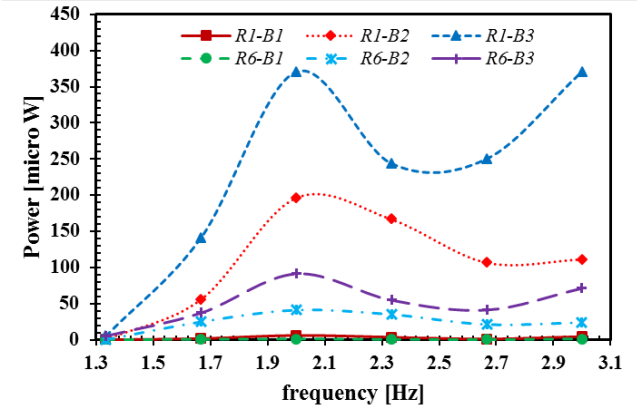
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(v(t)\right)^2 dt} \tag{۱۱}$$

که V_{rms}، R، T و v(t) به ترتیب ریشه میانگین مربعات ولتاژ، مقاومت الکتریکی، دوره تناوب و ولتاژ خروجی می‌باشند. در این شکل هم مشاهده می‌شود که بیشترین توان برداشت‌شده در هر حالت مربوط به فرکانس تشدید آن حالت بوده و ما بین فرکانس اول و دوم ابتدا کاهش و سپس افزایش توان روی می‌دهد. همچنین با افزایش قدرت آهنربا شاهد افزایش در برداشت انرژی هستیم. تاثیر ارتفاع بی‌بعد سیال در برداشت انرژی همانند تاثیر آن بر ولتاژ القایی است، بدینصورت که سیال با کمترین ارتفاع کمترین مقدار برداشت انرژی را داشته و با افزایش ارتفاع سیال شاهد افزایش توان الکتریکی برداشت‌شده خواهیم بود. نکته مهم این شکل، بالاتربودن توان برداشت‌شده با مقاومت الکتریکی کوچکتر می‌باشد که این یافته با داده‌های موجود در مقالات پیشین از جمله مراجع [۱۵و۱۷] مطابقت دارد. دلیل این امر را می توان از رابطه (۱۱) دریافت که به دلیل قرارگرفتن مقاومت الکتریکی در مخرج کسر، افزایش مقاومت الکتریکی باعث کاهش توان برداشت‌شده خواهد گردید. دلیل فیزیکی این یافته نیز بیشتربودن مقاومت الکتریکی از مقاومت خود سیم‌پیچ است که باعث کاهش توان الکتریکی می‌گردد. بنابراین اگر هدف از برداشت انرژی، ولتاژ القاء شده باشد استفاده از مقاومت بزرگتر پیشنهاد می‌شود اما برای مواردی که توان الکتریکی اهمیت بیشتری داشته باشد استفاده از مقاومت الکتریکی کوچک مفیدتر خواهد بود. بیشترین توان برداشت‌شده در در این مطالعه حدود μW ۴۰۰ بوده‌است.

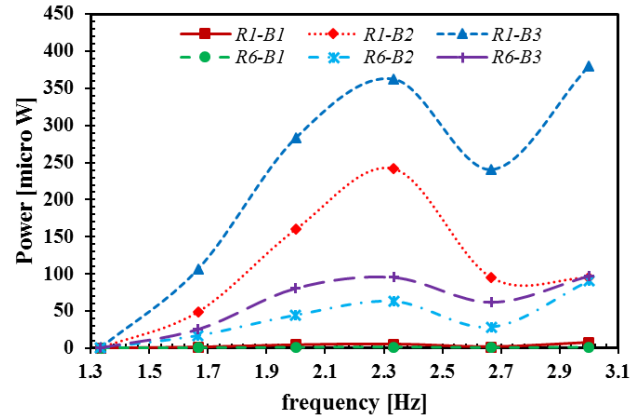
همانگونه که در قسمت مقدمه اشاره شد، روش مورد استفاده در این



الف

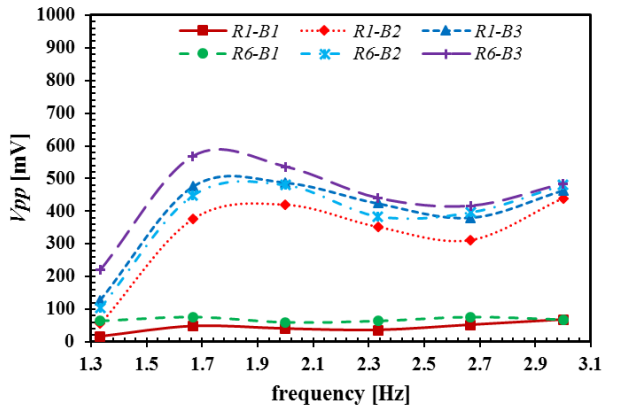


ب

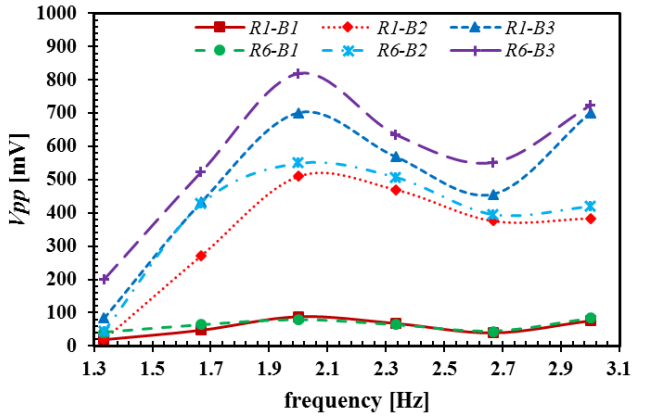


شکل ۷. توان برداشت‌شده، الف) h/L=۰/۲، ب) h/L=۰/۲۵، ج) h/L=۰/۳

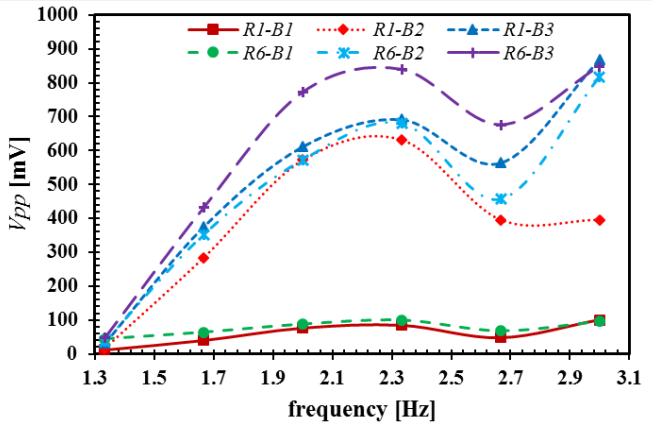
Fig. 7. Harvested electrical power: (a) h/L=0.2, (b) h/L=0.25, (c) h/L=0.3



الف



ب



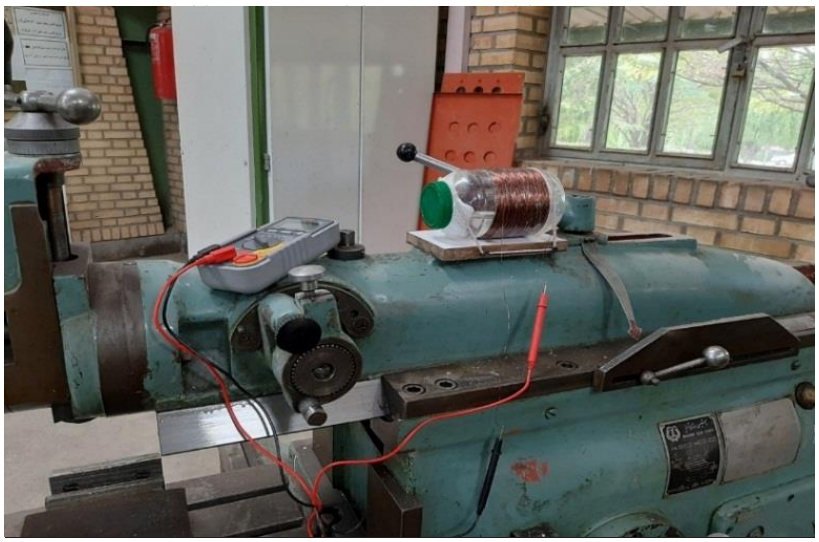
شکل ۶. ولتاژ القاءشده، الف) h/L=۰/۲، ب) h/L=۰/۲۵، ج) h/L=۰/۳

Fig. 6. Induced voltage: (a) h/L=0.2, (b) h/L=0.25, (c) h/L=0.3

جدول ۲. مقایسه بیشینه ریشه میانگین مربعات ولتاژ برداشت‌شده در مطالعه حاضر با مقالات مرجع

Table 2. Comparison of maximum root mean square of harvested voltage with reference papers

مقاله	فرکانس (Hz)	بیشنه ولتاژ برداشت‌شده (V_{rms} [mV])
مرجع ۱۷	۹	۲۰
مرجع ۱۸	۲/۱	۳/۵
مرجع ۱۹	۱/۹	۳۰
مطالعه حاضر	۲/۳	۴۸/۷



شکل ۸. دستگاه صفحه تراش و سیستم نصب‌شده روی آن

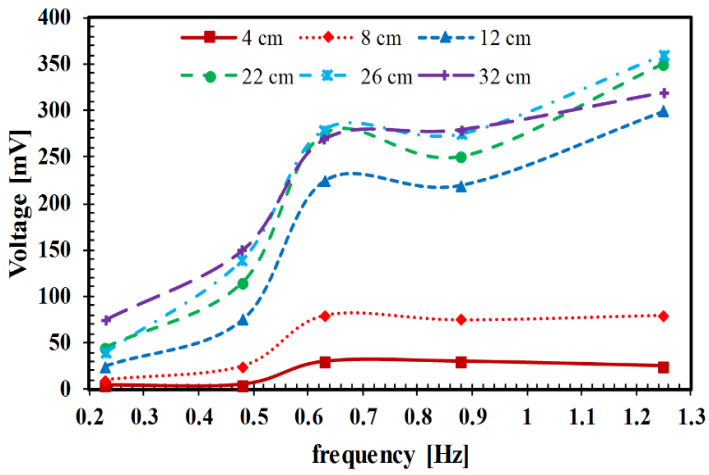
Fig. 8. Shaper machine and installed system on it

مطالعه نسبت به مطالعات قبلی که از فروسیالات استفاده کرده‌اند متفاوت است. بدینصورت که در مطالعات پیشین، فروسیال داخل ظرف پر شده و خارج از ظرف و نزدیکی آن آهنرباهای ثابتی قرار گرفته است. اما در این مطالعه آب داخل ظرف ریخته شده و آهنربا روی آن شناور گردیده‌است. با این‌حال مقایسه‌ای از عملکرد این دو سیستم در جدول ۲ آورده شده‌است.

قابل ذکر است ولتاژ برداشت‌شده به عوامل مختلفی چون فرکانس نوسان، سطح مایع مخزن، قدرت آهنربا و دیگر پارامترها بستگی دارد که به دلیل متفاوت‌بودن این پارامترها در مطالعات مختلف، نمی‌توان مقایسه دقیقی بین عملکرد آنها انجام داد. اما بررسی جدول (۲) دید کلی از محدوده عملکردی سیستم‌های مختلف مورد مطالعه در مقالات بدست می‌دهد.

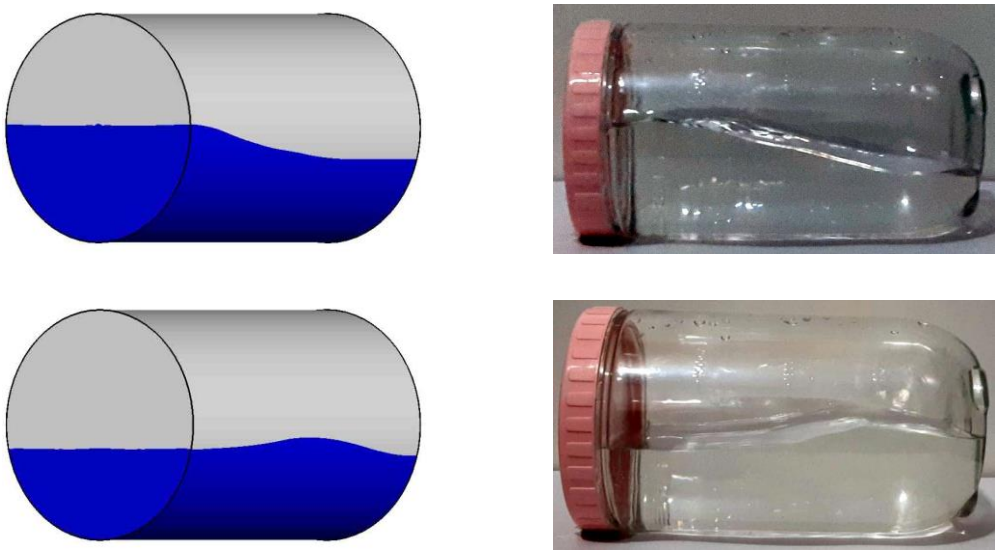
۳- ۳- کاربرد روش پیشنهادی روی دستگاه صفحه تراش

برای بررسی کارکرد روش پیشنهادی، سیستم مورد نظر روی یک دستگاه صفحه تراش نصب‌شده و در حالات مختلفِ کارکردِ این دستگاه، میزان برداشت انرژی اندازه‌گیری شده‌است. دستگاه صفحه تراش و سیستم نصب شده روی آن در شکل ۸ نشان داده شده‌است. دو متغیر اصلی این دستگاه، طول کورس و نوسان حرکت آن است. پس داده‌های تجربی برای هر یک از حالت‌های موجود استخراج شده و در شکل ۹ رسم شده‌است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی به خوبی بر روی دستگاه صفحه تراش عمل نموده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش طول کورس و همچنین نوسان حرکت صفحه تراش، ولتاژ القایی بیشتر شده‌است. بیشترین مقدار ولتاژ القایی در سیم پیچ ۳۵۰ mV است که مربوط به طول



شکل ۹. ولتاژ القایی در دستگاه صفحه تراش

Fig. 9. Induced voltage in the shaper machine



(ب) (الف)

شکل ۱۰. پروفیل سطح مایع در اثر اسلاشینگ در فرکانس ۲ هرتز: الف) مطالعه تجربی، و ب) مدلسازی عددی

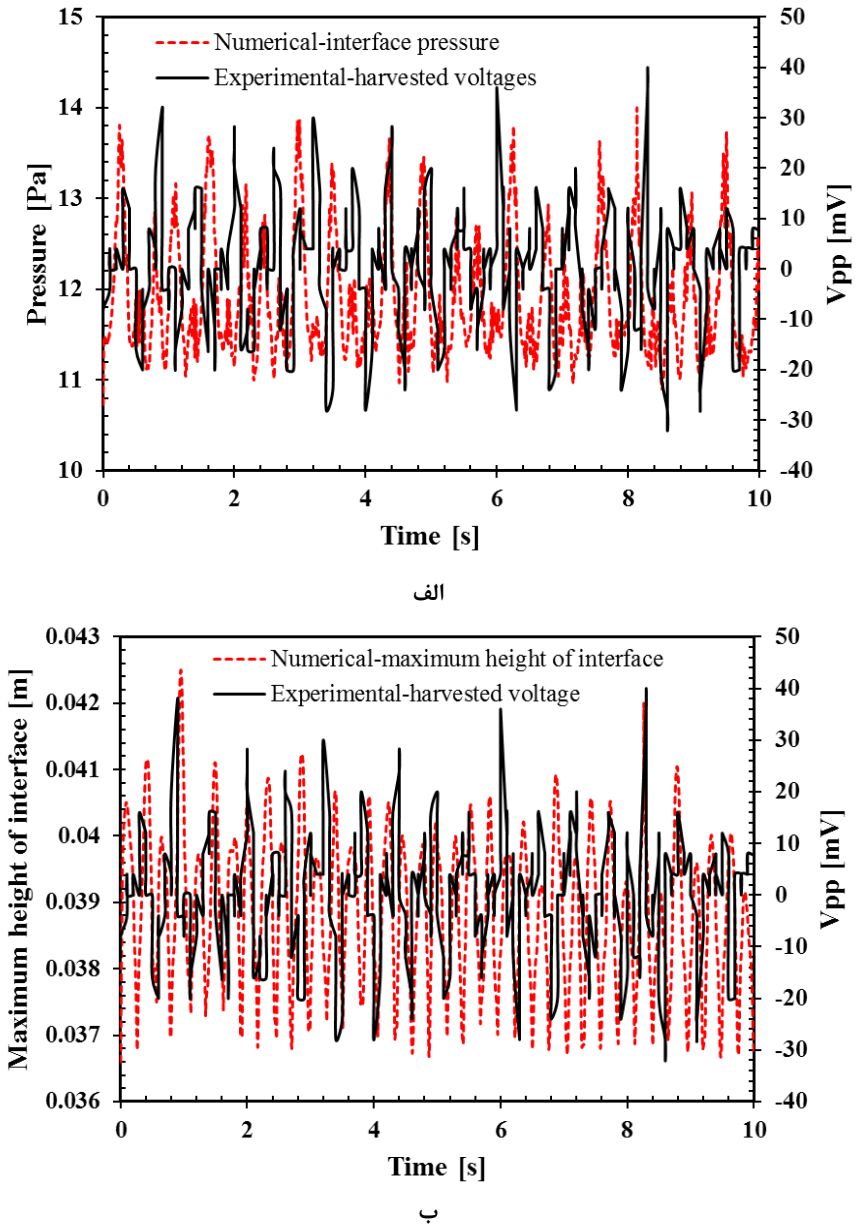
Fig. 10. Interface profile during sloshing at f=2Hz: (a) experimental study, (b) numerical modeling

کورس ۲۶ cm و فرکانس ۱/۲۵ هرتز می‌باشد.

۳- ۴- بخش عددی

برای بررسی دقت روش عددی بکاررفته، مقایسه‌ای بین یافته‌های آزمایشگاهی و نتایج مدلسازی انجام شده‌است. برای این منظور، پروفیل حرکت مایع در دو حالت ذکرشده مقایسه گردیده و در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که مدل عددی، به خوبی تغییرات پروفیل مایع در اثر اسلاشینگ را محاسبه نموده‌است.

همانگونه که در بخش قبل گفته شد، برداشت انرژی در سیستم پیشنهادی، به خاطر نوسانات مرز مشترک بین دو سیال و حرکات آهنربا نسبت به سیم پیچ اطراف ظرف است که در نهایت با توجه به قانون القاء فارادی باعث القاء ولتاژ در سیم پیچ می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود پارامترهای مربوط به مرز



شکل ۱۱. مقایسه نتایج مدلسازی عددی و ولتاژ برداشتی با زمان در فرکانس ۲ هرتز و h/L=۰/۲۵ با R1 و B1: الف) فشار مرز مشترک، و ب) ارتفاع بیشینه مرز مشترک

Fig. 11. Comparison of numerical results and harvested voltage variations with time at f=2Hz and h/L=0.25 with R1 and B1: (a) interface pressure, (b) maximum height of the interface

مشترک و تغییرات آنها نسبت به زمان، پیش‌بینی‌کننده مشاهدات تجربی باشند. بدین منظور و برای بررسی کارایی مدل عددی بکاررفته در این مطالعه، تغییرات فشار و ارتفاع مرز مشترک حاصل از روش عددی و ولتاژ برداشت‌شده آزمایشگاهی با زمان انجام گردیده و در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که شباهت کیفی بسیار زیادی بین نمودارهای عددی و داده‌های تجربی وجود دارد. بدین صورت که نوسانات هر دو پارامتر حاصل از روش عددی تقریبا مشابه نوسانات ولتاژ برداشتی بوده و قله و دره‌های آنها تقریبا در زمان‌های یکسانی اتفاق افتاده‌اند. در نتیجه می‌توان از تغییرات نمودار فشار و ارتفاع سطح مشترک، برآورد اولیه‌ای از میزان برداشت انرژی احتمالی بدست آورد. مقدار دقیق ولتاژ القایی در سیم پیچ به عوامل دیگری از جمله قدرت آهنربا و مقاومت الکتریکی استفاده‌شده در مدار بستگی دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه روشی جهت برداشت انرژی از ارتعاشات مکانیکی و تبدیل آن به جریان و ولتاژ الکتریکی پیشنهاد شده‌است. ظرفی حاوی سیال، سیم پیچی گردیده و آهنربایی درون آن شناور گردیده‌است. با حرکت نوسانی ایجادشده توسط میز لرزه، پدیده اسلاشینگ درون سیال اتفاق افتاده و آهنربا درون ظرف حرکت کرده‌است. بدلیل حرکت نسبی بین آهنربا و سیم پیچ و در نتیجه قطع خطوط میدان مغناطیسی، جریان و ولتاژی در سیم پیچ القاء گردیده‌است. ولتاژ و توان برداشت‌شده به ازای پارامترهای مختلف از قبیل فرکانس نوسان، قدرت آهنربا، ارتفاع سیال و مقدار مقاومت االکتریکی محاسبه و نتایج زیر بدست آمده‌است.

- بیشترین ولتاژ القایی و توان برداشت‌شده در این مطالعه به ترتیب ۸۵۰ mV و ۴۰۰ μW ثبت شده‌است.
- با افزایش فرکانس نوسانات، ولتاژ و توان برداشتی افزایش یافته و در فرکانسی موسوم به فرکانس طبیعی سازه و ظرف داده‌های ثبت‌شده بیشترین مقدار را دارند. فرکانس طبیعی مجموعه سازه و ظرف در نسبت‌های ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ برای h/L به ترتیب در حدود ۱/۷۵، ۲ و ۲/۳ هرتز می‌باشد. با افزایش فرکانس و دورشدن از حالت تشدید در مد اول، اسلاشینگ سیال کاهش یافته و در نتیجه مقادیر برداشت‌شده نیز کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر فرکانس و نزدیک‌شدن به فرکانس طبیعی دوم سیستم و سازه، مجددا تلاطم سیال درون ظرف افزایش یافته که منجر به افزایش برداشت انرژی گردیده‌است.
- با افزایش ارتفاع سیال درون ظرف برداشت انرژی نیز بیشتر شده‌است. دلیل این موضوع می تواند افزایش لختی به علت افزایش جرم سیال درون ظرف و در نتیجه افزایش جابجایی آهنربا روی سطح سیال باشد. همچنین همانگونه که انتظار می‌رود افزایش قدرت آهنربا منجر به افزایش برداشت انرژی شده‌است.
- ولتاژ القایی برای مقاومت قوی‌تر بیشتر بوده و در توان الکتریکی برداشت‌شده عکس این موضوع روی می‌دهد. این یافته در تطابق با یافته‌های مقالات پیشین از جمله مراجع [۱۵و۱۷] است. دلیل این پدیده، کاهش ولتاژ در مقاومت‌های کمتر به دلیل افزایش جریان الکتریکی است.
- سیستم پیشنهادی در دستگاه صفحه تراش استفاده شده و بیشترین مقدار ولتاژ القایی در سیم پیچ ۳۵۰ mV ثبت گردید که مربوط به طول کورس ۲۶ cm و فرکانس ۱/۲۵ هرتز می باشد. لذا این سیستم در دستگاه صفحه تراش عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده‌است، بطوریکه این میزان ولتاژ برداشت‌شده قادر به استفاده در سنسورهای بیسیم جهت کنترل دقیق عملکرد این دستگاه می‌باشد.
- با توجه به اینکه عامل اصلی برداشت انرژی در سیستم مورد بررسی، حرکات مرز مشترک دو سیال به دلیل اسلاشینگ است بنابراین با مدلسازی عددی می‌توان به طراحی و تحلیل عملکرد آن پرداخت. برای این منظور از فشار سطح مشترک و ارتفاع ماکزیمم آن استفاده شده و تطابق خوبی با داده‌های تجربی مشاهده گردید. بدینصورت که وقوع نوسانات شدید در فشار و یا ارتفاع سطح آزاد، تقریبا همزمان با القاء بیشترین ولتاژها می‌باشد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	دامنه نوسان، m
B	قدرت میدان مغناطیسی، G
D	قطر ظرف، m
$\boldsymbol{F}$	نیرو در واحد حجم، N/m^3
f	فرکانس، Hz
g	شتاب جاذبه، m/s^2
h	ارتفاع سیال، m
L	طول ظرف، m
m	انتقال جرم،
p	فشار، Pa
R	مقاومت الکتریکی، Ω
T	دوره زمانی، s
t	زمان، s
$\boldsymbol{U}$	سرعت، m/s
v	ولتاژ، V
V_{rms}	ریشه میانگین مربعات ولتاژ، V^2

علائم یونانی

α	کسر حجمی
ρ	چگالی، kg/m^3

زیرنویس

l	مایع
g	گاز

منابع

[1] I. Sari, T. Balkan, H. Kulah, An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations, Sensors and Actuators A: Physical, 145-146 (2008) 405-413.

[2] P. Glynne-Jones, M.J. Tudor, S.P. Beeby, N.M. White, An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems, Sensors and Actuators A: Physical, 110(1) (2004) 344-349.

[3] S.P. Beeby, M.J. Tudor, N.M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, Measurement Science and Technology, 17(12) (2006) R175-R195.

[4] A. Kansal, M. B. Srivastava, Distributed Energy Harvesting for Energy Neutral Sensor Networks, UCLA: Center for Embedded Network Sensing, (2005) https://escholarship.org/uc/item/96j1w5jc.

[5] D. Zhu, S. Roberts, M.J. Tudor, S.P. Beeby, Design and experimental characterization of a tunable vibration-based electromagnetic micro-generator, Sensors and Actuators A: Physical, 158(2) (2010) 284-293.

[6] M. El-hami, P. Glynne-Jones, N.M. White, M. Hill, S. Beeby, E. James, A.D. Brown, J.N. Ross, Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator, Sensors and Actuators A: Physical, 92(1) (2001) 335-342.

[7] A. Munaz, B.-C. Lee, G.-S. Chung, A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet, Sensors and Actuators A: Physical, 201 (2013) 134-140.

[8] D.W. Oh, D.Y. Sohn, D.G. Byun, Y.S. Kim, Analysis of electromotive force characteristics and device implementation for ferrofluid based energy harvesting system, in: 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014, pp. 2033-2038.

[9] C. Sravanthi, J.M. Conrad, A survey of energy harvesting sources for embedded systems, in: IEEE SoutheastCon 2008, 2008, pp. 442-447.

[10] M.P. Soares dos Santos, J.A.F. Ferreira, J.A.O. Simões, R. Pascoal, J. Torrão, X. Xue, E.P. Furlani, Magnetic levitation-based electromagnetic energy harvesting: a semi-analytical non-linear model for energy transduction, Scientific Reports, 6(1) (2016) 18579.

[11] Z. Li, Z. Yan, J. Luo, Z. Yang, Performance comparison of electromagnetic energy harvesters based on magnet arrays of alternating polarity and configuration, Energy Conversion and Management, 179 (2019) 132-140.

[12] M.A. Halim, H. Cho, M. Salauddin, J.Y. Park, A miniaturized electromagnetic vibration energy harvester using flux-guided magnet stacks for human-body-induced motion, Sensors and Actuators A: Physical, 249 (2016) 23-31.

[13] R.M. Toyabur, M. Salauddin, H. Cho, J.Y. Park, A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric-electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations, Energy Conversion and Management, 168 (2018) 454-466.

[14] X. Liu, J. Qiu, H. Chen, X. Xu, Y. Wen, P. Li, Design and Optimization of an Electromagnetic Vibration Energy Harvester Using Dual Halbach Arrays, IEEE Transactions on Magnetics, 51(11) (2015) 1-4.

[15] J.G. Monroe, O.T. Ibrahim, S.M. Thompson, N. Shamsaei, Energy harvesting via fluidic agitation of a magnet within an oscillating heat pipe, Applied Thermal Engineering, 129 (2018) 884-892.

[16] J.L. Neuringer, R.E. Rosensweig, Ferrohydrodynamics, The Physics of Fluids, 7(12) (1964) 1927-1937.

[17] A. Bibo, R. Masana, A. King, G. Li, M.F. Daqaq, Electromagnetic ferrofluid-based energy harvester, Physics Letters A, 376(32) (2012) 2163-2166.

[18] S. Alazmi, Y. Xu, M.F. Daqaq, Harvesting energy from the sloshing motion of ferrofluids in an externally excited container: Analytical modeling and experimental validation, Physics of Fluids, 28(7) (2016) 077101.

[19] Q. Liu, S.F. Alazemi, M.F. Daqaq, G. Li, A ferrofluid based energy harvester: Computational modeling, analysis, and experimental validation, Journal of

Magnetism and Magnetic Materials, 449 (2018) 105-118.

[20] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics, 39(1) (1981) 201-225.

[21] P.-j. Ming, W.-y. Duan, Numerical Simulation of Sloshing in Rectangular Tank with VOF Based on Unstructured Grids, Journal of Hydrodynamics, 22(6) (2010) 856-864.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Maroofiazar, M. Fahimi Farzam, N. Pashaei, Experimental and numerical study of energy harvesting from sloshing of a liquid and its performance on shaper machine, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 3911-3924.

DOI: 10.22060/mej.2021.19169.6967