

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(8) (2021) 1091-1094 DOI: 10.22060/mej.2021.18200.6780



M. Fallah<sup>1\*</sup>, V. Arab Maleki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran <sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT: In this paper, the energy harvesting by porous beams exposed to the external fluid flow

is studied. The electromechanical nonlinear differential equations of the transverse vibration behavior

of porous beams exposed to external fluid flow are derived using the Euler-Bernoulli beam theory. A

porous beam with concentrated mass which is equipped with a piezoelectric layer at its upper surface is

considered energy harvesting. After numerically solving the governing nonlinear equations, the effect of different parameters on the generated energy is investigated. The results show that in the lock-in area, the maximum amount of energy is taken. Also, the porosity distribution has a significant effect

on the maximum amplitude of the oscillations as well as the energy harvesting by the porous beam.

In addition, for electrical resistance of 1000 k $\Omega$ , the maximum voltage generated for the beam with

symmetrical porosity distribution in the form of wall stiffness, asymmetric porosity distribution, and

uniform porosity distribution is equal to 0.39 V, 0.44 V, and 57 V, respectively, which indicates the

highest energy harvesting capability of the beam with the porosity distribution of the third type.

**Review History:** 

Received: Apr. 10, 2020 Revised: May. 24, 2021 Accepted: Jun. 19, 2021 Available Online: Jul. 16, 2021

Keywords: Energy harvesting Porous beam Fluid induced vibrations

Lock-in region

#### **1-INTRODUCTION**

Defects in mechanical structures are one of the main reasons for the error in the mathematical modeling of mechanical systems. Porosity [1-3] is one of the most common defects in these structures. Avoiding porosity in parts made in the additive manufacturing process by metal 3D printers, which have also recently developed extensively, is inevitable [4-6]. Accordingly, considering these defects in the mathematical modeling of mechanical structures, especially beams, can increase the accuracy of modeling and achieve results consistent with experimental data.

Extensive research has been done on the production of electrical energy from the forced vibrations of the beam [7]. Li et al. [8] studied the energy harvesting capability of the bridge using the finite element method. Dai et al. [9] investigated energy harvesting by fluid-induced vibrations flow and the base excitation. Radgelchin and Moeenfard [10] investigated the electrical energy harvesting from a beam under basic excitation. Qi [11] analytically studied the energy harvesting from a functionally graded beam.

In this paper, using Euler-Bernoulli beam theory and considering the interaction of structure and fluid the coupling nonlinear differential equations of the motion governing the induced vibration behavior of porous beam fluid with piezoelectric layers as energy harvesting are extracted. The nonlinear equations are discretized using the Galerkin method, and finally, by numerically solving the discretized equations, the effect of different parameters on the vibration characteristics and energy harvesting of these beams is investigated.

#### 2- EQUATIONS OF MOTION

As shown in Fig. 1, the beam is a porous beam with a rectangular cross-section and a piezoelectric layer of PZT 5A is used on the upper surface of the beam as energy harvesting layers.

Three different porosity distributions are considered in terms of beam thickness. Continuous changes in Young's modulus (*E*), shear modulus (*G*), density ( $\rho$ ), and Poisson's ratio (v) can be obtained using the following equations [12]:

$$E(z) = E_{\max} \left( 1 - e_0 q(z) \right) \tag{1}$$

$$i(z) = 0.221\tilde{p} + i_{\max}(0.342\tilde{p}^2 - 1.21\tilde{p} + 1)$$
(2)

$$\tilde{n}(z) = \tilde{n}_{\max} \left( 1 - e_0 q(z) \right) \tag{3}$$

where q(z) represents the porosity distribution function in the direction of the beam thickness.  $e_0$  is the porosity coefficient of the beam is between zero and one.

Using dimensionless variables, the nonlinear equations governing the fluid-induced vibration behavior of the porous beam as an energy harvesting system in terms of dimensionless variables are obtained as follows:

\*Corresponding author's email: mfallah@azaruniv.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. Configuration of piezoelectric energy harvesting with the core made of porous material



Fig. 2. The maximum amplitude of oscillations of the midpoint of a porous beam in terms of external fluid flow velocity

$$-\alpha_{4} \frac{\partial^{4} \hat{w}}{\partial \hat{x}^{4}} - \alpha_{5} \frac{\partial}{\partial \hat{x}} \left( \frac{\partial^{2} \hat{w}}{\partial \hat{x}^{2}} \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{x}} \right) - \alpha_{1} \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{x}} \left( \frac{\partial^{2} \hat{w}}{\partial \hat{x}^{2}} \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{x}} \right)$$
$$+ \hat{\vartheta} \frac{\partial^{2}}{\partial \hat{x}^{2}} \left( V(t) \left[ H(\hat{x}) - H(\hat{x} - 1) \right] \right) - \left( 1 + \beta \delta(\hat{x} - 1) \right) \frac{\partial^{2} \hat{w}}{\partial \tau^{2}}$$
(4)
$$+ \alpha_{6} \frac{\partial^{4} \hat{w}}{\partial \tau^{2} \partial \hat{x}^{2}} = c_{L} \hat{U}^{2} \overline{q} - c_{D} \hat{U} \frac{\partial \hat{w}}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial^2 \overline{q}(\hat{x},\tau)}{\partial \tau^2} + \delta \Omega_{0s} u \Big[ \overline{q}(\hat{x},\tau)^2 - 1 \Big] \frac{\partial \overline{q}(\hat{x},\tau)}{\partial \tau} + \Omega_{0s}^2 u^2 \overline{q}(\hat{x},t) = T \frac{\partial^2 \hat{w}(\hat{x},\tau)}{\partial \tau^2}$$
(5)

$$V(\tau) - \alpha_9 \frac{dV(\tau)}{d\tau} = -\int_0^1 \left( \alpha_7 \frac{\partial^3 \hat{w}}{\partial \tau \partial \hat{x}^2} + \alpha_8 \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial \tau \partial \hat{x}} \frac{\partial \hat{w}}{\partial \hat{x}} \right) d\hat{x}$$
(6)

According to the Galerkin method, the hypothetical solution of the differential equation is considered as follows:

$$w(x,\tau) = \sum_{n=1}^{N} \varphi_n(x) y_n(\tau), \quad \overline{q}(x,\tau) = \sum_{n=1}^{N} \varphi_n(x) \chi_n(\tau)$$
(7)

By substituting Eq. (7) in Eqs. (5) and (6), the system of nonlinear differential equations with ordinary derivatives with unknown 2N is obtained, which must be numerically solved in order to calculate the unknown parameters including beam transverse deflection, instantaneous oscillation coefficient, and generated voltage. By solving these equations using the Rangokota method, in the next section, the effect of different parameters is studied.

### **3- RESULTS AND DISCUSSION**

As can be seen from the results shown in Fig. 2, the amplitude of steady-state vibrations for the lock-in zone is greater than for the other regions. In addition, the results show that the porosity distribution has a significant effect on the lock-in area as well as the maximum amplitude of the porous beam oscillations. The maximum vibration amplitude for the third type distribution of porosity occurs in the velocity of u=0.015, the value of which is equal to 0.27. Also, the lock-in area for the beam with two other types of porosity distributions is created in this speed range, but the maximum amplitude created is different and for the first and second type distributions is equal to 0.22 and 0.13, respectively.

Figs. 3 and 4 show the voltage generated by the porous beam for three different porosity distributions. At low fluid velocities, the output voltage, which is directly related to the system response, is oscillating with a constant amplitude. At the velocity of u=0.5, it causes different behavior in the time response of the porous beams. In this case, the beating phenomenon occurs in response. At this speed, the maximum voltage generated by the piezoelectric layers in the steadystate for the first type porosity distributions, second and third types is 2.38V, 2.52 V, and 2.87 V, respectively, which



Fig. 4. Time response of porous beam for different fluid flow velocities *u*=0.5

indicates the high energy production capability in the use of porosity beams with uniform porosity distribution (third type).

Table 1 provides a comparison between the maximum voltage obtained by the presented porous biomorphic beam in the present study and some of the models presented in the previous research. According to the results shown in this table, it can be seen that the use of porous beams has a very good ability in energy production and can replace similar existing systems.

#### **4- CONCLUSION**

In the present study, the effect of energy harvesting from porous beams exposed to external fluid flow was analyzed. A summary of the important results of the present study is:

- The porosity distribution has a significant effect on the time response as well as the maximum amplitude of the porous beams oscillations and affects the energy harvesting of this type of beam.

- The results show that the porosity distribution does not have a significant effect on the lock-in area, but the maximum

 Table 1. Comparison between the maximum voltages of porous

 beams presented in the present study with some of the models

 presented in previous research

	Present	Ref.	Ref.	Ref.
	work	[13]	[14]	[15]
Max. Voltage (V)	0.57	1.07	0.05	0.02



Fig. 3. Time response of porous beam for different fluid flow velocities u=0.015

amplitude of porous beam oscillations is strongly affected.

- The amount of energy that can be extracted in lock-in areas is much higher than in other areas, which is due to the existence of high dynamic strains in these areas.

- The results show that the maximum voltage of the porous beam is about 1.6 times higher than the corresponding beam without porosity. Based on this, it can be concluded that the use of porous beams significantly increases the ability of energy harvesting due to fluid-induced vibrations, which is due to the high flexibility of porous beams.

#### REFERENCES

- R. Thomson, J. Hancock, Stress and strain fields near a contained porous imperfection in a plastically deforming matrix, Res mechanica, 16(2) (1985) 135-146.
- [2] K. Xie, Y. Wang, H. Niu, H. Chen, Large-amplitude nonlinear free vibrations of functionally graded plates with porous imperfection: A novel approach based on energy balance method, Composite Structures, 246 (2020) 345-367.
- [3] R. Kumhar, S. Kundu, M. Maity, S. Gupta, Analysis of interfacial imperfections and electro-mechanical properties on elastic waves in porous piezo-composite bars, International Journal of Mechanical Sciences, 187 (2020) 105-126.
- [4] R. Fu, S. Tang, J. Lu, Y. Cui, Z. Li, H. Zhang, T. Xu, Z. Chen, C. Liu, Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate, Materials & Design, 199 (2021) 34-51.
- [5] A. Sola, A. Nouri, Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion, Journal of Advanced Manufacturing and Processing, 1(3) (2019) 87-95.

- [6] D. Basu, Z. Wu, J.L. Meyer, E. Larson, R. Kuo, A. Rollett, Entrapped Gas and Process Parameter-Induced Porosity Formation in Additively Manufactured 17-4 PH Stainless Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 56 (2021) 1-8.
- [7] H. Farokhi, A. Gholipour, M.H. Ghayesh, Efficient Broadband Vibration Energy Harvesting Using Multiple Piezoelectric Bimorphs, Journal of Applied Mechanics, 87(4) (2020) 45-56.
- [8] A. Li, W. Zhao, S. Zhou, L. Wang, L. Zhang, Enhanced energy harvesting of cantilevered flexoelectric microbeam by proof mass, AIP Advances, 9(11) (2019) 115305.
- [9] H. Dai, A. Abdelkefi, L. Wang, Piezoelectric energy harvesting from concurrent vortex-induced vibrations and base excitations, Nonlinear Dynamics, 77(3) (2014) 967-981.
- [10] M. Radgolchin, H. Moeenfard, Size-dependent piezoelectric energy-harvesting analysis of micro/nano bridges subjected to random ambient excitations, Smart Materials and Structures, 27(2) (2018) 12-24.

- [11] ]L. Qi, Energy harvesting properties of the functionally graded flexoelectric microbeam energy harvesters, Energy, 171 (2019) 721-730.
- [12] M.L. Facchinetti, E. De Langre, F. Biolley, Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations, Journal of Fluids and structures, 19(2) (2004) 123-140.
- [13] F. Cottone, L. Gammaitoni, H. Vocca, M. Ferrari, V. Ferrari, Piezoelectric buckled beams for random vibration energy harvesting, Smart materials and structures, 21(3) (2012) 34-54.
- [14] A. Mehmood, A. Abdelkefi, M. Hajj, A. Nayfeh, I. Akhtar, A. Nuhait, Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations of circular cylinder, Journal of Sound and Vibration, 332(19) (2013) 4656-4667.
- [15] A. Khatami, Response regime of nonlinear bistable energy harvester, Modares Mechanical Engineering, 18(5) (2018) 57-65.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Fallah, V. Arab Maleki, Piezoelectric Energy Harvesting Using a Porous Beam Under Fluid-Induced Vibrations, Amirkabir J. Mech Eng., 53(8) (2021) 1091-1094.

DOI: 10.22060/mej.2021.18200.6780



نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۸، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۶۳۳ تا ۴۶۴۸ DOI: 10.22060/mej.2021.18200.6780

# برداشت انرژی با استفاده از تیر بایمورف متخلخل با لایه پیزوالکتریک تحت ارتعاشات القایی ناشی از جریان سیال خارجی

محسن فلاح\*'، وحيد عربملكي

<sup>۱-</sup> دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران <sup>۲-</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۲ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹ ارائه آنلاین:۱۴۰۰/۰۴/۲۵

کلمات کلیدی: برداشت انرژی تیر بایمورف متخلخل ارتعاشات القائی ناشی از سیال ناحیه قفلشدگی. 

### ۱ – مقدمه

وجود عیوب در سازههای مکانیکی یکی از دلایل اصلی در خطای موجود در مدلسازیهای ریاضی سیستمهای مکانیکی میباشند. تخلخل [۳-۱] از رایجترین عیوب موجود در ساختارها میباشد. جلوگیری از ایجاد تخلخل در قطعات ساخته شده در فرآیند ساخت افزایشی<sup>۱</sup> توسط پرینترهای سهبعدی فلزات که اخیر توسعه زیادی نیز پیدا کرده است اجتنابپذیر میباشد [۱۵–۱۳]. بر این اساس، در نظر گرفتن این عیوب در مدشلسازی ریاضی سازههای مکانیکی به خصوص تیرها میتواند باعث افزایش دقت مدلسازی و دستیابی به نتایج منطبق بر دادههای تجربی بشود.

\* نویسنده عهدهدار مکاتبات:mfallah@azaruniv.ac.ir

انرژی در تجهیزات الکترونیکی کم مصرف نظیر سیستمهای میکروالکترومکانیکی، حسگرها، سامانههای بی سیم و فضاپیماها مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. برداشت انرژی به مفهوم به کارگیری انرژی اتلافی محیط به عنوان منبعی برای توان الکتریکی است که عموماً از انرژیهای ارتعاشی [۱۶]، صوتی [۱۹–۱۷] و حرارتی [۲۲–۲۲] موجود در محیط برای این منظور استفاده می گردد. هدف از برداشت انرژی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین توان الکتریکی لوازم با توان مصرفی پایین، مانند سنسورهای بی سیم، اطلاعات، ایمپلنتهای پزشکی و برخی از دوربینها می باشد. به طور معمول دسترسی به این لوازم سخت بوده و یا امکان استفاده از باتری

در سالهای اخیر با گسترش تکنولوژی و نیاز به تأمین

کو ی کی حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کا کو ی ک



شکل ۱. پیکربندی برداشت کننده انرژی پیزوالکتریکی با هسته ساخته شده از مواد متخلخل Fig. 1. Configuration of piezoelectric energy harvesting with core made of porous material





تحقیقات گستردهای صورت گرفته است [۲۸–۲۶]. ژانگ و همکاران [۲۹] با استفاده از روش المان محدود به مطالعه قابلیت برداشت انرژی از پل پرداختند و اثر عوامل مختلف در برداشت انرژی از جمله محل قرارگیری لایههای پیزوالکتریک را مورد مطالعه قرار دادند. دای و همکاران [۳۰] با در نظر گرفتن یک تیر یکسرگیردار استوانهای دارای جرم متمرکز در انتهای آن به بررسی استحصال انرژی ناشی از ارتعاشات القائی ناشی از جریان سیال و تحریک پایه پرداختند. رادگلچین و همکاران [۳۱] در مطالعه خود به بررسی برداشت انرژی پرداختند. لی و همکاران [۳۲] با استفاده از تئوری تیر اویلر-برنولی به بررسی قابلیت جذب انرژی در میکروتیر یکسرگیردار با جرم متمرکز در انتهای پرداختند. آنها با در نظر گرفتن یک شکل مود ارتعاشی، برای مدت زمان طولانی کار کرد، امکان پذیر نمی باشد. در میان منابع مختلف انرژی، ارتعاشات مکانیکی به دلیل رخداد آن در بسیاری از سازههای مکانیکی، کاربرد بسیاری پیداکرده است. از میان منابع یاد شده استفاده از منابع ارتعاشات مکانیکی آسان تر و در دسترس تر است و یکی از منابع شناخته شده آن ارتعاشات ناشی از جریان است. در این نوع از ارتعاشات جسمی که در برابر جریان سیال قرار می گیرد، در جهت عمود بر حرکت سیال می تواند ارتعاش کند. ارتعاشات ناشی از گردابه <sup>۱</sup>، فلاتر و گلوپینگ<sup>۲</sup> به عنوان سه مکانیزم اصلی ارتعاشات ناشی از جریان محسوب می شوند [۲۵–۲۳]. در زمینه

<sup>1</sup> Vortex Induced Vibration (VIV)

<sup>2</sup> Galloping

پاسخ کوپل الکترومکانیکی حالت پایا را تحت تحریک هارمونیک استخراج کردند. زمانیان و همکاران [۳۳] به مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی تیر یونی مورف با تحریک هارمونیک پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان میدهد که استفاده از شکل مودهای گسسته برای تیرهای دارای لایه پیزوالکتریک از همگرایی بالایی برخوردار بوده و هزینه محاسباتی را به شدت کاهش میدهد. ارتورک و همکاران [۴۳] با استفاده از تئوری تیر اویلر-برنولی به ارائه رابطه صریحی برای پاسخ دینامیکی، ولتاژ تولید شده، جریان و توان برداشت شده توسط لایههای پیزوالکتریک پرداختند. در یکی از جدیدترین تحقیقات انجام شده در این زمینه، گیو [۳۵] جذب انرژی از تیر یکسرگیردار مدرج که با افزایش ضریب گردایان کرنش الاستیک، فرکانس طبیعی سیستم افزایش مییابد در صورتی که حداکثر توان قابل برداشت

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه برداشت انرژی نشان می دهد که هر چند مطالعات بسیار زیادی در این زمینه صورت پذیرفته است، ولی تاکنون تأثیر عیوب هندسی تخلخل ناشی از فرآیند ساخت بر قابلیت برداشت انرژی از تیرها مطالعه نشده است. برای تیرهای متخلخل، توزیع تخلخل می تواند تأثیر قابل ملاحظهای بر میزان انرژی تولید شده داشته باشد که این هدف در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. بر این اساس، در این تحقیق با استفاده از تئوری تیر اویلر-برنولی و در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال به استخراج معادلات دیفرانسیل غیرخطی کوپل حرکت حاکم بر رفتار ارتعاشات عنوان تولید کننده انرژی، پرداخته می شود. معادلات غیرخطی کوپل با استفاده از روش گالرکین گسستهسازی شده و در نهایت با حل عددی معادلات گسستهسازی شده، تأثیر پارامترهای مختلف مانند ارتعاشی و برداشت انرژی این تیرها پرداخته می شود. معادلات میرخطی کوپل القائی ناشی از سیال خارجی و نحوه توزیع تخلخل بر مشخصههای

## ۲- معادلات حرکت

تیر بایمورف تحت بررسی به صورت تیر متخلخل با سطح مقطع مستطیلی بوده و از یک لایه پیزوالکتریک PZT ۵A در سطح بالایی تیر به عنوان لایههای برداشت کننده انرژی استفاده شده است. مدل

مذکور از طریق الکترودهایی به یک مدار ساده متصل شده که فقط شامل یک مقاومت الکتریکی به عنوان مصرف کننده توان است. فرض شده است که الکترودها تمام سطح لایه پیزوالکتریک را پوشانده و لایه پیزوالکتریک به طور کامل به سطح تیر چسبیده باشد. در شکل ۱ شماتیکی از تیر متخلخل یکسرگیردار واقع در معرض جریان سیال خارجی به منظور تولید انرژی نشان داده شده است. برای یک ماده متخلخل، روابط مختلفی به منظور بیان نحوه توزیع تخلخل در راستای ضخامت ماده ارائه شده است. در این تحقیق، مطابق شکل ۲ سه نوع توزیع تخلخل در سطح تیر در نظر گرفته شده است که عبارتاند از [۳۶]:

- نوع ۱ توزیع تخلخل متقارن به صورت سختشوندگی در جداره، - نوع ۲ توزیع تخلخل نامتقارن - نوع ۳ توزیع تخلخل یکنواخت.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سه توزیع مختلف تخلخل در راستای ضخامت پوسته در نظر گرفته میشود. تغییرات پیوسته مدول یانگ (E)، مدول برشی (G)، چگالی (q) و نسبت پواسون ( ۷) را میتوان با استفاده از روابط زیر به دست آورد [۳۶]:

$$E(z) = E_{\max} \left( 1 - e_0 q(z) \right) \tag{1}$$

$$i(z) = 0.221\tilde{p} + i_{\max}(0.342\tilde{p}^2 - 1.21\tilde{p} + 1)$$
 (7)

$$\tilde{n}(z) = \tilde{n}_{\max} \left( 1 - e_0 q(z) \right) \tag{7}$$

که در آن تابع q(z) نشان دهنده تابع توزیع تخلخل در راستای ضخامت صفحه میباشد. eضریب تخلخل پوسته میباشد و مقدار آن بین صفر و یک است. افزایش ضریب تخلخل به معنای افزایش حجم حفرات نسبت به فضای کل ماده متخلخل است و افزایش حجم حفرات نسبت به فضای کل ماده متخلخل است و در اکتر مقدار مدول یانگ تیر متخلخل در راستای ضخامت میباشد. حداکثر مقدار مدول یانگ تیر متخلخل در راستای ضخامت میباشد. حداکثر مقدار موال یانگ تیر متخلخل در منده حداکثر چگالی و نسبت پواسون مربع وره و مقدار  $\tilde{r}$  مدر رابطه (۲) برای ماده متخلخل سلول بسته برابر بوده و مقدار  $\tilde{p}$  در رابطه (۲) برای ماده متخلخل سلول بسته برابر

تیر برابر h باشد، در این صورت تابع توزیع تخلخل برای سه حالت  $\tilde{p} = 1/T \cdot (1 - r\sqrt{t}) - e.q(z)$  بشان داده شده در شکل ۲ به ترتیب از روابط زیر به دست می آید:

**نوع ۱:** توزیع تخلخل متقارن (سختشوندگی در جداره)

$$q(z) = \cos\left(\frac{\delta z}{h}\right) \tag{(f)}$$

**نوع ۲:** توزیع تخلخل نامتقارن

$$q(z) = \cos\left(\frac{\delta z}{2h} + \frac{\delta}{4}\right) \tag{(a)}$$

نوع ۳: توزيع تخلخل يكنواخت

$$q(z) = q_0 \tag{(5)}$$

# ۲-۱- نیروی وارد از طرف جریان سیال بر تیر

ارتعاشات ناشی از گردابه به حرکت اجسامی اطلاق میشود که در اثر وجود گردابه در جریان خارجی روی آنها به وجود آمده باشد. وجود جریان روی جسم باعث تشکیل گردابههایی پشت جسم و جدا شدن آنها به صورت متناوب از بالا و پایین جسم می شود. اگر جسم مقید شده باشد فرکانس تشکیل گردابهها از قانون اشتروهال پیروی می کند. از این پدیده تاکنون به عنوان یک پدیده مخرب نام برده می شده اما مدتی است که مطالعاتی در رابطه با استحصال انرژی از این پدیده مطرح شده است. به علت خاصیت غیرخطی این مسئله، همواره مدلسازی این پدیده با مشکلات زیادی روبرو بوده است. عموماً مطالعه روى اين پديده به سه روش امكان پذير است. روش اول روش تجربی (انجام آزمایشها) میباشد. روش دوم روش شبه تجربی نام دارد. این روش در حقیقت همان روش تحلیلی است با این تفاوت که چون در روش تحلیلی تمام ضرایب قابل استخراج نیست تعدادی از ضرایب به کمک نتایج روش تجربی به دست میآید، بنابراین این روش شبه تجربی نام گرفته است. روش آخر نیز روش شبیهسازی عددی میباشد. در روشهای تحلیلی بر اساس مدل توسعه داده شده توسط فاچینتی و همکاران [۳۸]، با ارائه یک مدل اصلاح شده که از وجود یک نوسان گر دافینگ بهره می برد، به نتایج قابل قبولی

رسیده میشود. بر اساس این مدل، نیروی خارجی اعمالی به تیر از طرف سیال از دو قسمت نیروی لیفت،  $f_L$ ، و نیروی ناشی از میرایی هیدرودینامیک،  $f_D$ ، که در راستای عرضی به تیر اعمال میشود، تشکیل میشود. با توجه به مطالعات انجام شده توسط فاچینتی و همکاران [۳۸] نیروی برآیند خارجی اعمالی از طرف سیال به صورت زیر بیان میشوند:

$$f(x,t) = f_D(x,t) + f_L(x,t) =$$

$$\frac{1}{2}C_L \rho_f D U^2 \overline{q}(x,t) - \frac{1}{2} \qquad (Y)$$

$$C_D \rho_f D U \frac{\partial w(x,t)}{\partial t}$$

که در آن  $C_D$  ضریب میرایی میباشد و مقدار آن وابسته به عدد رینولدز میباشد و  $C_L$  ضریب لیفت میباشد.  $\rho_f$  و U به ترتیب نشان دهنده چگالی سیال، قطر هیدرولیکی معادل و سرعت جریان سیال میباشد. w(x,t) تابع خیز عرضی تیر بوده و  $\overline{q}(x,t)$  ضریب برآی نوسانی لحظهای میباشد و به صورت معادله وندرپل غیرخطی برای شبیهسازی نوسانگر سیال استفاده میشود که رابطه آن به صورت زیر میباشد [۳۸]:

$$\frac{\partial^2 \overline{q}(x,t)}{\partial t^2} + \delta \omega_s \left[ \overline{q}(x,t)^2 - 1 \right]$$

$$\frac{\partial \overline{q}(x,t)}{\partial t} + \omega_s^2 \overline{q}(x,t) = \qquad (\Lambda)$$

$$\frac{P}{D} \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2}$$

که در آن ثابت P و  $\delta$  ضریب دمپینگ جریان سیال اضافه شده بوده و مقادیر آنها از برازش دادههای تجربی به دست میآیند [۳۸].  $\varpi_s$  فرکانس گردابهها میباشد که با رابطه زیر به سرعت سیال و عددی بی بعد اشتروهال وابسته میباشد:

$$\omega_s = 2\pi S_t \frac{U}{D} \tag{9}$$

که در آن  $S_t$  عدد بیبعد اشتروهال میباشد و مقدار آن با توجه به هندسه سطح مقطع جسم تعیین میشود [۳۹].

1Vortex Shedding

۲-۲ اعمال اصل هميلتون

به منظور استخراج معادلات حرکت از تئوری تیر اویلر-برنولی و مد نظر قرار دادن اندرکنش سازه-سیال و روابط کرنش-جابجایی خطی فون کارمن استفاده میشود. معادلات حرکت و شرایط مرزی متناظر را میتوان با استفاده از اصل همیلتون استخراج نمود [۴۰]:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V + W_{ext}) dt = 0$$
 (1.)

که در آن T و  $W_{\text{ext}}$  به ترتیب نشان دهنده انرژی جنبشی، انرژی کرنشی و کار خارجی انجام شده توسط نیروهای خارجی میباشد. انرژی کرنشی را میتوان به صورت زیر محاسبه نمود [۴۰]:

$$V = \frac{1}{2} \iiint (\mathbf{\acute{o}} : \mathbf{\acute{a}}) dV \tag{11}$$

که در آن  $\dot{\mathbf{0}}_{\mathbf{0}}$  به ترتیب نشان دهنده تانسور تنش و تانسور که در آن  $\dot{\mathbf{0}}_{\mathbf{0}}$  به ترتیب نشان دهنده از روابط زیر قابل محاسبه هستند [۴۰]:

$$\mathbf{\acute{o}} = \lambda(z)tr(\mathbf{\mathring{a}})I + 2\mu(z)\mathbf{\mathring{a}} \tag{11}$$

$$\mathbf{\ddot{a}} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$
(17)

که در آن  $\lambda$  و  $\mu$  ثوابت لامه هستند که به صورت زیر به دست میآیند [۴۰]:

$$\lambda(z) = \frac{E(z)\nu(z)}{(1+\nu(z))(1-2\nu(z))} \tag{14}$$

$$\mu(z) = \frac{E(z)}{2(1+\nu(z))} \tag{10}$$

$$u(x, z, t) = -u(x, t),$$
  

$$v(x, z, t) = 0, \quad w(x, z, t) = w(x, t)$$
(19)

در رابطه فوق *w* جابجایی عرضی تیر میباشد. با استفاده از معادلات اخیر مؤلفه غیر صفر تانسور کرنش به صورت زیر به دست می آید:

$$\varepsilon_{xx}(x,t) = u - z \frac{\partial w}{\partial x} \tag{14}$$

با جایگذاری رابطه (۱۷) در معادله (۱۲) خواهیم داشت:

$$\sigma_{xx} = (\lambda(z) + 2\mu(z)) \left( u - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$
(1A)

$$\delta U = \int_{0}^{L} \begin{bmatrix} N_{xx} \frac{\partial(\delta u)}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial(\delta w)}{\partial x} - \\ M_{xx} \frac{\partial^{2}(\delta w)}{\partial x^{2}} - P_{xy} \frac{\partial^{2}(\delta w)}{\partial x^{2}} \end{bmatrix} dx \qquad (19)$$

که در آن 
$$M_{_{XX}}$$
،  $N_{_{XX}}$  و  $P_{_{Xy}}$  منتجههای تنش بوده و به صورت  
زیر محاسبه میشوند:

$$N_{xx} = \int_{A} \sigma_{xx} dA, \qquad M_{xx} = \int_{A} z \sigma_{xx} dA, \qquad P_{xy} = \int_{A} m_{xy} dA$$
(Y · )

$$T = \int_{V} \frac{1}{2} \rho(z) \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^{2} dV + \frac{1}{2} M_{b} \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^{2} \delta(x - L) \qquad (1)$$

بنابراین، تغییرات انرژی جنبشی تیر اویلر-برنولی به صورت زیر به دست میآید:

$$\delta T = \int_{0}^{L} m_{0} \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial (\delta w)}{\partial t} dx + \int_{0}^{L} m_{2} \frac{\partial^{2} w}{\partial t^{2}} \frac{\partial^{2} (\delta w)}{\partial t^{2}} dx \qquad (\Upsilon\Upsilon)$$

$$+ M_{b} \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial (\delta w)}{\partial t} \delta(x - L)$$

که در آن 
$$m_1, m_2$$
 و  $m_2$  به صورت زیر به دست میآیند:

$$M(x,t) = b \int_{-h_{p}-h_{s}/2}^{-h_{s}/2} E_{p} \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} z^{2} + e_{31} \frac{V(t)}{h_{p}} dz + b \int_{-h_{s}/2}^{h_{s}/2} E_{s}(z) \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} z^{2} dz - b$$

$$\int_{-h_{s}/2}^{h_{p}+h_{s}/2} E_{p} \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} z^{2} + V(t) E_{p} \frac{d_{31}}{h_{p}} z dz$$
(YY)

$$M(x,t) = E_p I_p \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - E_p A_p$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \vartheta V(t) \left[H(x) - H(x - L)\right]$$
(YA)

که در آن 
$$H(x)$$
 تابع پله واحد بوده و کوپل الکترومکانیکی با  
فرض سری بودن مدار الکتریکی خروجی به صورت زیر میباشد:

$$\vartheta = \frac{e_{31}bE_p}{2h_p} \left[ \left( h_p + \frac{h_s}{2} \right)^2 - \frac{h_s^2}{4} \right]$$
(19)

$$-(\lambda_{2} + E_{p}I_{p})\frac{\partial^{4}w}{\partial x^{4}} - \lambda_{1}\frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\left(\frac{\partial^{2}w}{\partial x^{2}}\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}}\left(9V(t)\left[H(x) - H(x - L)\right]\right) \quad (\forall \cdot)$$

$$-E_{p}A_{p}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^{2}w}{\partial x^{2}}\frac{\partial w}{\partial x}\right) - \left(m_{0} + M_{b}\delta(x - L)\right)$$

$$\frac{\partial^{2}w}{\partial t^{2}} + m_{2}\frac{\partial^{4}w}{\partial t^{2}\partial x^{2}} = f(x, t)$$

:که در آن 
$$\lambda_i \, , \mu_i$$
 و  $m_i$  عبارتاند از

$$\lambda_{i} = b \int_{-h/2}^{h/2} \lambda(z) z^{i} dz, \quad m_{i} = b \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z) z^{i} dz, \quad i = 0, 1, 2 \quad (\Upsilon)$$

$$m_i = b \int_{-h_p/2}^{h_p/2} \rho(z) z^i dz, \qquad i = 0, 1, 2$$
 (YY)

در معادله (۲۳)، b و  $h_p$  به ترتیب نشان دهنده پهنا و ضخامت تیر میاشند.

با جایگذاری انرژی کرنشی و انرژی جنبشی در معادله اصل همیلتون و با استفاده از انتگرالگیری جزءبهجرء، معادلات حرکت تیر متخلخل به صورت زیر به دست میآید:

$$\begin{split} \delta w: & -\left(m_{0} + M_{b}\delta(x - L)\right)\frac{\partial^{2}w}{\partial t^{2}} + \\ & m_{2}\frac{\partial^{4}w}{\partial t^{2}\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}}(M_{xx} + P_{xy}) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(N_{xx}\frac{\partial w}{\partial x}\right) = f(x, t) \end{split}$$

$$\end{split}$$
(7%)

$$M(x,t) = -\int_{-h_p - h_s/2}^{-h_s/2} T_1^p z dz - \int_{-h_s/2}^{h_s/2} T_1^s z dz - \int_{-h_s/2}^{h_p + h_s/2} T_1^p z dz$$
(Ya)

که در رابطه فوق
$$T_{i}^{s}$$
 تنش در تیر و  $T_{i}^{p}$  تنش لایههای  
پیزوالکتریک است که به صورت زیر به دست میآیند:

$$\sigma_{s} = E_{s}\varepsilon_{s} = -E_{s}z\frac{\partial^{2}w}{\partial x^{2}}\sigma_{p} = E_{p}\varepsilon_{p} - e_{31}E_{3} = -E_{p}z\frac{\partial^{2}w}{\partial x^{2}} + e_{31}\frac{V(t)}{h_{p}}$$
(79)

که در آن  $E_p$  و  $E_p$  به ترتیب مدول یانگ تیر و پیزوالکتریک  $e_r$  میباشد. و V اختلاف ولتاژ بین لایههای پیزوالکتریک میباشد. مدول پیزوالکتریسیته و  $E_r$  میدان الکتریکی ایجاد شده در ماده پیزوالکتریک میباشد. با جایگذاری روابط تنش پیزوالکتریک در معادله (۲۵) خواهیم داشت:

از روابط پیزوالکتریک به صورت زیر استفاده می شود:

$$D_3 = e_{31}\varepsilon_p + \varepsilon_{33}^T E_3 \tag{(TT)}$$

که در آن  $D_r$  جابجایی الکتریکی،  $\mathcal{E}_{rr}^T$  ظرفیت الکتریکی در تنش ثابت و  $D_r$  میدان الکتریکی است. همچنین، زیرنویسهای ۱ و T به ترتیب در راستای حورهای x و z میباشند. با استفاده از  $\mathcal{E}_r$  به ترتیب در راستای حورهای x و z میباشند. با استفاده از  $\mathcal{E}_{rr}^T = \mathcal{E}_{rr}^T - d_{r1}^r E_p$  و  $E_r(t) = -V(t)/h_p$ میتوان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$D_3(x,t) = d_{31}E_p\varepsilon_p - \varepsilon_{33}^T \frac{V(t)}{h_p}$$
(77)

با معرفی  $h_{pc}$  به عنوان فاصله مرکز لایه پیزوالکتریک از محور خنثی تیر، کرنش خمشی متوسط لایه پیزوالکتریک به صورت زیر به دست میآید:

$$\varepsilon_{p} = -h_{pc} \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^{2} \tag{(74)}$$

$$q(t) = -b \int_{0}^{L} \left( d_{31} E_{p} \left[ \frac{h_{pc}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^{2} \right] + \varepsilon_{33}^{s} \frac{V(t)}{h_{p}} \right) dx$$
 (75)

$$i(t) = \frac{\partial q(t)}{\partial t} = -b \int_0^L d_{31} E_p \begin{bmatrix} h_{pc} \frac{\partial^3 w}{\partial t \partial x^2} \\ + \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \end{bmatrix} dx -$$
(3.5)

$$\frac{b\varepsilon_{33}^{*}L}{h_{p}}\frac{dV(t)}{dt}$$

$$V(t) = Ri(t) =$$

$$-Rb \int_{0}^{L} d_{31} E_{p} \begin{bmatrix} h_{pc} \frac{\partial^{3} w}{\partial t \partial x^{2}} \\ + \frac{\partial^{2} w}{\partial t \partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \end{bmatrix} dx$$

$$+ \frac{b \varepsilon_{33}^{s} L}{h_{p}} \frac{dV(t)}{dt}$$
(YV)

$$\frac{V(t)}{Rb} - \frac{b\varepsilon_{33}^{s}L}{h_{p}} \frac{dV(t)}{dt} = -\int_{0}^{L} d_{31}E_{p} \left[ h_{pc} \frac{\partial^{3}w}{\partial t \partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}w}{\partial t \partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \right] dx$$
(7%)

۴-۲ بیبعدسازی معادلات

به منظور بیبعدسازی معادلات، متغیرهای بیبعد به صورت زیر تعریف میشوند:

$$\begin{split} \hat{w} &= \frac{w}{l}, \ \hat{x} = \frac{x}{l}, \ \tau = \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{E_s I}{m_0}} t, \ \hat{U} = U l \sqrt{\frac{m_0}{E_s I}}, \\ \Omega &= \omega \sqrt{\frac{m_0 l^4}{E_s I}}, \ \beta = \frac{M_b}{m_0 l} \Omega_s = \omega_s \sqrt{\frac{m_0 l^4}{E_s I}} = \Omega_{0s} u, \\ \Omega_{0s} &= \frac{2\pi l S_t}{D}, \ c_L = \frac{C_L \rho_f D l}{4\rho A}, \ c_D = \frac{C_D \rho_f D l^2}{2m_0} \\ \alpha_7 &= \frac{1}{l^3} R b d_{31} E_p h_{pc} \sqrt{\frac{E_s I}{m_0}}, \ \alpha_5 = \frac{E_p A_p l^2}{E_s I}, \\ \alpha_6 &= \frac{m_2}{m_0 l^2}, \ \alpha_1 = \frac{m_1}{m_0 l}, \ \alpha_4 = \frac{\left(2\mu_2 + \lambda_2 + E_p I_p\right)}{E_s I} \\ \alpha_8 &= \frac{1}{l^2} R b d_{31} E_p \sqrt{\frac{E_s I}{m_0}}, \ \alpha_9 = \frac{b \varepsilon_{33}^s R b}{h l} \sqrt{\frac{E_s I}{m_0}} \end{split}$$

با جایگذاری متغیرهای بی بعد در روابط (۲)، (۳۰) و (۳۸)، معادلات غیرخطی حاکم بر رفتار ارتعاشات القائی ناشی از جریان



شکل ۳. مقایسه حداکثر دامنه نوسانات تیر با تکیهگاههای ساده در دو انتها برحسب سرعت سیال خارجی

Fig. 3. Comparison of the maximum amplitude of beam oscillations with simple supports at both ends in terms of external fluid velocity



شکل ۴. منحنی تغییرات حداکثر دامنه نوسانات نقطه میانی تیر متخلخل ۳ – Type برحسب سرعت جریان سیال خارجی و با مد نظر قرار دادن تعداد جملات مختلف در روش گالرکین

Fig. 4. Changes in the maximum amplitude of oscillations of the mid-point of Type-3 porous beam in terms of external fluid flow velocity and considering the number of different sentences in the Galerkin method. ش

در ادامه به منظور اختصار از علامت بالانویس در معادلات صرفنظر میشود.

## ۵-۲ حل معادلات

در مقاله حاضر دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی با مشتقات جزئی ارائه شده در روابط (۴۰) تا (۴۲) با استفاده از روش گالرکین گسستهسازی میشود. بر این اساس پاسخ فرضی معادله دیفرانسیل به صورت زیر در نظر گرفته میشود:

$$w(x,\tau) = \sum_{n=1}^{N} \varphi_n(x) y_n(\tau),$$

$$\overline{q}(x,\tau) = \sum_{n=1}^{N} \varphi_n(x) \chi_n(\tau)$$
(FT)

در رابطه اخیر (x)،  $(\sigma_n(x)$  و  $(\tau)$  و  $(\tau)_n \chi$  به ترتیب نشان دهنده شکل مودهای ارتعاشی و مختصههای زمانی تعمیمیافته میباشند. توابع شکل مود (x)، بایستی تمام شرایط مرزی سیستم را ارضا کنند. بر این اساس در تحقیق حاضر با توجه به شرایط مرزی یکسر گیردار، این توابع به صورت شکل مودهای ارتعاشی تیر یکسر گیردار مورد استفاده قرار می گیرند.

با جایگذاری رابطه (۴۳) در معادلات (۴۰) تا (۴۲)، دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی با مشتقات معمولی دارای ۲۸ مجهول به دست میآیند که میبایست به منظور محاسبه پارامترهای مجهول شامل خیز عرضی تیر، ضریب برآی نوسانی لحظهای و ولتاژ تولید شده، به صورت عددی حل شوند. با حل این معادلات با استفاده از روش رانگ کوتا، در بخش بعد تأثیر پارامترهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته میشود.

# ۳- بررسی نتایج

در این بخش به مطالعه رفتار ارتعاشات القایی ناشی از سیال و برداشت انرژی توسط تیرهای متخلخل واقع در معرض جریان سیال خارجی با در نظر گرفتن اندرکنش سازه–سیال پرداخته میشود. مقادیر ضرایب  $C_L \cdot C_D$  و نرایا از مرجع [۴۱] و ضرایب نوسانات ویک  $\delta$  و P از مقادیر ارائه شده در مرجع [۲۶] مورد استفاده قرار گرفتهاند. معادلات دیفرانسیل با مشتقات معمولی به دست آمده در روابط (۴۰)

به ازای مقادیر مختلف از پارامترهای سیستم به دست آمدهاند. در استخراج نتایج فرض شده است که تیر تحت تأثیر شرایط اولیه جابجایی خالص و به صورت ۲۰،  $i = 1, ..., 1 \cdot \chi_i = \eta_i = \cdot, i = 1, ..., 1 \cdot \chi_i = \dot{\eta}_i = \cdot, i = 1, ..., 1 \cdot$ 

ابتدا به منظور صحتسنجی دقت مدل، نتایج عددی برای تیر با تکیهگاههای ساده در دو انتها واقع در معرض جریان سیال بدون اثرات برداشت انرژی با نتایج دای و همکاران [۴۲] در شکل ۲ مقایسه میشود. همانطور که نتایج نشان میدهد تطابق بسیار قابل قبولی بین نتایج وجود دارد. لازم به ذکر است که این نتایج با در نظر گرفتن چهار شکل مود ارتعاشی اول در روش گالرکین استخراج شده که نشان دهنده کافی بودن تعداد جملات در نظر گرفته شده در این روش میباشد. با توجه به شکل ۳ مشاهده میشود که ناحیه قفلشدگی در محدوده سرعت بیبعد ۲/۵ روی میدهد که در آن دامنه نوسانات بیشترین مقدار را داشته، اما در ناحیه قبل و بعد از آن، دامنه ارتعاشات کمتر میباشد.

به منظور بررسی عدم وابستگی حل به تعداد شکل مودهای ارتعاشی در نظر گرفته شده در پاسخ فرضی ارائه شده در رابطه (۴۳)، در شکل ۴ منحنی تغییرات حداکثر دامنه نوسانات نقطه میانی تیر متخلخل ۳–Type برحسب سرعت جریان سیال خارجی و با مد نظر قرار دادن یک، ۵، ۱۰ و ۱۵ مود ارتعاشی در روش گالرکین مورد مقایسه قرار داده شده است. همانطور که از نتایج مشاهده میشود تقریب مود اول تنها اثر مود اول را در پاسخ در نظر گرفته و همانطور که مشاهده میشود خطای پاسخ زیاد میباشد. با افزایش تعداد جملات پاسخ تقریبی همگرا شده و پاسخ به دست آمده با استفاده از ۱۰ و ۱۵ جمله تقریباً یکسان میباشند. بنابراین میتوان بیان داشت که در نظر گرفتن ۱۰ جمله با دقت مناسبی رفتار سیستم را در اختیار میگذارد. در ادامه نتایج با در نظر قرار دادن ۱۰ جمله ارائه و مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در ارتعاشات القائی ناشی از سیال، نیروی مقاوم سیال ترکیبی از نیروهای برشی و فشاری است. با افزایش سرعت جریان و در نتیجه عدد رینولدز، ناحیه گردابهای پشت تیر گسترده شده و نیروی درگ اثر غالب در نیروی مقاوم کل و ارتعاشات تیر دارد. بدین جهت در نواحی سرعتهای پایین این نیرو باعث میرا شدن دامنه ارتعاشات میشود. با افزایش بیشتر سرعت سیال، نیروهای اینرسی زیادتر



شكل ۵. حداكثر دامنه نوسانات نقطه ميانى تير متخلخل برحسب سرعت جريان سيال خارجى Fig. 5. Maximum amplitude of oscillations of the midpoint of a porous beam in terms of external fluid flow velocity



 $u = \cdot \cdot \circ$  شکل ۶. منحنیهای پاسخ زمانی تیر متخلخل به ازای سرعتهای مختلف جریان سیال (الف)  $u = \cdot \cdot \circ$  و (ب) Fig. 6. Time response of porous beam for different fluid flow velocities (a) u=0.015 and (b) u=0.05



Fig. 7. Time response of porous beam for fluid flow velocity of *u*=0.6



 $u = \cdot/\delta$  شکل ۸. تبدیل مورلت پاسخ ارتعاشی تیر متخلخل به ازای سرعت جریان سیال آ $\lambda$  . Fig. 8. Morlett transform of the vibrating response of a porous beam at velocity of the fluid flow of u=0.5



شكل ۹. منحنى تغييرات حداكثر مقدار ولتاژ توليدى برحسب سرعت جريان سيال براى سه نوع تير متخلخل Fig. 9. Changes in the maximum magnitude of output voltage in terms of fluid flow velocity for three types of porous beams

خارجی را نشان میدهد، مشاهده نمود. علاوه بر این، نتایج نشان میدهد که توزیع تخلخل تأثیر قابل ملاحظهای بر ناحیه قفل شدگی و همچنین حداکثر دامنه نوسانات تیر متخلخل دارد. حداکثر دامنه ارتعاشی برای توزیع تخلخل نوع سوم و در محدود سرعت u = 0.00 اتفاق میافتد که مقدار آن برابر v/v میباشد. همچنین، ناحیه قفل شدگی برای تیر با دو نوع توزیع تخلخل دیگر نیز در این محدوده وقفل شدگی برای تیر با دو نوع توزیع تخلخل دیگر نیز در این محدود و برعت ایجاد می مدوده برای توزیع تود می برای میبان برای توزیع تر با دو نوع توزیع تخلخل دیگر نیز در این محدوده برای تیز محدوده برای تیر با دو نوع توزیع تخلخل دیگر نیز در این محدوده برعت ایجاد می شود ولی حداکثر دامنه ایجاد شده متفاوت بوده و برای توزیع نوع اول و دوم به ترتیب برابر v/v

در شکلهای ۶ و ۷ ولتاژ تولید شده از تیر متخلخل به ازای سه توزیع مختلف تخلخل و در سرعتهای بیبعد سیال برابر  $u = \cdot/\cdot 10$ ،  $u = \cdot/\cdot 0$  نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده میشود که در یک سرعت معین سیال، تاریخچه زمانی برداشت انرژی شده و دیگر قابل صرفنظر کردن نمیباشند. این امر باعث میشود تا در سرعتهای بالاتر دامنه ارتعاشات سیستم به صورت ناگهانی افزایش یافته و دوباره نوسانات سیستم پایدار شود. این محدوده از سرعت سیال، ناحیه قفل شدگی نامیده می شود. در ناحیه بعد از ناحیه قفل شدگی، افزایش بیشتر سرعت سیال باعث کاهش دامنه نوسانات شده و دامنه حالت پایدار سیستم برخلاف حالتهای قبل به صفر می رسد. در این محدوده نیروهای مقاوم ناشی از سیال بر نیروهای اینرسی و بازگرداننده تیر غالب شده و باعث ساکن شدن تیر می شود. همانطور که از نتایج نشان داده شده در شکل ۵ مشاهده می شود دامنه ارتعاشات حالت پایدار برای ناحیه قفل شدگی بیشتر از دو ناحیه دامنه ارتعاشات نقطه میانی تیر متخلخل برحسب سرعت جریان سیال



شکل ۱۰. حداکثر ولتاژ تولیدی برحسب سرعت جریان سیال برای تیر بدون تخلخل و تیر متخلخل با توزیع تخلخل نوع سوم Fig. 10. Maximum output voltage in terms of fluid flow velocity for beam without porosity and porous beam with porosity distribution type III

پیش بینی بود. به هر حال، همان طوری که از این شکلها مشخص است، میزان انرژی قابل استحصال در نواحی قفل شدگی به مراتب بیشتر از سایر نواحی است که علت این امر، به وجود آمدن کرنشهای دینامیکی زیاد در این نواحی است. علاوه بر این نتایج نشان می دهد که حداکثر دامنه نوسانات تیر با تخلخل نوع سوم بیشتر از دو نوع توزیع تخلخل دیگر می باشد. بر این اساس، می توان بیان نمود که نوع توزیع تخلخل به علت تغییر در سفتی معادل سازه و انعطاف پذیری آن تأثیر قابل ملاحظه ای بر پاسخ زمانی و همچنین حداکثر دامنه تیرهای متخلخل داشته و می تواند برداشت انرژی از این نوع تیرها را تحت تأثیر قرار دهند.

در شکل ۸ منحنیهای تبدیل موجک مورلت پاسخهای زمانی نشان داده شده در شکل ۶ ارائه شده است. نتیجه جالب توجه دیگری که میتوان مشاهده نمود این است که محتوای فرکانس نوسانات سیستم برحسب زمان متغیر میباشد. به واسطه وجود اثرات جرم افزوده ناشی از حضور جریان سیال خارجی، در سرعتهای پایین سیال فرکانسهای نوسانات سیستم کاهش مییابد و سپس در سرعتهای بالاتر به علت تشکیل گردابهها، فرکانس نوسانات افزایش مییابد. تبدیل موجک مورلت نشان میدهد که در (h - u) = u فرکانس غالب نوسانات KHZ بوده و به سبب وجود تشدید داخلی در سیستم فرکانسهای بزرگتری نیز در پاسخ سیستم ظاهر میشوند که با گذشت زمان اثر این فرکانسها از پاسخ سیستم حذف میشوند. در مقابل، مشاهده میشود که میزان قدرت فرکانس تشدید اصلی

به صورت نوسانی میباشد. با توجه به شکل ۶الف مشاهده می شود که در سرعت های پایین سیال، ولتاژ تولیدی که وابستگی مستقیم به پاسخ سیستم دارد به صورت نوسانی با دامنه ثابت میباشد. در این حالت تنها اثر جرم افزوده ناشی از سیال تأثیر گذاشته که این امر باعث كاهش فركانس طبيعي تير مي شود. با افزايش سرعت سيال، جریان سیال اطراف تیر از نوع بسیار آهسته و یا خزشی می باشد. با جریان پیدا کردن سیال اطراف تیر، گردابههای ونکارمن بر اثر فشار منفی در پشت تیر به صورت متقارن ایجاد شده و سبب وارد کردن نیروهای لیفت و درگ بر تیر شده و در نتیجه باعث افزایش دامنه نوسانات و در نتیجه آن ولتاژ تولیدی می شوند. همانطور که در شکل Pب نشان داده شده است در سرعت  $u = \cdot/\Delta$  سیال اطراف تیر باعث ایجاد رفتاری متفاوت در پاسخ زمانی تیرهای متخلخل می شود. همانطور که مشاهده می شود در این حالت پدیده ضربان <sup>۱</sup> در پاسخ رخ مىدهد و دامنه جابجايى تير با گذشت زمان افزايش و كاهش مىيابد. در این سرعت، حداکثر ولتاژ تولید شده توسط لایههای پیزوالکتریک در حالت پایا برای توزیعهای تخلخل نوع اول، نوع دوم و نوع سوم به ترتیب برابر ۷۳۸ /۲، ۲/۵۲ و ۲/۸۷ میباشد که نشان دهنده قابلیت بالای تولید انرژی در صورت استفاده از تیرهای تخلخل با توزيع تخلخل يكنواخت (نوع سوم) در آن مي باشد. با توجه به اینکه حوالی  $u = \cdot/10$  ناحیه قفل شدگی برای تیر با توزیع تخلخل نوع سوم میباشد، بنابراین با توجه به شکل ۵ چنین نتیجهای قابل

1 Beating

جدول ۱. مقایسه بین حداکثر ولتاژ برداشت شده توسط تیر بایمورف متخلخل ارائه شده در تحقیق حاضر با برخی از مدلهای ارائه شده در تحقیقات پیشین

Table 1. Comparison between the maximum voltages of porous beams presented in the present study with	some of the
models presented in previous research	

خاتمی و همکاران [۴۷]	محمود و همکاران [۴۵]	کوتون و همکاران [۴۶]	تحقيق حاضر	
•/•۲ V	$\cdot / \cdot \vartriangle V$	1/•YV	$\cdot$ /sy V	حداكثر ولتاژ برداشت شده

و انرژی متناظر با آن در طول زمان برای هر سه نوع تخلخل تقریباً ثابت است.

در شكل ۹ منحني تغييرات حداكثر مقدار ولتاژ توليدي برحسب سرعت جریان سیال برای سه نوع تیر متخلخل تحت بررسی و همچنین مقادیر مختلف مقاومت الکتریکی نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که میزان برداشت انرژی در نواحی که پدیده قفل شدگی اتفاق می افتد، بیشترین مقدار را دارد که این نتیجه با نتایج مطالعات قبلی انجام شده در زمینه برداشت انرژی با استفاده از ارتعاشات القائی ناشی از سیال در سازههای مختلف نیز سازگاری دارد [۴۵-۴۵]. همچنین، برداشت انرژی وابستگی قابل ملاحظهای به نحوه توزيع تخلخل در تيرها دارد. به عنوان مثال، به ازاى مقاومت الكتريكي ، حداکثر ولتاژ تولید شده برای تیر با توزیع تخلخل نوع اول،  $\Omega$ ·/۳۷ نوع دوم و نوع سوم به ترتیب برابر با ۷ ۰/۲۶ V V/7 و ۷ /۳۷/ می باشد که نشان دهنده بیشترین قابلیت برداشت انرژی مربوط به تیر با توزیع تخلخل نوع سوم می باشد. علاوه بر این، مشاهده می شود که ولتاژ تولید شده وابستگی زیادی به مقاومت الکتریکی دارد و نتایج نشان میدهد که برای هر سه نوع توزیع تخلخل، حداکثر مقدار ولتاژ برداشت انرژی مربوط به مقاومت الکتریکی برابر  $k\Omega$  ۱۰۰ میباشد. بر این اساس، با توجه به نمودارهای ولتاژ خروجی، اندازه ولتاژ به دست آمده از سیستم رابطه مستقیمی با مقاومت الکتریکی دارد، یعنی با افزايش مقاومت الكتريكي اندازه ولتاژ برداشت شده از سيستم افزايش مى يابد.

به منظور بررسی وجه تمایز میان عملکرد برداشت انرژی تیرهای متخلخل و تیرهای همگن، در شکل ۱۰ مقایسه منحنی تغییرات حداکثر مقدار ولتاژ تولیدی برحسب سرعت جریان سیال برای تیر همگن بدون تخلخل (۰/۰ = .q) و تیر متخلخل با توزیع تخلخل

نوع سوم ( ۳ Type ) آورده شده است. با توجه به این شکل مشاهده میشود که کسر حجمی تخلخل تأثیر قابل ملاحظهای بر حداکثر ولتاژ تولید شده دارد و با بیشتر شدن تخلخل تیرها، حداکثر ولتاژ نیز افزایش مییابد. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که حداکثر ولتاژ تیر متخلخل به ازای P - = .P در حدود 2/1 برابر بیشتر از تیر متناظر بدون تخلخل میباشد. بر این اساس، میتوان نتیجه گرفت که استفاده از تیرهای متخلخل قابلیت برداشت انرژی در اثر ارتعاشات القائی ناشی از سیال را به صورت قابل ملاحظهای افزایش می دهند که این نیمی از سیال را به صورت قابل ملاحظهای افزایش می دهند که این متخلخل ارائه شده در تحقیق حاضر با برخی از مدل های ارائه شده در متخلخل ارائه شده در تحقیق حاضر با برخی از مدل های ارائه شده در بسیار مناسبی در تولید انرژی دارند و میتواند جایگزین سیستمهای در این جدول مشاهده می شود که استفاده از تیرهای متخلخل قابلیت

## ۴- نتیجهگیری

در تحقیق حاضر به مطالعه تحلیلی تأثیر برداشت انرژی از تیرهای متخلخل واقع در معرض جریان سیال خارجی پرداخته شد. بدین منظور، با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-سیال و سه نوع توزیع تخلخل مختلف، معادلات غیرخطی الکترومکانیکی کوپل با استفاده از روش گالرکین گسستهسازی شده و سپس با حل عددی آنها تأثیر پارامترهای مختلف بر قابلیت برداشت انرژی از این سازهها مطالعه شد. خلاصهای از نتایج مهم تحقیق حاضر عبارت است از:

-توزیع تخلخل تأثیر قابل ملاحظهای بر پاسخ زمانی و همچنین حداکثر دامنه تیرهای متخلخل داشته و برداشت انرژی از این نوع effects, Smart Structures and Systems, 25(5) (2020) 619-630.

- [5]S.S. Mirjavadi, M. Forsat, M.R. Barati, A. Hamouda, Post-buckling of higher-order stiffened metal foam curved shells with porosity distributions and geometrical imperfection, Steel and Composite Structures, 35(4) (2020) 567-578.
- [6]E. Salari, S.S. Vanini, A. Ashoori, A. Akbarzadeh, Nonlinear thermal behavior of shear deformable FG porous nanobeams with geometrical imperfection: Snapthrough and postbuckling analysis, International Journal of Mechanical Sciences, 178 (2020) 603-615.
- [7] Y. Huo, S. Ren, Z. Wei, G. Yi, Standing Wave Binding of Hemispherical Resonator Containing First–Third Harmonics of Mass Imperfection under Linear Vibration Excitation, Sensors, 20(19) (2020) 38-54.
- [8]H.B. Khaniki, M.H. Ghayesh, S. Hussain, M. Amabili, Porosity, mass and geometric imperfection sensitivity in coupled vibration characteristics of CNT-strengthened beams with different boundary conditions, Engineering with Computers, 45 (2020) 1-27.
- [9]X. Ma, Z. Su, Analysis and compensation of mass imperfection effects on 3-D sensitive structure of bellshaped vibratory gyro, Sensors and Actuators A: Physical, 224 (2015) 14-23.
- [10]B. Zhang, S. Liu, Y.C. Shin, In-Process monitoring of porosity during laser additive manufacturing process, Additive Manufacturing, 28 (2019) 497-505.
- [11]W. Meng, Z. Li, F. Lu, Y. Wu, J. Chen, S. Katayama, Porosity formation mechanism and its prevention in laser lap welding for T-joints, Journal of Materials Processing Technology, 214(8) (2014) 1658-1664.
- [12]A. Matsunawa, M. Mizutani, S. Katayama, N. Seto, Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding, Welding international, 17(6) (2003) 431-437.
- [13]R. Fu, S. Tang, J. Lu, Y. Cui, Z. Li, H. Zhang, T. Xu, Z. Chen, C. Liu, Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate, Materials & Design, 199 (2021) 34-51.
- [14]A. Sola, A. Nouri, Microstructural porosity in additive

تیرها را تحت تأثیر قرار دهند.

نتایج نشان میدهد که توزیع تخلخل تأثیر قابل ملاحظهای بر ناحیه قفلشدگی نداشته ولی حداکثر دامنه نوسانات تیر متخلخل را به شدت تحت تأثیر قرار میدهد. ناحیه قفلشدگی برای هر سه توزیع تخلخل در حدود  $10^{-1} u = 0$  و برای تیر با توزیع تخلخل نوع اول (توزیع تخلخل متقارن به صورت سختشوندگی در جداره)، تیر با توزیع تخلخل نوع دوم (توزیع تخلخل نامتقارن) و تیر با توزیع تخلخل سوم (توزیع تخلخل یکنواخت) حداکثر دامنه بی بعد نوسانات ایجاد شده به ترتیب برابر ۰/۲۷ ، ۰/۲۱ و ۱/۰ می باشد.

میزان انرژی قابل استحصال در نواحی قفل شدگی به مراتب
 بیشتر از سایر نواحی است که علت این امر، به وجود آمدن کرنش های
 دینامیکی زیاد در این نواحی است.

نتایج نشان میدهد که حداکثر ولتاژ تیر متخلخل در حدود ۱/۶ برابر بیشتر از تیر متناظر بدون تخلخل میباشد. بر این اساس، میتوان نتیجه گرفت که استفاده از تیرهای متخلخل قابلیت برداشت انرژی در اثر ارتعاشات القائی ناشی از سیال را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش میدهند که این پدیده در اثر انعطاف پذیری بالای تیرهای متخلخل میباشد.

## مراجع

- [1]R. Thomson, J. Hancock, Stress and strain fields near a contained porous imperfection in a plastically deforming matrix, Res mechanica, 16(2) (1985) 135-146.
- [2]K. Xie, Y. Wang, H. Niu, H. Chen, Large-amplitude nonlinear free vibrations of functionally graded plates with porous imperfection: A novel approach based on energy balance method, Composite Structures, 246 (2020) 345-367.
- [3]R. Kumhar, S. Kundu, M. Maity, S. Gupta, Analysis of interfacial imperfections and electro-mechanical properties on elastic waves in porous piezo-composite bars, International Journal of Mechanical Sciences, 187 (2020) 105-126.
- [4]L.A.H. Kunbar, L.B. Hamad, R.A. Ahmed, N.M. Faleh, Nonlinear vibration of smart nonlocal magneto-electroelastic beams resting on nonlinear elastic substrate with geometrical imperfection and various piezoelectric

Technology Society Journal, 53(4) (2019) 17-25.

- [25]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, 67 (2019) 67-78.
- [26]L. Chen, S. Pan, Y. Fei, W. Zhang, F. Yang, Theoretical study of micro/nano-scale bistable plate for flexoelectric energy harvesting, Applied Physics A, 125(4) (2019) 242-253.
- [27]H. Farokhi, A. Gholipour, M.H. Ghayesh, Efficient Broadband Vibration Energy Harvesting Using Multiple Piezoelectric Bimorphs, Journal of Applied Mechanics, 87(4) (2020) 45-56.
- [28]A. Li, W. Zhao, S. Zhou, L. Wang, L. Zhang, Enhanced energy harvesting of cantilevered flexoelectric microbeam by proof mass, AIP Advances, 9(11) (2019) 115305.
- [29]Y. Zhang, S.C. Cai, L. Deng, Piezoelectric-based energy harvesting in bridge systems, Journal of intelligent material systems and structures, 25(12) (2014) 1414-1428.
- [30]H. Dai, A. Abdelkefi, L. Wang, Piezoelectric energy harvesting from concurrent vortex-induced vibrations and base excitations, Nonlinear Dynamics, 77(3) (2014) 967-981.
- [31]M. Radgolchin, H. Moeenfard, Size-dependent piezoelectric energy-harvesting analysis of micro/nano bridges subjected to random ambient excitations, Smart Materials and Structures, 27(2) (2018) 12-24.
- [32]A. Li, W. Zhao, S. Zhou, L. Wang, L. Zhang, Enhanced energy harvesting of cantilevered flexoelectric microbeam by proof mass, AIP Advances, 9 (2019) 23-41.
- [33] M. Zamanian, H. Rezaei, M. Hadilu, S. Hosseini, A comprehensive analysis on the discretization method of the equation of motion in piezoelectrically actuated microbeam, Smart Structures and Systems, 16(5) (2015) 891-918.
- [34]A. Erturk, D.J. Inman, A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters, Journal of vibration and acoustics, 130(4) (2008) 12-24.
- [35]L. Qi, Energy harvesting properties of the functionally

manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion, Journal of Advanced Manufacturing and Processing, 1(3) (2019) 87-95.

- [15]D. Basu, Z. Wu, J.L. Meyer, E. Larson, R. Kuo, A. Rollett, Entrapped Gas and Process Parameter-Induced Porosity Formation in Additively Manufactured 17-4 PH Stainless Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, 56 (2021) 1-8.
- [16]A. Erturk, D.J. Inman, Piezoelectric energy harvesting, John Wiley & Sons, 2011.
- [17]J. Choi, I. Jung, C.-Y. Kang, A brief review of sound energy harvesting, Nano energy, 56 (2019) 169-183.
- [18]N.M. Monroe, J.H. Lang, Broadband, large scale acoustic energy harvesting via synthesized electrical load: I. Harvester design and model, Smart Materials and Structures, 28(5) (2019) 55-67.
- [19]M.A. Pillai, E. Deenadayalan, A review of acoustic energy harvesting, International journal of precision engineering and manufacturing, 15(5) (2014) 949-965.
- [20]H. Maiwa, Thermal energy harvesting of PLZT and BaTiO3 ceramics using pyroelectric effects, in: Nanoscale Ferroelectric-Multiferroic Materials for Energy Harvesting Applications, Elsevier, 2019, pp. 217-229.
- [21]Q. Wang, C.R. Bowen, R. Lewis, J. Chen, W. Lei, H. Zhang, M.-Y. Li, S. Jiang, Hexagonal boron nitride nanosheets doped pyroelectric ceramic composite for high-performance thermal energy harvesting, Nano Energy, 60 (2019) 144-152.
- [22]S. Wu, T. Li, Z. Tong, J. Chao, T. Zhai, J. Xu, T. Yan, M. Wu, Z. Xu, H. Bao, High Performance Thermally Conductive Phase Change Composites by Large Size Oriented Graphite Sheets for Scalable Thermal Energy Harvesting, Advanced Materials, 31(49) (2019) 23-45.
- [23]C. Williamson, R. Govardhan, A brief review of recent results in vortex-induced vibrations, Journal of Wind engineering and industrial Aerodynamics, 96(6-7) (2008) 713-735.
- [24]M.J. Wickett, S. Hindley, M.B. Wickett, WITT: Harvesting Energy From Subsea, Vortex-Induced Vibration, Marine

- [42]H. Dai, L. Wang, Q. Qian, Q. Ni, Vortex-induced vibrations of pipes conveying fluid in the subcritical and supercritical regimes, Journal of Fluids and Structures, 39 .334-322 (2013)
- [43]Y. Hu, B. Yang, X. Chen, X. Wang, J. Liu, Modeling and experimental study of a piezoelectric energy harvester from vortex shedding-induced vibration, Energy conversion and management, .158-145 (2018) 162
- [44]R. Song, X. Shan, F. Lv, T. Xie, A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension, Ceramics International, 2015) 41) S-768S.773
- [45]A. Mehmood, A. Abdelkefi, M. Hajj, A. Nayfeh, I. Akhtar, A. Nuhait, Piezoelectric energy harvesting from vortexinduced vibrations of circular cylinder, Journal of Sound and Vibration, .4667-4656 (2013) (19)332
- [46]F. Cottone, L. Gammaitoni, H. Vocca, M. Ferrari, V. Ferrari, Piezoelectric buckled beams for random vibration energy harvesting, Smart materials and structures, (3)21 .54-34 (2012)
- [47]A. Khatami, Response regime of nonlinear bistable energy harvester, Modares Mechanical Engineering, (5)18 .65-57 (2018)

graded flexoelectric microbeam energy harvesters, Energy, 171 (2019) 721-730.

- [36]Z. Zhou, Y. Ni, Z. Tong, S. Zhu, J. Sun, X. Xu, Accurate nonlinear buckling analysis of functionally graded porous graphene platelet reinforced composite cylindrical shells, International Journal of Mechanical Sciences, 151 (2019) 537-550.
- [37]P. Jiao, A.H. Alavi, Buckling analysis of graphenereinforced mechanical metamaterial beams with periodic webbing patterns, International Journal of Engineering Science, 131 (2018) 1-18.
- [38]M.L. Facchinetti, E. De Langre, F. Biolley, Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations, Journal of Fluids and structures, 19(2) (2004) 123-140.
- [39]E. Ciappi, S. De Rosa, F. Franco, J.-L. Guyader, S.A. Hambric, Flinovia-Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects, Springer, 2015.
- [40]N. Shafiei, A. Mousavi, M. Ghadiri, On size-dependent nonlinear vibration of porous and imperfect functionally graded tapered microbeams, International Journal of Engineering Science, 106 (2016) 42-56.
- [41] R.D. Blevins, Flow-induced vibration 45 (1990) 34-50.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Fallah, V. Arab Maleki, Piezoelectric Energy Harvesting Using a Porous Beam Under Fluid-Induced Vibrations , Amirkabir J. Mech Eng., 53(8) (2021) 4633-4648.



DOI: 10.22060/mej.2021.18200.6780