

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 919-922 DOI: 10.22060/mej.2021.19113.6949

# Instability and frequency sensitivity analysis of single-walled carbon nanotubes conveying fluid under thermomagnetic field considering the surface effect

## H. Mahjoub<sup>1</sup>, H. Ramezannejad Azarboni<sup>2</sup>\*

<sup>1</sup>Faculty of Medical Science and Technology, Department Biomedical Engineering-Biomechanic, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University, Ramsar Iran.

ABSTRACT: In this investigation according to the nonlocal nonlinear Euler-Bernoulli beam theory, the instability and frequency sensitivity analysis of single-walled carbon nanotube conveying fluid is studied. The thermomagnetic field, residual stress and surface elasticity, viscoelastic foundation and small-scale effects on the governing equation of single-walled carbon nanotube are taken into account. The Galerkin decomposition method with the trigonometric shape functions corresponding to the standard boundary conditions including simple-simple, clamped-simple and clamped-clamped at two ends of carbon nanotube are employed to solve. The eigenvalues and critical fluid velocity in the threshold of instability of system are computed by extracting the mass, stiffness and damping matrices. The magnetic intensity, change of temperature in the cases of high and low-temperature conditions, length of nanotube, outer diameter of nanotube and small scale parameters are conceded as the input factors for sensitivity analysis. The qualitative and quantitative effects of input factors on the critical fluid velocity and natural frequencies of single-walled carbon nanotube are computed and compared with together by normalization. The results of sensitivity analysis of present work can be used for optimal or target design of single-walled carbon nanotube for different applications especially for drug delivery to kill metastatic cancer cells.

#### **Review History:**

Received: Oct. 08, 2020 Revised: Jan. 04, 2021 Accepted: Feb. 28, 2021 Available Online: Mar. 12, 2021

#### **Keywords:**

Single-walled carbon nanotube Sensitivity analysis Thermomagnetic field Critical flow velocity Residual stress and surface elasticity.

#### **1-Introduction**

Carbon NanoTubes (CNTs) can be used for biological applications such as drug delivery nanotubes to kill the metastatic cancer cells due to their excellent physical properties, small size, and hollow geometry. Selective delivery of anticancer drugs, called targeted therapies, will dramatically improve cancer treatment by using carbon nanotubes as an ideal carrier for drug delivery systems. Anticancer drugs can be delivered to cancer cells or tissues using magnetic field-guided nanotubes. Due to the high sensitivity of the drug delivery process, the analysis of dynamic stability and vibrational response of carbon nanotubes carrying fluid under a magnetic field is of great importance and has been considered by scientists. There is a lot of research on the dynamic instability and vibration analysis of carbon nanotubes using various theories.

Ru et al. [1] used the classical Euler-Elastic beam theory to investigate the effects of the elastic medium on the vibrational frequencies and the instability of the carbon nanotubes conveying fluid. Using the non-local Euler-Bernoulli beam classical beam theory, Li and Chang [2] investigate the effects of nonlocal parameters, fluid viscosity, aspect ratio and elastic bed coefficient on the free vibration of non-local fluid viscosity of carbon nanotubes conveying fluid under the elastic medium. Using the Knudsen number

and slip boundary condition, Kaviani and Mirdamadi [3] proposed a model for fluid-structure interaction problems in a nanotube. Wang [4] employed the Euler-Bernoulli beam model to investigate the critical velocity and natural frequency of single-walled CNT conveying fluid by considering the surface effect. The flutter instability and free vibration and in CNTs conveying fluid considering the effect of slip condition and nonlocal elasticity were studied by Bahaadini et al. [5]. The instability condition of singlewalled CNT conveying fluid under the thermomagnetic field in the anticancer drug delivery process were studied by Sadeghi et al. [6]. Sedighi [7] by considering the velocity correction factor for different slip condition, investigated the instability condition of carbon and boron nitride nanotube under thermomagnetic field based on the Euler-Bernoulli beam model.

In this study, considering the effects of thermomagnetic filed and the theory of surface elasticity with the nonlocal Euler-Bernoulli beam theory, the natural frequency and critical velocity of single-walled CNT conveying fluid are computed. The magnetic intensity, change of temperature, length of nanotube and small scale parameters are selected as factors to investigate the sensitivity analysis of SWCNT conveying fluid. The low and high temperature conditions are considered to apply the change of temperature.

\*Corresponding author's email: : h.ramezannejad@iauramsar.ac.ir





Fig. 1. Schematic of single-walled CNT conveying fluid

#### 2- Methodology

Fig. 1 shows a single-walled CNT conveying fluid subjected to the thermomagnetic field under the viscoelastic foundation.

Based on the nonlocal Euler–Bernoulli beam theory considering the small scale effect, the governing equation of nonlocal SWCNT conveying magnetic fluid under viscoelastic foundation by applying the surface effect and velocity correction factor subjected to the thermomagnetic axial field can be presented as follows;

$$EI * \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + (m_f + m_c) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + m_f v^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + 2m_f v \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \partial t} + C_m \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + K_m w(x,t) + (e_0 a)^2 \left\{ (m_f + m_c) \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial t^2 \partial x^2} + m_f v^2 \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \right\}$$
(1)  
$$-(e_0 a)^2 \left\{ 2m_f v \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^3 \partial t} + C_m \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial t \partial x^2} + K_m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right\} = 0$$

where,  $e_0a$  stands for the nonlocal parameter on the mechanical properties of nanostructures and EI \* is the effective bending stiffness by applying the surface effect can be formulated as follows;

$$EI^* = \frac{\pi E \left(d^4 - d^4\right)}{64} + \frac{\pi E_s \left(d^3 + d^3\right)}{8}$$
(2)

 Table 1. Trigonometric shape functions for different boundary conditions of single-walled CNT conveying fluid

Boundary conditions	Shape functions
S-S	$\Gamma(\tau.\xi) = \sum_{i=1}^{N} \Lambda_i(\tau) \sin(i \pi \xi)$
C-C	$\Gamma(\tau.\xi) = \sum_{i=1}^{N} \Lambda_i(\tau) \sin(\pi\xi) \sin(i\pi\xi)$
C-S	$\Gamma(\tau,\xi) = \sum_{i=1}^{N} A_i(\tau) \sin\left(\frac{\pi\xi}{2}\right) \sin(i\pi\xi)$

Eq. (1) can be rewritten as follows; By introducing the following dimensionless parameters and variable as following;

$$\begin{split} \Gamma(x,t) &= \frac{w(x,t)}{L}, \xi = \frac{x}{L}, \tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI^*}{m_f + m_c}}, v = VL \sqrt{\frac{m_f}{EI^*}}, \mu = \left(\frac{e_0 a}{L}\right)^2 \\ \alpha_c &= C_m \frac{L^2}{\sqrt{EI^*(m_f + m_c)}}, \alpha_K = K_m \frac{L^4}{EI^*} \\ \alpha_F &= -\frac{EA}{1 - 2\upsilon} \alpha_X \Delta T + 2\tau_s (d_{in} + d_{out}) + \frac{1}{\eta} B_0^2 A \end{split}$$

Eq. (1) can be rewritten as follows;

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^{4}\Gamma}{\partial\xi^{4}} + \frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\tau^{2}} + v^{2}\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\xi^{2}} + 2v\sqrt{\beta}\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\xi\partial\tau} + \alpha_{c}\frac{\partial\Gamma}{\partial\tau} + \alpha_{K}\Gamma + \alpha_{F}\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\xi^{2}} \\ &-\mu\left\{\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\tau^{2}\partial\xi^{2}} + v^{2}\frac{\partial^{4}\Gamma}{\partial\xi^{4}} + 2v\sqrt{\beta}\frac{\partial^{4}\Gamma}{\partial\tau\partial\xi^{3}} + \alpha_{c}\frac{\partial\Gamma}{\partial\tau\partial\xi^{2}} + \alpha_{K}\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\xi^{2}}\right\} (3) \\ &-\mu\left\{\alpha_{F}\frac{\partial^{4}\Gamma}{\partial\xi^{4}}\right\} = 0 \end{aligned}$$



Fig. 2. Comparison and verification of present work with [4] for aspect ratio of 10



Fig. 3. The surface effect on the non-dimensional frequency at mode 1 to 3 of single-walled CNT conveying fluid with C-C boundary condition

The Galerkin decomposition approximation method along with the admissible trigonometric shape functions for different standard boundary conditions including S-S, C-S and C-C, as shown in Table 1, are used to solve the Eq. (3).

#### **3- Discussion and Results**

The geometrical properties of single-walled CNT are the outer diameter  $d_{out} = 7\text{nm}$ , the layer's thickness , and the length of CNT  $L = 20d_{out}$ . Moreover, the mechanical properties of SWCNT are Young's modulus E = 1Tpa, the mass density  $\rho = 1300\text{kg/m}^3$ , the Poisson's ratio  $\upsilon = 0.3$ and the fluid density  $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ . As depicted in Fig. 2, the verification of the present work for the non-dimensional natural frequency of SWCNT conveying fluid are compared with obtained results in [4].

Fig. 3 illustrates the effect of surface elasticity on the critical flow velocity C-C at two ends of single-walled CNT. The values of magnetic intensity of the longitudinal magnetic field, change of temperature in the case of high temperature and Knudsen number are specified as  $B_0 = 20T$ ,  $\Delta T = 30K$ . It can be seen from Fig. 3 that the predicted natural frequencies at three lowest modes and critical flow velocity of SWCNT by considering the surface in the case of [111]

and [100] are higher than without of surface effect. In another word, increasing of stiffness of single-walled CNT due to the surface effect, increases the natural frequencies and critical flow velocity of system for different boundary conditions.

#### 4- Conclusions

The surface effect has a positive sensitivity on the natural frequency of single-walled CNT conveying fluid at modes 1 to 3 for different boundary conditions. The instability threshold of single-walled CNT conveying fluid can be postponed by consideration of surface effect. That means that the stiffness of system is increased by applying the surface effect. The magnetic intensity of the longitudinal magnetic field has a nonlinear positive effect on the flow critical fluid velocity and natural frequencies of CNT.

#### References

- J. Yoon, C.Q. Ru, A. Mioduchowski, Flow-induced flutter instability of cantilever carbon nanotubes, International Journal of Solids and Structures, 43(11-12) (2006) 3337-3349.
- [2] T.P. Chang, Thermal-mechanical vibration and instability of a fluid-conveying single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium based on nonlocal elasticity theory, Applied Mathematical Modelling, 36(5) (2012) 1964-1973.
- [3] F. Kaviani, H.R. Mirdamadi, Influence of Knudsen number on fluid viscosity for analysis of divergence in fluid conveying nano-tubes, Computational Materials Science, 61 (2012) 270-277.
- [4] L. Wang, Vibration analysis of fluid-conveying nanotubes with consideration of surface effects, Physica E: Lowdimensional Systems and Nanostructures, 43(1) (2010) 437-439.
- [5] R. Bahaadini, M. Hosseini, B. Jamali, Flutter and divergence instability of supported piezoelectric nanotubes conveying fluid, Physica B: Condensed Matter, 529 (2018) 57-65.
- [6] M. Sadeghi-Goughari, S. Jeon, H.J. Kwon, Fluid structure interaction of cantilever micro and nanotubes conveying magnetic fluid with small size effects under a transverse magnetic field, Journal of Fluids and Structures, 94 (2020).
- [7] H.M. Sedighi, Divergence and flutter instability of magneto-thermo-elastic C-BN hetero-nanotubes conveying fluid, Acta Mechanica Sinica, 36(2) (2020) 381-396.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Mahjoub, H. Ramezannejad Azarboni, Instability and frequency sensitivity analysis of single-walled carbon nanotubes conveying fluid under thermomagnetic field considering the surface effect, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 919-922.



DOI: 10.22060/mej.2021.19113.6949

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۸۷۵ تا ۳۸۹۰ DOI: 10.22060/mej.2021.19113.6949



# تحلیل آنالیز حساسیت ناپایداری و فرکانسی نانولولههای کربنی تک لایه حامل سیال در محیط ترمومغناطیسی با اثرات الاستیسیته سطح

هدیه محجوب٬، حبیب رمضان نژاد آزاربنی٬\*

۱– مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه اَزاد اسلامی، تهران، ایران ۲– مهندسی مکانیک، واحد رامسر، دانشگاه اَزاد اسلامی، رامسر، ایران

خلاصه: در این تحقیق بر اساس تئوری غیرمحلی تیر اویلر برنولی به تحلیل آنالیز حساسیت ناپایداری و فرکانسی نانولولههای کربنی تک لایه حامل سیال پرداخته شدهاست. در این تحلیل اثرات محیط ترمومغناطیسی، تنش پسماند و الاستیسیته سطح، بستر ویسکوالاستیک و پارامتر غیرمحلی در استخراج معادلات حاکم بر حرکت سیستم اعمال شدهاست. برای حل معادلات حاکم از روش گالرکین به همراه توابع شکل مثلثاتی متناظر با شرایط مرزی استاندارد شامل تکیهگاه ساده، ساده–گیردار–ساده و گیردار دو انتهای نانولوله استفاده شدهاست. با استخراج ماتریسهای جرم، سفتی و استهلاک سیستم، مقادیر ویژه و سرعت بحرانی متناظر با آستانه ناپایداری محاسبه شدهاست. برای تحلیل آنالیز حساسیت میدان مغناطیسی، تغییرات دما در دو حالت دمابالا و دماپایین، طول نانولوله، قطر خارجی نانولوله و پارامتر غیرمحلی به عنوان فاکتورهای ورودی در نظر گرفته شدهاند. اثر میزان حساسیت هریک از فاکتورهای ورودی بر سرعت بحرانی سیال و فرکانسهای طبیعی نانولوله کربنی حامل سیال بهصورت کیفی و کمی محاسبه و با نرمالیزه کردن با یکدیگر مقایسه شدهاست. نتایج تحلیل آنالیز حساسیت انجام شده را می توان در طراحی بهینه یا هدف و با نرمالیزه کردن با یکدیگر مقایسه شدهاست. نتایج تحلیل آنالیز حساسیت انجام شده را می توان در طراحی بهینه یا هدف و با سرمالیزه کردن با یکدیگر معایسه شدهاست. نتایج تحلیل آنالیز حساسیت انجام شده را می توان در طراحی بهینه یا هدف محور و سرمالیزه کردن با یکدیگر می سیل و کرابردهای مختلف به ویژه در به کارگیری در تحویل داروهای برای از بین بردن سلولهای سرطانی مورد استفاده قرار داد.

**تاریخچه داوری:** دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۷ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

**کلمات کلیدی:** نانولوله کربنی حامل سیال آنالیز حساسیت محیط ترمومغناطیسی سرعت بحرانی سیال تنش پسماند و الاستیسیته سطح

## ۱- مقدمه

نانولولههای کربنی به دلیل خواص فیزیکی عالی همراه با اندازه کوچک و هندسه توخالی میتوانند برای کاربرد بیولوژیکی مانند نانولوله انتقال دارو بهمنظور ازبینبردن سلولهای سرطانی متاستاتیک به کار روند. تحویل انتخابی داروهای ضد سرطان، به نام درمان هدف، با به کارگیری نانولولههای کربنی بهعنوان یک حامل ایدهآل برای سیستمهای انتقال دارو، بهطور قابل چشمگیری درمان سرطان را بهبود خواهد بخشید. داروهای ضد سرطان میتوانند با استفاده از نانولوله تحت هدایت میدان مغناطیسی به سلولهای سرطانی یا بافتهای سرطانی منتقل شوند. به دلیل حساسیت بالای فرآیند تحویل دارو، تحلیل پایداری دینامیکی و پاسخ ارتعاشی نانولولههای کربنی حامل سیال تحت میدان مغناطیسی از اهمیت زیادی برخوردار است و توسط دانشمندان مورد توجه قرارگرفتهاست. تحقیقات زیادی در مورد ناپایداری دینامیکی و آنالیز ارتعاش نانولوله کربنی با استفاده از تئوریهای مختلف وجود دارد.

اثرات بستر الاستیک بر فرکانسهای ارتعاشی و ناپایداری فلاتر نانولولههای کربنی تکلایه حامل سیال استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که سرعت جریان سیال تأثیر قابل توجهی بر فرکانس نانولولههای کربنی تکلایه در مودهای ۱، ۲ و ۳ دارد. لی و چانگ [۲] با استفاده از نظریه کلاسیک تیر تیموشنکو با درنظرگرفتن اینرسی چرخشی و تغییر شکل برش عرضی تأثیر سرعت جریان و نسبت ابعاد مایع انتقال دهنده نانولولههای کربنی تکلایه برشی عرضی تأثیر قابل توجهی بر فرکانس و شرایط پایداری نانولولههای برشی عرضی تأثیر قابل توجهی بر فرکانس و شرایط پایداری نانولولههای کوتاه دارند. لی و چانگ [۳] با بهکارگیری نظریه تیر کلاسیک اویلر –برنولی غیر محلی، تحلیل اثرات پارامتر غیر محلی، ویسکوزیته سیال، نسبت ابعاد و ضریب بستر الاستیک بر ارتعاش آزاد سیال غیر محلی ویسکوز نانولولههای کربنی تکلایه تحت بستر الاستیک را مورد بررسی قرار دادند. ژن و فنگ [۴] ارتعاش مکانیکی –حرارتی نانولولههای کربنی تکجداره حامل سیال را با استفاده از تئوری تیر اویلر برنولی مدل سازی کردند. آنها نتیجه گرفتند که

ريو و همکاران [۱] از نظريه کلاسيک تير اويلر-الاستيک براي بررسي

\* نویسنده عهدهدار مکاتبات: h.ramezannejad@iauramsar.ac.ir

دو دسترس شما قرار گرفته است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) دو موافین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) (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 در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس by المان المان المان المان المان الماندگی مردمی (Creative Commons License) من المان الم

با افزایش دما، سرعت جریان بحرانی و فرکانسهای طبیعی افزایش خواهد یافت. همچنین پارامتر غیرمحلی تأثیر نسبتاً کمتری بر فرکانس مرتبه اول دارد و این اثر در مودهای بالاتر افزایش مییابد.

سلطانی و همکاران [۵] پایداری و ارتعاشات نانولولههای کربنی تکلایه حامل سیال لزج را تحت یک بافت نرم زیستی ویسکوالاستیک براساس مدل تير اويلر-برنولي الاستيک غيرمحلي بررسي كردند. اثرات پارامتر غیر محلی، ضریب بستر ویسکوالاستیک برای بررسی فرکانس رزونانس در نظر گرفته شد. کاویانی و میردامادی [۶] با درنظرگرفتن عدد نادسن و شرط مرزی لغزش، مدلی را برای مسائل واکنش سیال-جامد در نانولوله پیشنهاد کردند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش ضریب نادسن، در ابتدا، ویسکوزیته مایع بهطور چشمگیری افزایش مییابد و پسازآن این نرخ رشد کاهش می یابد و یکنواخت می شود. چانگ [۷] مدلی را بر اساس یک تیر برنولى-اويلر الاستيك براى نانولولههاى كربني تكلايه حامل سيال توسعه داد. اثرات تغییر دما، پارامتر غیرمحلی و ضریب بستر الاستیک بر فرکانس ارتعاش نانولوله کربنی تکجداره حامل سیال بهطور عددی و با استفاده روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان میدهد که فرکانس طبيعي و سرعت جريان بحراني به سطح دما بستگي دارد. در حالت دماپايين، افزایش دما باعث افزایش فرکانس طبیعی و سرعت جریان بحرانی می شود، درحالی که در حالت دمابالا با افزایش دما، فرکانس طبیعی و سرعت جریان بحراني كاهش مييابد.

وانگ [۸] مدل تیر اویلر-برنولی را برای محاسبه فرکانس و سرعت بحرانی نانولولههای کربنی تکلایه حامل سیال را با درنظرگرفتن اثر سطح ارائه داد. نتایج نشان میدهد که کشش سطحی فرکانس پایه و سرعت بحرانی را افزایش میدهد. لیانگ و سو [۹] با استفاده از روش گالرکین و بر اساس تئوری الاستیسیته غیرمحلی فرکانسهای طبیعی نانولولههای کربنی تکلایه را محاسبه کردند. اثرات پارامتر غیرمحلی، ویسکوزیته سیال بر فرکانس طبیعی، سرعت جریان بحرانی و پایداری دینامیکی نانولولههای کربنی تکلایه مورد تحلیل قرار گرفت. ژانگ و همکاران [۱۰] روش موج را برای تحلیل ارتعاش نانولوله کربنی حامل سیال معرفی کردند. با این سرعتهای مختلف محاسبه میشوند. ژانگ و مگویید [۱۱] بر اساس سرعتهای مختلف محاسبه میشوند. ژانگ و مگویید [۱۱] بر اساس را با درنظرگرفتن اثر الاستیسیته سطح، فرمول بندی کردند. به دلیل خواص را با درنظرگرفتن اثر الاستیسیته سطح، فرمول بندی کردند. به دلیل خواص

و سرعت بحرانی برای نانو تیر آلومینیوم و باعث افزایش فرکانس و سرعت بحرانی نانو تیر سیلیکون می شود. وانگ و همکارانش [۱۲] بر اساس تئورى الاستيسيته غير محلى تير و با بهكارگيرى روش مربعات ديفرانسيلى برای گسسته سازی معادله دیفرانسیل جزئی اثر میدان مغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج عددی نشان میدهد که با اضافه کردن یک میدان مغناطیسی طولی، رفتارهای دینامیکی فرکانس و سرعت بحرانی بهبودیافته و سرعت بحرانی سیال افزایش می یابد. علاوه بر این، این میدان مغناطیسی می تواند پایداری دینامیکی سیستم را کنترل کند. بهائدینی و همکاران [۱۳, ۱۴] ارتعاشات آزاد و ناپایداری فلاتر در نانولوله های حامل سیال را با توجه به اثر شرایط لغزش و الاستیسیته غیرمحلی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند اثر عدد نادسن و ضرایب میرایی بر مقادیر ویژه اثری قابل توجه نیست. اویسی و همکاران [۱۵] پاسخ ارتعاشی دو نوع سیال مختلف در نانولولههای کربنی تکلایه را با درنظرگرفتن اثر اندازه کوچک نانو سیالات و نانو ساختار مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که عدد نادسن تأثير قابل توجهی بر کاهش سرعت جریان بحرانی دارد. اویسی و قاسمی [۱۶] ارتعاش نانولوله های کربنی تک لایه و انتشار موج طولی و عرضی با استفاده از جریان وابسته به ضریب نادسن و تئوری غیرمحلی ارینگن را تحلیل کردند. صادقی و همکاران [۱۹–۱۷] شرایط پایداری نانولولههای کربنی تکلایه حامل سیال تحت میدان مغناطیسی و دما در فرآیند تحویل داروی ضدسرطان را مورد مطالعه قرار دادند. اثرات میدان مغناطیسی، ضریب سرعت، پارامتر غیرمحلی روی فرکانس و سرعت بحرانی نانولوله های کربنی تک لایه مورد بررسی قرار گرفته است. چنگ و همکاران [۲۰] مطالعه ارتعاشات آزاد نانولولههای هیبریدی حامل سیال متشکل از نانولولههای کربنی و نانولولههای نیترید بور را انجام دادند. حسینی و همکاران [۲۱] فلاتر و ناپایداری نانولوله پیزوالکتریک حامل سیال را براساس نظریه تیر اويلر-برنولى غيرمحلى مورد بررسى قرار دادند. شرط لغزش بين جريان و دیواره نانولوله توسط عدد نادسن مدلسازی شد. لی و وانگ [۲۲] تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و تئوری گرادیان کرنش غیرمحلی را برای مطالعه شرایط ناپایداری سیال حامل نانولوله های لیپیدی به کار بردند. اثرات خواص هندسی و پارامتر غیر محلی برای نانولولههای چربی حامل سیال مختلف مورد بحث قرار گرفت. صدیقی [۲۳] ناپایداری و فلاتر نانولوله کربنی و نیترید بور را در معرض میدان مغناطیسی و دما براساس مدل تیر اویلر-برنولی با درنظرگرفتن ضریب تصحیح سرعت برای شرایط لغزش مختلف بررسی کرد.



شکل ۱. شماتیکی از نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال روی بستر ویسکوالاستیک تحت میدان ترمومغناطیسی

Fig. 1. Schematic of single-walled CNT conveying fluid under viscoelastic foundation subjected to the thermomagnetic field

$$m_{c} \frac{\partial^{2} w(x,t)}{\partial t^{2}} = \frac{\partial^{2} M(x,t)}{\partial x^{2}} + F_{ext}$$

$$M(x,t) - (e_{0}a)^{2} \frac{\partial^{2} M(x,t)}{\partial x^{2}} =$$

$$-EI \frac{\partial^{2} w(x,t)}{\partial x^{2}}$$
(1)

که  $m_c$  مرم نانولوله در واحد طول، (x, t) w جابجایی عرضی  $m_c$  من نانولوله،  $F_{ext}$  نیروی خارجی اعمال شده در واحد طول و (x, t) I نانولوله،  $F_{ext}$  نیروی خارجی اعمال شده به نانولوله شامل ممان اینرسی است. همچنین نیروی خارجی اعمال شده به نانولوله شامل مجموع نیروهای برهمکنش سیال جامد  $F_f(x, t)$ ، نیروی ناشی از تنش پسماند (x, t)، نیروی بستر ویسکوالاستیک  $F_m(x, t)$ ، نیروی ناشی از میدان معادل دمایی  $F_r(x, t)$  و (x, t) نیروی ناشی از میدان مغناطیسی است.

$$F_{ext} = F_{f}(x,t) + F_{\tau}(x,t) + F_{m}(x,t) + F_{T}(x,t) + F_{B}(x,t)$$
(Y)

نیروی برهمکنش سیال-جامد ناشی از حرکت سیال در داخل نانولوله کربنی تک لایه را میتوان به فرم زیر بیان نمود.[۱۶]

بر طبق مراجع مورد مطالعه در بخش اول مقدمه مى توان دريافت كه بیشتر مطالعات انجامشده در زمینه تحلیل پایداری نانولولههای حامل سیال مربوط به محاسبه فرکانس و سرعت بحرانی محدود و تحلیل آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف بر فرکانس و سرعت بحرانی انجام نشدهاست. هدف اصلی و نوآوری تحقیق حاضر، بررسی تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف ازجمله ميدان مغناطيسي، تغييرات دما، طول نانولوله، قطر خارجي و يارامتر غیرمحلی روی سرعت بحرانی و فرکانسهای نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال برای شرایط مرزی استاندارد مختلف است. اثرات میدان ترمومغناطیسی، تنش باقیمانده و اثر الاستیسیته سطح، در مدل سازی غیرمحلی تیر اویلر-برنولی در نظر گرفتهشدهاست. روش گالرکین با تابع شکل مثلثاتی برای شرایط مرزی مختلف شامل ساده-ساده، گیردار-گیردار و گیردار-ساده برای استخراج ماتریس جرم، سفتی و استهلاک سیستمها به کار گرفته شدهاست. فركانسهاى اول تا سوم طبيعى و سرعت بحرانى نانولوله كربنى تكلايه حامل سيال محاسبه شدهاست. شدت مغناطيسي، تغييرات دما، طول نانولوله، یارامترهای غیرمحلی و قطر خارجی نانولوله بهعنوان فاکتورهای ورودی آناليز حساسيت نانولوله كربني تكلايه حامل سيال انتخاب شدهاند.

# ۲- استخراج معادلات حرکت نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال

شکل ۱ شماتیکی از نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال تحت میدان ترمومغناطیسی روی بستر ویسکوالاستیک را نشان میدهد.

بر اساس مدل تیر اویلر برنولی و تئوری غیرمحلی خطی الاستیک، معادله کلی ارتعاشات عرضی تیر تحت بار خارجی عرضی را میتوان به فرم زیر بیان کرد. [۱۸]

$$F_{f}(x,t) = -m_{f}\left(\frac{\partial^{2}w(x,t)}{\partial t^{2}} + v^{2}\frac{\partial^{2}w(x,t)}{\partial x^{2}} + 2v\frac{\partial^{2}w(x,t)}{\partial x\partial t}\right)$$
(\*)

در رابطه (۳)  $m_f$  جرم سیال در واحد طول و V سرعت میانگین سیال بدون شرط لغزش است. بر اساس معادلات کلی یونگ-لاپلاس، نیروی توزیعی عرضی ناشی از درنظرگرفتن تنش پسماند سطح را میتوان به فرم زیر بیان نمود. [۸]

$$F_{\tau}(x,t) = 2\tau_s (d_{out} + d_{in}) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}$$
(\*)

در رابطه (۴)  $\tau_s$  تنش سطحی پسماند،  $d_{in}$  و  $d_{in}$  به ترتیب قطرهای خارجی و داخلی نانولوله تک لایه در نظر گرفته می شوند. نیروی ناشی از بستر ویسکوالاستیک را می توان بر طبق رابطه کلوین-ویت به فرم زیر ارائه نمود [۱۸].

$$F_{m}(x,t) = C_{m} \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + K_{m} w(x,t) \qquad (a)$$

که 
$${}^{}_{m}{}_{m}{}_{m}$$
به ترتیب ضریب میرایی و سفتی بستر ویسکولاستیک  
هستند. نیروی ناشی از میدان دمایی نیز به فرم زیر قابل بیان است [۱۸].

$$F_{T}(x,t) = -\frac{EA}{1-2\upsilon} \alpha_{X} \Delta T \frac{\partial^{2} w(x,t)}{\partial x^{2}} \qquad (\varepsilon)$$

در رابطه ( $\mathcal{P}_x$  ( $\mathcal{P}_x$  فریب انبساط دمایی در راستای محوری،  $\mathcal{O}_x$  فریب پواسون نانولوله و  $\Delta T$  تغییرات دمایی محسوب می شوند. همچنین نیروی ناشی از میدان مغناطیسی نیز به صورت زیر بر اساس روابط ماکسول بیان می شود [۱۸].

$$F_B(x,t) = \frac{1}{\eta} B_0^2 A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}$$
(Y)

در رابطه (۲)  $\eta$  ضریب نفوذپذیری میدان مغناطیسی و  $B_0$  شدت میدان مغناطیسی اعمالی است. با اعمال نیروهای بیان شده در روابط (۳) تا (۲) در معادله (۱)، معادله حرکت نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال روی بستر ویسکوالاستیک تحت میدان ترمومغناطیسی با درنظرگرفتن اثرات تنش پسماند و الاستیسیته سطح را میتوان به فرم زیر بیان نمود.

$$EI * \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + (m_f + m_c) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + m_f v^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + 2m_f v \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \partial t} + C_m \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + K_m w(x,t) - (e_0 a)^2 \left\{ (m_f + m_c) \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial t^2 \partial x^2} + m_f v^2 \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \right\}$$
(A)

$$+2m_{f}v\frac{\partial^{4}w(x,t)}{\partial x^{3}\partial t}+C_{m}\frac{\partial^{3}w(x,t)}{\partial t\partial x^{2}}+K_{m}\frac{\partial^{2}w(x,t)}{\partial x^{2}}\bigg\}$$
$$=0$$

که در رابطه (۸) 
$$e_0 a$$
 پارامتر غیرمحلی و  $EI^*$  سفتی خمشی مؤثر با  
در نظر گرفتن الاستیسیته سطح است که به فرم زیر قابل بیان است.

$$EI* = \frac{\pi E (d_{out}^4 - d_{in}^4)}{64} + \frac{\pi E_s (d_{out}^3 + d_{in}^3)}{8}$$
(9)

که در رابطه (۹)  $E_s$  مدول الاستیک سطح است. با تولید پارامترها و متغیرهای بی بعد زیر

$$[M] \{ \Lambda_i''(\tau) \} + [C] \{ \Lambda_i'(\tau) \} + [K] \{ \Lambda_i(\tau) \} = 0 \qquad (11)$$

$$arGamma( au. \xi) = \sum_{i=1}^N arLambda_i( au) arphi_i( au)$$
 هرگاه تابع شکل را به فرم کلی  $[arLambda_i( au) arphi_i( au)]$ به فرم زیر هستند.  
در نظر بگیریم عناصر ماتریسهای  $[M], [C], [K]$ به فرم زیر هستند.

$$M_{ij} = \int_0^1 \left( \varphi_i\left(\xi\right) - \mu \frac{d^2 \varphi_i\left(\xi\right)}{d\xi^2} \right) \varphi_j\left(\xi\right) d\xi \qquad (17)$$

$$C_{ij} = \int_0^1 \left( 2\nu \sqrt{\beta} \frac{d\varphi_i(\xi)}{d\xi} + \alpha_c \varphi_i(\xi) \right)$$
(17)

$$-\mu\left(2\nu\sqrt{\beta}\frac{d^{3}\varphi_{i}\left(\xi\right)}{d\xi^{3}}+\alpha_{c}\frac{d^{2}\varphi_{i}\left(\xi\right)}{d\xi^{2}}\right)\right)\varphi_{j}\left(\xi\right)d\xi$$

$$K_{ij} = \int_0^1 \left( \frac{d^4 \varphi_i(\xi)}{d\xi^4} + v^2 \frac{d^2 \varphi_i(\xi)}{d\xi^2} + \alpha_K \varphi_i(\xi) \right)$$
(14)

$$+\alpha_{F}\frac{d^{2}\varphi_{i}\left(\xi\right)}{d\xi^{2}}\varphi_{j}\left(\xi\right)d\xi$$

$$-\int_{0}^{1}\mu\left(\nu^{2}\frac{d^{4}\varphi_{i}\left(\xi\right)}{d\xi^{4}}+\alpha_{K}\frac{d^{2}\varphi_{i}\left(\xi\right)}{d\xi^{2}}+\alpha_{F}\frac{d^{4}\varphi_{i}\left(\xi\right)}{d\xi^{4}}\right)\varphi_{j}\left(\xi\right)d\xi$$

با توجه به روابط (۱۲) تا (۱۴) که به ترتیب عناصر ماتریسهای جرم، استهلاک و سفتی را تولید میکنند با استفاده از روش عددی مقادیر ویژه متناظر محاسبه میشود. دقت جواب بهدستآمده به تعداد جملات درنظرگرفته با بهکارگیری توابع شکل مثلثاتی ارائهشده در جدول ۱ وابسته است. با تولید ماتریسهای جرم، سفتی و استهلاک، مقادیر ویژه شامل فرکانسهای طبیعی اول تا سوم به فرم کلی  $(\omega) + i \operatorname{Im}(\omega) = \omega$ استخراج میشود. مقدار موهومی  $\omega$  متناظر با فرکانس طبیعی سیستم و مقدار حقیقی آن معیاری برای ناپایداری سیستم است. بهعبارتدیگر با تغییر مقدار حقیقی از مقادیر منفی به مثبت به همراه بخش موهومی صفر، نانولوله مقدار حقیقی از مقادیر منفی به مثبت به همراه بخش موهومی صفر، نانولوله

$$\Gamma(x,t) = \frac{w(x,t)}{L} \cdot \xi = \frac{x}{L} \cdot \tau =$$

$$\frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI^*}{m_f + m_c}} \cdot v = VL \sqrt{\frac{m_f}{EI^*}} \cdot \mu = \left(\frac{e_0 a}{L}\right)^2$$

$$\alpha_c = C_m \frac{L^2}{\sqrt{EI^*(m_f + m_c)}} \cdot \alpha_K =$$

$$K_m \frac{L^4}{EI^*} \alpha_F = -\frac{EA}{1 - 2\nu} \alpha_X \Delta T +$$

$$2\tau_s (d_{in} + d_{out}) + \frac{1}{\eta} B_0^2 A$$

معادله حرکت نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال به فرم بیبعد زیر استخراج میشود.

$$\frac{\partial^{4}\Gamma}{\partial\xi^{4}} + \frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\tau^{2}} + v^{2}\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\xi^{2}} + 2v\sqrt{\beta}\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\xi\partial\tau} + \alpha_{c}\frac{\partial\Gamma}{\partial\tau} + \alpha_{K}\Gamma + \alpha_{F}\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\xi^{2}} - \mu\left\{\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\tau^{2}\partial\xi^{2}} + v^{2}\frac{\partial^{4}\Gamma}{\partial\xi^{4}} + 2v\sqrt{\beta}\frac{\partial^{4}\Gamma}{\partial\tau\partial\xi^{3}}\right\}$$
(1.)

$$+\alpha_{c}\frac{\partial\Gamma}{\partial\tau\partial\xi^{2}}+\alpha_{K}\frac{\partial^{2}\Gamma}{\partial\xi^{2}}+\alpha_{F}\frac{\partial^{4}\Gamma}{\partial\xi^{4}}\bigg\}=0$$

برای حل معادله (۱۰) و کاهش آن از معادلات مشتقات جزئی به معادلات مشتق معمولی از روش گالرکین به همراه توابع شکل مثلثاتی استفاده شدهاست. این توابع شکل مورد استفاده متناظر با شرایط مرزی استاندارد شامل تکیهگاه ساده–ساده، گیردار–ساده و گیردار–گیردار در دو انتهای نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال در نظر گرفته شدهاست. برای تکیهگاه ساده جابجایی و گشتاور صفر و برای تکیهگاه گیردار جابجایی و شیب صفر است. این توابع شکل برای شرایط مرزی مختلف در جدول ۱ آورده شدهاست.

با اعمال توابع شکل ارائهشده در جدول یک برای شرایط مرزی مختلف و اعمال روش گالرکین میتوان معادله حرکت مشتق زمانی سیستم را با ماتریسهای جرم، سفتی و استهلاک به فرم زیر استخراج نمود. جدول ۱. توابع شکل مثلثاتی برای شرایط مرزی مختلف نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال

Table 1. Trig	onometric shape	functions for d	lifferent boundary	conditions of sing	le-walled CNT (	conveying fluid
				0		

شرايط تكيهگاهى	تابع شکل	شرایط مرزی
$w(0,t) = w(L,t) = 0$ $\frac{\partial^2 w(0,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w(L,t)}{\partial x^2} = 0$	$\Gamma(\tau.\xi) = \sum_{i=1}^{N} \Lambda_i(\tau) \sin(i \pi \xi)$	ساده–ساده
$w(0,t) = w(L,t) = 0$ $\frac{\partial w(0,t)}{\partial x} = 0, \frac{\partial w(L,t)}{\partial x} = 0$	$\Gamma(\tau.\xi) = \sum_{i=1}^{N} \Lambda_i(\tau) \sin(\pi\xi) \sin(i\pi\xi)$	گیردار-گیردار
$w(0,t) = w(L,t) = 0$ $\frac{\partial w(0,t)}{\partial x} = 0, \frac{\partial w(L,t)}{\partial x} = 0$	$\Gamma(\tau.\xi) = \sum_{i=1}^{N} \Lambda_i(\tau) \sin\left(\frac{\pi\xi}{2}\right) \sin\left(i\pi\xi\right)$	گیردار-سادہ

خواهد گرفت. سرعت سیال متناظر با آستانه ناپایداری را بهعنوان سرعت بحرانی سیال در نظر می گیرند.

## ۳- تحليل نتايج

نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال دارای خواص هندسی قطر خارجی ۷ نانومتر، ضخامت ۳.۳۴ نانومتر و طول بیست برابر قطر خارجی است. همچنین دارای ویژگیهای مکانیکی بهصورت مدول الاستیسیته ۱ تراپاسکال، چگالی ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ، ضریب پواسون ۳.۰۰ چگالی سیال ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و پارامتر غیرمحلی ۲نانومتر است. ضریب نفوذ ۱.۱ میکرو معکوس کلوین برای حالت دمابالا و ۲/۱ میکرو معکوس کلوین برای حالت دماپایین در نظر گرفته شدهاست. ضریب الاستیک بستر ویسکوالاستیک برابر ۱۰ مگا نیوتن بر متر مربع، ضریب استهلاک بستر میدان مغناطیسی ۲۰۱۵ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته میدان مغناطیسی ۲۰۱۵ ۱۹ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته برای حالت ۲۰۱۶ ۱۱۸ نیوتن بر متر و ۲/۵۳ نیوتن بر متر و مربع مخریب نفوذپذیری مرادی حالت ۲۰۱۶ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح برای حالت ۲۰۱۶ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح برای حالت ۲۰۱۶ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح برای حالت ۲۰۱۶ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح برای حالت ۲۰۱۶ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح برای حالت ۲۰۱۶ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح مرای حالت ۲۰۱۶ و ۲۰۱۶ نیوتن بر متر و ۲/۵۲۵۳ میوتن بر متر در نظر

کریستالی ماده مربوط است که با درنظر گرفتن اثر الاستیسیته سطح و تنش پسماند سطحی میتوانند ضرایب مختلف داشته باشند. لازم به ذکر است که خصوصیات سطح به شدت به جهت گیری بلوری لایه های سطحی بستگی دارند.

در ابتدا به منظور اعتبار سنجی، نتایج حاصل از تحقیق حاضر با مرجع [۸] مطابق شکل ۲ مقایسه شده است. در این مرجع مدول یانگ ۷۰ گیگاپاسکال، چگالی نانولوله ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، قطر داخلی نانولوله ۲۰ نانومتر و تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح برای دو حالت {۱۱۱} ۰۱۸۰/ نیوتن بر متر و ۱۸۸۲/۵ نیوتن بر متر چگالی سیال ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و شرایط مرزی مورد تحلیل در این مرجع به صورت ساده – ساده در دو انتها با اثر سطح حالت {۱۱۱} در نظر گرفته شده است. با مشاهده نمودارهای ارائه شده در شکل ۲ میتوان دریافت که نتایج حاصل از به کارگیری روش ارائه شده در مرجع [۸] تطابق بسیار خوبی دارد. همچنین از مطالعه منحنیهای استفاده در مرجع [۸] تطابق بسیار خوبی دارد. همچنین از مطالعه منحنیهای نتیجه کاهش مقادیر فرکانس طبیعی و سرعت بحرانی سیال دارد. این روند بیان می کند با درنظرگرفتن مقدار کمینه ضخامت افزایش سطح پایداری سیستم حاصل خواهد شد.

شکل ۳ مقایسه نتایج تغییرات سرعت بحرانی سیال را برحسب تغییرات



شکل ۲. مقایسه و اعتبارسنجی نتایج تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال در نانولوله کربنی تکلایه تحقیق حاضر با مرجع [۸] برای نسبت طول به قطر خارجی ۱۰

Fig. 2. Comparison and verification natural frequency changes to the thickness of CNT present work with Ref [8] aspect ratio 10



شکل ۳. منحنی دیسپرژن سرعت فاز لوله فولادی با قطر ۲۲۰ میلیمتر و ضخامت ٤/٨ میلیمتر

Fig. 3. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm



شکل ۴. اثر سطح بر فرکانس بیبعد نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال تحت محیط ترمومغناطیسی در مود ۱ تا ۳ برای شرایط مرزی ساده-ساده Fig. 4. The surface effect on the non-dimensional frequency at mode 1 to 3 of single-walled CNT conveying fluid with S-S boundary condition

### جدول ۲. سه فرکانس بیبعد اول و سرعت بحرانی سیال نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال برای شرایط مرزی مختلف

Table 2. Non-dimensional three lowest frequency and critical fluid velocity of single-walled CNT for different boundary conditions

				انی سیال	سرعت بحر	ای طبیعی و	فر کانسھ					
	بدون اثر سطح			{\}	اثر سطح {۱۰۰}			اثر سطح {۱۱۱}				
فركانس	فر کانس	فركانس	سرعت	فركانس	فركانس	فركانس	سرعت	فركانس	فركانس	فركانس	سرعت	
اول	دوم	سوم	بحراني	اول	دوم	سوم	بحراني	اول	دوم	سوم	بحراني	
٨/٤١	۳۲/۳۶	۶٣/۴	۲/۷۱	۱۱/۸۷	۳۵/۹۳	۶۷/۰۲	۳/۸۱	۱۳/۸۷	۳٩/۴۵	٧٢/٢٢	4/41	ساده– ساده
13/22	۴۰/۸۱	۷۳/۷۲	٣/٩١	۱۶/۵۸	44/•8	<b>۲۲/۱۹</b>	۴/۷۱	۱۸/۶۴	۴۷/۸۵	<b>λ</b> γ/λγ	۵/۳۱	گیردار-ساده
20/65	۵•/•۵	84/42	۵/۲۱	22/29	۵۳/۰۹	۸۸/۱۱	$\Delta/\Lambda$ )	۲۴/۸۸	۵۷/۳۳	۹۴/۳۳	۶/۳۱	گیردار-گیردار

# افزایش سفتی سیستم و بهتبع آن افزایش سطح پایداری را با افزایش سرعت بحراني سيال نشان ميدهد. تطابق بسيار خوبي بين نتايج تحقيق حاضر و مرجع [٨] مشاهده می شود.

اثر الاستیسیته سطح و تنش پسماند بر منحنیهای فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال برای شرایط مرزی ساده-ساده، ساده-گیردار و گیردار- ضخامت نانولوله كربني حامل سيال به ازاى نسبت طول به قطر خارجي مختلف با درنظر گرفتن اثر سطح {۱۱۱} در تحقیق حاضر و مرجع [۸] نشان مىدهد. بر اساس منحنىهاى ارائهشده مىتوان اثر قابل توجه الاستيسته سطح را بر تغییرات سرعت بحرانی مشاهده نمود. برای ضخامتهای پایین تر و نسبت طول به قطر بالاتر اثر الاستيسته سطح بيشتر بوده كه موجب



شکل ۵. اثر سطح بر فرکانس بیبعد نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال تحت محیط ترمومغناطیسی در مود ۱ تا ۳ برای شرایط مرزی گیردار-ساده

Fig. 5. The surface effect on the non-dimensional frequency at mode 1 to 3 of single-walled CNT conveying fluid with C-S boundary condition



شکل ۶. اثر سطح بر فرکانس بیبعد نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال تحت محیط ترمومغناطیسی در مود ۱ تا ۳ برای شرایط مرزی گیردار-ساده

Fig. 6. The surface effect on the non-dimensional frequency at mode 1 to 3 of single-walled CNT conveying fluid with C-C boundary condition

## جدول ۳. ضرایب معادله رگرسیون محاسبهشده با روش آنالیز پاسخ سطح برای سرعت بحرانی سیال و فرکانس طبیعی نانولوله کربنی حامل سیال در محیط ترمومغناطیسی برای شرط مرزی گیردار

	دمابالا	حالت ه		حالت دماپايين				
سرعت	فركانس	فركانس	فركانس	سرعت	فركانس	فركانس	فركانس	پارامترها
بحراني	اول	دوم	سوم	بحراني	اول	دوم	سوم	
۶/۱۵۲	78/84	۶۸/۲۴	१८४/४	λ/۲٢	21/18	۶۹/۰۹	۱۳۰/۹۲	ضريب ثابت
-•/•••١۶	•/••**	•/•• <b>\</b> •	•/• ١•٢	•/•1•74	•/•• ٧٣	• 1 • 1	۰/۰۱۱۵	ضريب مغناطيسي
-•/••Y&1	-•/• <b>۲</b> ٧٣۶	-•/•۴•۴	-•/• 480	•/• ١٢١٧	•/• ٣٧۶۶	•/۵۶۴	•/•۶۵٨	دما
•/•١٩١٩	۰/۰۵۹۵۸	۰/۰ <b>۸</b> ۷۸۹	۰/۱۰۲۵	•/•7809	۰/۰۹۰۳۸	•/13847	۰/۱۶۰۵	طول
-•/١١٣	-1/849	-1/988	-7/748	-•/YY•	۲/۱۱۱	-٣/١٨٠	٣/٧٠٢	قطرخارجى
•/• ٣٧	-•/••Y	-•/١	-•/۴۴	•/•88	•/••۴	-•/• <b>\</b>	-•/۴۲	ضريب غيرمحلى
•/•••١۵٩	•/•••\$\$*	•/•••٩٨٧	•/••))	•/•••١٧٢	•/•••\$98	•/•••٩٢٧	•/••))	ضریب مغناطیسی در ضریب مغناطیسی
-•/••••7٣	-•/••••١٣	-•/•••• <b>٩</b>	-•/•••• <b>۵</b>	-•/••• <b>\</b> \	-•/••••	-•/•••• <b>\</b> Y	-•/••••))	دما در دما
•/••••١٧	•/••••\$٣	•/•••١•١	•/•••118	•/••••۲٨	• / • • • ١	۰/۰۰۰۱۸۶	•/•••٢٣٧	طول در طول
•/• ١٩٢	•/\•٧٣	•/1818	•/١٨٨١	•/•۶८٩	٠/١٩٧٨	•/٣٢•٩	•/٣٩•٢	قطر خارجی در قطر خارجی
-•/• YYY	•/•• ١	-•/• <b>٣</b> ٢	-•/ <b>\Y</b> A	•/•٢•	•/••۴	_•/•٣٣	-•/ <b>\Y</b> \	ضریب غیرمحلی در ضریب غیرمحلی
-•/••••٢٣	•/••••۵١	•/••••۴١	•/••••	•/••••١٢	-•/••• <b>۵</b> ۱	-•/••••۴٧	-•/••••٣۴	ضریب مغناطیسی در دما
•/•••١۴•	•/•••٣۴٣	•/•••\$\$\$	•/•••٧٧٩	•/••••	•/•••٣۴٩	•/•••۵۸۵	•/•••٧٢٢	ضریب مغناطیسی در طول
-•/••٢٣٣٢	-•/•• <b>٩</b> ٣۶	-•/•1440	-•/• \V•۴	-•/•• ٢٧٢١	-•/••V49	-•/• 1787	-•/• 10Y•	ضریب مغناطیسی در دما
•/••	•/••••	•/•••))	•/•••٢١	-•/•• <b>١</b> ١٧	•/••••۴	•/••• • •	•/•••١٩	ضریب مغناطیسی در ضریب غیرمحلی
-•/••••۴٧	-•/••• <b>۲</b> ۵•	_•/••• <b>~</b> %%	-•/•••۴۴٩	٠/•••٩٨	•/•••٢٩٣	•/•••۴٩•	•/•••۶•۵	دما در طول
•/••١٣٩٩	•/••۵۳۹	•/•• • • • • • • • • • • • • • • • • •	۰/۰۰۹۸۱	•/••٢•٩٩	-•/••\$7\$\$	-•/• \• <b>\</b> V	-•/•١٣١۵	دما در قطر خارجی
•/••	-•/••• <b>*</b>	-•/•••V	-•/•••١٢	•/•••٧•	•/••••	•/••••	•/•••18	دما در ضریب غیرمحلی
-•/•• <b>٢</b> ١٧٧	-•/••۶۲۸۱	-•/•• <b>٩</b> ۶٧۶	-•/• ) ) ٣٨٧	-•/••٣٢۶۵	-•/•١١١٠۴	-•/• 188• 1	-•/• <b>٢٣</b> ••	طول در قطر خارجی
• / • •	•/••••	•/•••۵٨	•/••٢۵•	•/•••\$99	•/••••	•/•••۵۶	•/••748	طول در ضریب غیرمحلی
•/••	-•/•••۶	-•/••Y	-•/••٣	-•/•٢٣٣	-•/••١٢	-•/••٣	-•/••۶	قطر خارجی در ضریب غیرمحلی

# Table 3. The coefficient of regression equation of critical fluid velocity and natural frequency of single-walledCNT conveying fluid under thermomagnetic field for C-C boundary conditions with response surface method

گیردار به ترتیب در شکلهای ۴، ۵ و ۶ نمایش داده شدهاست. مقادیر میدان مغناطیسی ۲۰ تسلا و تغییر دما ۳۰ درجه کلوین در نظر گرفته شدهاست. اثر قابلتوجه درنظرگرفتن الاستیسیته سطح بر افزایش سطح پایداری و افزایش فرکانسهای طبیعی نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال برای هر سه شرط مرزی مورد بررسی کاملاً مشهود است. این رفتار بیان میکند اثر سطح موجب افزایش سفتی سیستم داشته و اثری مثبت بر پایداری سیستم دارد. همچنین جدول ۲ نشاندهنده مقادیر سرعت بحرانی و فرکانسهای طبیعی سیستم در سه مود اول برای سه شرط مرزی مورد مطالعه است. مطالعه مقادیر ارائهشده بیان میکند که شرط مرزی ساده–ساده کمترین سطح پایداری و کمترین مقادیر فرکانس طبیعی را نسبت به شرایط مرزی ساده–گیردار و گیردار–گیردار دارد. این امر به دلیل ماهیت تکیهگاه گیردار در افزایش سفتی سیستم است به همین دلیل نانولوله کربنی با تکیهگاه گیردار–گیردار سطح پایداری بالاتری نسبت به تکیهگاه گیردار–ساده دارد.

برای تحلیل آنالیز حساسیت، میدان مغناطیسی در بازه صفر تا ۶۰ تسلا ، تغییرات دما در بازه صفر تا ۱۰۰ درجه کلوین ، طول نانولوله کربنی در بازه ۱۰۰ تا ۲۵۰ نانومتر پارامتر غیرمحلی در بازه صفر تا ۱ نانومتر و قطر خارجی نانولوله کربنی در بازه ۷ تا ۱۰ نانومتر بهعنوان فاکتورهای ورودی در نظر گرفته شدهاند. بعد از انتخاب بازه فاکتورهای ورودی، طراحی تست انجام و دسته مقادیر فاکتورهای ورودی تولید شده و بر اساس آنها مقادیر فرکانسهای طبیعی در سه مود اول و سرعت بحرانی سیال برای شرط از نرمافزار مینی تب به تحلیل حساسیت پرداخته شدهاست. برای مقایسه اثر هریک از فاکتورهای ورودی و تعیین کیفی و کمی میزان اثر آنها در مقایسه با یکدیگر، این فاکتورها نرمالیزه شده و تغییرات سرعت بحرانی سیال و فرکانسهای طبیعی سیستم برحسب فاکتورهای نرمالیزه شده در یک شکل فرکانسهای اول تا سوم نانولوله کربنی در جدول ۳ ارائه شدهاست.

شکلهای ۷ و ۸ برای تحلیل و آنالیز حساسیت سرعت بحرانی سیال و فرکانسهای طبیعی اول تا سوم نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال برای دو وضعیت دمابالا و دماپایین با درنظرگرفتن اثر سطح استخراج شدهاست. مطابق منحنیهای ارائهشده در شکل ۷ میتوان دریافت که فاکتورهای طول نانولوله کربنی و شدت میدان مغناطیسی دارای اثر مثبت و تغییرات دما و قطر خارجی نانولوله کربنی دارای اثر منفی هستند درحالی که پارامتر غیرمحلی بر تغییرات سرعت بحرانی سیال بی اثر است. همچنین اثرات طول، شدت میدان

مغناطیسی و قطر خارجی نانولوله کربنی غیرخطی بوده و اثر تغییرات دما تقريباً خطى است. افزايش ميدان مغناطيسي بهطور مستقيم موجب افزايش سفتی و افزایش دما در حالات دمابالا موجب کاهش سفتی سیستم می شود که این دو روند موجب افزایش و کاهش سطح پایداری نانولوله کربنی حامل سیال می شوند. همچنین روند افزایشی و کاهشی فرکانس طبیعی در سه مود برحسب تغییرات میدان مغناطیسی و تغییرات دما نیز به دلیل افزایش و کاهش سفتی سیستم برحسب این دو فاکتور است. همچنین با افزایش طول و كاهش قطر نانولوله كربنى حامل سيال اثر الاستيسته سطح بر افزايش سفتى سیستم بیشتر شده که این امر موجب افزایش سرعت بحرانی سیال با افزایش طول نانولوله و کاهش قطر آن می شود. این روند در منحنی های شکل ۳ نیز قابل مشاهده است. علاوه بر این از بین فاکتورهای ورودی در بازه مقادیر منتخب طول نانولوله کربنی بالاترین سطح اثرگذاری را بر تغییرات سرعت بحرانی سیال دارد. مطالعه شکل ۷ نیز بیان میکند که میزان اثرگذاری فاکتورهای ورودی بر فرکانسهای اول تا سوم نیز مشابه اثر آنها بر سرعت بحرانی سیال است با این تفاوت که با افزایش شکل مود اثر پارامتر غیرمحلی بهتدریج به فرم غیرخطی در جهت کاهش فرکانس ظاهر می شود. این نوع رفتار برای فرکانس سوم نانولوله کربنی مشهود ولی در مقایسه با حساسیت دیگر فاکتورهای ورودی قابل صرفنظر است. با توجه به منحنیهای آنالیز حساسیت ارائه شده در شکل ۸ برای حالت دماپایین و مقایسه آن با حالت دمابالا مىتوان دريافت كه تغييرات دما براى حالت دماپايين برخلاف دمابالا اثری خطی مثبت بر تغییرات سرعت سیال و فرکانسهای بحرانی دارد. همچنین میزان اثرگذاری تغییرات دما در حالت دمابالا نسبت بهشدت میدان مغناطیسی بیشتر درحالی که برای حالت دماپایین این ردهبندی برعکس است.

## ۴- نتیجهگیری

در این مقاله بر اساس مدل تیر غیرمحلی اویلر برنولی به تحلیل آنالیز حساسیت فرکانسی و سرعت بحرانی سیال نانولوله کربنی تکلایه حامل سیال روی بستر ویسکوالاستیک پرداخته شدهاست. در مدلسازی اثرات تنش پسماند و الاستیسیته سطح، میدان ترمومغناطیسی برای استخراج معادلات حرکت سیستم در نظر گرفته شدهاست. روش گالرکین با توابع شکل مثلثاتی متناظر با شرایط مرزی استاندارد ساده-ساده، گیردار-ساده و گیردار-گیردار برای استخراج ماتریسهای جرم، سفتی و استهلاک مورد استفاده قرار گرفته شدهاست. شدی و استهلاک مورد نانولوله، قطر خارجی نانولوله و پارامتر غیرمحلی بهعنوان فاکتورهای ورودی



شکل ۷. آنالیز حساسیت سرعت بیبعد بحرانی سیال و فرکانس طبیعی در مود ۱ تا ۳ نانولوله کربنی حامل سیال در محیط ترمومغناطیسی برحسب فاکتورهای ورودی نرمالیزه برای شرط مرزی گیردار-گیردار در حالت دمابالا

Fig. 7. Sensitivity analysis of non-dimensional critical fluid velocity and frequency at mode 1 to 3 with normalized of factors for C-C boundary conditions in the case of high temperature



شکل ۸. آنالیز حساسیت سرعت بیبعد بحرانی سیال و فرکانس طبیعی در مود ۱ تا ۳ نانولوله کربنی حامل سیال در محیط ترمومغناطیسی برحسب فاکتورهای ورودی نرمالیزه برای شرط مرزی گیردار –گیردار در حالت دماپایین

Fig. 8. Sensitivity analysis of non-dimensional critical fluid velocity and frequency at mode 1 to 3 with normalized of factors for C-C boundary conditions in the case of low temperature

برای آنالیز حساسیت بر فرکانسهای بحرانی و سرعت بحرانی سیال انتخاب شدهاند. با طراحی تست در بازهای مشخص از فاکتورهای ورودی توابع مورد بررسی محاسبه و تابع رگرسیون متناظر استخراج شد. با نرمالیزه کردن فاکتورهای ورودی امکان مقایسه کیفی و کمی اثر آنها بر توابع مورد بررسی فراهم شده است. مهمترین نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

درنظرگرفتن اثر الاستیسیته سطح برای دو حالات {۱۱۱} و
 درنظرگرفتن اثر الاستیسیته سطح برای دو حالات {۱۱۱} و
 موجب افزایش سفتی سیستم و به بع افزایش پایداری نانولوله
 کربنی تک لایه حامل سیال شده و سرعت بحرانی سیال که معیاری برای
 آستانه ناپایداری سیستم است به همراه فرکانسهای طبیعی آن افزایش
 مییابد.

پایداری نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال با شرایط مرزی
 گیردار – گیردار به دلیل بالاترین مقدار ماتریس سفتی بیشترین سطح پایداری
 را در مقایسه با شرایط مرزی گیردار – ساده و ساده – ساده دارد.

 طول نانولوله و شدت میدان مغناطیسی دارای اثر مثبت و تغییرات دما در حالت دمابالا و قطر نانولوله دارای اثری منفی بر تغییرات سرعت بحرانی سیال و فرکانسهای طبیعی نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال دارد. اثر تغییرات دما در حالت دماپایین مثبت است.

اثرات طول نانولوله، شدت میدان مغناطیسی و قطر نانولوله
 بر تغییرات سرعت بحرانی سیال و فرکانسهای طبیعی غیرخطی بوده
 درحالی که اثر تغییرات دما خطی است.

 پارامتر غیرمحلی بر سرعت بحرانی سیال و فرکانسهای اول و دوم تقریباً بدون حساسیت قابل توجهی است ولی با افزایش شکل مود اثر منفی پارامتر غیرمحلی در نمودارهای آنالیز حساسیت فرکانس طبیعی مود سوم قابل مشاهده است.

 سرعت بحرانی سیال و فرکانسهای طبیعی بیشترین حساسیت را نسبت به طول نانولوله دارند و شدت میدان مغناطیسی، تغییرات دما در حالت دمابالا، قطر نانولوله و پارامتر غیرمحلی به ترتیب در ردههای بعدی بالاترین علائم انگلیسی

$$(m^2)$$
 مساحت،  $(m^2)$  مساحت،  $B_0$   
شدت میدان مغناطیسی (T)  
 $B_0$  شدت میدان مغناطیسی (T)  
ماتریس استهلاک  
محریب استهلاک بستر ویسکوالاستیک (N.s/m)  
قطر داخلی نانولوله (nm)  
قطر خارجی نانولوله (N/m<sup>2</sup>)  
مدول الاستیسیته،  $(N/m^2)$ 

مدول الاستيسيته سطح (N/m)	$E_{s}$
ضریب غیرموضعی (nm)	$e_0 a$
نیروی تحریک (N)	$F_{ext}$
نیروی برهمکنش سیال-جامد (N)	$F_{f}(x,t)$
نیروی تنش پسماند سطح (N)	$F_{\tau}(x,t)$
نیروی بستر ویسکوالاستیک (N)	$F_m(x,t)$
نیروی میدان دمایی (N)	$F_T(x,t)$
نیروی میدان مغناطیسی (N)	$F_{B}(x,t)$
شمارنده توابع شكل	i
ممان اینرسی (m <sup>4</sup> )	Ι
ماتریس سفتی	k
ضريب الاستيك بستر ويسكوالاستيك (N/m)	$k_m$
طول نانولوله کربنی (nm)	L
جرم واحد طول نانولوله کربنی (Kg/m)	$m_c$
جرم واحد طول سيال (Kg/m)	$m_{f}$
گشتاور (Nm)	M(x,t)
ماتریس جرم	M
شمارنده توابع شكل	N
زمان (S)	t
سرعت سیال (m/s)	V
سرعت بی بعد سیال	v
جابجایی عرضی نانولوله کربنی (m)	w(x,t)
مختصات در راستای محوری	x
	علائم يونانى
ضریب نفوذ دمایی (1/K)	$a_{x}$
پارامتر بیبعد ضریب میرایی	$a_{c}$
پارامتر بیبعد نیرو	$a_{F}$
پارامتر بيبعد ضريب الاستيک	$a_k$
پارامتر بیبعد جابجایی عرضی	$\Gamma(\tau.\xi)$
تغييرات دما	$\Delta T$
ضريب نفوذپذيري ميدان مغناطيسي	$\eta$
دامنه بىبعد جابجايى عرضي	$\Lambda_{_{i}}\left(  au ight)$
1	
پارامتر بیبعد عیرمحلی	μ
پارامتر بیبعد عیرمحلی ضریب پواسون	$\mu$ v
پارامتر بیبعد عیرمحلی ضریب پواسون پارامتر بیبعد مختصات محوری	μ ν ξ
پارامتر بیبعد عیرمحلی ضریب پواسون پارامتر بیبعد مختصات محوری پارامتر بیبعد زمان	μ ν ζ τ
پارامتر بیبعد عیرمحلی ضریب پواسون پارامتر بیبعد مختصات محوری پارامتر بیبعد زمان تنش پسماند سطحی (N/m)	$\mu$ $ v$ $\xi$ $ au$ $ au$ $ au$ $ au$

instability of a fluid-conveying single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium based on nonlocal elasticity theory, Applied Mathematical Modelling, 36(5) (2012) 1964-1973.

- [8] L. Wang, Vibration analysis of fluid-conveying nanotubes with consideration of surface effects, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 43(1) (2010) 437-439.
- [9] F. Liang, Y. Su, Stability analysis of a single-walled carbon nanotube conveying pulsating and viscous fluid with nonlocal effect, Applied Mathematical Modelling, 37(10-11) (2013) 6821-6828.
- [10] Z. Zhang, Y. Liu, B. Li, Free vibration analysis of fluid-conveying carbon nanotube via wave method, Acta Mechanica Solida Sinica, 27(6) (2014) 626-634.
- [11] J. Zhang, S.A. Meguid, Effect of surface energy on the dynamic response and instability of fluidconveying nanobeams, European Journal of Mechanics - A/Solids, 58 (2016) 1-9.
- [12] L. Wang, Y. Hong, H. Dai, Q. Ni, Natural Frequency and Stability Tuning of Cantilevered CNTs Conveying Fluid in Magnetic Field, Acta Mechanica Solida Sinica, 29(6) (2016) 567-576.
- [13] R. Bahaadini, M. Hosseini, Effects of nonlocal elasticity and slip condition on vibration and stability analysis of viscoelastic cantilever carbon nanotubes conveying fluid, Computational Materials Science, 114 (2016) 151-159.
- [14] R. Bahaadini, M. Hosseini, M. Amiri, Dynamic stability of viscoelastic nanotubes conveying pulsating magnetic nanoflow under magnetic field, Engineering with Computers, (2020).
- [15] S. Oveissi, S.A. Eftekhari, D. Toghraie, Longitudinal vibration and instabilities of carbon nanotubes conveying fluid considering size effects of nanoflow and nanostructure, Physica E: Lowdimensional Systems and Nanostructures, 83 (2016) 164-173.

حساسیت قرار دارند. جایگاه تغییرات دما و شدت میدان مغناطیسی در حالت دماپایین ازلحاظ میزان حساسیت نسبت به حالت دمابالا عوض می شود.

# تشکر و قدردانی:

نگارندگان بر خود لازم میدانند از حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات و واحد رامسر در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی نمایند.

## ٥- فهرست علائم

# منابع

- J. Yoon, C.Q. Ru, A. Mioduchowski, Flow-induced flutter instability of cantilever carbon nanotubes, International Journal of Solids and Structures, 43(11-12) (2006) 3337-3349.
- [2] H.L. Lee, W.J. Chang, Surface effects on frequency analysis of nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory, Journal of Applied Physics, 108(9) (2010).
- [3] H.L. Lee, W.J. Chang, Vibration analysis of a viscous-fluid-conveying single-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 41(4) (2009) 529-532.
- [4] Y. Zhen, B. Fang, Thermal–mechanical and nonlocal elastic vibration of single-walled carbon nanotubes conveying fluid, Computational Materials Science, 49(2) (2010) 276-282.
- [5] P. Soltani, M.M. Taherian, A. Farshidianfar, Vibration and instability of a viscous-fluid-conveying singlewalled carbon nanotube embedded in a visco-elastic medium, Journal of Physics D: Applied Physics, 43(42) (2010).
- [6] F. Kaviani, H.R. Mirdamadi, Influence of Knudsen number on fluid viscosity for analysis of divergence in fluid conveying nano-tubes, Computational Materials Science, 61 (2012) 270-277.
- [7] T.P. Chang, Thermal-mechanical vibration and

a longitudinal magnetic field, Physics Letters A, 381(35) (2017) 2898-2905.

- [19] M. Sadeghi-Goughari, S. Jeon, H.J. Kwon, Flutter instability of cantilevered carbon nanotubes caused by magnetic fluid flow subjected to a longitudinal magnetic field, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 98 (2018) 184-190.
- [20] Q. Cheng, Y. Liu, G. Wang, H. Liu, M. Jin, R. Li, Free vibration of a fluid-conveying nanotube constructed by carbon nanotube and boron nitride nanotube, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 109 (2019) 183-190.
- [21] R. Bahaadini, M. Hosseini, B. Jamali, Flutter and divergence instability of supported piezoelectric nanotubes conveying fluid, Physica B: Condensed Matter, 529 (2018) 57-65.
- [22] Z.H. Li, Y.Q. Wang, Vibration and stability analysis of lipid nanotubes conveying fluid, Microfluidics and Nanofluidics, 23(11) (2019).
- [23] H.M. Sedighi, Divergence and flutter instability of magneto-thermo-elastic C-BN hetero-nanotubes conveying fluid, Acta Mechanica Sinica, 36(2) (2020) 381-396.

- [16] S. Oveissi, A. Ghassemi, Longitudinal and transverse wave propagation analysis of stationary and axially moving carbon nanotubes conveying nano-fluid, Applied Mathematical Modelling, 60 (2018) 460-477.
- [17] M. Sadeghi-Goughari, S. Jeon, H.J. Kwon, Fluid structure interaction of cantilever micro and nanotubes conveying magnetic fluid with small size effects under a transverse magnetic field, Journal of Fluids and Structures, 94 (2020).
- [18] M. Sadeghi-Goughari, S. Jeon, H.J. Kwon, Effects of magnetic-fluid flow on structural instability of a carbon nanotube conveying nanoflow under

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Mahjoub1, H. Ramezannejad Azarboni, Instability and frequency sensitivity analysis of single-walled carbon nanotubes conveying fluid under thermomagnetic field considering the surface effect, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 3875-3890.



**DOI:** 10.22060/mej.2019.15465.6128