

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(10) (2023) 467-470 DOI: 10.22060/mej.2022.21144.7386

The Effect of Magnetic Field and Fluid on the Primary and Secondary Frequency Response of Fluid-Conveying Carbon Nanotubes Using a Stress-Driven Nonlocal Integral Model

E. Mahmoudpour*

Department of Mechanical Engineering, Borujerd Branch, Islamic Azad University, Borujerd, Iran

ABSTRACT: In this article, the nonlinear forced vibrations of carbon nanotubes conveying magnetic nanofluid under a longitudinal magnetic field have been investigated. Using Von Karman's nonlinear strain field and the Euler-Bernoulli beam theory, the equations governing the nonlinear vibrations of carbon nanotubes are extracted. Using the method of multiple scales, the frequency response in primary resonance, superharmonic resonance, and subharmonic resonance is obtained. In order to consider the effects of small size, a stress-driven non-local integral model has been used. In the end, the effect of magnetic fluid and magnetic field intensity on frequency response and force response has been investigated. From the results, it can be seen that the presence of a magnetic field causes the system's vibration amplitude to be unstable and have a limited cycle. In this condition, the vibration response is quasi-periodic. However, the presence of magnetic fluid causes the vibration amplitude to be stable and the time response to alternate; In such a way that the Poincaré diagram shows a point in the phase plane. In the primary resonance, with the presence of the longitudinal magnetic field, as the excitation amplitude increases, the frequency response curves include two sub-amplitudes. One is an asymptotic curve with a horizontal axis and the other is a closed curve.

Review History:

Received: Mar. 04, 2022 Revised: May, 18, 2022 Accepted: Oct. 07, 2022 Available Online: Dec. 01, 2022

Keywords:

Nonlinear vibrations Carbon nanotube conveying fluid Longitudinal magnetic field Magnetic fluid Secondary resonance

1-Introduction

In recent years, multi-walled carbon nanotubes conveying ferromagnetic fluid have become a promising research path. Such materials may have diverse applications, from the implementation of filled tubes in magnetic force microscopy sensors [1] or as an array of high-density magnetic nanocores for future magnetic data storage devices [2] or so-called nano Containers in human medicine [3]. One of the most important issues in the treatment of acute cancerous diseases and tumors is to deliver the drug to the site of the disease and tumor in a sufficient amount without side effects on the adjacent healthy tissues. It took the drug movement [4, 5], especially iron-filled carbon nanotubes, which are new and potentially attractive tools for new anti-cancer therapeutic strategies.

All the results of the mentioned article are for two cases with and without the effect of the fluid and magnetic field in a wide range of magnetic field intensity.

2- Methodology

Fig. 1 shows a carbon nanotube conveying magnetic fluid under a longitudinal magnetic field located on an elastic foundation.

The equation of forced vibrations of nanobeam based on Stress-Driven non-local integral Model theory is as follows [6]:

$$EI\left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - l_s^2 \frac{\partial^6 w}{\partial x^6}\right] - EA\left[\frac{3}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 - l_s^2\left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 + 4\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]\right] + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P(x,t)$$
(1)

where P(x,t) is the sum of external harmonic loading, elastic foundation, the force caused by magnetic fluid flow, and force caused by the longitudinal magnetic field is defined. Using the Galerkin method, the partial differential equation can be converted to the following ordinary differential equation.

$$\ddot{q} + \gamma_1 q + \gamma_2 \dot{q} + \gamma_3 q^3 = f \operatorname{Cos}(\Omega t)$$
⁽²⁾

There are different methods to solve the nonlinear equation number 2. The frequency response of this equation in primary and secondary resonance using the method of multiple scales is as follows:

$$\gamma_2 + \left[\sigma_1 - \frac{3}{8} \cdot \frac{\gamma_3 a^2}{\sqrt{\gamma_1}}\right] = \left(\frac{f_1}{2a\sqrt{\gamma_1}}\right)^2$$
, Primary (3)

*Corresponding author's email: E.Mahmoodpour@yahoo.com

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. Carbon nanotube conveying magnetic fluid under a longitudinal magnetic field



Fig. 2. Comparing the results of the frequency response in the primary resonance for a carbon nanotube conveying a magnetic fluid located on an elastic foundation with Ref. [8] $(H_x = 2 * 10^4, l_s = 0.01, V_f = 1)$

$$\gamma_2 + \left[\sigma_1 - \frac{3}{8} \cdot \frac{\gamma_3 a^2}{\sqrt{\gamma_1}} - \frac{3a_3 \Lambda^2}{\sqrt{\gamma_1}}\right]^2 = \left(\frac{a_3 \Lambda^3}{a\sqrt{\gamma_1}}\right)^2, \quad (4)$$

Supperharmonic resonance

$$(3\gamma_2)^2 + \left[\sigma_1 - \frac{9\gamma_3\Lambda^2}{\sqrt{\gamma_1}} - \frac{9}{8}\frac{\gamma_3a^2}{\sqrt{\gamma_1}}\right]^2 = (\frac{9\gamma_3\Lambda a}{4\sqrt{\gamma_1}})^2, \quad (5)$$

Subharmonic resonance

where a, σ_1 and $\Lambda = f_1 / (2(\alpha_1 - \Omega^2))$ are, respectively: response range, parameter deviation, and dimensionless excitation range.

3- Results and Discussion

In order to investigate the structure-fluid interaction of a carbon nanotube conveying a magnetic nanofluid located in



Fig. 3. Variations of the response amplitude in the initial resonance according to variations of the magnetic field intensity of different excitation amplitudes for a carbon nanotube located in a longitudinal magnetic field ($V_f = 1, l_s = 0.01$)

a longitudinal magnetic field, the parameters are considered as in Ref. [8].

First, in order to ensure the correctness of the relations and results, the frequency response in the initial resonance for a carbon nanotube located on the elastic foundation in Fig. 2 is compared with the reference results [8]. As can be seen, the results are in good agreement. On the other hand, it can be easily seen that with the increase of the foundation coefficient, the response curve tends to the right, which indicates the non-linear behavior and greater hardening of the carbon nanotube. On the other hand, when the foundation coefficient becomes negative, the curve tilts to the left and shows a linear behavior, the undesirable phenomenon of jumping is eliminated and the system becomes more stable.

The effect of the force excitation amplitude on the response amplitude with the change of H_x in the primary resonance with the presence of the longitudinal magnetic field is shown in Fig. 3. As can be seen, with the increase of the excitation range, the frequency response curves include two sub-ranges. The first domain includes an asymptotic curve with a horizontal axis, which reaches zero with increasing H_x of domain response. The second domain consists of a closed curve that expands as the excitation amplitude (f) increases. For a critical value of f, two branches are connected and a curve is obtained. The critical value of the excitation amplitude in the initial resonance is f = 1.778. As shown in Fig. 2, as the excitation amplitude increases, the amplitude response appears as a single-valued function of the longitudinal magnetic field.

4- Conclusion

In this article, the forced nonlinear vibrations of fluidconveying carbon nanotubes located on elastic foundations under uniform distributed load were investigated. The carbon nanotube is under the longitudinal magnetic field and carries the magnetic nanofluid. The summary of the results obtained from this research is as follows:

The effect of the magnetic field increases the hardening

effect and increases the non-linear behavior and consequently the instability of the system. On the other hand, the effect of the magnetic fluid causes the frequency response curves to be closed and the system to become more stable, and the amplitude of the undesirable phenomenon of jumping is reduced.

In the primary resonance, with the presence of a longitudinal magnetic field, with the increase of the excitation amplitude, the frequency response curves include two sub-amplitudes. One is an asymptotic curve with a horizontal axis and the other is a closed curve.

References

- A. Thiaville, JM. Garcıa, J. Miltat, Domain wall dynamics in nanowires, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 242 (2002) 1061-1063.
- [2] I. Mönch, A. Meye, A. Leonhardt, K. Krämer, R. Kozhuharova, T. Gemming, MP. Wirth, B. Büchner, Ferromagnetic filled carbon nanotubes and nanoparticles: synthesis and lipid-mediated delivery into human tumor cells, Journal of magnetism and magnetic materials, 290 (2005) 276-8.
- [3] A. Leonhardt, I. Mönch, A. Meye, S. Hampel, B. Büchner, Synthesis of ferromagnetic filled carbon nanotubes and their biomedical application, InAdvances in Science and Technology, 49 (2006) 74-78, Trans Tech Publications

Ltd.

- [4] B. Beigzadeh, Numerical simulation of micro/ nano magnetic particles movement in bloodstream considering interaction of particles, Modares Mechanical Engineering, 17 (2017) 307-14. [In Persian]
- [5] A. Salari, A. Sharifi, H. Niazmand, Iron-carbon micro particles drug targeting simulation in vertebrobasilar system: magnetic field effects, Modares Mechanical Engineering, 16 (2017) 92-102. [In Persian]
- [6] E. Mahmoudpour, S.H. Hosseini-Hashemi, S.A. Faghidian, Nonlinear vibration analysis of FG nanobeams resting on elastic foundation in thermal environment using stress-driven nonlocal integral model, Appl. Math. Model. 57 (2018) 302–315.
- [7] E. Mahmoudpour, M. Esmaeili, Nonlinear free and forced vibration of carbon nanotubes conveying magnetic nanoflow and subjected to a longitudinal magnetic field using stress-driven nonlocal integral model, Thin-Walled Structures, 166 (2021) 108134.
- [8] E. Mahmoudpour, Differences between stress-driven nonlocal integral model and Eringen differential model in the vibrations analysis of carbon nanotubes conveying magnetic nanoflow, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43 (2021) 1-21.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

E. Mahmoudpour, The Effect of Magnetic Field and Fluid on the Primary and Secondary Frequency Response of Fluid-Conveying Carbon Nanotubes Using a Stress-Driven Nonlocal Integral Model, Amirkabir J. Mech Eng., 54(10) (2023) 467-470.



DOI: 10.22060/mej.2022.21144.7386

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۱۰، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۳۱۵ تا ۲۳۳۲ DOI: 10.22060/mej.2022.21144.7386

اثر میدان و سیال مغناطیسی بر پاسخ فرکانسی اولیه و ثانویه نانولولههای کربنی حامل سیال با استفاده از مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش

ابراهيم محمودپور*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بروجرد، بروجرد، ایران.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۵ ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

کلمات کلیدی: ارتعاشات غیرخطی نانولوله حامل سیال میدان مغناطیسی طولی سیال مغناطیسی

خلاصه: در این مقاله ارتعاشات اجباری غیرخطی نانولولههای کربنی حامل نانو سیال مغناطیسی و تحت یک میدان مغناطیسی طولی بررسی شده است. با استفاده از میدان کرنش غیرخطی ون کارمن و تئوری تیر اولر برنولی، معادلات حاکم بر ارتعاشات غیرخطی نانولوله کربنی دوسر مفصل استخراج میشوند. با استفاده از روش مقیاسهای چندگانه پاسخ فرکانسی در رزنانس اولیه، رزنانس فوق هارمونیک و رزنانس زیرهارمونیک بدست میآید. برای در نظر گرفتن اثرات نانو از مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش استفاده شده است. در پایان اثر سیال مغناطیسی و شدت میآید. برای در نظر گرفتن اثرات نانو از مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش استفاده شده دریافت که وجود میدان مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی بر پاسخ فرکانسی و پاسخ نیرویی بررسی شده است. از نتایج میتوان دریافت که وجود میدان مغناطیسی باعث میشود که دامنه ارتعاشی سیستم ناپایدار و دچار چرخه حدی شود. در این شرایط پاسخ ارتعاشی شبه متناوب است. ولی، وجود سیال مغناطیسی باعث میشود که دامنه ارتعاشی پایدار بوده و پاسخ زمانی متناوب شود؛ به گونهای که نمودار پوانکاره یک نقطه را در صفحه فاز نشان میدهد. در رزنانس اولیه با وجود میدان مغناطیسی طولی، با افزایش دامنه تحریک، منحنیهای پاسخ فرکانسی شامل دو زیر دامنه میبشد. که یکی منحنی مجانبی با محور افقی است و دیگری شامل یک منحنی بسته است.

۱- مقدمه

در سالهای اخیر، نانولولههای کربنی چند جداره حامل سیال فرو مغناطیسی به یک مسیر تحقیقاتی امیدوار کننده تبدیل شدهاند. چنین موادی ممکن است کاربردهای متنوعی داشته باشند، از پیادهسازی لولههای پرشده در حسگرهای میکروسکوپ نیروی مغناطیسی [۱] و یا به عنوان مجموعهای از نانو هستههای مغناطیسی با چگالی بالا برای دستگاههای ذخیره داده مغناطیسی آینده [۲] یا اصطلاحاً نانو ظرفهای موجود در داروی انسانی [۳]. یکی از مهمترین مسائل پیش روی درمان بیماریهای حاد سرطانی و تومورها، رساندن دارو به موضع بیماری و تومور به میزان کافی و بدون اثرات جانبی بر بافتهای سالم مجاور است، در این میان داروسازی مغناطیسی از جمله روشهایی است که به کمک آن میتوان کنترل حرکت دارو را در دست گرفت [۴ و ۵] به خصوص نانولولههای کربنی پرشده با آهن، برای استراتژیهای جدید درمانی ضد سرطان ابزارهای جدید و بالقوه جذابی

به منظور تحلیل ارتعاشات آزاد و اجباری نانوتیرها و بررسی اثرات اندازه کوچک، از تئوریهای مختلفی نظیر تئوری الاستیسیته غیرموضعی، گرادیان کرنش، گرادیان کرنش-اینرسی و ... استفاده شده است [۹–۶]. مدل دیفرانسیلی ارینگن فقط برای سازههای نامحدود، رشد ترک و ... معتبر است اما متاسفانه بطور گسترده در مقالات برای تحلیل رفتار ارتعاشی نانوتیر، نانو ورق و ... مورد استفاده قرار میگیرد و این در حالی است که این تئوری تعادل استاتیکی گشتاورها در تیریکسرگیردار را ارضاء نمی کند. به همین خاطر رافائل برتا^۲ و همکاران [۲۲–۱۰] تئوری جدیدی با شرایط ابداع کردند که برای نانوتیر با هر شرط مرزی، رفتار یکسانی از خود نشان میدهد. از طرفی اپوزو^۳ و همکاران [۱۳] نشان دادند که با افزایش پارامتر غیرموضعی فرکانسهای طبیعی نانوتیر کاهش پیدا میکنند بجز در نانوتیر یکسرگیردار که فرکانسهای طبیعی افزایش مییابند و این در حالی است

- 2 Stress-driven nonlocal integral model
- 3 Apuzzo

ر المعنى الم علا المعنى الم

¹ Raffaele Barretta

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: E.Mahmoodpour@yahoo.com

که در مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، با افزایش پارامتر مقیاس طول، فركانسهاى طبيعى نانوتير با شرايط مرزى مختلف افزايش پيدا مىكنند. محمودپور و همکاران [۱۴] ارتعاشات غیر خطی نانوتیر هدفمند با شرایط مرزى مختلف واقع بر فونداسيون الاستيك و تحت ميدان حرارتي با استفاده از مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، را بررسی کردند و نشان دادند که در حالت غیرخطی نیز با افزایش پارامتر مقیاس طول، فرکانسهای طبیعی نانوتیر با شرایط مرزی مختلف افزایش پیدا می کنند. برتا و همکاران [۱۵] با استفاده از مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، فرکانسهای طبیعی نانوورق دایروی دورمفصل را بدست آوردند. با توجه به کاربردهای رو به رشد نانولولههای کربنی در انتقال هدفمند نانودارو به بافت سرطانی در مهندسی پزشکی، تحلیل ارتعاشات نانولولههای کربنی حامل سیال بخش قابل توجهی از پژوهشهای علمی را به خود اختصاص داده است. در این میان ارتعاشات نانولوله های کربنی حامل سیال بر اساس مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، و تئوری تنش کوپل اصلاح شده انجام شده است [۱۶ و ۱۷]. محمودپور و اسمعیلی [۱۸] ارتعاشات غیرخطی نانولولههای کربنی حامل سیال مغناطیسی و تحت میدان مغناطیسی طولی با استفاده از مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، را بررسی کردند ایشان کارآمدی مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، در تحلیل اندرکنش سازه – سیال را بررسی کردند و نشان دادند که نتایج این مدل، تطابق بسیار خوبی با مدل گرادیان کرنش دارد. اثر پارامترهای نامعین سازه، تیرویسکوالاستیک، تقویت با صفحات گرافن، پیزوالکتریسیته و فلکسوالکتریک بر ارتعاشات نانولولههای کربنی حامل سیال بررسی شده است [۲۴–۱۹]. رمضان نژاد و کشاورزپور [۲۵] اثر سطح و میدان مغناطیسی را بر پاسخ فرکانسی نانولوله کربنی در رزنانس اولیه و رزنانس سوپرهارمونیک بررسی کردند. رفتار آشوبناک نانولوله کربنی واقع بر فونداسیون غیرخطی ویسکوالاستیک و تحت میدان حرارتی در رزنانس اولیه و سوپرهارمونیک بررسی شده است [۲۶ و ۲۷].

مقاله حاضر به بررسی ارتعاشات اجباری نانولوله کربنی حامل سیال می پردازد. نانولوله در یک میدان مغناطیسی قرار داشته و نانوسیال مغناطیسی در داخل آن جریان دارد. نانولوله تک جداره با تکیه گاههای ساده بوده و بر فونداسیون وینکلر واقع است. برای در نظر گرفتن اثرات اندازه از مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، استفاده شده است. پس از تأیید کارآمدی این مدل، برای تحلیل اندرکنش سازه – سیال در مرجع [۱۸] و اطلاع از اینکه کلیه نتایج مقاله مذکور برای دو حالت با و بدون اثر سیال و میدان مغناطیسی دریک شدت میدان مغناطیسی خاص است، لذا در این مقاله به

بررسی رفتار این تئوری نسبت به تغییر شدت میدان مغناطیسی در یک محدوده وسیع پرداخته شده است. در پایان اثر میدان مغناطیسی طولی و سیال مغناطیسی بر پاسخ فرکانسی در رزنانس اولیه، رزنانس فوق هارمونیک، رزنانس زیرهارمونیک و آشوب بررسی می شود.

۲- معادلات حاکم

درشکل ۱ یک نانولوله کربنی دو سر مفصل حامل سیال مغناطیسی و تحت یک میدان مغناطیسی طولی واقع بر فونداسیون الاستیک نشان داده شده است.

۲- ۱- تئورى الاستيسيته مدل انتگرال غيرمحلى مبتنى بر تنش

همانطوریکه در مقدمه بحث شد، مدل دیفرانسیلی ارینگن فقط برای سازههای نامحدود، رشد ترک و ... معتبر است اما متاسفانه بطور گسترده در مقالات برای تحلیل رفتار ارتعاشی نانوتیر، نانو ورق و ... مورد استفاده قرار می گیرد و این در حالی است که این تئوری برای پیش بینی رفتار نانوتیریکسر گیردار دچار تناقض می شود. به همین خاطر محققان بسیاری در صدد یافتن تئوریهای جدید الاستیسیته برای بررسی رفتار نانوسازه ها هستند. در این میان اولین بار تئوری جدیدی توسط آقای رافائل برتا ¹تحت عنوان مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش مطرح شد که در تحلیل رفتار استاتیکی و دینامیکی نانوتیر با انواع شرایط مرزی رفتار یکسانی از خود نشان می دهد. در این تئوری میدان انحنای الاستیک بصورت زیر تعریف می شود [۱۳]:

$$\chi_{EL} = \int_0^L \phi_\lambda(x - \xi) C \, \mathcal{M}(\xi) d\,\xi \tag{1}$$

که M گشتاور خمشی و C انطباق الاستیک میباشد. منظور ازمیدان انحنای الاستیک همان شعاع انحنای تیر تحت خمش میباشد که از آن M برای تعریف کرنش طولی \mathcal{E}_x ودر نهایت محاسبه گشتاور خمشی M استفاده می شود. ضریب انطباق الاستیک بصورت زیر تعریف می شود:

$$C = \frac{1}{\int_{A} E y^2 dA} \tag{(Y)}$$

¹ Raffaele Barretta



شکل ۱. نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی و تحت یک میدان مغناطیسی طولی

Fig. 1. Carbon nanotube conveying magnetic fluid under a longitudinal magnetic field

بدون بعد $\, {\cal A}$ بصورت نسبت طول مشخصه $\, l_s \,$ به طول نانوتیر L تعریف $\,$ می شود. برای تبدیل معادله انتگرالی به معادله دیفرانسیل حاکم، تابع کرنل بصورت نمایی تعریف می شود [۱۳]:

$$\phi_{\lambda}(x) = \frac{1}{2l_s} \exp(-\frac{|x|}{l_s}) \tag{(7)}$$

با توجه به کرنل نمایی تعریف شده، می توان معادله انتگرالی (۱) را به فرم ديفرانسيلي زير نوشت:

$$\frac{\partial^2 \chi_{EL}}{\partial x^2} = \frac{1}{l_s^2} (\chi_{EL} - C.M)$$
(*)

با توجه به تئوري تير اولر-برنولي معادله حاكم بر ارتعاشات خطي نانولوله كربنى براساس تئورى الاستيسيته انتكرال غيرمحلى مبتنى بر تنش، بصورت زیر میباشد [۱۳]:

$$EI\left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - l_s^2 \frac{\partial^6 w}{\partial x^6}\right] + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = P(x,t) \qquad (a)$$

که w(x,t) خیز عرضی تیر در راستای z میباشد. از آنجاکه معادله ديفرانسيل خطى حاكم بر ارتعاشات نانولوله (رابطه (۵)) يک معادله

در رابطه (۲) A سطح مقطع نانوتیر میباشد. پارامتر مشخصه غیرموضعی 🦳 دیفرانسیل مرتبه شش میباشد لذا خیز تیر، شش ثابت مجهول خواهد داشت که چهارتای آنها با توجه به شرایط مرزی در ابتدا و انتهای تیر بدست میآیند (شرایط مرزی هندسی) و دو تای دیگر از شرایط مرزی ساختاری زير [١٣]:

$$\begin{cases} \frac{\partial_{\chi_{EL}}(0)}{\partial x} = \frac{1}{l_s} \chi_{EL}(0) \\ \frac{\partial_{\chi_{EL}}(L)}{\partial x} = \frac{1}{l_s} \chi_{EL}(L) \end{cases}$$
(8)

در نهایت معادله ارتعاشات اجباری غیرخطی نانوتیر بر اساس مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، بصورت زیر میباشد [۱۴]:

$$EI\left[\frac{\partial^{4}w}{\partial x^{4}} - l_{s}^{2}\frac{\partial^{6}w}{\partial x^{6}}\right] - EA\left[\frac{3}{2}\frac{\partial^{2}w}{\partial x^{2}}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^{2} - l_{s}^{2}\left[\left(\frac{\partial^{2}w}{\partial x^{2}}\right)^{2} + \frac{\partial^{2}w}{\partial x^{2}}\frac{\partial^{3}w}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{4}w}{\partial x^{4}}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^{2}\right]\right] + \rho A \frac{\partial^{2}w}{\partial t^{2}} = P(x,t)$$
(Y)

 P_{ext} که P(x,t) بصورت مجموع بارگذاری هارمونیک خارجی P(x,t) که فونداسیون الاستیک P_{rest} ، نیروی ناشی از جریان سیال مغناطیسی ، فونداسیون الاستیک P_{rest} بیروی ناشی از میدان مغناطیسی طولی P_{fluid} بصورت زیرتعریف می شود:

$$P_{ext} = P_0 \operatorname{Cos}(\Omega t) \tag{(1)}$$

$$P_{rest} = K_L w \tag{(--)}$$

$$P_{fluid} = m_f \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2(VCF \, u_{avg,no-slip}) \times \frac{\partial^2 w}{\partial x \, \partial t} + (VCF \, u_{avg,no-slip})^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) \qquad (z-\Lambda)$$
$$-\sigma A H_x^2 \left(\frac{\partial w}{\partial t} + VCF \, u_{avg,no-slip} \, \frac{\partial w}{\partial x}\right)$$

$$P_{magnet} = \eta A H_x^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{(3-A)}$$

که $E, I, H_x, A, \rho, \Omega, VCF, P, K_L, \eta, \sigma, m_f$ به ترتیب جرم سیال، نفوذپذیری مغناطیسی، هدایت الکتریکی، ضریب فونداسیون الاستیک، دامنه تحریک نیروی خارجی، ضریب تصحیح سرعت، فرکانس تحریک، چگالی نانولوله کربنی، سطح مقطع نانولوله، شدت میدان مغناطیسی، ممان اینرسی و مدول الاستیسیته نانولوله کربنی میباشند.

۳- روش حل

معادله حاکم بر ارتعاشات اجباری نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی و تحت میدان مغناطیسی طولی واقع بر فونداسیون الاستیک (معادله (۶)) یک معادله دیفرانسیل پارهای میباشد که با استفاده از روش گالرکین معادله دیفرانسیل پارهای را میتوان به معادله دیفرانسیل معمولی تبدیل نمود. برای این منظور خیزتیر بصورت زیر در نظر گرفته میشود [۶].

$$w(x,t) = \phi(x)q(t) \tag{9}$$

که $\phi(x)$ شکل مود خطی تیر و q(t) تابع زمانی مجهول میباشد. برای تعیین شکل مودهای خطی تابع زمانی معلوم بوده و بصورت نمایی

در نظر گرفته می شود به همین خاطر برای شرایط مرزی مختلف بر اساس تئوری الاستیسیته مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، فرض می شود که حل معادله (۷) به شکل زیر می باشد:

$$w(x,t) = w(x)e^{\alpha t} \tag{(1)}$$

که در آن \mathfrak{M} فرکانس طبیعی خطی است. با جاگذاری معادله (۱۰) در معادله (۷) و حذف ترمهای غیرخطی یک مساله مقدار ویژه شش بعدی بدست خواهد آمد. از آنجاکه معادله دیفرانسیل مرتبهای حاصل، از مرتبه شش میباشد لذا ماتریس جابجایی بصورت یک آرایه شش عضوی $\{ {}_{g} \mathfrak{M}_{a} \mathfrak{M}_{s}, \mathfrak{M}_{r}, \mathfrak{M}_{r}, \mathfrak{M}_{r}, \mathfrak{M}_{a} \mathfrak{M}_{s} \} = \mathfrak{M}$ درنظر گرفته می شود. با برابر صفرقراردادن ماتریس ضرایب فرکانسهای طبیعی و درنهایت با استفاده از نرم افزار متمتیکا^۱ شکل مودهای نانوتیر بدست خواهند آمد. حال با استفاده از روش گالرکین و جاگذاری رابطه (۹) در معادله (۷) و ضرب معادله حاصل در $\mathfrak{P}(\mathbf{x})$

$$\ddot{q} + \gamma_1 q + \gamma_2 \dot{q} + \gamma_3 q^3 = f \operatorname{Cos}(\Omega t)$$
 (11)

که ضرایب معادله فوق بصورت زیر میباشند:

$$\gamma_{1} = [(a_{3} - l_{s}^{2}a_{4}) + K_{L}a_{1} + ((VCF \times V_{f})^{2} - H_{1})a_{2} + (UCF \times V_{f}a_{7})^{2} - H_{1})a_{2} + H_{3} \times VCF \times V_{f}a_{7}]/a_{1}$$

$$\gamma_2 = \left[ca_1 + 2VCF \times V_f \sqrt{\beta}a_7 + H_2a_1 \right] / a_1 \quad (-1)$$

$$\gamma_3 = \delta \Big[-1.5a_5 + l_s^2 (a_6 + 4a_7 + a_8) \Big] / a_1$$
 (5.17)

$$\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} =$$

$$\int_{0}^{1} \{\phi^2, \phi, \frac{d^2\phi}{dx^2}, \phi, \frac{d^4\phi}{dx^4}, \qquad (2-1)^{\gamma}\}$$

$$\phi \cdot \frac{d^6\phi}{dx^6}, \phi \cdot \frac{d^2\phi}{dx^2} \cdot \left(\frac{d\phi}{dx}\right)^2 \} dx$$

¹ Mathematica

$$(3\gamma_2)^2 + \left[\sigma_1 - \frac{9\gamma_3\Lambda^2}{\sqrt{\gamma_1}} - \frac{9}{8}\frac{\gamma_3a^2}{\sqrt{\gamma_1}}\right]^2 = (\frac{9\gamma_3\Lambda a}{4\sqrt{\gamma_1}})^2, \quad (\lambda \Delta)$$

که $a, \sigma_{_{1}}$ و $(\Upsilon(\alpha_{_{1}} - \Omega^{\Upsilon})) = \Lambda$ به ترتیب: پارامتر انحرافی، دامنه پاسخ و دامنه تحریک بدون بعد میباشند. خاطرنشان میگردد که هرگاه فرکانس تحریک سه برابر فرکانس طبیعی باشد رزنانس زیرهارمونیک و هرگاه فرکانس تحریک یکسوم فرکانس طبیعی باشد، رزنانس فوق هارمونیک رخ میدهد.

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی اندرکنش سازه-سیال یک نانولوله کربنی حامل نانوسیال مغناطیسی واقع در یک میدان مغناطیسی طولی پارامترهای زیر برای سیستم در نظر گرفته می شود:

دانسیته (ρ)، نسبت منظری (TR_{out})، مدول یانگ (P)، دانسیته (ρ)، نسبت منظری (R_{out})، مدول یانگ (R_{out})، دانسیته خارجی (R_{out}) و ضخامت نانولوله کربنی به ترتیب π TPa ،۴۰ م. ۳/۴ TPa و ۳ nm ۴۰ (π ۴ میانلیسی نانولوله کربنی $^{-1}$ ۰۱* π ۹ میباشد. به منظور متمایزتر شدن نتایج و اثرات مغناطیسی سیال، جیوه به عنوان یک فلز مایع که در داخل نانولوله جریان دارد، در نظر گرفته میشود. این سیال نیوتنی با چگالی $\pi/2$ ۳/۳ و هدایت گرفته میشود. این سیال فرض میشود.

۴– ۱– اعتبار سنجی

در ابتدا به منظور اطمینان از صحت روابط و نتایج، پاسخ فرکانسی در رزنانس اولیه برای یک نانو لوله کربنی واقع بر روی فونداسیون الاستیک در شکل ۲ با نتایج مرجع [۲۹] مقایسه شده است. همانطوریکه مشاهده میشود، نتایج تطابق خوبی دارند. خاطر نشان میگردد که مرجع [۲۹] تیر با انواع شرایط مرزی را بررسی می کندکه در اینجا، نتایج فقط با حالت تیردوسرمفصل آن مقایسه شدهاند. از طرفی به راحتی میتوان دریافت که با افزایش ضریب فونداسیون، منحنی پاسخ به سمت راست بیشتر متمایل میشود که نشان دهنده رفتار غیرخطی و سخت شوندگی بیشتر نانولوله کربنی میباشد. از طرفی با منفی شدن ضریب فونداسیون منحنی به سمت چپ متمایل میشود و رفتار خطی از خود نشان میدهد و پدیده نامطلوب پرش حذف شده و سیستم پایدارتر میگردد. خاطرنشان میگردد

$$\{a_{6},a_{7},a_{8},a_{9},a_{10}\} =$$

$$\int_{\circ}^{1} \{\phi \cdot \left(\frac{d^{2}\phi}{dx^{2}}\right)^{3}, \phi \cdot \frac{d\phi}{dx} \cdot \frac{d^{2}\phi}{dx^{2}} \cdot \frac{d^{3}\phi}{dx^{3}}, \qquad (\circ - 17)$$

$$\phi \cdot \frac{d^{4}\phi}{dx^{4}} \cdot \left(\frac{d\phi}{dx}\right)^{2}, \phi \cdot \frac{d^{3}\phi}{dx^{3}}\} dx$$

$$f = \frac{P \cdot L^3}{a_1 E I}, V_f = \sqrt{\frac{m_f}{E I}} \cdot L \, u_{avg, noslip},$$

$$\beta = \frac{m_f}{m_c + m_f}, k_l = \frac{K_L \cdot L^4}{E I}, \delta = \frac{A \cdot L^2}{I}$$
 (9-17)

$$H_{1} = \frac{\eta A H_{x}^{2} L^{2}}{EI},$$

$$H_{2} = \frac{\sigma A H_{x}^{2} L^{2}}{\sqrt{EI(m_{f} + m_{c})}},$$

$$H_{3} = \frac{\sigma A H_{x}^{2} L^{2}}{\sqrt{EIm_{f}}}$$

$$(j-17)$$

برای حل معادله غیرخطی (۱۱) روشهای مختلفی وجود دارد. پاسخ فرکانسی این معادله در رزنانس اولیه و ثانویه با استفاده از روش مقیاس چندگانه ¹بصورت زیر میباشد[۶]:

$$\gamma_2 + \left[\sigma_1 - \frac{3}{8} \cdot \frac{\gamma_3 a^2}{\sqrt{\gamma_1}}\right] = \left(\frac{f_1}{2a\sqrt{\gamma_1}}\right)^2 \tag{17}$$

$$\gamma_{2} + \left[\sigma_{1} - \frac{3}{8} \cdot \frac{\gamma_{3}a^{2}}{\sqrt{\gamma_{1}}} - \frac{3a_{3}\Lambda^{2}}{\sqrt{\gamma_{1}}}\right]^{2} = \left(\frac{a_{3}\Lambda^{3}}{a\sqrt{\gamma_{1}}}\right)^{2}, \quad (1\%)$$

$$(1\%)$$

$$(1\%)$$

$$(1\%)$$

1 Method of Multiple Scale



شکل ۲. مقایسه نتایج پاسخ فرکانسی در رزنانس اولیه برای یک نانو لوله کربنی حامل سیال مغناطیسی واقع بر روی فونداسیون الاستیک با

 $(l_s = \cdot / \cdot), V_f = 0, H_x = T \times 1 \cdot (0, T)$ مرجع

Fig. 2. Comparing the results of the frequency response in the primary resonance for a carbon nanotube conveying a magnetic fluid located on an elastic foundation with Ref. [29] $(l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 2 \times 10^4)$



شكل ٣. مقايسه شكل مود اول بدست آمده از حل تئوري الاستيسيته SDM با حل تقريبي

Fig. 3. Comparison of the shape of the first mode obtained from the solution of SDM elasticity theory with the approximate solution

شکل مود اول نانولوله کربنی دوسرمفصل بدست آمده از نتایج تحلیلی با شکل مود تقریبی [πx Sin[πx در شکل ۳ مقایسه شده است. در اکثر مقالات برای خیز نانو تیر با شرایط مرزی دو سر مفصل از تابع تقریبی [πx Sin[πx استفاده می شود و این درحالی است که با توجه به تئوریهای مختلف برای مدل کردن نانوتیر دو سر مفصل، توابع خیز متفاوتی بدست خواهد آمد که قطعاً [πx آیر Sin[πx نخواهد بود و اندکی با آن متفاوت هستند لذا در شکل ۳ تلاش شده است که تفاوت حل دقیق بدست آمده در این مقاله با حل تقریبی نشان داده شود. همانطوریکه مشاهده می شود این دو منحنی اختلاف ناچیزی یا مواد پادکشسان ¹موادی با ضریب پواسون منفی هستند. اکستیکها در هنگام اعمال تنش کششی عمودی، برخلاف مواد معمول، در راستای عمود بر نیروی وارده، ضخیمتر میشوند. این خاصیت در کامپوزیتهای لایهای، فومهای پلیمری و فلزی دیده شده است. جامدات اتمی با ساختار مکعبی هنگامی که در جهت [۱۱۰] کشیده شوند نیز چنین رفتاری از خود نشان میدهند. در دو دهه اخیر مواد اکستیک توجه فراوانی را به خود جلب کردهاند، از مقیاس نانو گرفته تا ماکرو.

1 Auxetics









دارند و نشان دهنده دقت بالای محاسبات میباشد. در شکل ۴ اثر سیال و میدان مغناطیسی بر پاسخ فرکانسی نانولوله کربنی حامل سیال در رزنانس اولیه نشان داده شده است. با توجه به شکل میتوان دریافت که اثر میدان مغناطیسی باعث افزایش اثر سخت شوندگی شده و رفتار غیرخطی و به تبع ناپایداری سیستم را افزایش میدهد. خاطر نشان میگردد که هرچه منحنیها بیشتر به سمت

راست متمایل شوند، اثرغیرخطی و به تبع ناپایداری سیستم بیشتر می شود. از طرفی اثر سیال مغناطیسی باعث می شود که منحنیها بسته شده و سیستم پایدارتر شده و دامنه پدیده نامطلوب پرش کاهش یابد. با توجه به شکل می توان دریافت که افزایش سرعت سیال در داخل نانولوله کربنی هم در حضور میدان مغناطیسی طولی و هم با وجود سیال مغناطیسی، باعث افزایش ناپایداری سیستم می شود.



شکل ۵. تغییرات دامنه پاسخ در رزنانس اولیه برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف برای یک نانولوله کربنی واقع در یک میدان مغناطیسی طولی (۱ ₋ ۱ / ۱٫۷ - ۱٫۷)

Fig. 5. Variations of the response amplitude in primary resonance in terms of magnetic field intensity variations of different excitation amplitudes for a carbon nanotube located in a longitudinal magnetic field $(l_s = 0.01, V_f = 1)$.

در شکل ۴ (ب) پاسخ نیرویی برای نانولوله کربنی حامل سیال تحت میدان مغناطیسی طولی و سیال مغناطیسی در رزنانس اولیه ترسیم شده است. همانطوریکه مشخص است، وجود سیال و میدان مغناطیسی باعث کاهش دامنه شده و محدوده ناپایداری را کاهش میدهد. از طرفی وجود سیال مغناطیسی باعث جدا شدن منحنیها از محور عمودی می شود.

اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزنانس اولیه با وجود میدان مغناطیسی طولی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می شود، با افزایش دامنه تحریک، ابتدا منحنیهای پاسخ فرکانسی شامل دو زیر دامنه می باشد. دامنه اول شامل یک منحنی مجانبی با محور افقی است که با افزایش $_x$ اپاسخ دامنه به صفر می رسد. دامنه دوم شامل یک منحنی محانبی ما مرور یک منحنی افقی است که با افزایش $_x$ اپاسخ دامنه به صفر می رسد. دامنه دوم شامل یک منحنی مجانبی با محور می است که با افزایش $_x$ افزایش دامنه به صفر می رسد. دامنه دوم شامل می منحنی محانبی می با محور افقی است که با افزایش $_x$ افزایش دامنه به صفر می رسد. دامنه دوم شامل می منحنی محانبی با محور می منحنی محانبی با محور افتی است که با افزایش $_x$ افزایش دامنه تحریک (f) گسترش می باد. برای یک منحنی حاصل می می مقدار بحرانی دامنه تحریک در رزنانس اولیه ۲۷۷۸ f می باشد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش بیشتر دامنه تحریک، می سازم می باید می بایخ دامنه به عنوان یک تابع تک مقداره از میدان مغناطیسی طولی ظاهر می شود. برهمین اساس، در انتقال نانوداروها تحت میدان مغناطیسی طولی طری اید. باید به پاسخ دینامیکی سازه به ازاء تغییر دامنه تحریک، دقت ویژه به عمل آید.

اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزنانس اولیه با وجود سیال مغناطیسی در شکل ۶ نشان داده شده است.

همانطوری که از شکل ۶ مشاهده می شود، با وجود سیال مغناطیسی، دامنه پاسخ، نسبت به وجود میدان مغناطیسی طولی، کاهش یافته و مقدار بحرانی دامنه تحریک در رزنانس اولیه f=1/۶۲۷۵ رخ می دهد.

اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزنانس زیرهارمونیک با وجود میدان مغناطیسی طولی در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطوری که در شکل ۷ نشان داده شده است، منحنی پاسخ بصورت یک منحنی بسته می باشد که با افزایش دامنه تحریک، دامنه پاسخ نیز افزایش می یابد و تا شدت میدان مغناطیسی های بالا، حدود $1/2 \times 10^{9}$, سیستم پایدار می باشد.

اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزنانس زیرهارمونیک با وجود سیال مغناطیسی در شکل ۸ نشان داده شده است. رفتار نانولوله کربنی حامل نانوسیال مغناطیسی در حالت زیر هارمونیک بصورت نوسانی میباشد. بدین صورت که با افزایش دامنه تحریک، محدوده پایداری و وجود جواب افزایش مییابد. به عبارت دیگر تا شدت میدان مغناطیسیهای بالاتری سیستم پایدار میباشد و سپس با افزایش دامنه تحریک، محدوده پایداری و وجود جواب کاهش مییابد و به تدریج محدوده وجود جواب



شکل ۶. تغییرات دامنه پاسخ در رزنانس اولیه برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف برای $(I_s = 0.0, V_f = 1)$

Fig. 6. Variations in the response amplitude in primary resonance according to changes in the magnetic field intensity of different excitation amplitudes for a carbon nanotube conveying a magnetic fluid ($l_s = 0.01, V_f = 1$).



شکل ۲. تغییرات دامنه پاسخ در رزنانس زیرهارمونیک برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف $(l_s = \cdot / \cdot \mathbf{1}, V_f = \mathbf{1})$

Fig. 7. Variations of the response amplitude in subharmonic resonance according to variations of the magnetic field intensity of different excitation amplitudes for a carbon nanotube located in a longitudinal magnetic field ($l_s = 0.01, V_f = 1$).



شکل ۸. تغییرات دامنه پاسخ در رزنانس زیرهارمونیک برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف $(l_s=\cdot/\cdot)V_f=1$

Fig. 8. Variations of the response amplitude in subharmonic resonance according to variations of the magnetic field intensity within the range of different excitations for a carbon nanotube conveying a magnetic fluid ($l_c = 0.01, V_f = 1$).

کوچکتر شده تا به صفر میرسد.

اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزنانس فوق هارمونیک با وجود میدان مغناطیسی طولی در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ میتوان دریافت که با افزایش دامنه در ارتعاشات فوق هارمونیک با وجود میدان مغناطیسی طولی، اثر غیرخطی سیستم افزایش مییابد. مییابد و پایداری سیستم کم شده و دامنه غیرمطلوب پرش افزایش مییابد. کاملاً واضح است که اثر سخت شوندگی افزایش یافته و دامنه پاسخ نیز زیاد شده است.

اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزنانس فوق هارمونیک با وجود سیال مغناطیسی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ براحتی میتوان دریافت که در رزنانس فوق هارمونیک با وجود سیال مغناطیسی منحنیهای پاسخ فرکانسی شامل دو زیر دامنه میباشند و در دامنه بحرانی Λ =۰/۰۵ یک منحنی پیوسته حاصل میشود. و جالب اینکه با افزایش دامنه تحریک، دامنه پاسخ در منحنی بسته کاهش مییابد و در شاخه ایکه همراستا با محور افقی میباشد، دامنه افزایش مییابد. در شکل ۱۱ میتوان رفتار ارتعاشی نانولوله کربنی حامل سیال واقع در

یک میدان مغناطیسی طولی را در قالب نمودارهای فازی جابجایی –سرعت، دیاگرام پوانکاره و تاریخچه زمانی مشاهده نمود. همانطوری که در شکلهای ۱۱ (الف) تا (ج) دیده میشود تا ۲۰^۷ = ۲۰ ، دامنه ارتعاشی ناپایدار و دچار چرخه حدی میشود. در این شرایط پاسخ ارتعاشی شبه متناوب است.

در شکل ۱۲ میتوان رفتار ارتعاشی نانولوله کربنی حامل سیال معناطیسی را در قالب نمودارهای فازی ، دیاگرام پوانکاره و تاریخچه زمانی مشاهده نمود. همانطوریکه در شکلهای ۱۲ (الف) تا (ج) دیده میشود تا ۱۰۴ میاهده نمود. همانطوریکه در شکلهای ۲۲ (الف) تا (ج) دیده میشود تا ۲۰ میاهده نمود. همانطوریکه در شکلهای ۲۲ (الف) تا (ج) دیده میشود که نمود. همانطوریکه در شکلهای ۲۲ (الف) تا (ج) دیده میشود تا ۲۰ می میده می می در می می دهد. که نمودار پوانکاره یک نقطه را در صفحه فاز نشان می دهد.

در شکل ۱۳ می توان رفتار ارتعاشی نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی واقع بر فونداسیون الاستیک را در قالب نمودارهای فازی، دیاگرام پوانکاره و تاریخچه زمانی مشاهده نمود. همانطوریکه در شکلهای ۱۳ (الف) تا (ج) دیده می شود درشدت میدان مغناطیسی ^۱۰۲ × ۵۰ می می از مانی از تعاشی ناپایدار بوده و پاسخ را در مانی گذرا است؛ به گونهای که نمودار فازی یک رفتار آشوبناک را در صفحه فاز نشان می دهد.



شکل ۹. تغییرات دامنه پاسخ دررزنانس فوق هارمونیک برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف $(l_s = \cdot / \cdot 1, V_f = 1)$

Fig. 9. Variations of the response amplitude in superharmonic resonance according to variations of the magnetic field intensity within the range of different excitations for a carbon nanotube located in a longitudinal magnetic field ($l_s = 0.01, V_f = 1$).



شکل ۱۰. تغییرات دامنه پاسخ در رزنانس فوق هارمونیک برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف $(l_s = \cdot / \cdot 1, V_f = 1)$ برای یک نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی

Fig. 10. Variations of the response amplitude in superharmonic resonance according to variations of the magnetic field intensity within the range of different excitations for a carbon nanotube conveying a magnetic fluid ($l_s = 0.01, V_f = 1$).



شکل ۱۱. تاریخچه زمانی (الف)، دیاگرام پوانکاره (ب) و نمودار فازی (ج). رفتار شبه پریودیک نانولوله کربنی واقع در یک میدان $(l_s=\cdot/\cdot 1_sV_f=1, H_x=10^{\circ})$ مغناطیسی طولی به ازاء ($v_s=0.00$

Fig. 11. Time history (a), Poincaré diagram (b) and phase diagram (c) of quasi-periodic behavior of carbon nanotube located in a longitudinal magnetic field ($l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 10^7$).



شکل ۱۲. تاریخچه زمانی (الف)، دیاگرام پوانکاره (ب) و نمودار فازی (ج). رفتار پریودیک نانولوله کربنی واقع در یک میدان مغناطیسی $(l_s=\cdot/\cdot 1,V_f=1,H_x=\pi\times 1\cdot 1)$

Fig. 12. Time history (a), Poincaré diagram (b) and phase diagram (c) of quasi-periodic behavior of carbon nanotube located in a longitudinal magnetic field $(l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 3 \times 10^4)$.



شکل ۱۳. تاریخچه زمانی (الف)، دیاگرام پوانکاره (ب) و نمودار فازی (ج). رفتار آشوبناک نانولوله کربنی واقع در یک میدان مغناطیسی ($l_s = \cdot/\cdot 1, V_f = 1, k_I = -1$ ۷۵, $H_x = \cdot/ 2 \times 1^{\circ}$) طولی به ازاء (

Fig. 13. Time history (a), Poincaré diagram (b) and phase diagram (c) of quasi-periodic behavior of carbon nanotube located in a longitudinal magnetic field $(l_s = 0.01, V_f = 1, k_l = -175, H_x = 0.5 \times 10^4)$.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله ارتعاشات غیرخطی اجباری نانولوله کربنی دوسرمفصل حامل سیال واقع بر فونداسیون الاستیک تحت بار گسترده یکنواخت بررسی گردید. نانولوله کربنی تحت میدان مغناطیسی طولی قرار دارد و حامل نانوسیال مغناطیسی میباشد. معادلات ارتعاشی نانولوله کربنی با توجه به مدل تیراولر-برنولی و براساس تئوری الاستیسیته مدل انتگرال غیرمحلی مبتنی بر تنش، بدست آمد. با استفاده از روش مقیاسهای چندگانه معادلات دیفرانسیل حاکم حل شد و پاسخ فرکانسی نانولوله کربنی در حالت رزنانس اولیه، رزنانس زیرهارمونیک و رزنانس فوق هارمونیک بدست آمد. سپس اثر میدان و سیال مغناطیسی بر پاسخ فرکانسی در حالت رزنانس اولیه و رزنانس ثانویه بررسی شد. در پایان دیاگرامهای فازی و پوانکاره برای نانولوله ترسیم شده و اثر سیال و میدان مغناطیسی بر وقوع پدیده آشوب بررسی گردید.

خلاصه نتايج گرفته شده از اين پژوهش بهصورت زير ميباشد:

اثر میدان مغناطیسی باعث افزایش اثر سخت شوندگی شده
 و رفتار غیر خطی و به تبع ناپایداری سیستم را افزایش میدهد. از طرفی اثر
 سیال مغناطیسی باعث می شود که منحنی های پاسخ فرکانسی، بسته شده و
 سیستم پایدارتر شده و دامنه پدیده نامطلوب پرش کاهش یابد.

افزایش سرعت سیال در داخل نانولوله کربنی هم در حضور میدان مغناطیسی طولی و هم با وجود سیال مغناطیسی، باعث افزایش ناپایداری سیستم می شود.

در رزنانس اولیه با وجود میدان مغناطیسی طولی، با افزایش
 دامنه تحریک، منحنیهای پاسخ فرکانسی شامل دو زیر دامنه میباشد. که
 یکی منحنی مجانبی با محور افقی است و دیگری شامل یک منحنی بسته
 است.

دررزنانس زیرهارمونیک با وجود میدان مغناطیسی طولی، منحنی پاسخ بصورت یک منحنی بسته میباشد که با افزایش دامنه تحریک، دامنه پاسخ نیز افزایش مییابد و تا شدت میدان مغناطیسیهای بالا، سیستم پایدار میباشد.

دررزنانس فوق هارمونیک با وجود میدان مغناطیسی طولی، با
 افزایش دامنه تحریک، سیستم یک رفتار سخت شونده از خود نشان میدهد
 بطوریکه اثر غیرخطی سیستم افزایش یافته، پایداری سیستم کم شده و دامنه
 غیرمطلوب پرش افزایش مییابد.

وجود میدان مغناطیسی باعث میشود که دامنه ارتعاشی سیستم ناپایدار و دچار چرخه حدی شود. در این شرایط پاسخ ارتعاشی شبه

متناوب است.

وجود سیال مغناطیسی باعث می شود که دامنه ارتعاشی پایدار بوده و پاسخ زمانی متناوب شود؛ به گونه ای که نمودار پوانکاره یک نقطه را در صفحه فاز نشان می دهد.

با وجود سیال مغناطیسی و ضریب منفی فونداسیون الاستیک، دامنه ارتعاشی ناپایدار بوده و پاسخ زمانی گذرا است؛ به گونهای که نمودار فازی یک رفتارآشوبناک را در صفحه فاز نشان میدهد.

منابع

- [1] A. Thiaville, JM. Garcıa, J. Miltat, Domain wall dynamics in nanowires, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 242 (2002) 1061-1063.
- [2] I. Mönch, A. Meye, A. Leonhardt, K. Krämer, R. Kozhuharova, T. Gemming, MP. Wirth, B. Büchner, Ferromagnetic filled carbon nanotubes and nanoparticles: synthesis and lipid-mediated delivery into human tumor cells, Journal of magnetism and magnetic materials, 290 (2005) 276-8.
- [3] A. Leonhardt, I. Mönch, A. Meye, S. Hampel, B. Büchner, Synthesis of ferromagnetic filled carbon nanotubes and their biomedical application, InAdvances in Science and Technology, 49 (2006) 74-78, Trans Tech Publications Ltd.
- [4] B. Beigzadeh, Numerical simulation of micro/ nano magnetic particles movement in bloodstream considering interaction of particles, Modares Mechanical Engineering, 17 (2017) 307-14. [In Persian]
- [5] A. Salari, A. Sharifi, H. Niazmand, Iron-carbon micro particles drug targeting simulation in vertebrobasilar system: magnetic field effects, Modares Mechanical Engineering, 16 (2017) 92-102. [In Persian]
- [6] YZ. Wang, FM. Li, Nonlinear primary resonance of nano beam with axial initial load by nonlocal continuum theory, International Journal of Non-Linear Mechanics, 61 (2014) 74-9. [In Persian]
- [7] H. Rafieipour, A. Lotfavar, SS. HAMZE, Nonlinear vibration analysis of functionally graded beam on winkler-pasternak foundation under mechanical and

a magneto-thermal environment, Physica Scripta., 95 (2020) 065204.

- [17] R. Ansari, A. Norouzzadeh, R. Gholami, Force vibration analysis of conveying fluid carbon nanotube resting on elastic foundation based on modified couple stress theory, Modares Mechanical Engineering, 15 (2015) 27-34. [In Persian]
- [18] E. Mahmoudpour, M. Esmaeili, Nonlinear free and forced vibration of carbon nanotubes conveying magnetic nanoflow and subjected to a longitudinal magnetic field using stress-driven nonlocal integral model, Thin-Walled Structures, 166 (2021) 108134.
- [19] AA. Alizadeh, HR. Mirdamadi, Free vibration and divergence instability of pipes conveying fluid with uncertain structural parameters, Modares Mechanical Engineering, 15 (2015) 247-54. [In Persian]
- [20] GH. Zarepour, I. Javanshir, Semi-Analytical Study of Fluid-Induced Nonlinear Vibrations In Viscoelastic Beams with Standard Linear Solid Model Using Multiple Time Scales Method, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53 (2021) 5. [In Persian]
- [21] R. Khodabakhsh, AR. Saidi, R. Bahaadini, Nonlinear Vibrations of Graphene Reinforced Pipes Conveying Fluid, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53 (2021) 1. [In Persian]
- [22] A. Shooshtari, V. Atabakhshian, Stability Analyses and Dynamic Response of Fluid Conveyed Thin-Walled Piezoelectric Cylinder Under Harmonic Excitation, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 50 (2018) 151-162. [In Persian]
- [23] A. Parsa, E. Mahmoudpour, Nonlinear free vibration analysis of embedded flexoelectric curved nanobeams conveying fluid and submerged in fluid via nonlocal strain gradient elasticity theory, Microsyst. Technol., 25 (2019) 4323–4339.
- [24] E. Mahmoudpour, A. Parsa, M. Parsa, Nonlinear response and stability of flexoelectric nanotube conveying fluid under temperature field using nonlocal strain gradient theory, Scientific Journal of Aerospace mechanics, 18 (2022) 1-18. [In Persian]

thermal loading via homotopy analysis method, Modares Mechanical Engineering, (2013) 87-101.]In Persian[

- [8] ST. Pourashraf, R. Ansari, Nonlinear forced vibration analysis of functionally graded nanobeams in thermal environments with considering surface stress and nonlocal effects, Modares Mechanical Engineering, 14 (2015) 17-26. [In Persian]
- [9] E. Mahmoudpour, Nonlinear Vibration Analysis of FG Nano-Beams in Thermal Environment and Resting on Nonlinear Foundation based on Nonlocal and Strain-Inertia Gradient Theory, ADMT Journal, 11 (2018) 11-24 [In Persian]
- [10] R. Barretta, A. Caporale, S.A. Faghidian, R. Luciano, F. Marotti de Sciarra, C.Maria Medaglia, A stress-driven local-nonlocal mixture model for Timoshenko nanobeams, Composites B, 164 (2019) 590–598.
- [11] P. Bian, H. Qing, C. Gao, One-dimensional stress-driven nonlocal integral model with bi-Helmholtz kernel: Close form solution and consistent size effect, Appl. Math. Model. 89 (2021) 400–412.
- [12] R. Barretta, S.A. Faghidian, R. Luciano, C.M. Medaglia, R. Penna, Free vibrations of FG elastic timoshenko nano-beams by strain gradient and stress-driven nonlocal models, Composites B, 154 (2018) 20–32.
- [13] A. Apuzzo, R. Barretta, R. Luciano, F.M. de Sciarra, R. Penna, Free vibrations of Bernoulli–Euler nano-beams by the stress-driven nonlocal integral model, Composites B, 123 (2017) 105–111.
- [14] E. Mahmoudpour, S.H. Hosseini-Hashemi, S.A. Faghidian, Nonlinear vibration analysis of FG nanobeams resting on elastic foundation in thermal environment using stress-driven nonlocal integral model, Appl. Math. Model. 57 (2018) 302–315.
- [15] R. Barretta, S.A. Faghidian, F.M. de Sciarra, Stressdriven nonlocal integral elasticity for axisymmetric nano-plates, Internat. J. Engrg. Sci. 136 (2019) 38–52.
- [16] HM. Sedighi, HM. Ouakad, R. Dimitri, F. Tornabene, Stress-driven nonlocal elasticity for the instability analysis of fluid-conveying C-BN hybrid-nanotube in

thermal environment. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 52 (2020) 233-48. [In Persian]

- [28] M. Sadeghi-Goughari, S. Jeon, HJ. Kwon, Effects of magnetic-fluid flow on structural instability of a carbon nanotube conveying nanoflow under a longitudinal magnetic field, Physics Letters A, 381 (2017) 2898-905.
- [29] E. Mahmoudpour, Differences between stress-driven nonlocal integral model and Eringen differential model in the vibrations analysis of carbon nanotubes conveying magnetic nanoflow, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43 (2021) 1-21.
- [25] H. Ramezannejad Azarboni, H. Keshavarzpour, Surface and Magnetic Field Effects Analysis on the Primary and Superharmonic Resonance Frequency Response of Single Walled CNT, Modares Mechanical Engineering, 19 (2019) 1-9. [In Persian]
- [26] Massoud M, Tahani M. Chaotic behavior of nonlocal nanobeam resting on a nonlinear viscoelastic foundation subjected to harmonic excitation. Modares Mechanical Engineering, 18 (2018) 264-72. [In Persian]
- [27] Ramezannejad Azarboni H, Keshavarzpour H. Nonlocal chaotic vibration Analysis on the Primary and Superharmonic Resonance of Single Walled CNT in

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم E. Mahmoudpour, The Effect of Magnetic Field and Fluid on the Primary and Secondary Frequency Response of Fluid-Conveying Carbon Nanotubes Using a Stress-Driven Nonlocal Integral Model, Amirkabir J. Mech Eng., 54(10) (2023) 2315-2332.



DOI: 10.22060/mej.2022.21144.7386

بی موجعه محمد ا