



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

ابراهیم 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
رزنانس ثانویه

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 غیرمحلّی مبتنی بر تنش استفاده شده است. در پایان اثر سیال 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 پویانکاره 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 می‌باشد. که یکی منحنی مجانبی با محور افقی است و دیگری شامل یک منحنی بسته است.

۱- مقدمه

به منظور تحلیل ارتعاشات آزاد و اجباری نانوتیرها و بررسی اثرات اندازه کوچک، از تئوری‌های مختلفی نظیر تئوری الاستیسیته غیرموضعی، گرادیان کرنش، گرادیان کرنش-انرژی 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 نمی‌کند. به همین خاطر رافائل برتا^۱ و همکاران [۱۲-۱۰] تئوری جدیدی با شرایط مرزی ساختاری جدید تحت عنوان مدل انتگرال غیرمحلّی مبتنی بر تنش^۲ 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

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 پر شده 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 پر شده با آهن، برای استراتژی‌های جدید درمانی ضد سرطان ابزارهای جدید و بالقوه جذابی هستند.

1 Raffaele Barretta

2 Stress-driven nonlocal integral model

3 Apuzzo

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: E.Mahmoodpour@yahoo.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



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 می‌شود.

۲- معادلات حاکم

در شکل 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- تئوری الاستیسیته مدل انتگرال غیرمحلّی مبتنی 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 می‌گیرد و این در حالی است که این تئوری برای پیش بینی رفتار نانوتیری که در چار تناقض می‌شود. به همین خاطر محققان بسیاری در صدد یافتن تئوریهای جدید الاستیسیته برای بررسی رفتار نانو سازه ها هستند. در این میان اولین بار تئوری جدیدی توسط آقای رافائل برتا^۱ تحت عنوان مدل انتگرال غیرمحلّی مبتنی بر تنش مطرح شد که در تحلیل رفتار استاتیکی و دینامیکی نانوتیر با انواع شرایط مرزی رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهد. در این تئوری میدان انحنای الاستیک بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

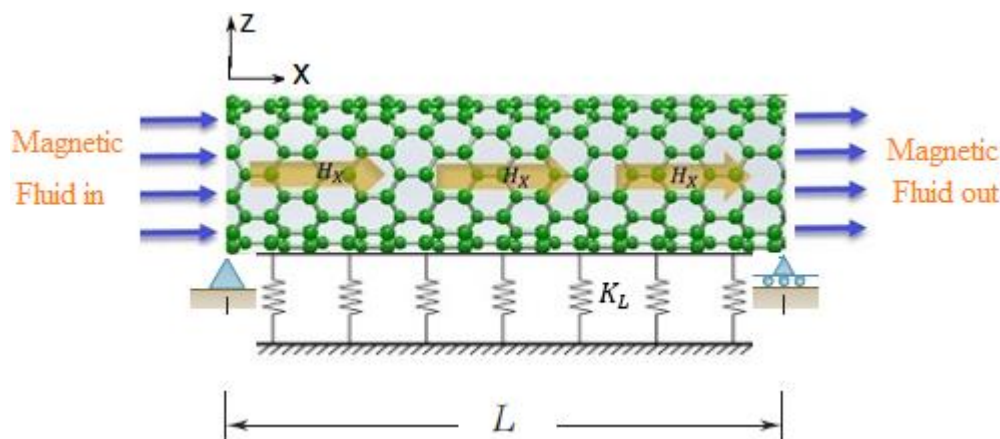
$$\chi_{EL} = \int_0^L \phi_\lambda(x - \xi) C M(\xi) d\xi \quad (1)$$

که M گشتاور خمشی و C انطباق الاستیک می‌باشد. منظور از میدان انحنای الاستیک همان شعاع انحنای تیر تحت خمش می‌باشد که از آن برای تعریف کرنش طولی ϵ_x و در نهایت محاسبه گشتاور خمشی M استفاده می‌شود. ضریب انطباق الاستیک بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = \frac{1}{\int_A E y^2 dA} \quad (2)$$

که در مدل انتگرال غیرمحلّی مبتنی بر تنش، با افزایش پارامتر مقیاس طول، فرکانس‌های طبیعی نانوتیر با شرایط مرزی مختلف افزایش پیدا می‌کنند. محمودپور و همکاران [۱۴] ارتعاشات غیر خطی نانوتیر هدفمند با شرایط مرزی مختلف واقع بر فونداسیون الاستیک و تحت میدان حرارتی با استفاده از مدل انتگرال غیرمحلّی 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 می‌کنند. برتا و همکاران [۱۵] با استفاده از مدل انتگرال غیرمحلّی مبتنی بر تنش، فرکانس‌های طبیعی نانورق 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 نانولوله‌های کربنی حامل سیال بر اساس مدل انتگرال غیرمحلّی 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 غیرمحلّی مبتنی بر تنش، را بررسی کردند ایشان کارآمدی مدل انتگرال غیرمحلّی 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، پیژوالکتریسیته و فلکسوالکتریک بر ارتعاشات نانولوله‌های کربنی حامل سیال بررسی شده است [۱۹-۲۴]. رمضان‌نژاد 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 می‌پردازد. 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 غیرمحلّی 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 در یک شدت میدان مغناطیسی خاص است، لذا در این مقاله به



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

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 زیر [۱۳]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \chi_{EL}(0)}{\partial x} = \frac{1}{l_s} \chi_{EL}(0) \\ \frac{\partial \chi_{EL}(L)}{\partial x} = \frac{1}{l_s} \chi_{EL}(L) \end{cases} \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} EI \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - l_s^2 \frac{\partial^6 w}{\partial x^6} \right] - \\ EA \left[\frac{3}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - l_s^2 \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. 4 \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \right] + \\ \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P(x, t) \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه (۲) سطح مقطع نانوتیر می‌باشد. پارامتر مشخصه غیرموضعی بدون بعد λ بصورت نسبت طول مشخصه l_s به طول نانوتیر L تعریف می‌شود. برای تبدیل معادله انتگرالی به معادله دیفرانسیل حاکم، تابع کرنل بصورت نمایی تعریف می‌شود [۱۳]:

$$\phi_\lambda(x) = \frac{1}{2l_s} \exp\left(-\frac{|x|}{l_s}\right) \quad (3)$$

با توجه به کرنل نمایی تعریف شده، می‌توان معادله انتگرالی (۱) را به فرم دیفرانسیلی زیر نوشت:

$$\frac{\partial^2 \chi_{EL}}{\partial x^2} = \frac{1}{l_s^2} (\chi_{EL} - C.M) \quad (4)$$

با توجه به تئوری تیر اولر-برنولی معادله حاکم بر ارتعاشات خطی نانولوله کربنی براساس تئوری الاستیسیته انتگرال غیرمحلّی مبتنی بر تنش، بصورت زیر می‌باشد [۱۳]:

$$EI \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - l_s^2 \frac{\partial^6 w}{\partial x^6} \right] + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = P(x, t) \quad (5)$$

که $w(x, t)$ خیز عرضی تیر در راستای z می‌باشد. از آنجاکه معادله دیفرانسیل خطی حاکم بر ارتعاشات نانولوله (رابطه (۵)) یک معادله

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

$$w(x, t) = w(x) e^{i\omega t} \quad (10)$$

که در آن ω 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 آنجا که معادله دیفرانسیل مرتبه‌ای حاصل، از مرتبه شش می‌باشد لذا ماتریس جابجایی بصورت یک آرایه شش عضو صفر قرار دادن ماتریس ضرایب فرکانس‌های طبیعی و در نهایت با استفاده از نرم افزار متمتیکا شکل مودهای نانو تیر بدست خواهند آمد. حال با استفاده از روش گالرکین و جاگذاری رابطه (۹) در معادله (۷) و ضرب معادله حاصل در $\phi(x)$ و انتگرال گیری در طول نانوتیر، معادله زیر بدست می‌آید:

$$\ddot{q} + \gamma_1 \dot{q} + \gamma_2 \dot{q} + \gamma_3 q^3 = f \cos(\omega t) \quad (11)$$

که ضرایب معادله فوق بصورت زیر می‌باشند:

$$\gamma_1 = [(a_3 - l_s^2 a_4) + K_L a_1 + (VCF \times V_f)^2 - H_1] a_2 + H_3 \times VCF \times V_f a_7 / a_1 \quad (الف-۱۲)$$

$$\gamma_2 = [ca_1 + 2VCF \times V_f \sqrt{\beta} a_7 + H_2 a_1] / a_1 \quad (ب-۱۲)$$

$$\gamma_3 = \delta [-1.5 a_5 + l_s^2 (a_6 + 4a_7 + a_8)] / a_1 \quad (ج-۱۲)$$

$$\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} = \int_0^l \left\{ \phi^2, \phi \cdot \frac{d^2 \phi}{dx^2}, \phi \cdot \frac{d^4 \phi}{dx^4}, \phi \cdot \frac{d^6 \phi}{dx^6}, \phi \cdot \frac{d^2 \phi}{dx^2} \cdot \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 \right\} dx \quad (د-۱۲)$$

که $P(x, t)$ بصورت مجموع بارگذاری هارمونیک خارجی P_{ext} ، فونداسیون الاستیک P_{rest} ، نیروی ناشی از جریان سیال مغناطیسی P_{fluid} ، نیروی ناشی از میدان مغناطیسی طولی P_{magnet} بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{ext} = P_0 \cos(\omega t) \quad (الف-۸)$$

$$P_{rest} = K_L w \quad (ب-۸)$$

$$P_{fluid} = m_f \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2(VCF u_{avg, no-slip}) \times \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + (VCF u_{avg, no-slip})^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - \sigma A H_x^2 \left(\frac{\partial w}{\partial t} + VCF u_{avg, no-slip} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \quad (ج-۸)$$

$$P_{magnet} = \eta A H_x^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (د-۸)$$

که $E, I, H_x, A, \rho, \Omega, VCF, P, K_L, \eta, \sigma, m_f$ 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].

$$w(x, t) = \phi(x) q(t) \quad (۹)$$

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

$$(3\gamma_2)^2 + \left[\sigma_1 - \frac{9\gamma_3\Lambda^2}{\sqrt{\gamma_1}} - \frac{9}{8} \frac{\gamma_3 a^2}{\sqrt{\gamma_1}} \right]^2 = \left(\frac{9\gamma_3\Lambda a}{4\sqrt{\gamma_1}} \right)^2, \quad (15)$$

که σ_1 و a و $\Lambda = f_1 / (2(\alpha_1 - \Omega^2))$ 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 یک سوم 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 می‌شود:

دانسیته (ρ)، نسبت منطری ($L/2R_{out}$)، مدول یانگ (E)، شعاع خارجی (R_{out}) و ضخامت نانولوله کربنی به ترتیب 2300 kg/m^3 ، 40 ، $3/4 \text{ TPa}$ و 3 nm و 0.1 nm [۲۸]. نفوذپذیری مغناطیسی نانولوله کربنی $10^{-7} \pi$ 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 $13/6 \text{ gr/cm}^3$ و هدایت الکتریکی $1/0.2 \text{ s/m}$ 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 می‌کند که در اینجا، نتایج فقط با حالت تیردوسر مفصل 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 که مواد اکستیک، ضریب فونداسیون منفی دارند. اکستیک‌ها یا مواد آگزتیک

$$\{a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}\} = \int_0^L \left\{ \phi \cdot \left(\frac{d^2 \phi}{dx^2} \right)^3, \phi \cdot \frac{d\phi}{dx} \cdot \frac{d^2 \phi}{dx^2} \cdot \frac{d^3 \phi}{dx^3}, \phi \cdot \frac{d^4 \phi}{dx^4} \cdot \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2, \phi \cdot \frac{d^3 \phi}{dx^3} \right\} dx \quad (5-12)$$

$$f = \frac{P L^3}{a_1 EI}, V_f = \sqrt{\frac{m_f}{EI}} L u_{avg, no slip}, \quad (9-12)$$

$$\beta = \frac{m_f}{m_c + m_f}, k_l = \frac{K_L L^4}{EI}, \delta = \frac{A L^2}{I}$$

$$H_1 = \frac{\eta A H_x^2 L^2}{EI},$$

$$H_2 = \frac{\sigma A H_x^2 L^2}{\sqrt{EI(m_f + m_c)}}, \quad (12-j)$$

$$H_3 = \frac{\sigma A H_x^2 L^2}{\sqrt{EI m_f}}$$

برای حل معادله غیرخطی (۱۱) روش‌های مختلفی وجود دارد. پاسخ فرکانسی این معادله در رزنانس اولیه و ثانویه با استفاده از روش مقیاس چندگانه^۱ بصورت زیر می‌باشد [۶]:

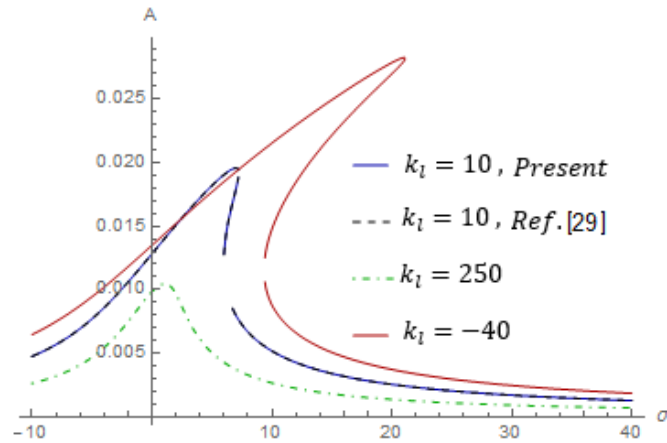
رزنانس اولیه

$$\gamma_2 + \left[\sigma_1 - \frac{3}{8} \frac{\gamma_3 a^2}{\sqrt{\gamma_1}} \right] = \left(\frac{f_1}{2a\sqrt{\gamma_1}} \right)^2 \quad (13)$$

رزنانس فوق هارمونیک

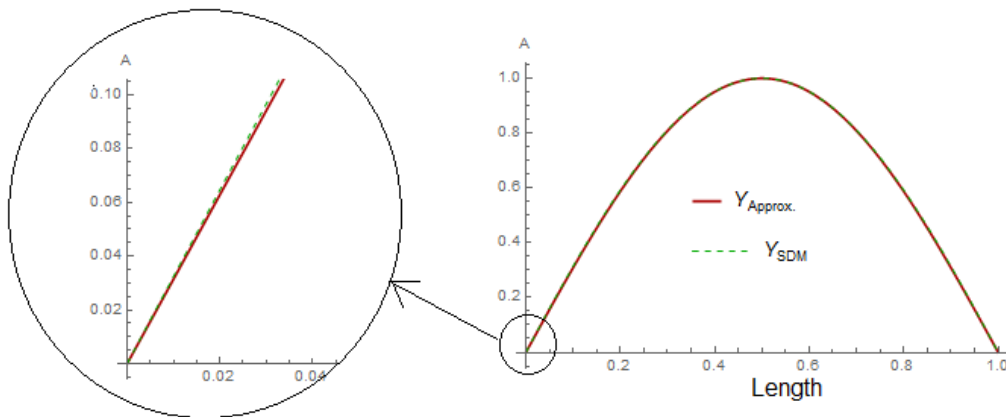
$$\gamma_2 + \left[\sigma_1 - \frac{3}{8} \frac{\gamma_3 a^2}{\sqrt{\gamma_1}} - \frac{3a_3\Lambda^2}{\sqrt{\gamma_1}} \right]^2 = \left(\frac{a_3\Lambda^3}{a\sqrt{\gamma_1}} \right)^2, \quad (14)$$

رزنانس زیرهارمونیک



شکل ۲. مقایسه نتایج پاسخ فرکانسی در رزونانس اولیه برای یک نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی واقع بر روی فونداسیون الاستیک با مرجع [۲۹] ($l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 2 \times 10^4$)

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] ($l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 2 \times 10^4$)

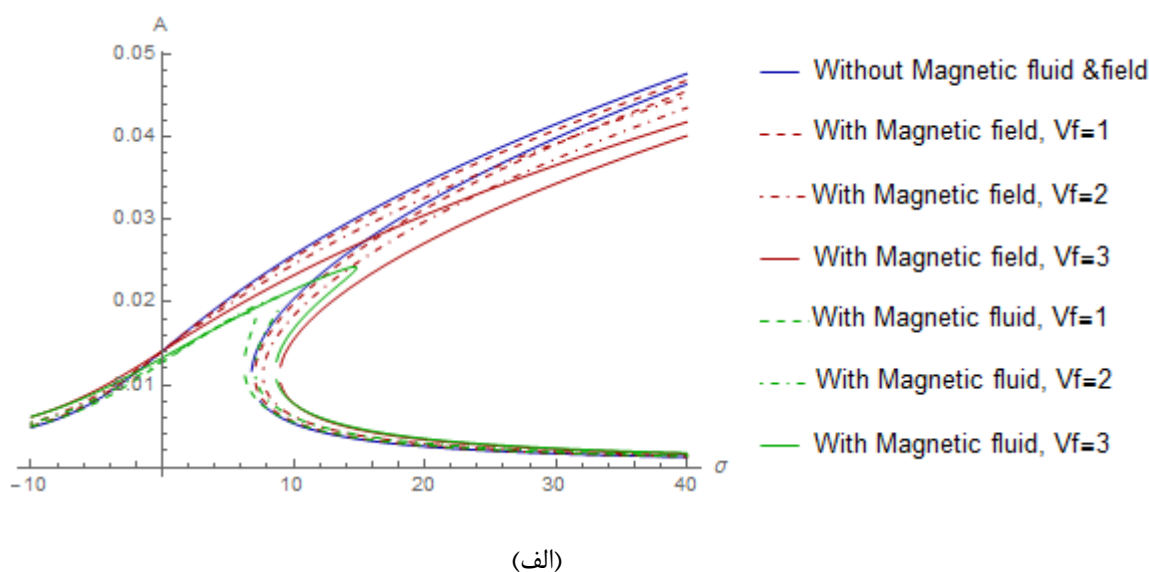


شکل ۳. مقایسه شکل مود اول بدست آمده از حل تئوری الاستیسیته SDM با حل تقریبی

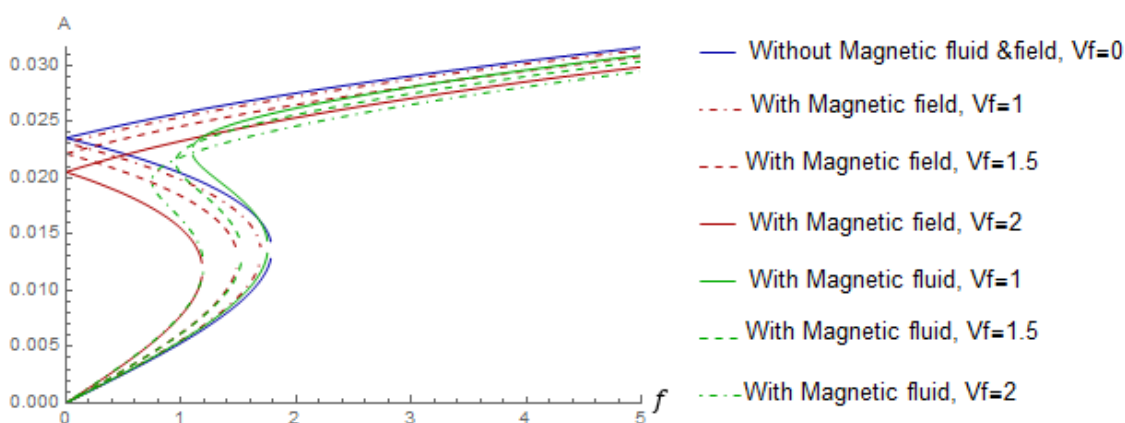
Fig. 3. Comparison of the shape of the first mode obtained from the solution of SDM elasticity theory with the approximate solution

شکل مود اول نانولوله کربنی دوسر مفصل بدست آمده از نتایج تحلیلی با شکل مود تقریبی $\sin[\pi x]$ در شکل ۳ مقایسه شده است. در اکثر مقالات برای خیز نانو تیر با شرایط مرزی دو سر مفصل از تابع تقریبی $\sin[\pi x]$ استفاده می‌شود و این در حالی است که با توجه به تئوری‌های مختلف برای مدل کردن نانوتیر دو سر مفصل، توابع خیز متفاوتی بدست خواهد آمد که قطعاً $\sin[\pi x]$ 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 می‌شود این دو منحنی اختلاف ناچیزی

یا مواد پادکشسان^۱ موادی 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.



(الف)



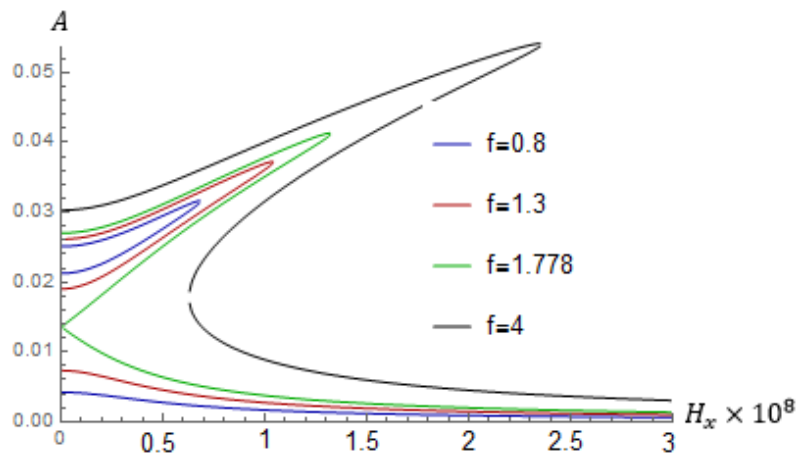
(ب)

شکل ۴. تغییرات دامنه پاسخ فرکانسی (الف) و پاسخ نیرویی (ب) با و بدون میدان و سیال مغناطیسی، با تغییر سرعت سیال ($I_s = 0.01$)

Fig. 4. Variations of frequency response amplitude (a) and force response (b) with and without field and magnetic fluid, with fluid velocity change ($I_s = 0.01$)

راست و متمایل شوند، اثر غیرخطی و به تبع ناپایداری سیستم بیشتر می‌شود. از طرفی اثر سیال مغناطیسی باعث می‌شود که منحنی‌ها بسته شده و سیستم پایدارتر شده و دامنه پدیده نامطلوب پرش کاهش یابد. با توجه به شکل می‌توان 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 می‌شود.

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



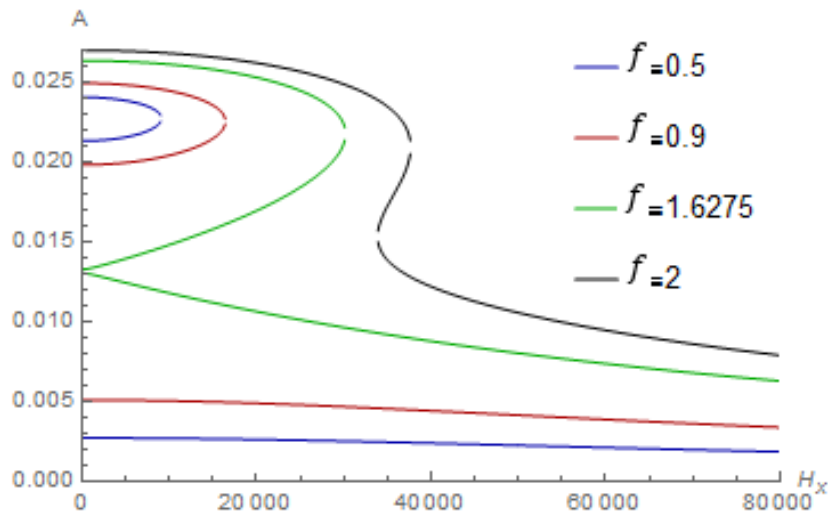
شکل ۵. تغییرات دامنه پاسخ در رزونانس اولیه بر حسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریک‌های مختلف برای یک نانولوله کربنی واقع در یک میدان مغناطیسی طولی ($l_s = 0.01, V_f = 1$)

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 ($l_s = 0.01, V_f = 1$).

اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزونانس اولیه با وجود سیال مغناطیسی در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطوری که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، با وجود سیال مغناطیسی، دامنه پاسخ، نسبت به وجود میدان مغناطیسی طولی، کاهش یافته و مقدار بحرانی دامنه تحریک در رزونانس اولیه $f=1/6275$ رخ می‌دهد. اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزونانس 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 می‌باشد که با افزایش دامنه تحریک، دامنه پاسخ نیز افزایش می‌یابد و تا شدت میدان مغناطیسی‌های بالا، حدود $1/5 \times 10^9$ ، سیستم پایدار می‌باشد.

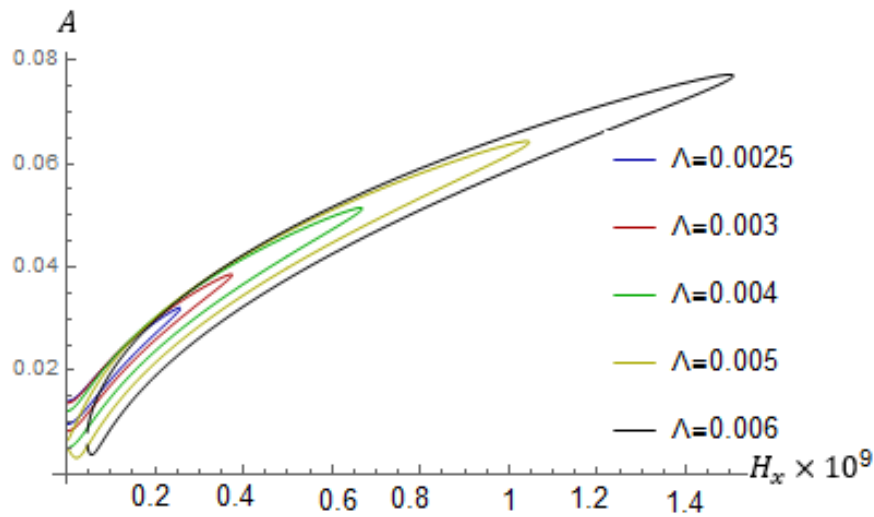
اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزونانس زیرهارمونیک با وجود سیال مغناطیسی در شکل ۸ نشان داده شده است. رفتار نانولوله کربنی حامل نانوسیال مغناطیسی در حالت زیر هارمونیک بصورت نوسانی می‌باشد. بدین صورت که با افزایش دامنه تحریک، محدوده پایداری و وجود جواب افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر 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

در شکل ۴ (ب) پاسخ نیرویی برای نانولوله کربنی حامل سیال تحت میدان مغناطیسی طولی و سیال مغناطیسی در رزونانس اولیه ترسیم شده است. همانطوری که 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 می‌شود. اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزونانس اولیه با وجود میدان مغناطیسی طولی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود، با افزایش دامنه تحریک، ابتدا منحنی‌های پاسخ فرکانسی شامل دو زیر دامنه می‌باشد. دامنه اول شامل یک منحنی مجانبی با محور افقی است که با افزایش H_x پاسخ دامنه به صفر می‌رسد. دامنه دوم شامل یک منحنی بسته است که با افزایش دامنه تحریک (f) گسترش می‌یابد. برای یک مقدار بحرانی f ، دو شاخه متصل شده و یک منحنی حاصل می‌شود. مقدار بحرانی دامنه تحریک در رزونانس اولیه $f=1/778$ می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش بیشتر دامنه تحریک، پاسخ دامنه به عنوان یک تابع تک مقداره از میدان مغناطیسی طولی ظاهر می‌شود. بر همین اساس، در انتقال نانوداروها تحت میدان مغناطیسی طولی باید به پاسخ دینامیکی سازه به ازاء تغییر دامنه تحریک، دقت ویژه به عمل آید.



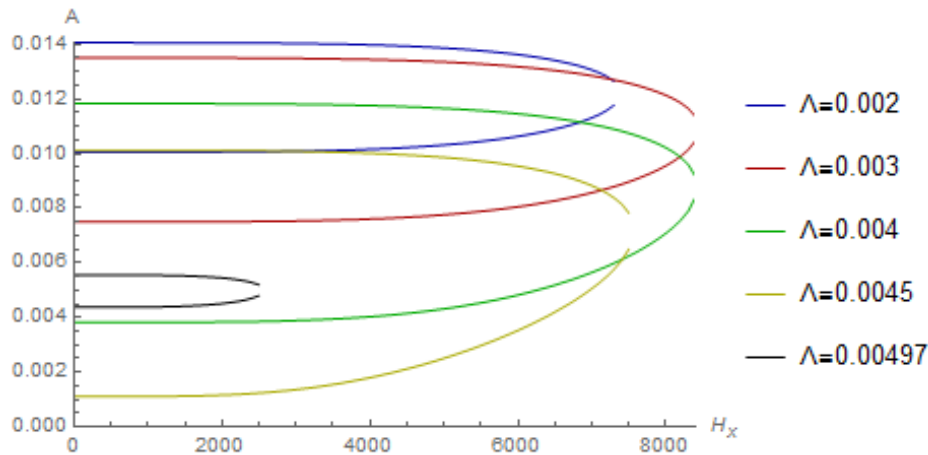
شکل ۶. تغییرات دامنه پاسخ در رزونانس اولیه برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف برای یک نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی ($l_s = 0.01, V_f = 1$)

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 ۷. تغییرات دامنه پاسخ در رزونانس زیرهارمونیک برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف برای یک نانولوله کربنی واقع در یک میدان مغناطیسی طولی ($l_s = 0.01, V_f = 1$)

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 رزونانس زیرهارمونیک برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف برای یک نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی ($I_s = 0.01, V_f = 1$)

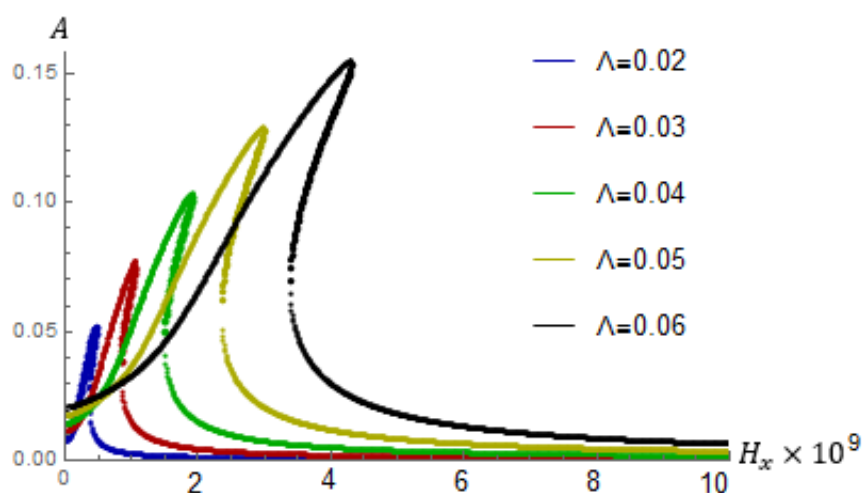
Fig. 8. Variations of the response amplitude in subharmonic resonance according to variations of the magnetic field intensity within the range of different excitations for a carbon nanotube conveying a magnetic fluid ($I_s = 0.01, V_f = 1$).

کوچکتر شده تا به صفر می‌رسد. اثر دامنه تحریک نیرو بر دامنه پاسخ با تغییر H_x در رزونانس 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 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 رزونانس فوق هارمونیک با وجود سیال مغناطیسی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ براحتی می‌توان دریافت که در رزونانس فوق هارمونیک با وجود سیال مغناطیسی منحنی‌های پاسخ فرکانسی شامل دو زیر دامنه می‌باشند و در دامنه بحرانی $\Lambda = 0.05$ 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

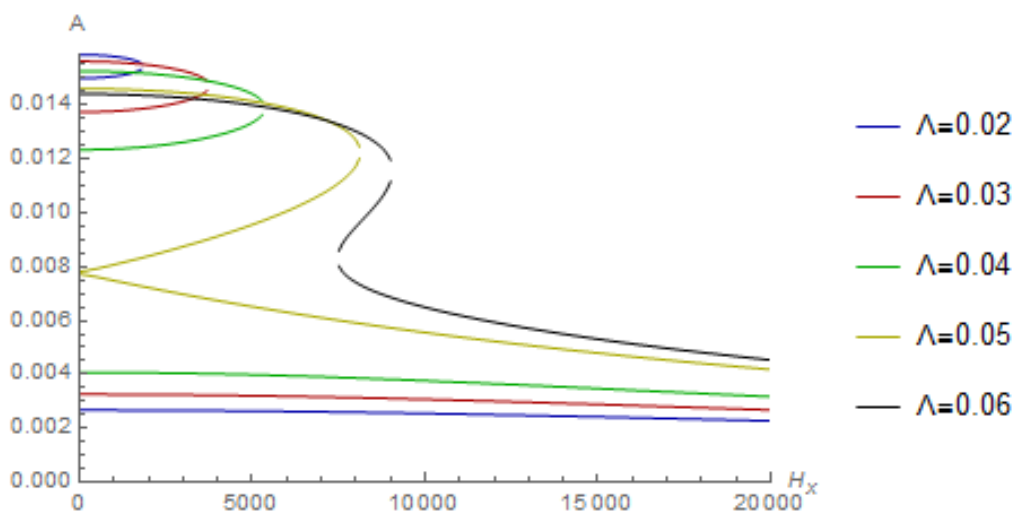
یک میدان مغناطیسی طولی را در قالب نمودارهای فازی جابجایی-سرعت، دیاگرام پوانکاره و تاریخچه زمانی مشاهده نمود. همانطوری که در شکل‌های ۱۱ (الف) تا (ج) دیده می‌شود تا $H_x = 10^7$ ، دامنه ارتعاشی ناپایدار و دچار چرخه حدی می‌شود. در این شرایط پاسخ ارتعاشی شبه متناوب است. در شکل ۱۲ می‌توان رفتار ارتعاشی نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی را در قالب نمودارهای فازی، دیاگرام پوانکاره و تاریخچه زمانی مشاهده نمود. همانطوری که در شکل‌های ۱۲ (الف) تا (ج) دیده می‌شود تا 10^4 $H_x = 3 \times 10^4$ ، دامنه ارتعاشی پایدار بوده و پاسخ زمانی متناوب است؛ به گونه‌ای که نمودار پوانکاره یک نقطه را در صفحه فاز نشان می‌دهد.

در شکل ۱۳ می‌توان رفتار ارتعاشی نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی واقع بر فونداسیون الاستیک را در قالب نمودارهای فازی، دیاگرام پوانکاره و تاریخچه زمانی مشاهده نمود. همانطوری که در شکل‌های ۱۳ (الف) تا (ج) دیده می‌شود در شدت میدان مغناطیسی 10^4 $H_x = 0.5 \times 10^4$ و بازای $k_f = -175$ ، دامنه ارتعاشی ناپایدار بوده و پاسخ زمانی گذرا است؛ به گونه‌ای که نمودار فازی یک رفتار آشوبناک را در صفحه فاز نشان می‌دهد.



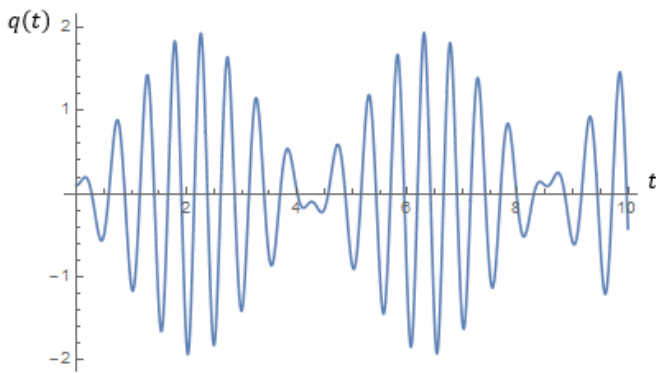
شکل ۹. تغییرات دامنه پاسخ در رزونانس فوق هارمونیک برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف برای یک نانولوله کربنی واقع در یک میدان مغناطیسی طولی ($I_s = 0.01, V_f = 1$)

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 ($I_s = 0.01, V_f = 1$).

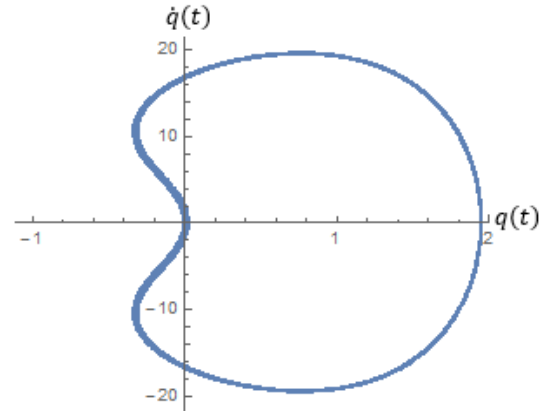


شکل ۱۰. تغییرات دامنه پاسخ در رزونانس فوق هارمونیک برحسب تغییرات شدت میدان مغناطیسی به ازاء دامنه تحریکهای مختلف برای یک نانولوله کربنی حامل سیال مغناطیسی ($I_s = 0.01, V_f = 1$)

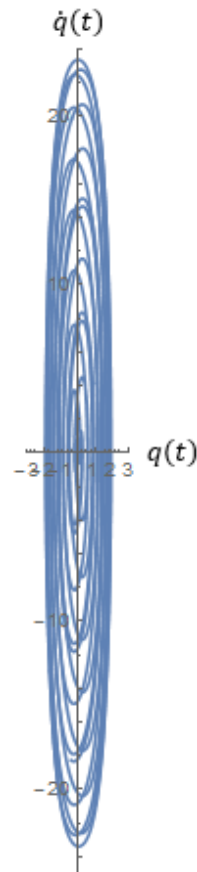
Fig. 10. Variations of the response amplitude in superharmonic resonance according to variations of the magnetic field intensity within the range of different excitations for a carbon nanotube conveying a magnetic fluid ($I_s = 0.01, V_f = 1$).



(الف) تاریخچه زمانی



(ب) دیاگرام پوانکاره

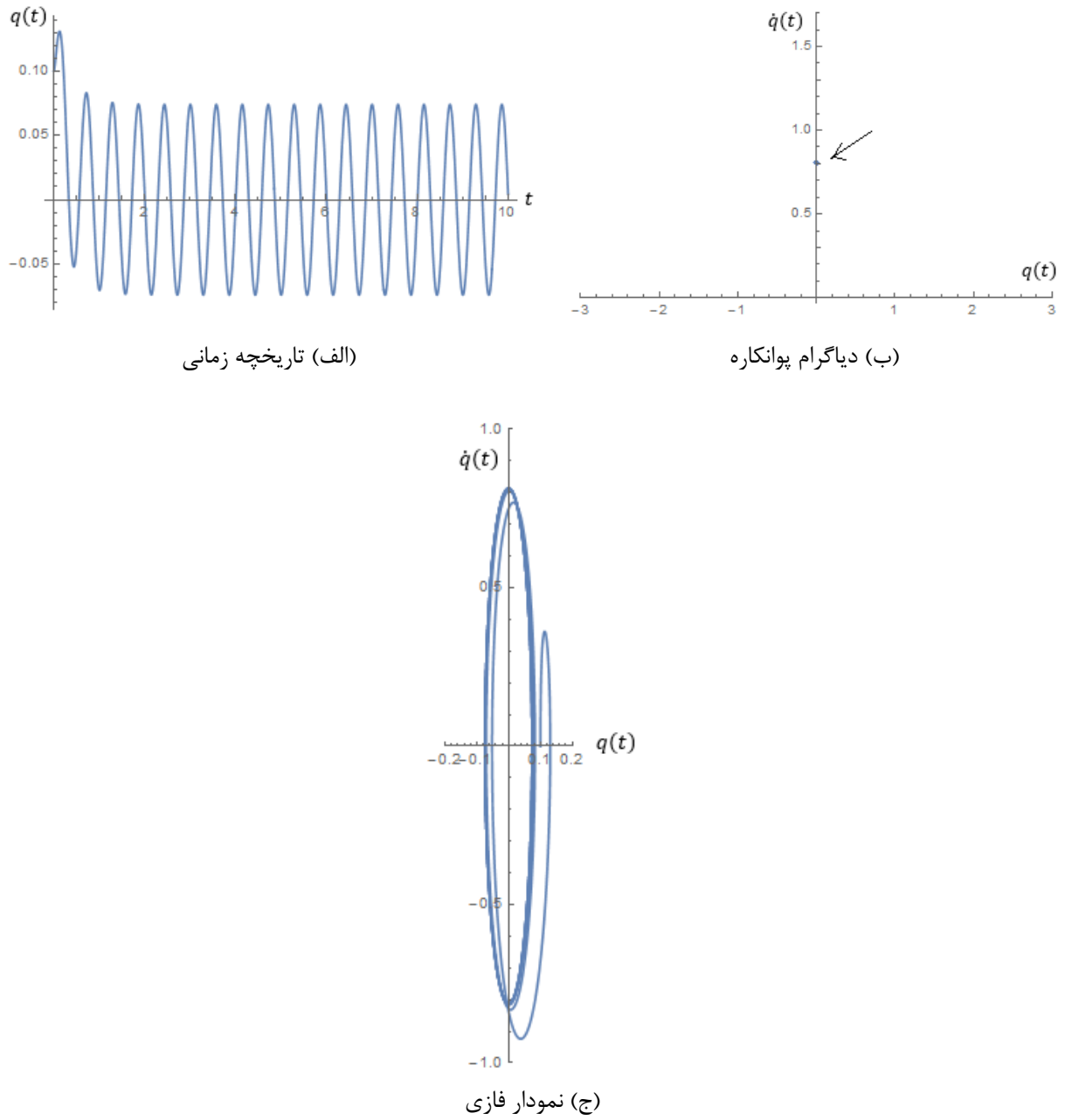


(ج) نمودار فازی

شکل ۱۱. تاریخچه زمانی (الف)، دیاگرام پوانکاره (ب) و نمودار فازی (ج). رفتار شبه پریودیک نانولوله کربنی واقع در یک میدان

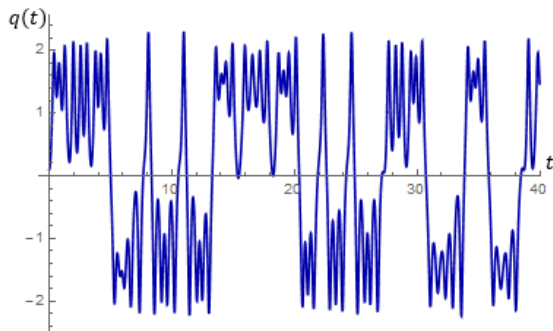
$$\text{مغناطیسی طولی به ازاء } (l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 10^7)$$

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 ($l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 10^7$).

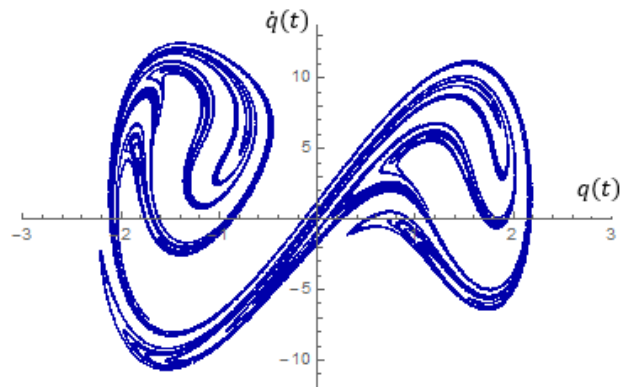


شکل ۱۲. تاریخچه زمانی (الف)، دیاگرام پوانکاره (ب) و نمودار فازی (ج). رفتار پریودیک نانولوله کربنی واقع در یک میدان مغناطیسی طولی به ازاء $(l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 3 \times 10^4)$

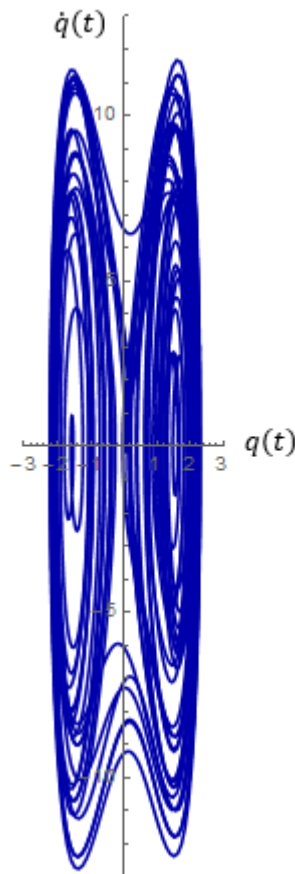
Fig. 12. Time history (a), Poincaré diagram (b) and phase diagram (c) of quasi-periodic behavior of carbon nanotube located in a longitudinal magnetic field $(l_s = 0.01, V_f = 1, H_x = 3 \times 10^4)$.



(الف) تاریخچه زمانی



(ب) دیاگرام پوانکاره



(ج) نمودار فازی

شکل ۱۳. تاریخچه زمانی (الف)، دیاگرام پوانکاره (ب) و نمودار فازی (ج). رفتار آشوبناک نانولوله کربنی واقع در یک میدان مغناطیسی طولی به اِزاء $(l_s = 0.01, V_f = 1, k_l = -175, H_x = 0.5 \times 10^4)$

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

متناوب است.

❖ 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.

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

منابع

- [1] A. Thiaville, JM. Garcia, 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, In *Advances 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

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 غیرمحلّی مبتنی بر تنش، بدست آمد. با استفاده از روش مقیاس‌های چندگانه معادلات دیفرانسیل حاکم حل شد و پاسخ فرکانسی نانولوله کربنی در حالت رزونانس اولیه، رزونانس زیرهارمونیک و رزونانس فوق هارمونیک بدست آمد. سپس اثر میدان و سیال مغناطیسی بر پاسخ فرکانسی در حالت رزونانس اولیه و رزونانس 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 نتایج گرفته شده از این پژوهش به صورت زیر می‌باشد:

❖ 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 می‌شود که منحنی‌های 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 می‌شود.

❖ در رزونانس 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.

❖ در رزونانس 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.

❖ در رزونانس 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

- 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. Esmaili, 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. Shoostari, 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 nano-beams, *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 nano-beams 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, Stress-driven 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



