



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

هدیه محجوب<sup>۱</sup>، حبیب رمضان نژاد آزاربنی<sup>۲\*</sup>

۱- مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
۲- مهندسی مکانیک، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۷  
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۱۵

### کلمات کلیدی:

نانولوله کربنی حامل سیال  
آنالیز حساسیت  
محیط ترمومغناطیسی  
سرعت بحرانی سیال  
تنش پسماند و الاستیسیته سطح

**خلاصه:** در این تحقیق بر اساس تئوری غیرمحلّی تیر اویلر برنولی به تحلیل آنالیز حساسیت ناپایداری و فرکانسی نانولوله‌های کربنی تک لایه حامل سیال پرداخته شده است. در این تحلیل اثرات محیط ترمومغناطیسی، تنش پسماند و الاستیسیته سطح، بستر ویسکوالاستیک و پارامتر غیرمحلّی در استخراج معادلات حاکم بر حرکت سیستم اعمال شده است. 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-گیردار در دو انتهای نانولوله استفاده شده است. با استخراج ماتریس‌های جرم، سفتی و استهلاک سیستم، مقادیر ویژه و سرعت بحرانی متناظر با آستانه ناپایداری محاسبه شده است. برای تحلیل آنالیز حساسیت میدان مغناطیسی، تغییرات دما در دو حالت دمابالا و دمابالین، طول نانولوله، قطر خارجی نانولوله و پارامتر غیرمحلّی به‌عنوان فاکتورهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. اثر میزان حساسیت هر یک 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 شده است. نتایج تحلیل آنالیز حساسیت انجام شده را می‌توان در طراحی بهینه یا هدف محور نانولوله‌های کربنی تک لایه حامل سیال در کاربردهای مختلف به‌ویژه در به‌کارگیری در تحویل داروهای برای از بین بردن سلول‌های سرطانی مورد استفاده قرار داد.

### ۱- مقدمه

ریو و همکاران [۱] از نظریه کلاسیک تیر اویلر-الاستیک برای بررسی 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 در نظر گرفتن اینرسی چرخشی و تغییر شکل برش عرضی تأثیر سرعت جریان و نسبت ابعاد مایع انتقال‌دهنده نانولوله‌های کربنی تک‌لایه را مطالعه کردند. نتایج نشان می‌دهد که اینرسی چرخشی و تغییر شکل برشی عرضی تأثیر قابل توجهی بر فرکانس و شرایط پایداری نانولوله‌های کوتاه دارند. لی و چانگ [۳] با به‌کارگیری نظریه تیر کلاسیک اویلر-برنولی غیرمحلّی، تحلیل اثرات پارامتر غیرمحلّی، ویسکوزیته سیال، نسبت ابعاد و ضریب بستر الاستیک بر ارتعاش آزاد سیال غیرمحلّی 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 مدل‌سازی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که

نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص فیزیکی عالی همراه با اندازه کوچک و هندسه توخالی می‌توانند برای کاربرد بیولوژیکی مانند نانولوله انتقال دارو به‌منظور از بین بردن سلول‌های سرطانی متاستاتیک به کار روند. تحویل انتخابی داروهای ضد سرطان، به نام درمان هدف، با به‌کارگیری 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 قرار گرفته است. تحقیقات زیادی در مورد ناپایداری دینامیکی و آنالیز ارتعاش نانولوله کربنی با استفاده از تئوری‌های مختلف وجود دارد.

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

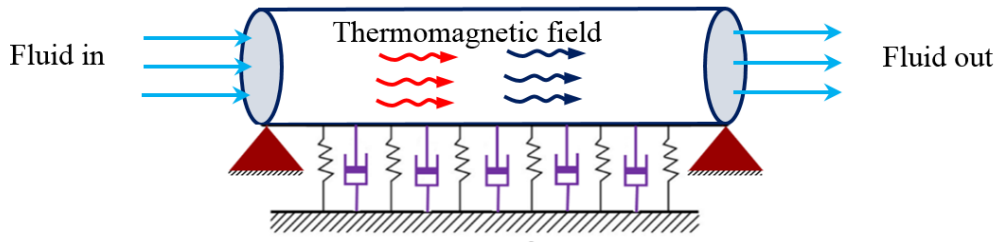


با افزایش دما، سرعت جریان بحرانی و فرکانس‌های طبیعی افزایش خواهد یافت. همچنین پارامتر غیرمحلّی تأثیر نسبتاً کمتری بر فرکانس مرتبه اول دارد و این اثر در مودهای بالاتر افزایش می‌یابد.

سلطانی و همکاران [۵] پایداری و ارتعاشات نانولوله‌های کربنی تک‌لایه حامل سیال لزج را تحت یک بافت نرم زیستی ویسکوالاستیک براساس مدل تیر اویلر-برنولی الاستیک غیرمحلّی بررسی کردند. اثرات پارامتر غیر محلّی، ضریب بستر ویسکوالاستیک برای بررسی فرکانس رزونانس در نظر گرفته شد. کاویانی و میردامادی [۶] با در نظر گرفتن 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 پس‌از آن این نرخ رشد کاهش می‌یابد و یکنواخت می‌شود. چانگ [۷] مدلی را بر اساس یک تیر برنولی-ویلر الاستیک برای نانولوله‌های کربنی تک‌لایه حامل سیال توسعه داد. اثرات تغییر دما، پارامتر غیرمحلّی 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 طبیعی و سرعت جریان بحرانی به سطح دما بستگی دارد. در حالت دمایی، افزایش دما باعث افزایش فرکانس طبیعی و سرعت جریان بحرانی می‌شود، درحالی‌که در حالت دمابالا با افزایش دما، فرکانس طبیعی و سرعت جریان بحرانی کاهش می‌یابد.

وانگ [۸] مدل تیر اویلر-برنولی را برای محاسبه فرکانس و سرعت بحرانی نانولوله‌های کربنی تک‌لایه حامل سیال را با در نظر گرفتن 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 غیرمحلّی فرکانس‌های طبیعی نانولوله‌های کربنی تک‌لایه را محاسبه کردند. اثرات پارامتر غیرمحلّی، 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 روش، پنج مود اول فرکانس‌های طبیعی نانولوله‌های کربنی تک‌لایه در سرعت‌های مختلف محاسبه می‌شوند. ژانگ و مگووید [۱۱] بر اساس تئوری تیر تیموشنکو معادله ارتعاشی عرضی حرکت نانو تیر حامل سیال را با در نظر گرفتن اثر الاستیسیته سطح، فرمول‌بندی کردند. به دلیل خواص الاستیسیته سطح متفاوت، در نظر گرفتن اثر سطح موجب کاهش فرکانس

و سرعت بحرانی برای نانو تیر آلومینیوم و باعث افزایش فرکانس و سرعت بحرانی نانو تیر سیلیکون می‌شود. وانگ و همکارانش [۱۲] بر اساس تئوری الاستیسیته غیر محلّی تیر و با به‌کارگیری روش مربعات دیفرانسیلی 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 بهبود یافته و سرعت بحرانی سیال افزایش می‌یابد. علاوه بر این، این میدان مغناطیسی می‌تواند پایداری دینامیکی سیستم را کنترل کند. بهائدینی و همکاران [۱۳]، [۱۴] ارتعاشات آزاد و ناپایداری فلاتر در نانولوله‌های حامل سیال را با توجه به اثر شرایط لغزش و الاستیسیته غیرمحلّی 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 در نظر گرفتن اثر اندازه کوچک نانو سیالات و نانو ساختار مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که عدد نادسن تأثیر قابل توجهی بر کاهش سرعت جریان بحرانی دارد. اویسی و قاسمی [۱۶] ارتعاش نانولوله‌های کربنی تک‌لایه و انتشار موج طولی و عرضی با استفاده از جریان وابسته به ضریب نادسن و تئوری غیرمحلّی ارینگن را تحلیل کردند. صادق و همکاران [۱۷-۱۹] 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 غیرمحلّی روی فرکانس و سرعت بحرانی نانولوله‌های کربنی تک‌لایه مورد بررسی قرار گرفته است. چنگ و همکاران [۲۰] مطالعه ارتعاشات آزاد نانولوله‌های هیبریدی حامل سیال متشکل از نانولوله‌های کربنی و نانولوله‌های نیتريد بور را انجام دادند. حسینی و همکاران [۲۱] فلاتر و ناپایداری نانولوله پیزوالکتریک حامل سیال را براساس نظریه تیر اویلر-برنولی غیرمحلّی مورد بررسی قرار دادند. شرط لغزش بین جریان و دیواره نانولوله توسط عدد نادسن مدل‌سازی شد. لی و وانگ [۲۲] تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و تئوری گرادیان کرنش غیرمحلّی را برای مطالعه شرایط ناپایداری سیال حامل نانولوله‌های لیبیدی به کار بردند. اثرات خواص هندسی و پارامتر غیر محلّی برای نانولوله‌های چربی حامل سیال مختلف مورد بحث قرار گرفت. صدیقی [۲۳] ناپایداری و فلاتر نانولوله کربنی و نیتريد بور را در معرض میدان مغناطیسی و دما براساس مدل تیر اویلر-برنولی با در نظر گرفتن ضریب تصحیح سرعت برای شرایط لغزش مختلف بررسی کرد.



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

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

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

$$M(x,t) - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} = -EI \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

که  $m_c$  جرم نانولوله در واحد طول،  $w(x,t)$  جابجایی عرضی نانولوله،  $F_{ext}$  نیروی خارجی اعمال شده در واحد طول و  $M(x,t)$  برآیند گشتاور خمشی،  $e_0 a$  پارامتر غیرمحملی،  $E$  مدول الاستیک و  $I$  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  $F_T(x,t)$ ، نیروی بستر ویسکو الاستیک  $F_m(x,t)$ ، نیروی معادل دمایی  $F_T(x,t)$  و  $F_B(x,t)$  نیروی ناشی از میدان مغناطیسی است.

$$F_{ext} = F_f(x,t) + F_T(x,t) + F_m(x,t) + F_T(x,t) + F_B(x,t) \quad (2)$$

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 می‌توان دریافت که بیشتر مطالعات انجام شده 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 نشده است. هدف اصلی و نوآوری تحقیق حاضر، بررسی تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف از جمله میدان مغناطیسی، تغییرات دما، طول نانولوله، قطر خارجی و پارامتر غیرمحملی روی سرعت بحرانی و فرکانس‌های نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال برای شرایط مرزی استاندارد مختلف است. اثرات میدان ترمومغناطیسی، تنش باقیمانده و اثر الاستیسیته سطح، در مدل سازی غیرمحملی تیر اوپلر-برنولی در نظر گرفته شده است. 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 شده است. فرکانس‌های اول تا سوم طبیعی و سرعت بحرانی نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال محاسبه شده است. شدت مغناطیسی، تغییرات دما، طول نانولوله، پارامترهای غیرمحملی و قطر خارجی نانولوله به عنوان فاکتورهای ورودی آنالیز حساسیت نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال انتخاب شده اند.

## ۲- استخراج معادلات حرکت نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال

شکل ۱ شماتیکی از نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال تحت میدان ترمومغناطیسی روی بستر ویسکو الاستیک را نشان می‌دهد.

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

در رابطه  $\eta$  (۷) ضریب نفوذپذیری میدان مغناطیسی و  $B_0$  شدت میدان مغناطیسی اعمالی است. با اعمال نیروهای بیان شده در روابط (۳) تا (۷) در معادله (۱)، معادله حرکت نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال روی بستر ویسکوالاستیک تحت میدان ترمومغناطیسی با در نظر گرفتن اثرات تنش پسماند و الاستیسیته سطح را می توان به فرم زیر بیان نمود.

$$EI * \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + (m_f + m_c) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + m_f v^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + 2m_f v \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \partial t} + C_m \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + K_m w(x,t) - (e_0 a)^2 \left\{ (m_f + m_c) \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial t^2 \partial x^2} + m_f v^2 \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \right. \\ \left. + 2m_f v \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^3 \partial t} + C_m \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial t \partial x^2} + K_m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right\} = 0 \quad (۸)$$

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

$$EI^* = \frac{\pi E (d_{out}^4 - d_{in}^4)}{64} + \frac{\pi E_s (d_{out}^3 + d_{in}^3)}{8} \quad (۹)$$

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

$$F_f(x,t) = -m_f \left( \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + v^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + 2v \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \partial t} \right) \quad (۳)$$

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 در نظر گرفتن تنش پسماند سطح را می توان به فرم زیر بیان نمود. [۸]

$$F_\tau(x,t) = 2\tau_s (d_{out} + d_{in}) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)  $\tau_s$  تنش سطحی پسماند،  $d_{in}$  و  $d_{out}$  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 کلونین-ویت به فرم زیر ارائه نمود [۱۸].

$$F_m(x,t) = C_m \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + K_m w(x,t) \quad (۵)$$

که  $C_m$  و  $K_m$  به ترتیب ضریب میرایی و سفتی بستر ویسکوالاستیک هستند. نیروی ناشی از میدان دمایی نیز به فرم زیر قابل بیان است [۱۸].

$$F_T(x,t) = -\frac{EA}{1-2\nu} \alpha_x \Delta T \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)  $\alpha_x$  ضریب انبساط دمایی در راستای محوری،  $\nu$  ضریب 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].

$$F_B(x,t) = \frac{1}{\eta} B_0^2 A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (۷)$$

$$[M]\{A''_i(\tau)\} + [C]\{A'_i(\tau)\} + [K]\{A_i(\tau)\} = 0 \quad (11)$$

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

$$M_{ij} = \int_0^1 \left( \varphi_i(\xi) - \mu \frac{d^2 \varphi_i(\xi)}{d\xi^2} \right) \varphi_j(\xi) d\xi \quad (12)$$

$$C_{ij} = \int_0^1 \left( 2\nu\sqrt{\beta} \frac{d\varphi_i(\xi)}{d\xi} + \alpha_c \varphi_i(\xi) \right) \varphi_j(\xi) d\xi \quad (13)$$

$$- \mu \left( 2\nu\sqrt{\beta} \frac{d^3 \varphi_i(\xi)}{d\xi^3} + \alpha_c \frac{d^2 \varphi_i(\xi)}{d\xi^2} \right) \varphi_j(\xi) d\xi$$

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

$$- \int_0^1 \mu \left( \nu^2 \frac{d^4 \varphi_i(\xi)}{d\xi^4} + \alpha_K \frac{d^2 \varphi_i(\xi)}{d\xi^2} + \alpha_F \frac{d^4 \varphi_i(\xi)}{d\xi^4} \right) \varphi_j(\xi) d\xi$$

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 به دست آمده به تعداد جملات در نظر گرفته با به کارگیری توابع شکل مثلثاتی ارائه شده در جدول ۱ وابسته است. با تولید ماتریس‌های جرم، سفتی و استهلاک، مقادیر ویژه شامل فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم به فرم کلی  $\omega = \text{Re}(\omega) + i \text{Im}(\omega)$  استخراج می‌شود. مقدار موهومی  $\omega$  متناظر با فرکانس طبیعی سیستم و مقدار حقیقی آن معیاری برای ناپایداری سیستم است. به عبارت دیگر با تغییر مقدار حقیقی از مقادیر منفی به مثبت به همراه بخش موهومی صفر، نانولوله کربنی حامل سیال پایداری خود را از دست داده و در آستانه ناپایداری قرار

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial^4 \Gamma}{\partial \xi^4} + \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial \tau^2} + \nu^2 \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial \xi^2} + 2\nu\sqrt{\beta} \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial \xi \partial \tau} +$$

$$\alpha_c \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + \alpha_K \Gamma + \alpha_F \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial \xi^2}$$

$$- \mu \left\{ \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial \tau^2 \partial \xi^2} + \nu^2 \frac{\partial^4 \Gamma}{\partial \xi^4} + 2\nu\sqrt{\beta} \frac{\partial^4 \Gamma}{\partial \tau \partial \xi^3} \right. \quad (10)$$

$$\left. + \alpha_c \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau \partial \xi^2} + \alpha_K \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial \xi^2} + \alpha_F \frac{\partial^4 \Gamma}{\partial \xi^4} \right\} = 0$$

برای حل معادله (۱۰) و کاهش آن از معادلات مشتقات جزئی به معادلات مشتق معمولی از روش گالرکین به همراه توابع شکل مثلثاتی استفاده شده است. 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 شده است. 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 شده است.

با اعمال توابع شکل ارائه شده 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 تک لایه حامل سیال

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

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

کریستالی ماده مربوط است که با در نظر گرفتن اثر الاستیسیته سطح و تنش پسماند سطحی می‌توانند ضرایب مختلف داشته باشند. لازم به ذکر است که خصوصیات سطح به شدت به جهت‌گیری بلوری لایه‌های سطحی بستگی دارند.

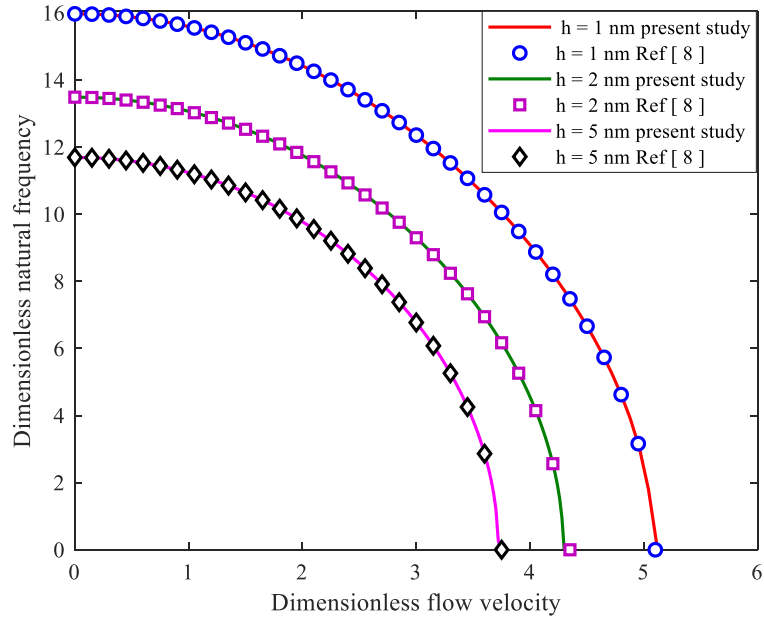
در ابتدا به منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصل از تحقیق حاضر با مرجع [۸] مطابق شکل ۲ مقایسه شده است. در این مرجع مدول یانگ ۷۰ گیگاپاسکال، چگالی نانولوله ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، قطر داخلی نانولوله ۲۰ نانومتر و تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح برای دو حالت  $\{111\}$  ۹۱۰۸/۰ نیوتن بر متر و ۱۸۸۲/۵ نیوتن بر 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  $\{111\}$  در نظر گرفته شده است. با مشاهده نمودارهای ارائه شده در شکل ۲ می‌توان دریافت که نتایج حاصل از به کارگیری روش گالرکین در این تحقیق با نتایج حاصل از روش مربعات دیفرانسیلی مورد استفاده در مرجع [۸] تطابق بسیار خوبی دارد. همچنین از مطالعه منحنی‌های ارائه شده می‌توان دریافت که افزایش ضخامت موجب کاهش سفتی و در نتیجه کاهش مقادیر فرکانس طبیعی و سرعت بحرانی سیال دارد. این روند بیان می‌کند با در نظر گرفتن مقدار کمینه ضخامت افزایش سطح پایداری سیستم حاصل خواهد شد.

شکل ۳ مقایسه نتایج تغییرات سرعت بحرانی سیال را بر حسب تغییرات

خواهد گرفت. سرعت سیال متناظر با آستانه ناپایداری را به عنوان سرعت بحرانی سیال در نظر می‌گیرند.

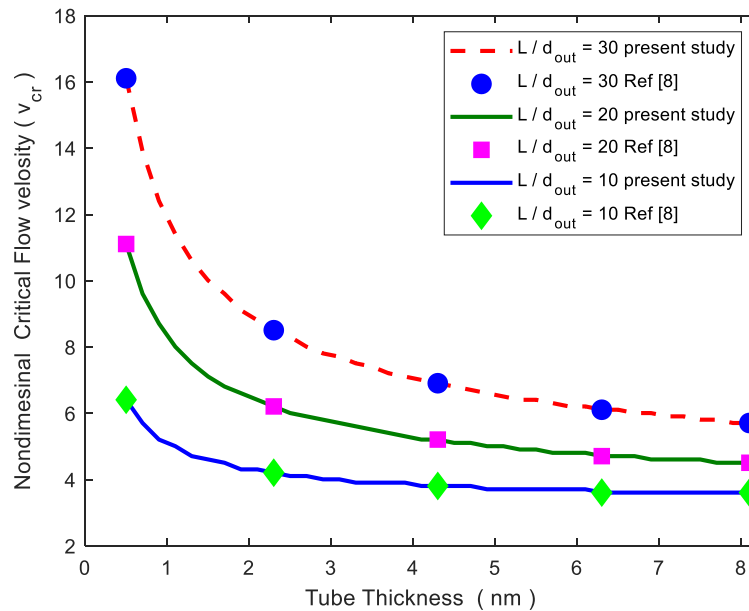
### ۳- تحلیل نتایج

نانولوله کربنی تک لایه حامل سیال دارای خواص هندسی قطر خارجی ۷ نانومتر، ضخامت ۰.۳۴ نانومتر و طول بیست برابر قطر خارجی است. همچنین دارای ویژگی‌های مکانیکی به صورت مدول الاستیسیته ۱ تراپاسکال، چگالی ۱۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب پواسون ۰.۳، چگالی سیال ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و پارامتر غیرمحل ۲ نانومتر است. ضریب نفوذ ۱.۱ میکرو معکوس کلون برای حالت دمابالا و ۶/۱ میکرو معکوس کلون برای حالت دمابابین در نظر گرفته شده است. ضریب الاستیک بستر ویسکوالاستیک برابر ۱۰ مگا نیوتن بر متر مربع، ضریب استهلاک بستر ویسکوالاستیک برابر ۳ فمتو نیوتن ثانیه بر متر مربع، ضریب نفوذپذیری میدان مغناطیسی ۶/۱۲۵ میکرون است. تنش پسماند سطحی و الاستیسیته سطح برای حالت  $\{111\}$  ۹۱۰۸/۰ نیوتن بر متر و ۱۸۸۲/۵ نیوتن بر متر و برای حالت  $\{100\}$  ۵۶۸۹/۰ نیوتن بر متر و ۹۲۵۳/۷ نیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. وقتی نسبت سطح به حجم افزایش می‌یابد، عاملی به نام اثرات سطحی روی سطح نانو ساختارها موجب تعادل ایستایی اتم‌ها را در سطح می‌شود. حالت‌های  $\{111\}$  و  $\{100\}$  به دو حالت مختلف جهت‌گیری



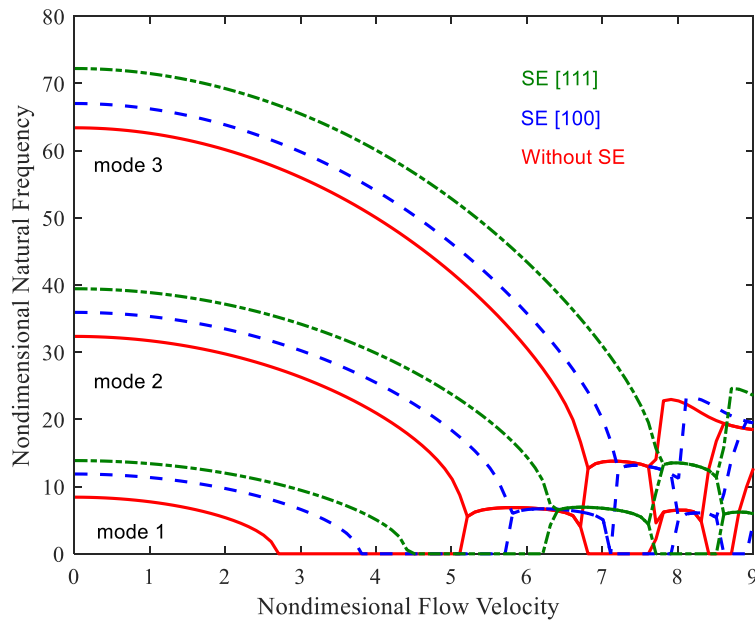
شکل ۲. مقایسه و اعتبارسنجی نتایج تغییرات فرکانس طبیعی بر حسب سرعت سیال در نانولوله کربنی تک لایه تحقیق حاضر با مرجع [۸] برای نسبت طول به قطر خارجی ۱۰

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



شکل ۳. منحنی دیسپرزین سرعت فاز لوله فولادی با قطر ۲۲۰ میلی متر و ضخامت ۴/۸ میلی متر

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 تک لایه 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

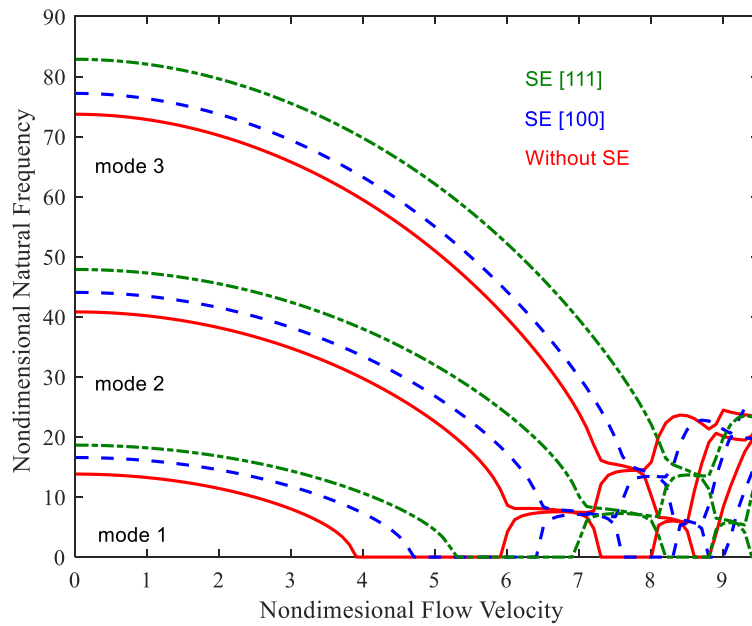
فرکانس‌های طبیعی و سرعت بحرانی سیال												
شرایط مرزی	اثر سطح {۱۱۱}			اثر سطح {۱۰۰}			بدون اثر سطح			سرعت بحرانی		
	فرکانس سوم	فرکانس دوم	فرکانس اول	سرعت بحرانی	فرکانس سوم	فرکانس دوم	فرکانس اول	سرعت بحرانی	فرکانس سوم		فرکانس دوم	فرکانس اول
ساده- ساده	۴/۴۱	۷۲/۲۲	۳۹/۴۵	۱۳/۸۷	۳/۸۱	۶۷/۰۲	۳۵/۹۳	۱۱/۸۷	۲/۷۱	۶۳/۴	۳۲/۳۶	۸/۴۱
گیردار-ساده	۵/۳۱	۸۲/۸۷	۴۷/۸۵	۱۸/۶۴	۴/۷۱	۷۷/۱۹	۴۴/۰۶	۱۶/۵۸	۳/۹۱	۷۳/۷۲	۴۰/۸۱	۱۳/۸۲
گیردار-گیردار	۶/۳۱	۹۴/۳۳	۵۷/۳۳	۲۴/۸۸	۵/۸۱	۸۸/۱۱	۵۳/۰۹	۲۲/۶۹	۵/۲۱	۸۴/۴۲	۵۰/۰۵	۲۰/۴۷

افزایش سفتی سیستم و به تبع آن افزایش سطح پایداری را با افزایش سرعت بحرانی سیال نشان می‌دهد. تطابق بسیار خوبی بین نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۸] مشاهده می‌شود.

اثر الاستیسیته سطح و تنش پسماند بر منحنی‌های فرکانس طبیعی بر حسب سرعت سیال برای شرایط مرزی ساده-ساده، ساده-گیردار و گیردار-

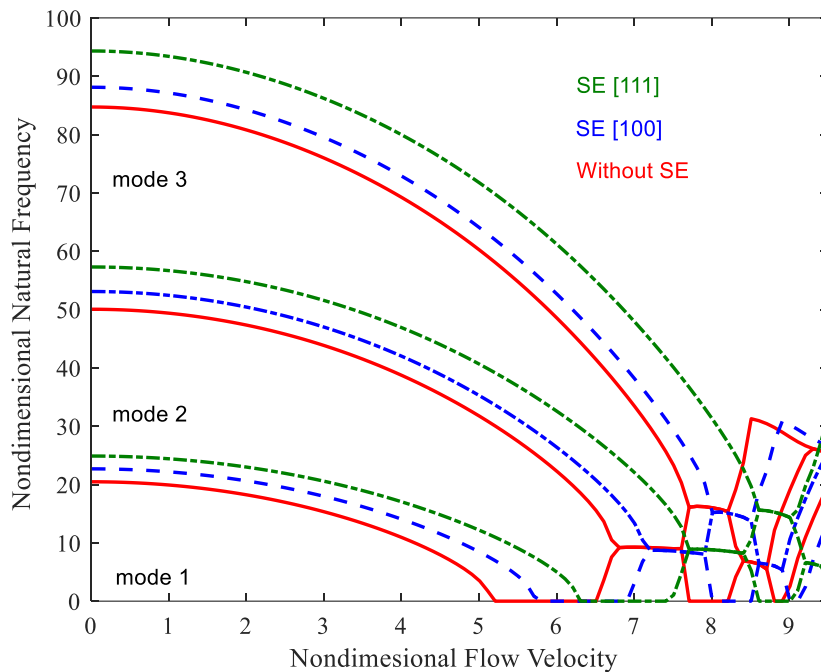
ضخامت نانولوله کربنی حامل سیال به ازای نسبت طول به قطر خارجی مختلف با در نظر گرفتن اثر سطح {۱۱۱} در تحقیق حاضر و مرجع [۸] نشان می‌دهد. بر اساس منحنی‌های ارائه شده می‌توان اثر قابل توجه الاستیسیته سطح را بر تغییرات سرعت بحرانی مشاهده نمود. برای ضخامت‌های پایین تر و نسبت طول به قطر بالاتر اثر الاستیسیته سطح بیشتر بوده که 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 تک لایه 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 محاسبه شده با روش آنالیز پاسخ سطح برای سرعت بحرانی سیال و فرکانس طبیعی نانولوله کربنی حامل سیال در محیط ترمومغناطیسی برای شرط مرزی گیردار

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

حالت دمابالا				حالت دماپایین				پارامترها
سرعت بحرانی	فرکانس اول	فرکانس دوم	فرکانس سوم	سرعت بحرانی	فرکانس اول	فرکانس دوم	فرکانس سوم	
۶/۱۵۲	۲۶/۶۴	۶۸/۲۴	۱۲۹/۹	۸/۲۲	۲۷/۱۴	۶۹/۰۹	۱۳۰/۹۲	ضریب ثابت
-۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۸۰	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۰۲۴	۰/۰۰۷۳	۰/۰۱۰۱	۰/۰۱۱۵	ضریب مغناطیسی
-۰/۰۰۰۷۶۱	-۰/۰۲۷۳۶	-۰/۰۴۰۴	-۰/۰۴۶۵	۰/۰۱۲۱۷	۰/۰۳۷۶۶	۰/۵۶۴	۰/۰۶۵۸	دما
۰/۰۱۹۱۹	۰/۰۵۹۵۸	۰/۰۸۷۸۹	۰/۱۰۲۵	۰/۰۲۶۵۹	۰/۰۹۰۳۸	۰/۱۳۶۴۲	۰/۱۶۰۵	طول
-۰/۱۱۳	-۱/۳۴۹	-۱/۹۶۲	-۲/۲۴۶	-۰/۷۷۰	۲/۱۱۱	-۳/۱۸۰	۳/۷۰۲	قطر خارجی
۰/۰۲۷	-۰/۰۰۷	-۰/۱	-۰/۴۴	۰/۰۸۶	۰/۰۰۴	-۰/۰۸	-۰/۴۲	ضریب غیرمحلی
۰/۰۰۰۱۵۹	۰/۰۰۰۶۶۳	۰/۰۰۰۹۸۷	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۱۷۲	۰/۰۰۰۵۹۶	۰/۰۰۰۹۲۷	۰/۰۰۱۱	ضریب مغناطیسی در
-۰/۰۰۰۰۲۳	-۰/۰۰۰۰۱۳	-۰/۰۰۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۰۰۵	-۰/۰۰۰۰۱۸	-۰/۰۰۰۰۲۰	-۰/۰۰۰۰۱۷	-۰/۰۰۰۰۱۱	ضریب مغناطیسی
۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۶۳	۰/۰۰۰۱۰۱	۰/۰۰۰۱۱۶	۰/۰۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۸۶	۰/۰۰۰۲۳۷	دما در دما
۰/۰۱۹۲	۰/۱۰۷۳	۰/۱۶۱۶	۰/۱۸۸۱	۰/۰۶۸۹	۰/۱۹۷۸	۰/۳۲۰۹	۰/۳۹۰۲	طول در طول
-۰/۰۲۷۲	۰/۰۰۱	-۰/۰۳۲	-۰/۱۷۸	۰/۰۲۰	۰/۰۰۴	-۰/۰۳۳	-۰/۱۷۱	قطر خارجی در قطر خارجی
-۰/۰۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۵۱	۰/۰۰۰۰۴۱	-۰/۰۰۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۵۱	-۰/۰۰۰۰۴۷	-۰/۰۰۰۰۳۴	ضریب غیرمحلی در
۰/۰۰۰۱۴۰	۰/۰۰۰۳۴۳	۰/۰۰۰۶۶۴	۰/۰۰۰۷۷۹	۰/۰۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۳۴۹	۰/۰۰۰۵۸۵	۰/۰۰۰۷۲۲	ضریب مغناطیسی در
-۰/۰۰۰۲۳۳۲	-۰/۰۰۰۹۳۶	-۰/۰۱۴۴۵	-۰/۰۱۷۰۴	-۰/۰۰۲۷۲۱	-۰/۰۰۷۴۹	-۰/۰۱۲۶۲	-۰/۰۱۵۷۰	طول
۰/۰۰	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۲۱	-۰/۰۰۱۱۷	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۱۹	ضریب مغناطیسی در
-۰/۰۰۰۰۴۷	-۰/۰۰۰۲۵۰	-۰/۰۰۰۳۸۳	-۰/۰۰۰۴۴۹	۰/۰۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۲۹۳	۰/۰۰۰۴۹۰	۰/۰۰۰۶۰۵	ضریب غیرمحلی
۰/۰۰۱۳۹۹	۰/۰۰۵۳۹	۰/۰۰۸۳۲	۰/۰۰۹۸۱	۰/۰۰۲۰۹۹	-۰/۰۰۶۲۶۶	-۰/۰۱۰۵۷	-۰/۰۱۳۱۵	دما در طول
۰/۰۰	-۰/۰۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۰۷	-۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۷۰	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۱۶	دما در قطر خارجی
-۰/۰۰۲۱۷۷	-۰/۰۰۶۲۸۱	-۰/۰۰۹۶۷۶	-۰/۰۱۱۳۸۷	-۰/۰۰۳۲۶۵	-۰/۰۱۱۱۰۴	-۰/۰۱۸۶۰۱	-۰/۰۲۳۰۰	دما در ضریب غیرمحلی
۰/۰۰	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۲۵۰	۰/۰۰۰۰۴۶۶	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۵۶	۰/۰۰۰۲۴۸	طول در قطر خارجی
۰/۰۰	-۰/۰۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۳	-۰/۰۰۲۳۳	-۰/۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۰۶	طول در ضریب غیرمحلی
								قطر خارجی در ضریب غیرمحلی

مغناطیسی و قطر خارجی نانولوله کربنی غیرخطی بوده و اثر تغییرات دما تقریباً خطی است. افزایش میدان مغناطیسی به‌طور مستقیم موجب افزایش سفتی و افزایش دما در حالات دمابالا موجب کاهش سفتی سیستم می‌شود که این دو روند موجب افزایش و کاهش سطح پایداری نانولوله کربنی حامل سیال می‌شوند. 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 کاهش قطر نانولوله کربنی حامل سیال اثر الاستیسیته سطح بر افزایش سفتی سیستم بیشتر شده که این امر موجب افزایش سرعت بحرانی سیال با افزایش طول نانولوله و کاهش قطر آن می‌شود. این روند در منحنی‌های 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 غیرمحملی به‌تدریج به فرم غیرخطی در جهت کاهش فرکانس ظاهر می‌شود. 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 ارائه‌شده در شکل ۸ برای حالت دمابالابین و مقایسه آن با حالت دمابالا می‌توان دریافت که تغییرات دما برای حالت دمابالابین برخلاف دمابالا اثری خطی مثبت بر تغییرات سرعت سیال و فرکانس‌های بحرانی دارد. همچنین میزان اثرگذاری تغییرات دما در حالت دمابالا نسبت به شدت میدان مغناطیسی بیشتر درحالی‌که برای حالت دمابالابین این رده‌بندی برعکس است.

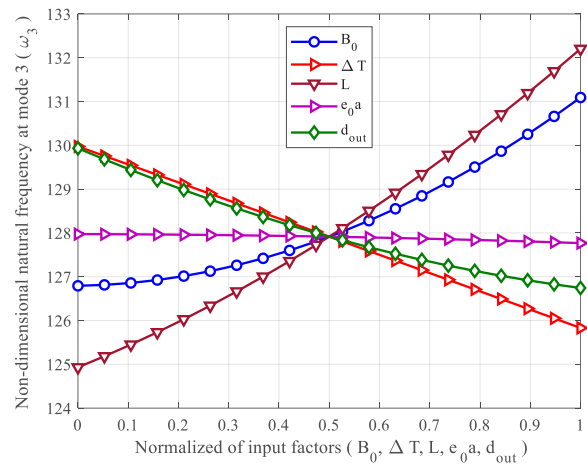
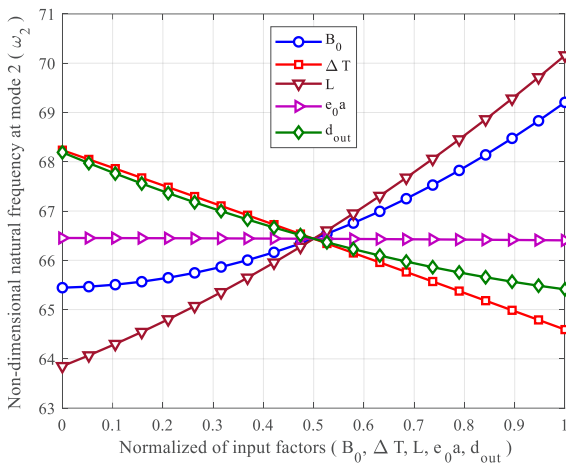
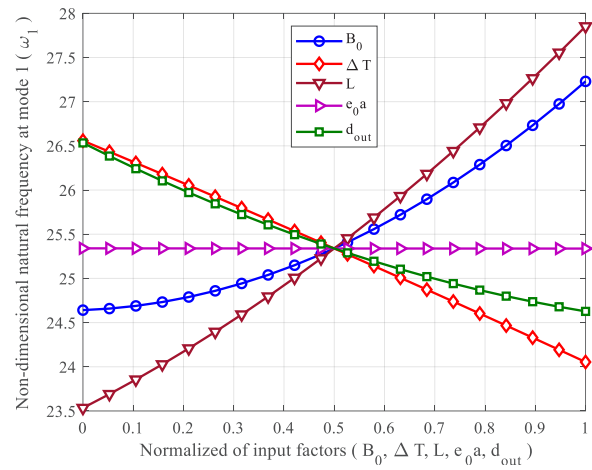
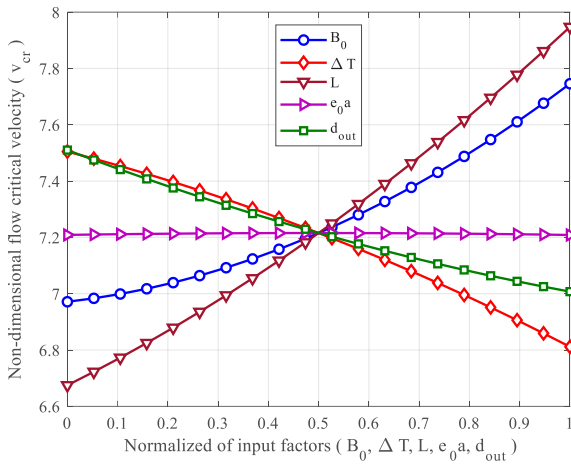
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله بر اساس مدل تیر غیرمحملی اوپلر 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. شدت میدان مغناطیسی، تغییرات دما، طول نانولوله، قطر خارجی نانولوله و پارامتر غیرمحملی به‌عنوان فاکتورهای ورودی

گیردار به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نمایش داده شده‌است. مقادیر میدان مغناطیسی ۲۰ تسلا و تغییر دما ۳۰ درجه کلون در نظر گرفته شده‌است. اثر قابل‌توجه در نظر گرفتن الاستیسیته سطح بر افزایش سطح پایداری و افزایش فرکانس‌های طبیعی نانولوله کربنی تک‌لایه 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.

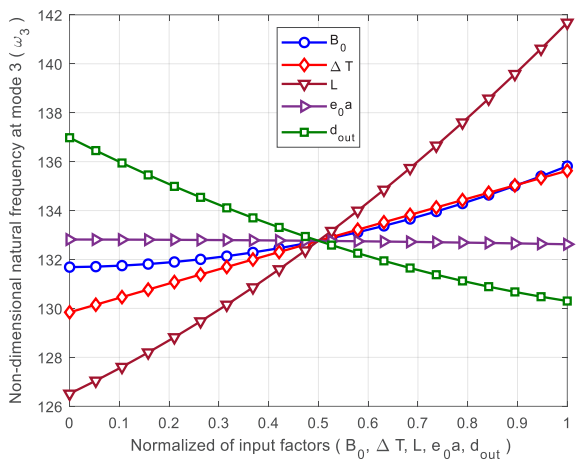
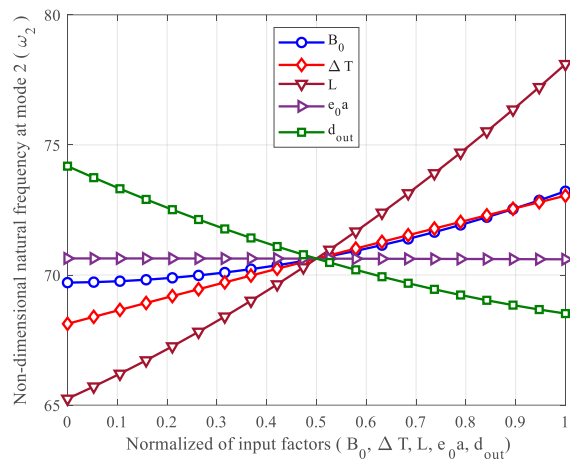
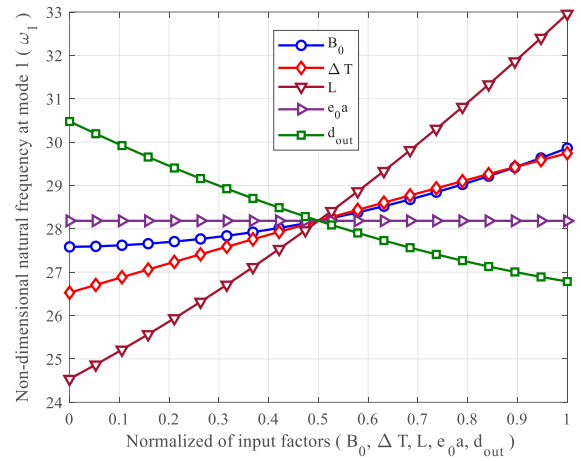
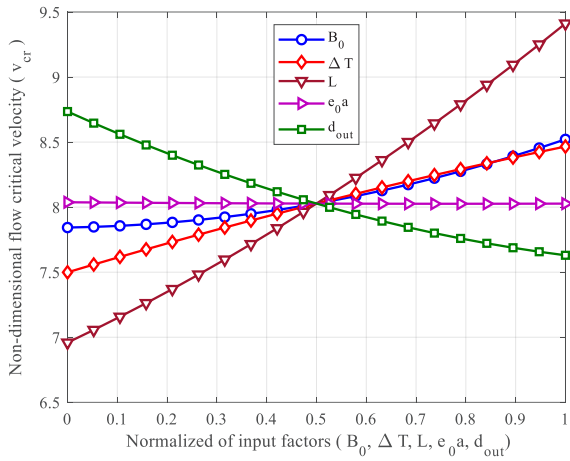
برای تحلیل آنالیز حساسیت، میدان مغناطیسی در بازه صفر تا ۶۰ تسلا، تغییرات دما در بازه صفر تا ۱۰۰ درجه کلون، طول نانولوله کربنی در بازه ۱۰۰ تا ۲۵۰ نانومتر پارامتر غیرمحملی در بازه صفر تا ۱ نانومتر و قطر خارجی نانولوله کربنی در بازه ۷ تا ۱۰ نانومتر به‌عنوان فاکتورهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. بعد از انتخاب 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 مرزی گیردار-گیردار با اثر سطح {۱۱۱} محاسبه شده‌اند. سپس با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب به تحلیل حساسیت پرداخته شده‌است. برای مقایسه اثر هر یک 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 ترسیم شده‌است. ضرایب توابع رگرسیون متناظر با سرعت بحرانی سیال و 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 تک‌لایه حامل سیال برای دو وضعیت دمابالا و دمابالابین با در نظر گرفتن 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 درحالی‌که پارامتر غیرمحملی بر تغییرات سرعت بحرانی سیال بی‌اثر است. همچنین اثرات طول، شدت میدان



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 دمایی پایین

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

مدول الاستیسیته 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 شکل	$i$
ممان اینرسی ( $m^4$ )	$I$
ماتریس سفتی	$k$
ضریب الاستیک بستر ویسکوالاستیک (N/m)	$k_m$
طول نانولوله کربنی (nm)	$L$
جرم واحد طول نانولوله کربنی (Kg/m)	$m_c$
جرم واحد طول سیال (Kg/m)	$m_f$
گشتاور (Nm)	$M(x, t)$
ماتریس جرم	$M$
شمارنده توابع شکل	$N$
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 یونانی

ضریب نفوذ دمایی ( $1/K$ )	$\alpha_x$
پارامتر بی بعد ضریب میرایی	$\alpha_c$
پارامتر بی بعد نیرو	$\alpha_F$
پارامتر بی بعد ضریب الاستیک	$\alpha_k$
پارامتر بی بعد جابجایی عرضی	$\Gamma(\tau, \xi)$
تغییرات دما	$\Delta T$
ضریب نفوذپذیری میدان مغناطیسی	$\eta$
دامنه بی بعد جابجایی عرضی	$\Lambda_i(\tau)$
پارامتر بی بعد غیرمحملی	$\mu$
ضریب پواسون	$\nu$
پارامتر بی بعد مختصات محوری	$\xi$
پارامتر بی بعد زمان	$\tau$
تنش پسماند سطحی (N/m)	$\tau_s$
اپراتور مشتق جزئی	$\partial$

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:

- در نظر گرفتن اثر الاستیسیته سطح برای دو حالات  $\{111\}$  و  $\{100\}$  موجب افزایش سفتی سیستم و به تبع 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 در حالی که اثر تغییرات دما خطی است.

- پارامتر غیرمحملی بر سرعت بحرانی سیال و فرکانس‌های اول و دوم تقریباً بدون حساسیت قابل توجهی است ولی با افزایش شکل مود اثر منفی پارامتر غیرمحملی 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 غیرمحملی به ترتیب در رده‌های بعدی بالاترین

#### علائم انگلیسی

$A$	مساحت، ( $m^2$ )
$B_0$	شدت میدان مغناطیسی (T)
$C$	ماتریس استهلاک
$C_m$	ضریب استهلاک بستر ویسکوالاستیک (N.s/m)
$d_{in}$	قطر داخلی نانولوله (nm)
$d_{out}$	قطر خارجی نانولوله (nm)
$E$	مدول الاستیسیته، ( $N/m^2$ )

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 fluid-conveying 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: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 83 (2016) 164-173.

حساسیت قرار دارند. جایگاه تغییرات دما و شدت میدان مغناطیسی در حالت دمابابین از لحاظ میزان حساسیت نسبت به حالت دمابالا عوض می‌شود.

### 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.

### ۵- فهرست علائم

### منابع

- [1] 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 single-walled 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. Mahjoub<sup>1</sup>, 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](https://doi.org/10.22060/mej.2019.15465.6128)

